



MARIANA ALBERGARIA QUININHA

LICENCIADA

Simulação de estruturas meandriformes por objectos e estatísticas multiponto e avaliação da porosidade – aplicação a reservatórios siliciclásticos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica
(Georrecursos)

Orientador: Doutor José António de Almeida, Prof. Associado – FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Paulo Alexandre Rodrigues Roque Legoinha, Prof.
Auxiliar – FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Carlos Ribeiro Kullberg

Arguente: Prof. Doutor Amílcar de Oliveira Soares

Vogais: Prof. Doutor José António de Almeida



Fevereiro 2015

SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS MEANDRIFORMES POR OBJECTOS E ESTATÍSTICAS MULTIPONTO E AVALIAÇÃO DA POROSIDADE – APLICAÇÃO A RESERVATÓRIOS SILICICLÁSTICOS

Copyright em nome de Mariana Albergaria Quininha, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Houvesse palavras suficientes para agradecer todas as pessoas que cruzaram o meu caminho até ao concluir desta etapa, já há tanto desejada.

Ao Prof. Doutor José António de Almeida por, desde o início do meu percurso académico, me ter dado a conhecer a fascinante área da geoestatística e modelação, cativando-me com a sua sabedoria e profissionalismo de um excelente professor. Pela sua orientação, pela infindável paciência que teve para as minhas dúvidas e por ter apostado nas minhas capacidades ao longo do tempo, sobretudo nestes últimos meses. O meu sincero obrigado e profunda admiração.

Ao Prof. Doutor Paulo Legoinha pela revisão e co-orientação prestada no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os docentes que enriqueceram a minha formação, principalmente, aqueles que pertencem ao Departamento de Ciências da Terra, cuja relação de proximidade e confiança que transmitem fizeram com que o percurso académico acabasse por ser mais cativante. Uma palavra de agradecimento ao Prof. Doutor José Carlos Kullberg pela sua dedicação e apoio inigualáveis ao longo destes anos.

Aos meus Pais, por tudo. Por tudo o que são e significam, por tudo o que me transmitiram, pelo exemplo que são. À minha mãe pelo esforço e dedicação durante esta caminhada, pela paciência e por ser a companheira que é. Por todo o amor, sempre. Ao meu pai, a estrela que brilha mais no meu céu, pelos seus valores e educação que nunca esqueço. Por ser o orgulho e herói que a memória nunca esquece.

À minha família. Aos meus irmãos e tios, pelas palavras e conselhos ao longo deste caminho. Às minhas sobrinhas, por todos os dias me mostrarem que tudo vale a pena.

Aos meus amigos, aqueles que me acompanharam e se preocuparam, incentivando-me sempre. Os que sabem que nada seria igual se não estivessem por perto e que reconhecem a importância que é tê-los na minha vida.

Aos colegas que fizeram com que os anos de faculdade fossem muito mais que uma formação, especialmente àqueles que acabaram por se tornar pessoas fundamentais para mim pela sua amizade e carinho.

Aos meus Pais.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia destinada a simular a morfologia e a porosidade de canais de areia em reservatórios fluviais. Como informação de partida utilizam-se um ou vários canais de areia de treino, em estrutura vectorial, que sejam representativos do reservatório, e leis de distribuição das dimensões largura e profundidade dos canais.

Para a simulação da morfologia dos canais de areia, são calculados os ângulos azimutais de todos os segmentos de recta das linhas poligonais que constituem os canais de treino, a que se segue a codificação em classes de azimute e a determinação de estatísticas multiponto destas classes. Seguidamente, faz-se a simulação estocástica dos novos canais no volume do reservatório, ou seja, são geradas novas linhas poligonais condicionadas às estatísticas multiponto, a que se associam as dimensões largura e profundidade. Este algoritmo multiponto é muito eficiente, porque é a 1D, e contorna a problemática da variável azimute ser do tipo circular.

A avaliação da porosidade é feita em simultâneo na conversão do modelo vectorial da morfologia dos canais de areia para o modelo matricial da malha de blocos do reservatório. Para cada bloco reservatório é contabilizada a proporção de não canal / canal e das fácies conforme um modelo conceptual de zonamento na secção do canal. A estimativa da porosidade média de cada bloco do reservatório é obtida pela soma do produto da proporção de cada fácies pela respectiva porosidade de referência.

Para ilustrar as potencialidades da metodologia proposta apresenta-se um caso de estudo com dados sintéticos. De acordo com critérios geológicos e estratigráficos, consideraram-se quatro fácies na secção do canal que são discriminadas lateralmente e em profundidade por valores de referência de porosidade. O algoritmo de simulação morfológica capturou adequadamente a morfologia das imagens de treino e gerou várias imagens equiprováveis que depois foram convertidas em porosidade.

Palavras-chave: estatísticas multi-ponto de classes de azimute; simulação multiponto; modelo morfológico vectorial; modelo conceptual de fácies de canais de areia; avaliação da porosidade.

ABSTRACT

This work presents a methodology for simulating the morphology and assessing the porosity of sand channels in siliciclastic reservoirs. Initial information consists of one to several training channels in polygon-vertex representation and distribution laws of the width and depth dimensions of the channels.

The simulation of channel morphology begins with the calculation of azimuths of all line segments of the training channels, followed by codification into classes of azimuth and the calculation of multipoint statistics of the classes. Utilising these multipoint statistics, a stochastic simulation of the skeleton of the new sand channels is performed within the reservoir volume. Width and depth dimensions of the training channels are assigned to the new channels. This multipoint algorithm is efficient because it runs in one dimension and allows azimuths to be simulated, obviating the problem of the azimuth variable being circular.

The evaluation of porosity is made simultaneously with the conversion of the previously simulated polygon-vertex model of the channels into the reservoir grid of blocks. For each reservoir block, the proportion of non-channel / channel is evaluated together with the proportions of channel facies according to a conceptual model. The average porosity of each reservoir block is calculated by summing the proportions of each facies multiplied by their porosity reference value.

To illustrate the potential of the proposed methodology, a case study is presented with synthetic data. In the channel section, and in accordance with geological and stratigraphic data, four regions (facies) with different average porosity values are considered both laterally and with respect to depth. The results demonstrate that the proposed simulation algorithm realistically captures the morphology of the training images, and generates images of channels with the same probability of occurrence, which are subsequently converted into a reservoir grid of porosity.

Key-words: multi-point statistics of classes of azimuth; multipoint simulation; vector morphological model; conceptual model of sand channels facies; evaluation of porosity.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Objectivos	1
1.2 Organização do Trabalho	2
2. RESERVATÓRIOS FLUVIAIS	5
2.1 Caracterização de Canais Fluviais.....	5
2.2 Tipos de Depósitos	7
2.3 Litologia	8
2.3.1 Geomorfologia Fluvial	11
2.3.2 Arquitectura Sedimentar	16
2.4 Caracterização de Material Clástico.....	20
2.4.1 Tamanho dos Grãos.....	20
2.4.2 Forma dos Grãos	21
2.4.3 Calibragem dos Grãos	23
2.4.4 Orientação dos Grãos	23
2.4.5 Arenitos	24
2.4.6 Porosidade	24
2.5 Caracterização de Reservatórios Fluviais.....	25
2.5.1 Geometria do Sistema Depositional	26
2.5.2 Geometria do Corpo do Reservatório.....	27
2.5.3 Ambiente Tectónico	28
2.5.4 Classificação de Tipos de Reservatórios Fluviais	28
2.6 Amostragem de Reservatórios Fluviais.....	30
3. MÉTODOS.....	33
3.1 Estado da Arte	33
3.2 Metodologia	36

3.3	Fundamentos de Geoestatística	38
3.3.1	Análise Espacial	39
3.3.2	Simulação Sequencial	40
3.3.2.1	Simulação e Co-simulação Sequencial Directa.....	42
3.4	Simulação da Morfologia dos Canais de Areia.....	43
3.4.1	Informação de Partida	43
3.4.2	Geração dos Esqueletos dos Canais de Areia por Simulação Multiponto de Classes de Azimute e Aplicação das Dimensões Largura e Profundidade.....	44
3.5	Avaliação da Porosidade na Malha de Blocos do Reservatório	50
3.6	Quantificação de Reservas Potenciais.....	55
4.	CASO DE ESTUDO.....	57
4.1	Preparação dos Dados e Estatísticas de Partida.....	57
4.2	Simulação dos Canais de Areia.....	59
4.2.1	Canal de Treino I.....	60
4.2.2	Canal de Treino II	67
4.2.3	Simulação Simultânea dos Canais I e II.....	73
4.3	Discussão.....	77
4.3.1	Preparação dos Dados de Partida	77
4.3.2	Simulação da Morfologia dos Canais de Areia	78
4.3.3	Avaliação da Porosidade na Malha de Blocos	79
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Hierarquia de elementos arquitecturais fluviais (adaptado de Miall, 2014).	8
Figura 2.2 – Calibragem e distribuição do tamanho dos grãos nos sedimentos de vários tipos de ambientes (adaptado de Folk, 1980).....	10
Figura 2.3 – Transporte de sedimentos e fluxo num canal meandrizado.	10
Figura 2.4 – Terminologia para secções transversais na geometria de canais (adaptado de Gibling, 2006).	12
Figura 2.5 – Esboços exemplificativos dos diferentes tipos de canais fluviais para os vários graus de sinuosidade, entrançamento e anastomose e sua caracterização (adaptado de Kuznetsova, 2012).....	13
Figura 2.6 – Classificação de padrões de canais fluviais (adaptado de Miall, 2014).	14
Figura 2.7 – Classificação de enchimentos de vale e canais fluviais baseado em dimensões, contexto geomorfológico e arquitectura (adaptado de Gibling, 2006).....	16
Figura 2.8 – Elementos arquitecturais básicos (adaptado de Miall, 2014).....	18
Figura 2.9 – Presença de elementos como componentes dos principais estilos fluviais (adaptado de Miall, 2014).	18
Figura 2.10 – Potencial de reservatório nos principais estilos fluviais (adaptado de Archer e Wall, 1986).....	20
Figura 2.11 – Classificação de sedimentos clásticos (adaptado de Hantschel e Kauerauf, 2009).	21
Figura 2.12 – Relação entre a velocidade de fluxo com o tamanho dos grãos (adaptado de Allan e Castillo, 2007).	21
Figura 2.13 – Classificação da esfericidade e arredondamento de grãos (adaptado de Powers, 1953).	22
Figura 2.14 – Diagrama triangular para descrição da forma de partículas sedimentares (adaptado de Kuznetsova, 2012).....	22
Figura 2.15 – Exemplo de classificação da calibragem de grãos.	23
Figura 2.16 – Exemplo da orientação dos grãos: arranjo cúbico e romboédrico (adaptado de Selley, 2000).	23

Figura 2.17 – Classificação de arenitos com base na sua composição (adaptado de Folk, 1980).	24
Figura 2.18 – Abundância de formações sedimentares e respectiva produção em reservatórios (adaptado de Haliburton, 2001).....	25
Figura 2.19 – Classificação de reservatórios não-marinhos de acordo com a geometria do sistema deposicional e do corpo do reservatório (adaptado de Miall, 1996).	27
Figura 2.20 – Propriedades obtidas em sondagens (adaptado de Archer e Wall, 1986).	31
Figura 3.1 – Exemplo de um canal de treino (linha poligonal) a) não regularizada para intervalos constantes e b) após regularização para intervalos de 50 metros.	44
Figura 3.2 – a) Ângulos azimutais do canal de treino; b) Classes de azimute de 1 a 18 dos ângulos azimutais; c) Resíduos calculados entre o ângulo azimutal real e o ângulo médio da classe de azimute.	45
Figura 3.3 – Posicionamento assimétrico da dimensão largura do canal em função do ângulo de desvio entre dois segmentos de recta consecutivos.	49
Figura 3.4 - Representação de uma fracção de canal simulada com visualização do esqueleto e secções de controlo posicionadas com igual espaçamento a cada 25 metros.....	50
Figura 3.5 Modelo conceptual das regiões de porosidade na secção do canal e regras de construção a partir da topologia dos canais de areia (vértices de maior dimensão a cheio).	51
Figura 3.6 – Vista em planta de pormenor da representação vectorial de um incremento unitário de um canal de areia delimitado por duas secções (traços a cor vermelha). As linhas a cor azul representam os limites dos quadriláteros de controlo das regiões conforme indicados previamente na figura 3.5.....	52
Figura 3.7 – Ilustração das quatro regiões amostradas para a estimação da porosidade dos blocos reservatório (I) maior porosidade a vermelho na base dos canais; (II) porosidade média-alta de cor amarela na parte intermédia dos canais; (III) porosidade média-baixa na parte superior dos canais; (IV) porosidade baixa nas margens esquerda e direita dos canais.....	53
Figura 3.8 – Malha de blocos com os valores de porosidade calculados com as fracções de cada região dos canais de areia por bloco. É visível que os blocos com porosidade mais elevada a vermelho estão na base dos canais conforme o modelo conceptual.....	54

Figura 3.9 – Avaliação da porosidade numa região de aproximação das margens do canal de areia, a solução de porosidade será sempre a mais optimista das regiões intersectadas.	54
Figura 4.1 – Variograma dos resíduos dos ângulos azimutais para o canal de treino I e modelo teórico ajustado.	58
Figura 4.2 – Representação dos valores simulados de profundidade a associar aos canais a simular.....	58
Figura 4.3 – Representação dos valores simulados de largura a associar aos canais a simular evidenciando correlação linear de 0,7 com os valores de profundidade.	59
Figura 4.4 – Representação dos resíduos simulados.	59
Figura 4.5 – Representação do canal de treino I no plano horizontal.	60
Figura 4.6 – Ângulos azimutais do canal de treino I.....	61
Figura 4.7 – Classes azimutais do canal de treino I.	61
Figura 4.8 – Resíduos dos ângulos azimutais do canal de treino I.....	61
Figura 4.9 – Representação de cinco canais simulados a partir do canal de treino I.	62
Figura 4.10 – Representação 3D de uma realização com 25 canais e respectivas secções separadas de 25 metros a partir do canal de treino I.....	62
Figura 4.11 – Pormenor dos valores de porosidade equivalente na malha de blocos do reservatório para valores superiores a 0% (à esquerda) e superiores a 15% (à direita).....	63
Figura 4.12 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino I em planos horizontais (Z=30m).....	64
Figura 4.13 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino I num plano vertical intermédio.	65
Figura 4.14 – Histograma das porosidades nos blocos reservatório para a simulação de 25 canais a partir do canal de treino I.....	65
Figura 4.15 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir do canal de treino I.	67
Figura 4.16 – Representação do canal de treino II no plano horizontal.	68
Figura 4.17 – Ângulos azimutais do canal de treino II.	68

Figura 4.18 – Classes azimutais do canal de treino II.	69
Figura 4.19 – Resíduos dos ângulos azimutais do canal de treino II.	69
Figura 4.20 – Representação de cinco canais simulados a partir do canal de treino II	70
Figura 4.21 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino II em planos horizontais ($Z=30m$).....	71
Figura 4.22 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino II num plano vertical intermédio.....	72
Figura 4.23 – Histograma das porosidades nos blocos reservatório referentes a uma simulação de 25 canais a partir do canal de treino II.....	72
Figura 4.24 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir do canal de treino II.	73
Figura 4.25 – Representação de uma realização com 25 canais simulados e respectivas secções condicionadas a estatísticas multiponto dos dois tipos de canais. A azul representam-se os canais condicionados ao canal de treino I e a cor vermelha os condicionados ao canal de treino II.....	74
Figura 4.26 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir dos canais de treino I e II em planos horizontais ($Z=30m$).....	75
Figura 4.27 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir dos canais de treino I e II num plano vertical intermédio.....	76
Figura 4.28 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir dos canais de treino I e II.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de corpos de canais fluviais e de enchimento de vales de acordo com a dimensão e forma (adaptado de Gibling, 2006).	7
Tabela 2.2 – Classificação de fácies (adaptado de Miall, 1996).	9
Tabela 2.3 – Estilos fluviais mais comuns baseados em exemplos interpretados (adaptado de Miall, 1996).	15
Tabela 2.4 – Subdivisões hierárquicas de unidades em depósitos clásticos (adaptado de Miall, 1996).	17
Tabela 2.5 – Elementos arquiteturais em depósitos fluviais (adaptado de Miall, 1996).	19
Tabela 2.6 – Descrição qualitativa da porosidade (adaptado de Ahr, 2008).	25
Tabela 2.7 – Critérios para classificação de reservatórios em arenitos fluviais (adaptado de Miall, 1996).	26
Tabela 2.8 – Principais tipos de reservatórios fluviais com arenitos (adaptado de Miall, 1996).	28
Tabela 3.1 – Exemplo ilustrativo de um histograma multiponto de classes de azimute de cinco células consecutivas.	47
Tabela 4.1 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir do canal de treino I.	67
Tabela 4.2 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir do canal de treino II.	70
Tabela 4.3 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir dos canais de treino I e II.	74

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Todos os fenómenos ocorrentes na Terra podem ser estudados e interpretados através de modelos computacionais baseados em observações e dados de natureza diversa, directa ou indirecta. Estes modelos têm por objectivo prever a distribuição espacial e/ou temporal de uma ou mais variáveis num determinado sistema, explicar a situação actual e prever variações futuras através da sua própria variabilidade ou alteração das condições iniciais (Goovaerts, 1997; Soares, 2000).

Para a realização de um modelo existem algumas etapas principais: recolha e selecção de informação, isto é, um sub-conjunto da realidade que serve como dados de entrada, que podem conter uma componente de tempo, inferindo condições iniciais, ou componente de espaço, tratando-se de condições de fronteira; elaboração de um fluxograma, de forma a organizar o estudo e prever possíveis situações que possam necessitar de soluções ou planos alternativos; execução computacional do modelo; validação e calibração do modelo; análise de sensibilidade e análise de resultados. Pode ser incluída a etapa de actualização se houver informação nova relevante a ser integrada no estudo.

A importância da exploração de recursos, numa sociedade que é dependente destes processos, tem vindo a dar cada vez mais relevância a este tipo de estudos e a indústria do petróleo não é excepção. Os investimentos têm de ser muito ponderados e, por isso, o estudo na fase preliminar, e a quantificação da sua incerteza, é essencial para o risco que se corre aquando da opção de exploração.

Os primeiros estudos de uma classe de algoritmos de modelação designados por geoestatísticos foram defendidos por George Matheron, no final da década de 50, que os afirmou como resultado da reflexão sobre o carácter ambíguo da operação que consistia em interpretar um fenómeno natural único e parcialmente desconhecido em termos de probabilidade. A estatística clássica foi sempre posta em segundo plano, uma vez que as realizações não eram de variáveis aleatórias mas sim de variáveis correlacionadas, não satisfazendo eficazmente os requisitos de um processo aleatório sem variabilidade, isto é, de um sistema estacionário. Existe também a necessidade de estudar as características intrínsecas de um fenómeno, que deve integrar nos dados de um sistema, de modo a possibilitar o estudo da distribuição espacial correspondendo a uma segunda lei de distribuição.

A caracterização de reservatórios começa a ganhar maior relevância nas décadas de 70 e 80, onde trabalhos pioneiros iniciam uma parte da geoestatística até aí pouco abordada (Crichlow, 1977; Haldorsen e Lake, 1982; Da Costa e Silva, 1984).

Neste seguimento, a partir da década de 90 gerou-se uma dinâmica de modelação de bacias dentro da indústria petrolífera, que começou com a análise de bacias com parâmetros estáticos a 1D e, mais tarde, com factores dinâmicos já a 3D (Hantschel e Kauerauf, 2009).

Desde então, os estudos dentro desta área têm vindo a aumentar de forma significativa, e a sua evolução tem proposto diferentes metodologias que são cada vez mais eficazes para a exploração de hidrocarbonetos (Jahn *et al*, 2008; Alves *et al*, 2014).

Este trabalho é mais uma aposta para o crescimento evolutivo da caracterização de reservatórios, neste caso, os designados por siliciclásticos. Compreende duas etapas principais: i) geração de imagens simuladas da morfologia dos canais de areia; ii) avaliação condicional das propriedades petrofísicas. Existem muitos algoritmos e variantes para a simulação realista da morfologia dos canais, mas o item decisivo é a parametrização estatística que descreve a forma. Neste contexto, propõe-se que a forma seja sintetizada por estatísticas multiponto de classes de ângulos azimutais medidas sobre canais de treino.

No contexto deste trabalho foi desenvolvido um programa informático escrito em linguagem C que permite a simulação dos canais de areia e a respectiva avaliação da porosidade para a malha de blocos do reservatório (CHOMS v1.0). Para o cálculo de variogramas e representações gráficas 2D da malha de blocos do reservatório foi utilizado o *software* geoMS; para as representações 3D vectoriais e matriciais o *software* Move® da empresa Midland Valley ao abrigo de um protocolo de utilização educacional com a FCT-UNL; para a execução da simulação e co-simulação o código de *software* proposto por Nunes e Almeida (2010).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese encontra-se organizada em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento geral do estudo, com os respectivos objectivos a atingir. No segundo capítulo faz-se um enquadramento geológico e estratigráfico dos reservatórios siliciclásticos.

No capítulo três, ‘Métodos’, descrevem-se o estado da arte, a metodologia e os algoritmos desenvolvidos e utilizados, quer para a simulação estocástica da geometria dos canais de areia quer para a estimação da porosidade equivalente na malha do reservatório.

No capítulo quatro faz-se a apresentação de um caso de estudo com dados sintéticos, concretamente a descrição dos dados de partida, a simulação da geometria do esqueleto dos canais de areia, a atribuição das dimensões largura e profundidade e a quantificação da porosidade equivalente na malha de blocos.

No capítulo cinco apresentam-se as considerações finais e no capítulo seis as referências bibliográficas.

2. RESERVATÓRIOS FLUVIAIS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS FLUVIAIS

As morfologias de natureza aluvial e os seus depósitos são produtos de interacções dos processos de erosão e deposição variando entre si consoante as condições do meio a que estão sujeitas (Reading, 1996 *in* Kuznetsova, 2012). O termo ‘aluvial’ é genericamente aplicado a processos superficiais que envolvem fluxos de água. Uma planície aluvial compreende uma área continental de baixo-relevo onde existem processos de acumulação de sedimentos, como planícies de inundação, que se definem como áreas ocupadas por canais fluviais, incluindo as aplanadas adjacentes que estão sujeitas ao extravasamento e conseqüente alagamento (o transbordo da margem do canal).

Os princípios dinâmicos básicos dos meandros estão intimamente relacionados com a erosão nas partes exteriores dos canais e com a deposição de sedimentos dentro destes cursos onde a corrente é mais fraca, os denominados bancos em ponta. As características hidráulicas dos canais conduzem a diferentes ocorrências e distribuições de estruturas sedimentares, como os *ripples* e dunas. Dentro deste conceito existem ainda os bancos e os canais entrançados que crescem lateralmente no sentido da corrente. A topografia deste tipo de bancos pode ser alterada por um maior fluxo que irá provocar migração periódica da curvatura e maior acreção nos bancos em ponta, que nas partes superiores ficam bem definidas pelas alternâncias de areias e camadas com matéria orgânica (Leeder, 1999). Estas estruturas são cruciais para uma boa caracterização sedimentológica dos canais fluviais.

Os bancos de canal são macroformas emersas, geralmente arenosas ou cascalhentas, sem vegetação na época de caudais baixos, que sofrem submersão e rápida modificação durante os estadios de caudais elevados. Podem igualmente ser consideradas como bancos em ponta de dois lados, tendo como diferença o seu constante movimento a jusante, cuja dinâmica é mais complicada de analisar.

Os termos acima referidos, juntamente com as cargas de fundo, constituem morfologias sedimentares presentes nos canais e são muito importantes para a análise e modelação dos canais.

O corpo de um canal é formado pelo agrupamento de canais individuais que se realocam e se sobrepõem. Esta justaposição de segmentos pode ser originada por um mesmo rio, tipicamente num curto período de tempo, ou pode representar uma alocação de um rio diferente numa mesma planície de inundação após um longo período de tempo. Os canais actuais podem ser

descritos pela sua forma: seccional (em parâmetros como a profundidade, raio hidráulico, e perímetro húmido); à superfície; e longitudinal.

De referir que com o agrupamento de canais individuais, na sua totalidade ou apenas partes, em corpos de canal compostos com vários graus de conectividade, a descrição dos parâmetros de forma acima referidos torna-se complexa. As definições que se focam na concentração de vários canais centram-se em: áreas de drenagem entrincheiradas – zonas de vale; locais de entrada restrita de drenagem em zonas não confinadas – leques aluviais; e bacias com diferentes taxas de subsidência que delimitam os canais em certas áreas. Desta forma, o termo ‘corpo do canal’ tem na prática algumas condicionantes na sua classificação pelo que é importante reconhecer igualmente o material existente nestas zonas, tipicamente com granulometrias finas (Gibling, 2006).

Os bancos de canal costumam migrar lateralmente como depósitos da planície de inundação adjacentes, podendo-se falar de acreção lateral ou horizontal. A base destes ‘novos’ canais pode cortar os depósitos da planície de inundação subjacentes, resultando em barras e cargas de fundo empilhadas e, neste caso, trata-se de uma acreção vertical, com a respectiva deposição sobreposta dos sedimentos em suspensão. Este amontoamento gera o corpo de um canal que irá ser, à partida, mais amplo do que os canais originais. Todavia, o preenchimento do canal pode não alterar a largura do corpo final, por exemplo, quando uma massa de sedimentos derivado a um deslizamento preenche um canal activo (Keefer, 1999 *in* Gibling, 2006), ou até repetidos fluimentos que conduzem ao preenchimento de um canal já abandonado. A combinação dos processos de erosão nas margens exteriores e de acreção no canal sobre a superfície gera a migração de todo o canal.

Um canal fluvial pode então ser definido como um corpo tridimensional composto por sedimentos não consolidados ou litificados, originados por processos aluviais ao longo do tempo. A sua magnitude pode ser descrita em termos de largura e profundidade na capacidade máxima de enchimento, o que determina a extensão de granulometrias mais grosseiras no canal. Na tabela 2.1 mostra-se um exemplo de classificação de canais fluviais de acordo com a dimensão e forma.

Na interpretação de canais fluviais é bastante relevante conhecer o conceito de avulsão que se relaciona com o súbito desvio de um canal, deslocando-se na planície de inundação, e levando ao abandono de uma faixa de canal, começando uma outra (Miall, 1996). O mesmo conceito pode ser utilizado num próprio canal quando se formam ramos a partir da faixa principal.

Tabela 2.1 – Classificação de corpos de canais fluviais e de enchimento de vales de acordo com a dimensão e forma (adaptado de Gibling, 2006).

Largura (m)		Espessura (m)		Largura/Espessura		Área (km ²)	
Muito largo	> 10 000	Muito espesso	> 50	Lâminas muito amplas	> 1 000	Muito grande	> 10 000
Largo	> 1 000	Espesso	> 15	Lâminas amplas	> 100	Grande	> 1 000
Médio	> 100	Médio	> 5	Lâminas estreitas	> 15	Médio	> 100
Estreito	> 10	Fino	> 1	Faixas amplas	> 5	Pequeno	> 10
Muito estreito	< 10	Muito fino	< 1	Faixas estreitas	< 5	Muito pequeno	< 10

Existem dois tipos principais de avulsão que ocorrem em canais activos e fazem com que este mude de posição (Miall, 1996). Um exemplo do primeiro tipo é quando a migração natural de um rio meandrizado resulta na junção de um banco com outro banco, resultando num meandro abandonado quando o fluxo do canal passa a desenvolver-se na margem do novo banco formado. No segundo caso, existe uma mudança avulsiva do canal, que abandona o seu curso original e começa a fluir numa parte diferente do vale. A ocorrência de um novo canal gerado desta forma é muitas vezes facilitada pelo facto desta mudança resultar num percurso mais curto e/ou íngreme para a foz. Este processo é análogo em alguns aspectos ao que ocorre em leques aluviais.

2.2 TIPOS DE DEPÓSITOS

De forma generalizada, os depósitos gerados por processos aluviais podem ser divididos em três grupos principais (Suguio, 2003):

1. Depósitos de canal – formados pela acção do próprio canal, incluindo os depósitos residuais, de barras de meandros, de barras de canais e de preenchimentos de canal;
2. Depósitos marginais – relacionados com as margens dos canais durante os períodos de inundação, incluindo depósitos de diques marginais e de rompimento de diques marginais;
3. Depósitos de planícies de inundação – formados por sedimentos finos que se depositam durante grandes enchentes, quando existe inundação das superfícies adjacentes ao canal e/ou rompimento de diques naturais.

Na figura 2.1 mostra-se uma proposta de hierarquia de elementos arquiteturais fluviais segundo Miall (2014).

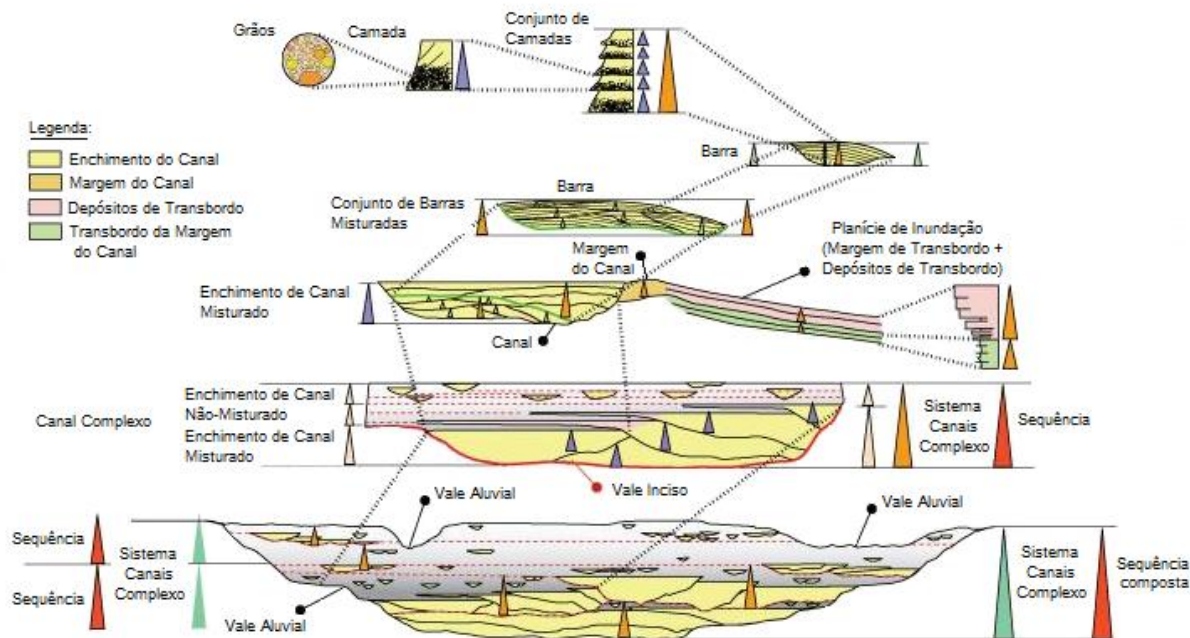


Figura 2.1 – Hierarquia de elementos arquiteturais fluviais (adaptado de Miall, 2014).

2.3 LITOLOGIA

Walker e Cant (1984) classificaram um conjunto de rochas sedimentares de origem fluvial consoante as várias fácies, tendo em consideração a sequência que apresentavam ao longo de processos deposicionais. Assim, através de uma sucessão vertical de fácies que mostre uma relação genética e ambiental, torna-se possível a identificação de um conjunto que caracterize um modelo de sistema deposicional. Pela descrição de parâmetros como a granulometria, textura e estruturas sedimentares, caracteriza-se o nível de energia e os processos sedimentares envolvidos na formação de uma unidade rochosa. Na sequência de vários estudos, Miall (1996) definiu 20 fácies como as mais comuns em sistemas aluviais (tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Classificação de fácies (adaptado de Miall, 1996).

Código de fácies	Fácies	Interpretação
Gmm	Cascalho maciço suportado pela matriz; levemente gradacional	Fluxo viscoso de detritos
Gmg	Cascalho maciço suportado pela matriz; gradação inversa a normal	Fluxo viscoso de detritos
Gci	Cascalho suportado pelos clastos; gradação inversa	Fluxo de detritos rico de clastos
Gcm	Cascalho suportado pelos clastos e maciço	Fluxo turbulento
Gh	Cascalho suportado pelos clastos e estratificação ligeira; estratos horizontais, imbricamento dos seixos	Formas de leito longitudinais; depósitos residuais
Gt	Cascalho estratificado; estratificação cruzada acanalada	Preenchimento de canais secundários
Gp	Cascalho estratificado; estratificação cruzada tabular	Formas de leito transversais
St	Areia fina a muito grossa podendo ser cascalhenta; estratificação cruzada acanalada	Dunas 3D
Sp	Areia fina a muito grossa podendo ser cascalhenta; estratificação cruzada tabular	Dunas 2D
Sr	Areia muito fina a grossa; laminação cruzada por <i>ripples</i>	<i>Ripples</i>
Sh	Areia muito fina a grossa podendo ser cascalhenta; laminação horizontal	Fluxo planar (crítico preenchimento de escavações antidunas)
Sl	Areia muito fina a grossa podendo ser cascalhenta; laminação de baixo ângulo (<15°)	Fluxo planar (crítico preenchimento de escavações antidunas)
Ss	Areia fina a muito grossa podendo ser cascalhenta; escavações largas a rasas	Preenchimento de escavações
Sm	Areia fina a grossa; maciça ou levemente laminada	Depósitos de gravidade
Fl	Areia, silte, argila; laminação fina, <i>ripples</i> muito pequenas	Depósitos de transbordo, canais abandonados ou de fluxo decrescente
Fsm	Silte, argila; maciço	Depósitos de canais abandonados
Fm	Argila, silte; maciço, fendas de dessecação	Canais abandonados ou depósitos de cobertura
Fr	Argila, silte; maciço, raízes, bioturbações	Solos
C	Carvão, argilas orgânicas, plantas, presença de argila	Depósitos de planície de inundação
P	Feições pedogenéticas; nódulos	Solos com precipitação química

Os depósitos de inundação são formados principalmente por fácies de granulometria fina como argilas. Os depósitos de diques naturais são constituídos por sedimentos, essencialmente de areia fina e silte, que se agrupam na margem do canal, formando estratificação planar (ou oblíqua) e laminações entrecruzadas de *ripples*. Os lóbulos de derrame são cones de fácies arenosas a siltosas, com sucessões de granulometria crescente ou decrescente, gerados por pequenos canais secundários aquando de picos de descarga fluvial. Nos depósitos da planície de inundação, as fácies são mais distais e constituídas principalmente por depósitos de suspensão volumetricamente importantes.

A sucessão de fácies em depósitos de canal formados por material arenoso a cascalhento evolui, da base para o topo, desde depósitos cascalhentos de fundo de canal a depósitos de inundação finos e argilosos. Podem incluir estruturas de pequena ou larga escala, como estratificação cruzada, durante a evolução vertical da deposição de sedimentos. De referir que sucessões de fácies de diferentes estilos fluviais podem ser bastante semelhantes.

Na figura 2.2 mostra-se uma proposta de calibragem e distribuição do tamanho dos grãos nos sedimentos de vários tipos de ambientes (Folk, 1980).

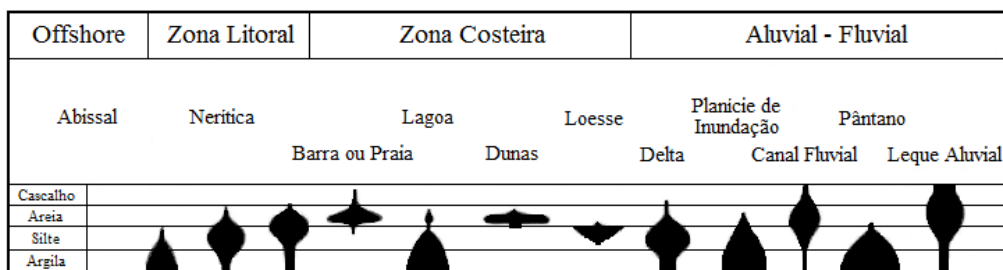


Figura 2.2 – Calibragem e distribuição do tamanho dos grãos nos sedimentos de vários tipos de ambientes (adaptado de Folk, 1980).

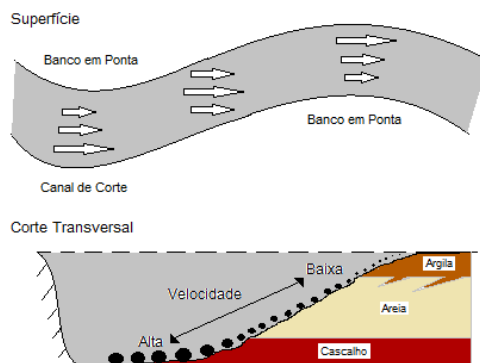


Figura 2.3 – Transporte de sedimentos e fluxo num canal meandrizado.

2.3.1 GEOMORFOLOGIA FLUVIAL

A interpretação dos canais pode fazer-se pelo respectivo corte seccional. Assim, podem ser classificados dois tipos de corpos, os individuais e os múltiplos. Os canais individuais compreendem um corpo principal e as margens. Um canal é um sulco que contem fluxo de água e pode ser simétrico ou assimétrico em relação à zona de máxima espessura próxima a uma margem (Gibling, 2006). As margens representam as zonas mais altas onde estão inseridos os depósitos de diques naturais e lóbulos de derrame relacionados, porém, diferenciados do preenchimento do canal principal. Como existe diferenciação do corpo central do canal e das margens para as diferentes características de depósitos e reservatórios, torna-se relevante a análise das dimensões destas estruturas.

Os corpos sedimentares também podem ser diferenciados com base no empilhamento vertical ou lateral de eventos, sendo considerados multiepisódicos (*multistory bodies*) ou multilaterais (*multilateral bodies*), respectivamente. A sucessão de vários eventos consecutivos, sem presença de erosão ou com erosão residual, faz com que esteja presente nas classificações o termo ‘dominados por deposição’ (*sucession-dominated*). Da mesma forma, quando existem períodos frequentes de erosão intensa, os enchimentos sedimentares são classificados como ‘dominados por erosão’ (*erosion-dominated*). Assim, em secção, a forma exterior pode ser classificada como simétrica ou assimétrica se, tal como o nome indica, houver um eixo de simetria entre os lados do canal. O preenchimento é também um dos parâmetros que confere uma classificação, definido consoante o modo de deposição dos sedimentos. Se esta for feita de forma progressiva, reduzindo a área seccional a partir da parte central do canal, denomina-se preenchimento concêntrico. Caso seja feito um preenchimento por acreção lateral de sedimentos, devido a erosão de uma margem e conseqüente deposição de material na outra, existe preenchimento assimétrico. Pode dar-se o caso de haver uma migração da barra mais rápida do que o do banco de canal em formação, e o progressivo aumento das superfícies de acreção é representado numericamente pelo chamado índice de agradação.

A geometria e o arranjo tridimensional dos elementos da arquitectura dos canais, no que diz respeito à sedimentologia, permite uma identificação do estilo fluvial mais ponderada, relacionando da mesma forma outros conceitos como a taxa de agradação e frequência da avulsão.

Como já foi referido, a magnitude de um canal fluvial pode ser determinada através da sua largura (w) e profundidade (h) durante o enchimento máximo (figura 2.4). O quociente w/h é a chave das classificações já propostas onde, genericamente, baixas relações entre a largura e a profundidade correspondem a canais com baixa sinuosidade (Leeder, 1999).

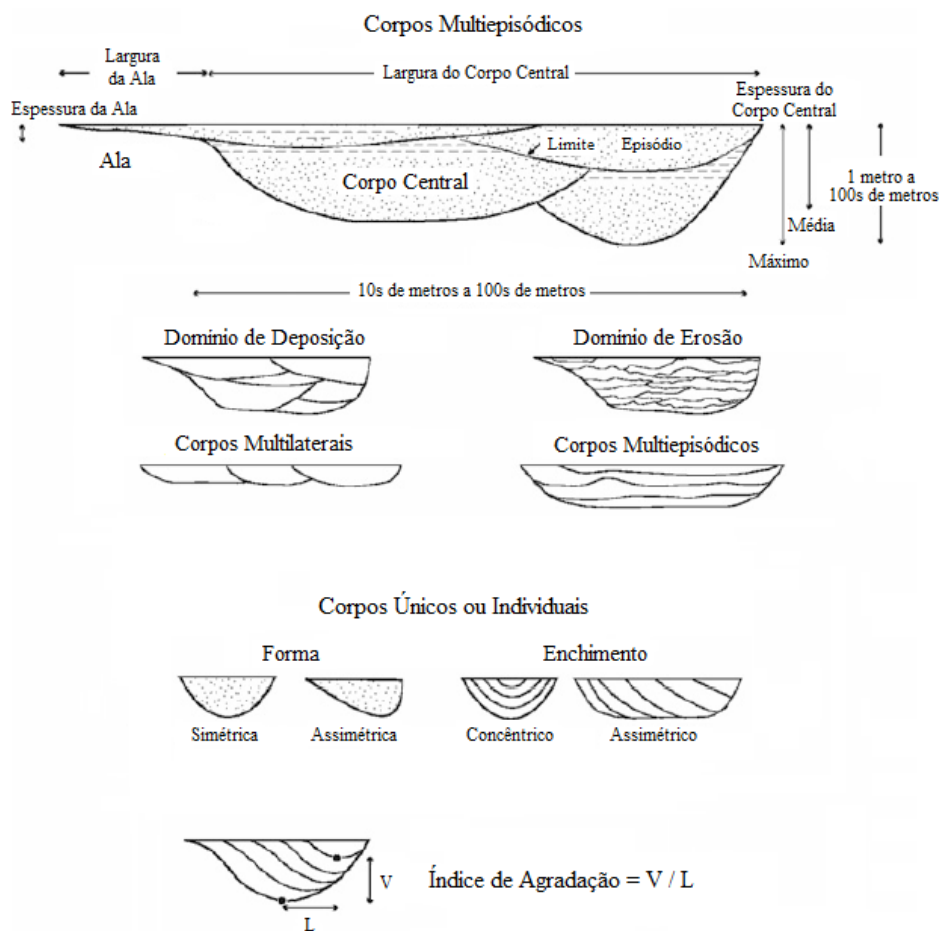


Figura 2.4 – Terminologia para secções transversais na geometria de canais (adaptado de Gibling, 2006).

Através da forma e magnitude dos canais fluviais é possível descrevê-los por uma combinação de três aspectos principais (figuras 2.5 e 2.6):

- Sinuosidade - Descrição à superfície dos desvios que o canal faz em relação a um padrão linear;
- Entrancamento (*braiding*) - Grau de subdivisão originado pela acreção lateral de bancos à volta das quais o canal diverge ou converge;
- Anastomose (*anastomosing*) - Distribuição mais permanente de subdivisões em canais mais pequenos e estacionários com os seus próprios canais e bancos em ponta.







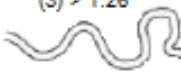














Sinuosidade	Entrançamento	Anastomose
Grau		
(1) 1 - 1.05 	(0) < 5% 	(0) < 5% 
(2) 1.06 - 1.25 	(1) 5 - 34% 	(1) 5 - 34% 
(3) > 1.26 	(2) 35 - 65% 	(2) 35 - 65% 
	(3) > 65% 	(3) > 65% 
Caracterização		
(a) Fase única, largura constante, grande profundidade 	(a) Maioritariamente barras 	(a) Canal lateral principalmente sinuoso 
(b) Fase única, mais largo nas zonas de maior curvatura 	(b) Barras e ilhas 	(b) Existência de curvas abandonadas 
(c) Fase única, irregular com variações na largura 		(c) Canal dividido, ramificação sinuosa 
(d) Duas fases, sinuosidade sub-dimensionada 		(d) Canal dividido, ramificação sub-paralela 

Figura 2.5 – Esboços exemplificativos dos diferentes tipos de canais fluviais para os vários graus de sinuosidade, entrançamento e anastomose e sua caracterização (adaptado de Kuznetsova, 2012).

Outro parâmetro que influencia a forma de um canal é a sua estabilidade. As margens que não estão susceptíveis à erosão apresentam-se mais lineares, enquanto que aquelas sem qualquer coesão podem alargar indefinidamente até que a diminuição da profundidade em conjunto com as forças de cisalhamento já não consigam erodir o canal (Leeder, 1999).

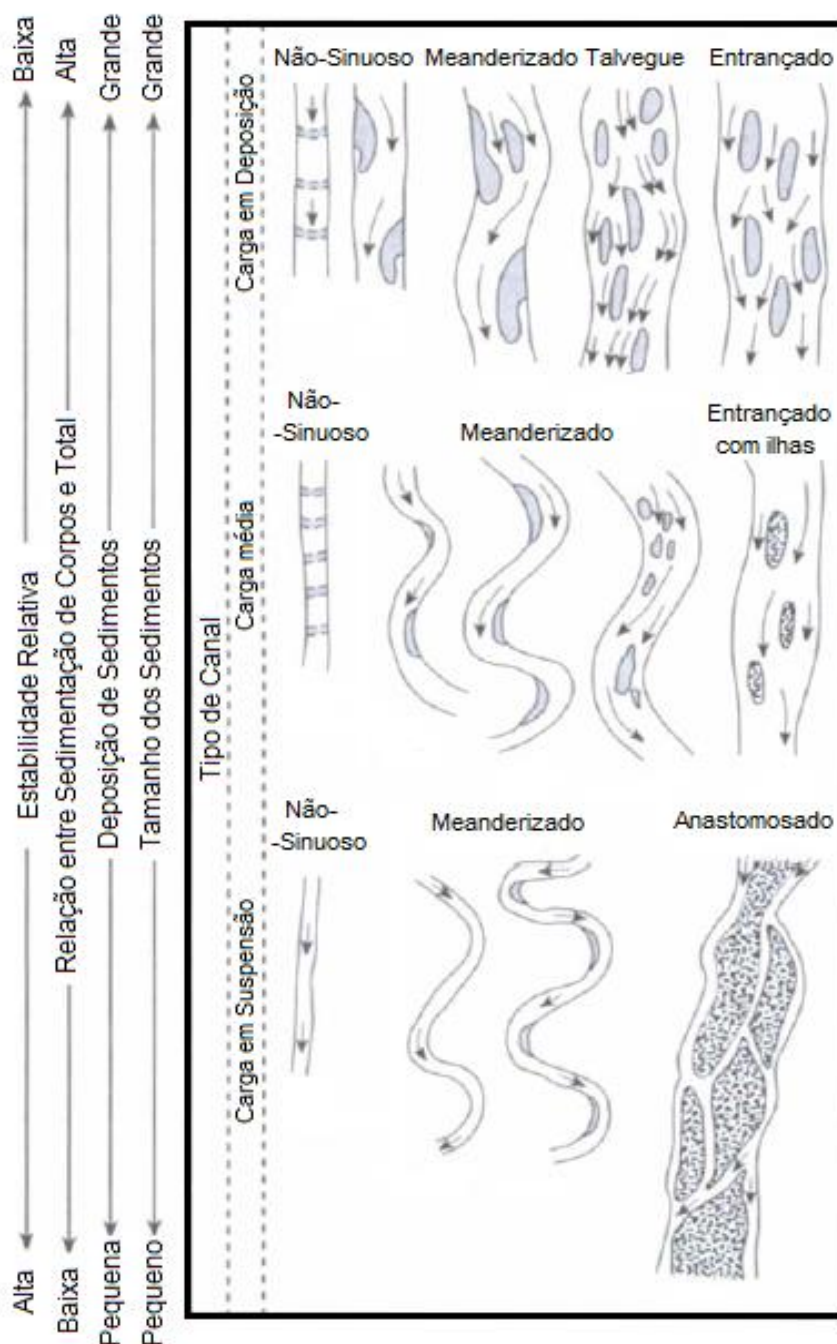


Figura 2.6 – Classificação de padrões de canais fluviais (adaptado de Miall, 2014).

A estabilidade relaciona-se com a variável sinuosidade de um canal (ω) que é expressa pela expressão:

$$\omega = (\rho g Q s) / w, \text{ onde } \rho = \text{densidade do fluído}; Q = \text{descarga}; s = \text{declive}; w = \text{largura do canal}$$

Existem várias classificações para os canais mas nenhuma é totalmente válida uma vez que os cursos podem apresentar diferentes combinações entre sinuosidade e entrançamento. Miall (1996) distinguiu 16 estilos fluviais comuns pelas suas fácies e descreveu-os através de exemplos (tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Estilos fluviais mais comuns baseados em exemplos interpretados (adaptado de Miall, 1996).

a) Canais dominados por cascalho	1 – Entrançados com cascalho e fluxo gravitacional de sedimentos
	2 – Entrançados com cascalho, pouco profundos (tipo ‘Scott’)
	3 – Entrançados com cascalho, profundos (tipo ‘Donjek’)
	4 – Móvel com cascalho
	5 – Meandrizado com cascalho
b) Canais sinuosos dominados por areia	6 – Meandrizado com cascalho e areia
	7 – Meandrizado com areia (‘meandro clássico’)
	8 – Meandrizado transitório com areia
	9 – Meandrizado com material fino
	10 – Anastomosado
c) Canais não-sinuosos dominados por areia	11 – Entrançados-meandrizados com barras alternadas
	12 – Entrançado pouco profundo longo
	13 – Entrançado profundo longo
	14 – Entrançado com areia e alta energia
	15 – Manto de inundação distal entrançado
	16 – Manto de inundação transitório

Gibling (2006) fez a distinção de nove corpos de canais fluviais principais conforme ilustrado na figura 2.7. Estes admitem que os enchimentos de vale dão origem a corpos laminares muito amplos a faixas estreitas e que os canais formam lentículas estreitas a faixas estreitas no caso de serem móveis e lentículas amplas a faixas estreitas no caso de canais fixos.

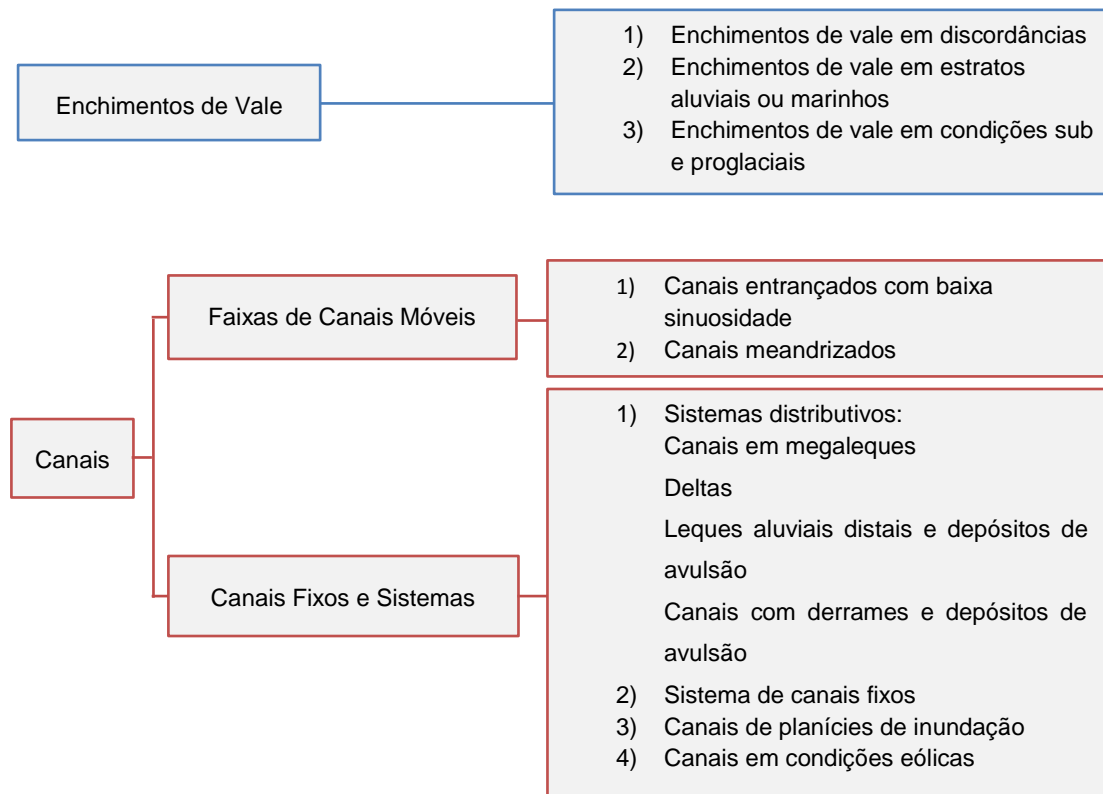


Figura 2.7 – Classificação de enchimentos de vale e canais fluviais baseado em dimensões, contexto geomorfológico e arquitectura (adaptado de Gibling, 2006).

2.3.2 ARQUITECTURA SEDIMENTAR

Na análise dos elementos estruturais existem descontinuidades de diferentes ordens que são necessárias classificar para um melhor entendimento tanto da história de deposição como da fácies que originou esses mesmos elementos. Uma junção dos grupos reconhecidos por Miall (1996) está sintetizada na tabela 2.4.

Para a diferenciação de hierarquias nas superfícies de descontinuidades foram seguidos três princípios básicos:

- Uma dada superfície pode ser truncada por outra de igual ou maior ordem, mas nunca por uma de ordem inferior;
- Na definição de uma dada superfície deve-se tomar, como base, uma superfície de maior grau hierárquico;
- Superfícies de baixa ordem podem aumentar de ordem lateralmente.

Tabela 2.4 – Subdivisões hierárquicas de unidades em depósitos clásticos (adaptado de Miall, 1996).

Grupo	Escala de tempo (anos)	Processos	Unidade arquitetural (fluvial ou deltaica)
1		Ciclo de arranque-arraste de partículas	Lâmina
2	10^5	Migração de corpos	Ripples (microforma) [Superfície de 1ª ordem]
3	10^5	Ciclo diário de marés	Incremento dunal diário (superfície de reactivação) [Superfície de 1ª ordem]
4	10^4	Ciclo de marés vivas-mortas	Duna (mesoforma) [Superfície de 2ª ordem]
5	10^2-10^3	Inundações sazonais a decenais	Crescimento de macroformas [Superfície de 3ª ordem]
6	10^2-10^3	Inundações seculares	Bancos em ponta, margem de canal (macroforma) [Superfície de 4ª ordem]
7	10^0-10^1	Processos geomórficos a longo tempo	Canal [Superfície de 5ª ordem]
8	10^{-1}	Ciclos de 5ª ordem (Milankovitch)	Faixas de Canal [Superfície de 6ª ordem]
9	$10^{-1}-10^{-2}$	Ciclos de 4ª ordem (Milankovitch)	Sistema deposicional, leque aluvial, delta principal
10	$10^{-1}-10^{-2}$	Ciclos de 3ª ordem	Enchimento de bacia sedimentar
11	$10^{-1}-10^{-2}$	Ciclos de 2ª ordem	Enchimento de bacia sedimentar

Segundo Miall (1996, 2014), existem nove tipos fundamentais de elementos arquiteturais em canais fluviais, correspondendo a conjuntos de fácies diferentes e com tipos de geometria igualmente distintos (figura 2.8 e tabela 2.5). Na figura 2.8 relaciona-se a presença de elementos como componentes dos principais estilos fluviais.

O elemento HO (*Hollow*), cavidade de bacia, foi introduzido por Cowan (1991), e pode ser confundido com pequenos canais pela sua forma erosiva côncava virada para cima. Porém, não se tratam de canais uma vez que diferem destes por serem limitados por superfícies de 4ª ordem. A sua formação é ainda controversa, no entanto, acredita-se que seja gerado por processos de escavação profundos no ponto de convergência de canais (Júnior e Castro, 2001).

A existência de reservatórios em elementos de origem aluvial depende de muitos factores entre os quais a sedimentologia, litologia e mesmo condições estruturais. No entanto, pode-se afirmar que os ambientes fluviais contêm um potencial elevado no que diz respeito ao armazenamento de hidrocarbonetos, principalmente nos canais que possuem barras com sinuosidades elevadas.

Na figura 2.10 ilustra-se o potencial de reservatório nos principais estilos fluviais.

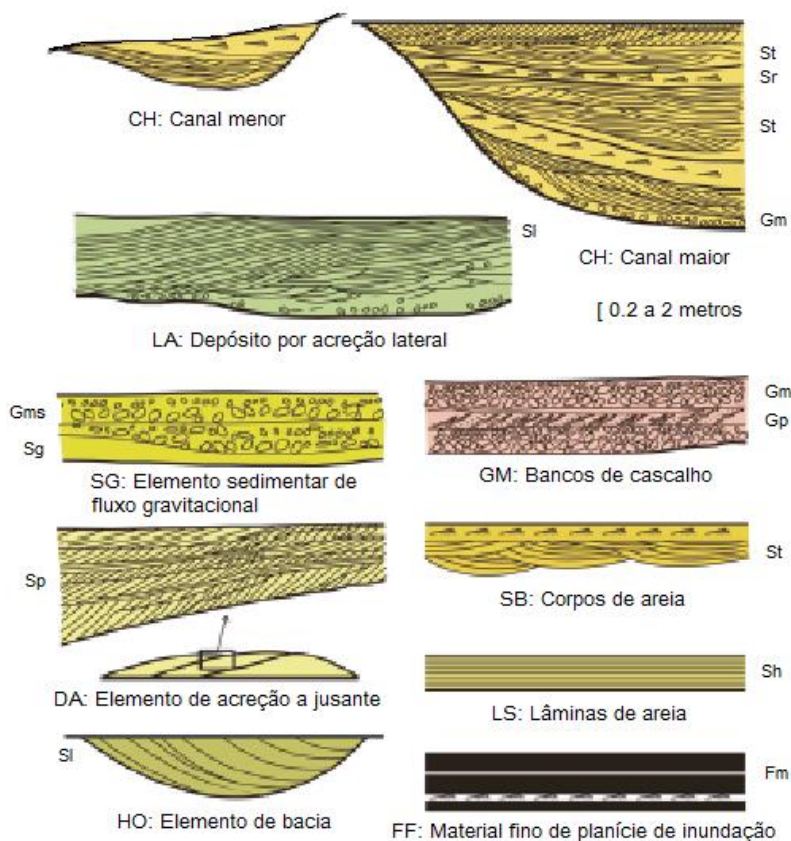


Figura 2.8 – Elementos arquiteturais básicos (adaptado de Miall, 2014).

	Entrancado	Meandrizado	Anastomosado	Não-Sinuoso
Elemento de Canal				
Canal Principal	Comum	Sempre	Comum	Sempre
Canal Secundário	Sempre	Ocasional	Sempre	Ocasional
Canal Avulso	Comum	Ocasional	Comum	Ocasional
Área de Abandono	Comum	Ocasional	Ocasional	Nunca
Meandro Abandonado	Ocasional	Nunca	Ocasional	Nunca
Zona de Pântano	Ocasional	Comum	Nunca	Ocasional
Elemento Interior de Canal				
Acreção a Jusante	Sempre	Comum	Nunca	Ocasional
Acreção Lateral	Comum	Sempre	Ocasional	Ocasional
Banco Arqueado	Ocasional	Comum	Nunca	Nunca
Acreção Obliqua	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca
Margem Concáva	Nunca	Ocasional	Nunca	Nunca
Elemento de Margem de Canal				
Margem de Canal	Ocasional	Comum	Comum	Ocasional
Lóbulo de Derrame	Ocasional	Ocasional	Comum	Ocasional
Elemento de Planície de Inundação				
Superfície de Inundação	Comum	Sempre	Sempre	Comum
Zona de Pântano Interna	Nunca	Comum	Comum	Nunca

■ Sempre
 ■ Comum
 ■ Ocasional
 Nunca

Figura 2.9 – Presença de elementos como componentes dos principais estilos fluviais (adaptado de Miall, 2014).

Tabela 2.5 – Elementos arquiteturas em depósitos fluviais (adaptado de Miall, 1996).

Elemento	Símbolo	Conjunto principal de fácies	Geometria
Canal	CH	Qualquer combinação	Lentículas ou faixas; base erosional com concavidade para cima; escala e forma muito variáveis; superfícies internas de erosão comuns com concavidade para cima (3ª ordem)
Corpos de cascalho	GB	Gm, Gp, Gt	Lentículas, mantos; usualmente corpos tabulares; frequentemente intercalados com elementos do tipo SG
Corpos de areia	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentículas, faixas, formações em cunha; ocorrem como preenchimento de canais; bancos menores, lóbulos de derrame
Acreção a jusante	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentículas acomodadas na base dos canais com superfícies convexas de erosão interna com concavidade para cima (3ª ordem) delimitadas superiormente por superfícies de 4ª ordem
Acreção lateral	LA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss, possível presença de Gm, Gt, Gp	Formações em cunha, lóbulos, faixas; caracterizadas pela acreção interna lateral de superfícies de 3ª ordem
Cavidade de bacia	HO	Gh, Gt, St, Sl	Bacias em forma de concha com preenchimento assimétrico
Fluxo sedimentar gravitacional	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Lóbulos, faixas; tipicamente intercalados com elementos do tipo GB
Lâminas de areia	LS	Sh, Sl, presença de Sp, Sr	Faixas, mantos
Material fino de planície de inundação	FF	Fm, Fl	Mantos estreitos a largos; comumente intercalados com elementos do tipo SB; podem preencher canais abandonados


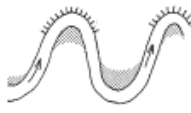



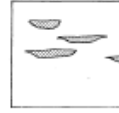
Canal	Aparência	Potencial de Reservatório
Entraçado		Excelente
Meandrizado		Excelente
Não-Sinuoso		Razoável a excelente dependendo da dimensão
Canais agrupados		Qualidade do reservatório depende do tamanho e padrão de empilhamento de canais
		
		

Figura 2.10 – Potencial de reservatório nos principais estilos fluviais (adaptado de Archer e Wall, 1986).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL CLÁSTICO

O material predominante em canais fluviais possui natureza clástica, sendo bastante relevante a sua caracterização para a posterior análise de estruturas e modelação. Existem também fácies não clásticas, porém, com menor relevância, como solos desenvolvidos em ambientes semiáridos, presença de carvão em unidades formadas em ambientes tropicais húmidos ou evaporitos, originados em climas áridos (Miall, 1996).

Nesta secção faz-se uma revisão de conceitos que caracterizam este tipo de material no que diz respeito ao seu tamanho, forma, orientação, morfologia, textura e, ainda, uma abordagem à porosidade destas formações.

2.4.1 TAMANHO DOS GRÃOS

O tamanho dos grãos que constituem os sedimentos podem ser relacionados com vários parâmetros, entre os quais a natureza do material que os compõem e a proximidade à sua fonte, uma vez que o transporte e deposição constituem processos que desgastam e transformam estas

partículas. No que diz respeito ao tamanho, os grãos podem ser divididos nas classes que se apresentam na figura 2.11. Na figura 2.12 apresenta-se a relação entre a velocidade de fluxo com o tamanho dos grãos.

	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	Tamanho dos Grãos (mm)
Classificação Sedimentos Clásticos	Argila			Silte	Areia			Cascalho
					Muito fina Fina Média Grosseira Muito grosseira			Seixo Calhau Bloco

Figura 2.11 – Classificação de sedimentos clásticos (adaptado de Hantschel e Kauerauf, 2009).

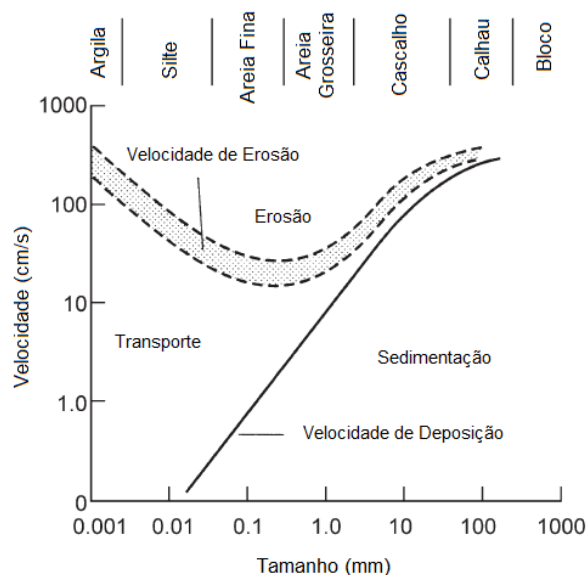


Figura 2.12 – Relação entre a velocidade de fluxo com o tamanho dos grãos (adaptado de Allan e Castillo, 2007).

2.4.2 FORMA DOS GRÃOS

A forma dos grãos depende dos processos de transporte e deposição que tendem a moldar o material consoante o nível de energia a que está ou foi sujeito.

O primeiro conceito é a esfericidade dos grãos, isto é, a aproximação que os grãos têm com a forma de uma esfera. Outro factor a considerar na forma dos grãos é o arredondamento, que se

relaciona com a curvatura existente na superfície das partículas. Na figura 2.13 mostra-se uma classificação de esfericidade e arredondamento dos grãos.

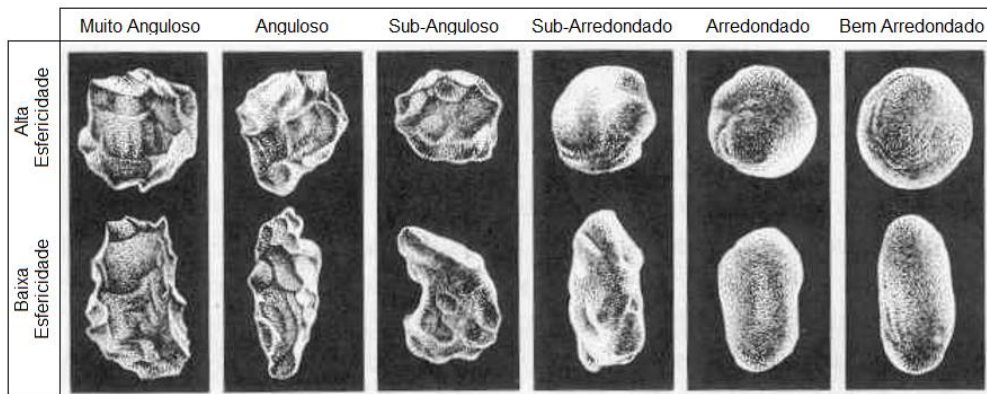


Figura 2.13 – Classificação da esfericidade e arredondamento de grãos (adaptado de Powers, 1953).

Outro parâmetro utilizado é a relação entre os diâmetros medidos nas várias direcções, que pode caracterizar um grão pela sua forma alongada, intermédia ou de pequenos diâmetros. Na figura 2.14 mostra-se um exemplo de descrição da forma de partículas sedimentares num diagrama triangular.

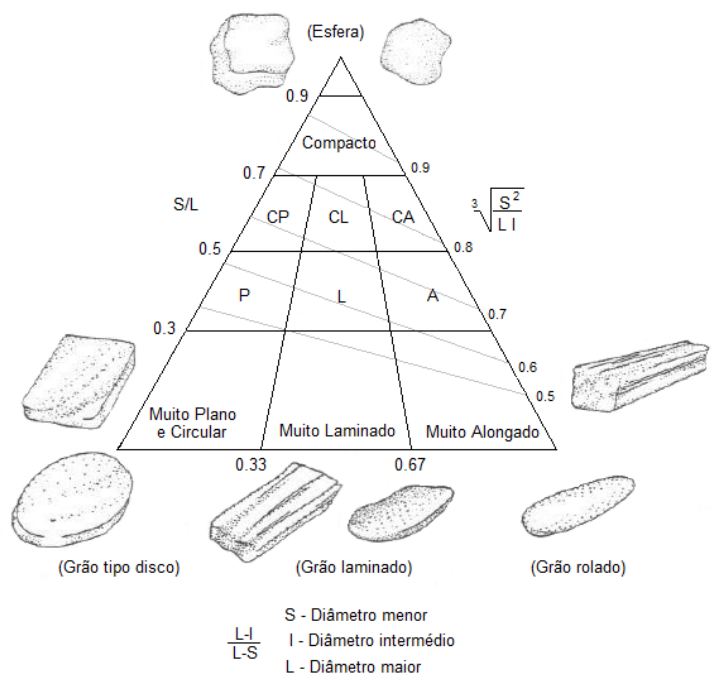


Figura 2.14 – Diagrama triangular para descrição da forma de partículas sedimentares (adaptado de Kuznetsova, 2012).

2.4.3 CALIBRAGEM DOS GRÃOS

A distribuição granulométrica é relevante para a quantificação da porosidade e da permeabilidade. É uma medida de dispersão dos tamanhos dos grãos dentro da matriz, e como é bastante difícil determinar, é comum fazer-se uma comparação expedita com padrões de tamanho (figura 2.15).

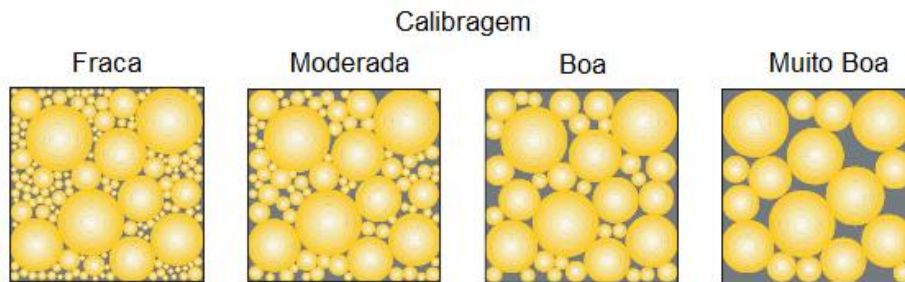


Figura 2.15 – Exemplo de classificação da calibragem de grãos.

2.4.4 ORIENTAÇÃO DOS GRÃOS

Este conceito refere-se à disposição e estrutura interna dos grãos que estão dispostos num arranjo aleatório natural e que pode ser comparado com padrões de arranjos ideais como, por exemplo, ajuntamentos cúbicos ou romboédricos. Os grãos que têm estrutura instável pelas suas formas irregulares, podem distribuir-se em direcções preferenciais, por exemplo, um grão com uma forma aplanada tende a depositar-se com o seu eixo mais pequeno na vertical com o eixo mais longo paralelo ou perpendicular à paleocorrente, dependendo do processo de deposição a que foi sujeito. Na figura 2.16 mostra-se um exemplo da orientação dos grãos: segundo os arranjos cúbico e romboédrico.

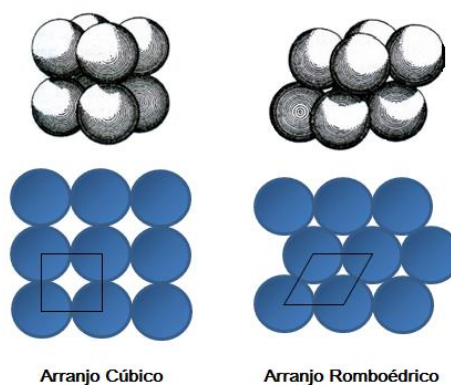


Figura 2.16 – Exemplo da orientação dos grãos: arranjo cúbico e romboédrico (adaptado de Selley, 2000).

2.4.5 ARENITOS

As areias formam os arenitos após processos de compactação e cimentação. Esta cimentação pode ser feita através de várias matrizes que podem, por si só, serem classificadas consoante a sua natureza (quartzosa, argilosa, entre outras). Os arenitos podem constituir, muitas vezes, os meios onde se encontram reservatórios, potenciados por propriedades como a porosidade e permeabilidade que influenciam a migração de hidrocarbonetos.

Os principais componentes dos sedimentos siliciclásticos são os que definem o nome do material e compreendem o quartzo, feldspato, micas e clastos com diversos minerais provenientes da rocha a partir da qual se originaram esses fragmentos (clastos líticos). Constituintes presentes em muito menor quantidade incluem partículas de minerais pesados (como anfíbolos, piroxenas, granadas) e minerais argilosos (como ilite, clorite, caolinite). Na figura 2.17 apresenta-se uma classificação de arenitos com base na composição.

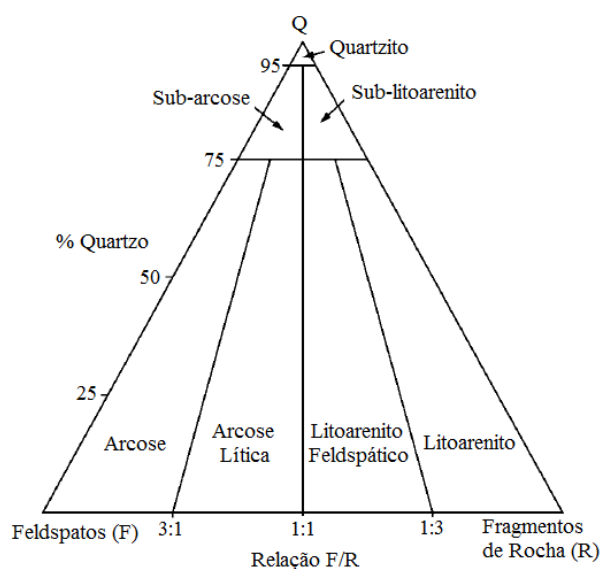


Figura 2.17 – Classificação de arenitos com base na sua composição (adaptado de Folk, 1980).

2.4.6 POROSIDADE

A porosidade (Φ) é definida como o volume de espaços vazios dentro de uma rocha, sendo expressa em fracção ou percentagem do volume total de rocha. Representa a capacidade de armazenamento de fluído e compreende dois tipos: a porosidade primária e a secundária. A primeira consiste no espaçamento entre grãos resultantes da deposição original dos sedimentos enquanto que a segunda é gerada em processos pós-deposição como dissolução de grãos ou cimentação.

A porosidade total pode ser subdividida nas componentes porosidade efectiva (Φ_{ef}) e porosidade residual (Φ_r), $\Phi = \Phi_{ef} + \Phi_r$. A porosidade efectiva é definida como o volume de espaço que se encontra disponível para ser ocupado por fluído, ou seja, os vazios que estão interconectados entre si, sendo a porosidade residual aqueles que não têm qualquer conexão e que, por essa razão, não conseguem ser preenchidos por fluído. A tabela 2.6 apresenta uma relação entre descritores qualitativos e valores de porosidade.

Tabela 2.6 – Descrição qualitativa da porosidade (adaptado de Ahr, 2008).

Descrição qualitativa	Porosidade (%)
Fraca	< 5
Razoável	5 -13
Boa	13 - 20
Excelente	> 20

2.5 CARACTERIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS

As rochas sedimentares constituem o tipo de reservatório mais importante para a indústria petrolífera, uma vez que nelas residem as maiores acumulações de hidrocarbonetos, apenas existindo pontualmente em redes de fracturação instaladas em rochas de origem metamórfica ou ígnea. Entre as rochas sedimentares, os arenitos constituem cerca de 35% das formações de hidrocarbonetos, gerando uma produção equivalente (figura 2.18).

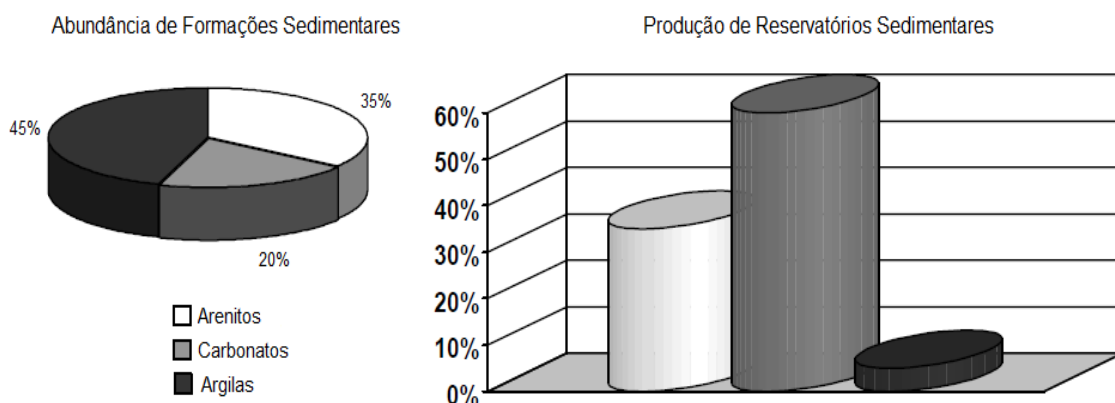


Figura 2.18 – Abundância de formações sedimentares e respectiva produção em reservatórios (adaptado de Haliburton, 2001).

Os reservatórios de hidrocarbonetos em arenitos gerados por processos aluviais são descritos segundo três critérios principais: a geometria e origem do sistema deposicional; a geometria do corpo do reservatório e o contexto tectónico (tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Critérios para classificação de reservatórios em arenitos fluviais (adaptado de Miall, 1996).

Critério	Classes	Observações
Geometria do sistema deposicional	Cunha de material clástico Paleovale	Tectonismo activo Base de baixo nível
Geometria do reservatório	Camadas Lâminas	Maioritariamente sistemas entrançados Cursos meandrizados, anastomosados
Condições tectónicas	Bacia de rifte Bacia de margem extensional Bacia <i>Backarc</i> Bacia <i>Retroarc</i> Bacia <i>Forearc</i> Bacia <i>Strike-slip</i> Margem de bacia <i>Foreland</i>	Associado a estratificação em lagos Pode ser vulcanoclástico Associado a colisão Associado a colisão

2.5.1 GEOMETRIA DO SISTEMA DEPOSICIONAL

Existem dois tipos principais de armadilhas geradas em depósitos fluviais (figura 2.19):

Formações Clásticas em Cunha – Este tipo é gerado quando o contexto tectónico potencia relevos elevados e íngremes. As cunhas originadas podem ter centenas de metros até alguns milhares de metros de espessura e alongarem-se por mais de dezenas a centenas de quilómetros. Depois de se formarem, passam para as zonas de menor declive dentro de deltas ou para sistemas de planícies costeiras. Alternativamente, podem acabar por se integrar em depósitos lacustres. Tanto numa situação como outra, estes depósitos vão sofrer alterações a nível da sua distribuição e geometria e, em alturas de nível eustático baixo ou de taxas de subsidência reduzidas, são intercalados por pequenas camadas de material mais fino.

Enchimento de Paleovales - Os vales são geralmente de grandes dimensões e formados por incisões de canais subaéreos durante períodos de nível de base baixo, preenchidos durante subsequentes estágios de alterações destes níveis para períodos transgressivos, sendo associados a desconformidades. Este preenchimento pode ser feito tanto por sedimentos fluviais como estuarinos, dependendo das condições locais em termos de declive, diferenças no nível de base e

da própria deposição de sedimentos. Este tipo de sistema é característico em ambientes de baixas topografias como por exemplo bacias tipo *foreland* (Miall, 1996).

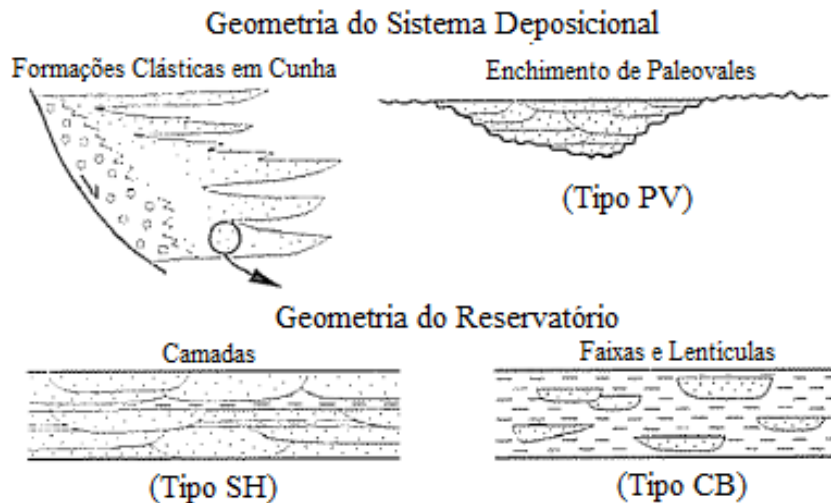


Figura 2.19 – Classificação de reservatórios não-marinhos de acordo com a geometria do sistema deposicional e do corpo do reservatório (adaptado de Miall, 1996).

2.5.2 GEOMETRIA DO CORPO DO RESERVATÓRIO

Miall (1996) caracterizou a geometria de reservatórios em dois tipos (figura 2.19): i) camadas de arenitos e ii) lentículas e faixas.

O primeiro diz respeito a depósitos formados em locais de gradientes de inclinação elevados onde os canais atravessam áreas amplas de vales. Porém, podem igualmente ocorrer em áreas de pequenos declives e baixas energias, desenvolvendo-se em ambientes com baixas taxas de subsidência que permitam que os depósitos se sobreponham entre si e a preservação potencial dos depósitos de material mais fino da planície de inundação seja residual. Para qualquer um dos casos, é necessária uma componente estrutural para formar uma armadilha de hidrocarbonetos. Podem caracterizar-se por uma relação entre a largura e espessura inferior a 15.

O segundo tipo é formado pela acumulação de corpos em arenitos dentro de sistemas de canal que estão isolados em sedimentos finos em ambientes de inundação da margem, como os bancos em ponta que originam formas de reservatórios em lentículas preservando o preenchimento de material mais fino abandonado pelo canal na margem destas formações. O quociente entre a largura e espessura é, nestes casos, superior a 15 (Miall 1996).

2.5.3 AMBIENTE TECTÓNICO

Os depósitos fluviais desenvolvem-se em contextos tectono-sedimentares, que se reúnem em duas categorias principais: bacias em regime de extensão e bacias associadas a placas em colisão. A presença de hidrocarbonetos é mais frequente em bacias de rifte e bacias de tipo *foreland*, onde estes depósitos são volumetricamente mais importantes.

Os ambientes tectónicos com maior potencial para desenvolver depósitos fluviais de dimensões consideráveis são bacias do tipo: *Retroarc (Backarc) Foreland; Backarc; Forearc; Strike-slip*; Bacias relacionadas com colisão; Bacias de rifte; Bacias em margens continentais extensionais; e Bacias intracratónicas.

2.5.4 CLASSIFICAÇÃO DE TIPOS DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS

Retomando a caracterização de tipos de reservatórios, cuja distinção se faz pelos critérios acima mencionados, agrupam-se três estilos de reservatórios fluviais mais importantes (figura 2.19, tabela 2.8):

Tabela 2.8 – Principais tipos de reservatórios fluviais com arenitos (adaptado de Miall, 1996).

Tipo	Código	Sistema deposicional	Geometria do reservatório	Condições tectónicas típicas
Paleovales	PV	Vale inciso	Faixas	Bacia <i>Foreland</i>
Camadas	SH	Formação Clástica em Cunha	Camadas	Bacia de rifte, margem extensional
Canais e Bancos	CB	Formação Clástica em Cunha	Múltiplas lâminas, faixas	Bacia <i>Foreland</i> , margem extensional

Corpos de Paleovale (tipo PV) - Estes corpos são distinguidos pela sua forma em faixa e associam-se a desconformidades regionais, tendo dimensões que vão desde dezenas de quilómetros de comprimento, a alguns quilómetros de largura e dezenas de metros de espessura. Este tipo define o curso de meandros incisos, com maior ou menor sinuosidade, cujo preenchimento pode ser estritamente fluvial ou conter uma componente estuarina. A estrutura interna pode ser homogénea ou conter fácies variadas, com geometrias de bancos e canais, formando armadilhas compostas por dois estilos diferentes.

Este estilo só ocorre onde o preenchimento do paleovale é inserido numa camada de material impermeável e requer, naturalmente, uma camada selante no seu topo de forma a gerar uma armadilha para hidrocarbonetos. Por outro lado, o paleovale pode ser dobrado num anticlinal.

Menos vulgarmente, é possível gerar-se uma armadilha com contornos mecânicos paleogeomórficos, quando uma actual armadilha ocorre onde a erosão fluvial penecontemporânea esculpe o topo da formação de arenito e forma diversos terraços (Miall, 1996).

Corpos em Camada (tipo SH) - Este tipo é formado em qualquer ambiente tectónico, geralmente no desenvolvimento de superfícies amplas com relevo. Para a existência de uma armadilha deste tipo é necessário um mecanismo estrutural que permita o fluído ficar acumulado no corpo. Frequentemente, este tipo de corpos é encontrado em anticlinais fracturados onde os reservatórios em arenitos são cobertos por uma camada impermeável.

No estudo deste tipo de reservatórios, a estrutura interna pode ser considerada, em primeira instância, homogénea, enquanto que, através de estudos mais aprofundados dão resultados heterogéneos, sendo assim bastante importante a monitorização de fluxos e outros dados como os sísmicos, para o desenvolvimento do estudo na sub-superfície e melhoramento da análise de exploração potencial do reservatório.

Corpos de Canal e Bancos (tipo CB) – Os reservatórios do tipo CB são caracterizados pelas suas reduzidas dimensões de reservatório individual. No entanto, a junção destas pequenas partes, se contiverem hidrocarbonetos em todas elas, pode constituir um reservatório composto com amplas dimensões.

A exploração deste tipo de formações pode ser bastante difícil, tendo sido denominados por Weber e Van Geuns reservatórios ‘labirínticos’ ou ‘*jigsaw*’, reflectindo os padrões de fluxo impostos pela estratigrafia muito confusos. As armadilhas existentes são formadas essencialmente através dos processos estratigráficos e o seu estudo para posterior exploração requer um conhecimento exaustivo destas áreas (Miall, 1996).

Muitos destes reservatórios são desenvolvidos em lentículas assimétricas formadas em bancos em ponta, particularmente onde esta estrutura é ladeada na parte superior por preenchimentos de canal em material fino formados aquando a desactivação do canal e a sedimentação nos bancos terminada.

Podem ser igualmente desenvolvidos, reservatórios onde o corpo tem uma forma mais lenticular, que representam um preenchimento de canais do tipo linear, comuns em ambientes de planícies deltaicas.

2.6 AMOSTRAGEM DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS

A modelação de reservatórios de qualquer tipo é tanto mais enriquecida quanto maior for a informação disponível e a sua qualidade. Dado que as zonas a explorar se encontram em profundidade, as observações têm, na maioria, de ser feitas indirectamente. A análise de um reservatório é um processo complexo e tem de ser trabalhado computacionalmente em modelos de simulação numéricos. A modelação de reservatórios, sobretudo de canais fluviais, contém alguns constrangimentos, entre os quais os seguintes:

1. Os canais têm formas e geometrias irregulares;
2. A distribuição espacial dos canais só pode ser conhecida em poucas localizações, onde se situam os poços;
3. A permeabilidade e porosidade estão correlacionadas e são espacialmente dependentes;
4. A informação é escassa;
5. As técnicas de medição têm precisão e exactidão limitada;
6. Existem erros na amostragem;
7. Os modelos aplicados não são exactos, por isso um bom modelo deve quantificar a incerteza.

Existem diversos processos de amostragem que caracterizam diferentes propriedades que se pretendem estudar nestes casos. Os primeiros furos de exploração em reservatórios de petróleo dão origem a informação mais detalhada das formações, como logs e carotes, de onde podem ser retiradas várias características como estão descritas na figura 2.20.

A prospecção geofísica é também bastante relevante para a obtenção de dados da área em estudo, da qual se podem destacar:

- Os estudos sísmicos, que envolvem a geração e propagação de ondas sísmicas no subsolo reflectindo para a superfície quando encontram uma descontinuidade. Este método, para o caso de canais, pode induzir alguns erros uma vez que alguns corpos possuem dimensões reduzidas e um fraco contraste acústico, devendo-se utilizar a prospecção sísmica aliada a informações já obtidas através de outros ensaios. Por outro lado, a sísmica 3D confere resultados bastante bons em canais e depósitos do tipo PV e CB e mesmo na definição da heterogeneidade de reservatórios em tipos SH (Kuznetsova, 2012).

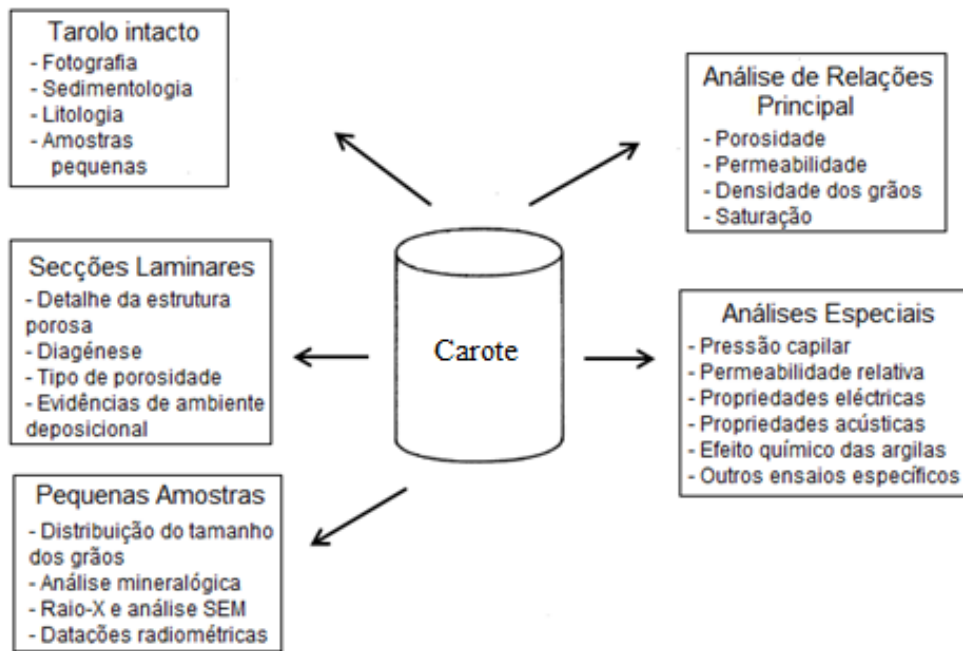


Figura 2.20 – Propriedades obtidas em sondagens (adaptado de Archer e Wall, 1986).

- Os estudos electromagnéticos, que utilizam radiação electromagnética na banda micro-ondas (frequência UHF/VHF) do espectro radio, emitindo pulsos para traçar uma imagem da subsuperfície através da captação do sinal de resposta das estruturas em profundidade. Estas reflexões ocorrem nas discontinuidades com contraste de propriedades eléctricas. Quando o atravessamento do sinal se dá de melhor forma havendo pouca reflectividade, é um bom indicador para areias não-consolidadas, cascalhos e arenitos secos. Esta técnica tem aplicação essencialmente no estudo da heterogeneidade de reservatórios.

Outros estudos, como a análise de paleocorrentes podem revelar-se importantes na medida em que podem indicar a orientação dos bancos e mudanças no canal, assim como a variabilidade direccional dentro de uma unidade estratigráfica; e mudanças verticais na direcção de fluxo dentro de uma secção, indicando a interacção de sistemas fluviais ou mudanças de orientação do sistema.

Outro método utilizado é o clinómetro que detecta e mapeia os mergulhos de unidades sedimentares, sendo uma técnica muito utilizada na indústria, por exemplo, na Schlumberger. O interesse neste tipo de estudo reflecte-se pela capacidade de mapear inclinações de superfícies de 4ª e 5ª ordem, correspondendo ao topo de bancos ou base de canais, desenhando a relação entre estes e, assim, a forma e orientação de diferentes corpos. Da mesma maneira, pode identificar superfícies de erosão de 2ª e 3ª ordem que podem facilitar a análise de macroformas.

Este método tem, no entanto, alguns constrangimentos devido à escala de aplicação que está limitada a algumas dezenas de centímetros ou menos, para além de produzir diferentes tipos de superfícies que podem provocar confusões na sua interpretação (Kuznetsova, 2012).

Os mapas de contorno estrutural ou mapas de litofácies dão também informações que auxiliam na modelação. Os primeiros identificam linhas em intervalos regulares, representativas da profundidade ou espessura de igual valor. Os mapas de litofácies mostram variações litológicas e como estas variam horizontalmente dentro da formação, dando noção da proporção de arenitos e argilas ou outro tipo de rocha presente.

3. MÉTODOS

3.1 ESTADO DA ARTE

A modelação geoestatística e de fluídos em reservatórios petrolíferos iniciou-se em meados das décadas de 70 e 80 do século passado (Journel *et al*, 1998). Vários factores contribuíram para esse incremento, nomeadamente, o desenvolvimento de novos algoritmos de estimação e simulação geoestatística, os fortes investimentos por parte das empresas de que resultaram novas tecnologias de prospecção, como a sísmica 3D e *logs* de alta resolução e, não menos importante, o incremento da capacidade de processamento dos computadores e a sua vulgarização.

Os dados que podem ser obtidos de um reservatório são de vários tipos e escalas, mas de alguma forma um bom modelo deve inclui-los a todos nas várias etapas da sua construção (Rosa *et al*, 2006; Quental *et al*, 2012). Estes dados permitem quantificar as propriedades estáticas do reservatório (morfologia, fácies, porosidade e permeabilidade) e as propriedades dinâmicas (saturações em fluídos, pressões, migração de fluídos e produção por poço). Um modelo do reservatório é uma construção ou imagem em computador do reservatório, e inclui as componentes estáticas e as componentes dinâmicas (Almeida *et al*, 1996; Almeida, 1999). A modelação inicia-se sempre com a componente estática, que recorre à geoestatística e algoritmos de simulação estocástica, a que se segue a componente dinâmica, com a simulação de fluxo (Lei de Darcy e balanço de massas) e calibração do histórico (*history match*). Os modelos são continuamente actualizados nestas duas componentes, estática e dinâmica, à medida que é recebida nova informação. Um modelo deve reproduzir o histórico de produção para poder ser considerado fiável na previsão do desenvolvimento do reservatório nos intervalos de tempo subsequentes.

Os modelos estocásticos são os mais aplicados na caracterização das propriedades estáticas dos reservatórios porque permitem gerar vários cenários equiprováveis das variáveis de estudo (Almeida, 2010b). Estes vários cenários transportam o que se designa por incerteza, onde a dispersão local das soluções é a medida de incerteza. Maior dispersão das soluções implica maior incerteza, ou seja, falta de informação ou informação próxima contraditória. Em contraponto com os modelos estocásticos, os modelos deterministas (digitalização de objectos após interpretação geológica) têm muitas limitações na caracterização de reservatórios, principalmente porque a informação disponível é escassa e, por isso, as soluções deterministas são muito subjectivas pelo que nenhuma empresa os utiliza em exclusivo. Mesmo assim, a heterogeneidade dos reservatórios é controlada pela distribuição espacial das fácies, o que nem

sempre é fácil de caracterizar. Os modelos estocásticos usam diferentes formalismos de condicionamento aos dados conhecidos, porém, possuem alguma dificuldade em capturar e reproduzir longas continuidades espaciais e sinuosidades dentro de corpos geomorfológicos complexos, podendo falhar na previsão da conectividade dos corpos de alta permeabilidade.

Nos últimos anos, os reservatórios fluviais têm sido um alvo privilegiado do desenvolvimento de novos algoritmos estocásticos. Estes estudos são desafiantes, porque a geometria dos canais de areia é meandriforme e com secção semielíptica, e efectivamente as estatísticas espaciais clássicas biponto descrevem mal estas características morfológicas. Em simultâneo, o modelo do reservatório tem de ser condicional à informação existente, que pode incluir sísmica e *logs* de poços. As actuais abordagens de modelação de reservatórios fluviais podem encaixar-se nas seguintes classes de algoritmos:

- I) Simulação da indicatriz com estatísticas biponto
- II) Simulação da indicatriz com estatísticas multiponto
- III) Simulação estocástica por objectos em estrutura vectorial

A simulação da indicatriz com estatísticas biponto (ou do tipo variograma ou covariância espacial da indicatriz) destina-se a gerar imagens binárias em estrutura matricial da morfologia dos canais de areia. As propriedades petrofísicas são modeladas em fase posterior, condicionadas à morfologia do canal e do não canal. Os algoritmos de simulação da indicatriz podem ser a simulação Gaussiana truncada ou, mais recentemente, a simulação sequencial da indicatriz. Nestes algoritmos, para gerar as estruturas meandriformes são consideradas fortes anisotropias nos variogramas (por exemplo relações de amplitudes de 5000 m para 50 m, relativamente comprimento e largura dos canais) e orientações locais (Luís e Almeida, 1997). As amplitudes do variograma e a relação de anisotropia condicionam fortemente os resultados e o estabelecimento destes valores é quase sempre empírico, ou seja, por tentativa e erro testam-se vários cenários e analisam-se os resultados até que o padrão meandriforme dos resultados seja geologicamente aceitável. Os mapas de orientações locais, baseados em ângulos azimutais, podem ser gerados por estimação ou simulação a partir de informação de poços ou por afinidade com um modelo digital de terreno. Esta classe de algoritmos gera imagens da estrutura meandriforme de canais, mas não têm a possibilidade de gerar a secção semielíptica, ou ter em conta a assimetria da largura. Todavia, a forma da secção e a assimetria são questões que dependem da resolução espacial horizontal e vertical dos blocos reservatório, pelo que com a dimensão de blocos adequada a aproximação é realista. As imagens geradas tendem a ser muito diferentes entre si, nomeadamente o padrão meandriforme dos canais, porque são condicionadas apenas às estatísticas biponto, e este aspecto pode ser uma vantagem ou desvantagem.

A simulação da indicatriz com estatísticas multiponto recorre a uma estratégia diferente da anterior, porque parte-se de uma imagem determinista de um canal chamado de treino em estrutura matricial (Strebelle, 2002). Ou seja, ao invés de testar variogramas e avaliar resultados, parte-se de uma imagem que representa o resultado pretendido, avaliam-se estatísticas multiponto dessa imagem e simulam-se novas imagens em estrutura matricial condicionadas a estas estatísticas multiponto. As estatísticas multiponto são conceptualmente mais ricas do que as biponto, porque incluem, pelo menos em parte, as estatísticas biponto de menor passo. Para aferir as estatísticas multiponto recorrem-se aos chamados templates, que são as matrizes de amostragem da imagem de treino. A sua forma pode ser variada, simétrica ou assimétrica, idealmente deve-se desenhar um template o mais pequeno possível mas que quantifique adequadamente a morfologia da imagem. Quanto maior for o template menor será o universo de soluções obtidas com a simulação. Templates demasiado pequenos também geram imagens que têm pouco a ver com a imagem de treino. A simulação multiponto é um dos algoritmos onde se assiste, nos dias de hoje, a um investimento continuado de investigação, sobretudo ao nível da programação em árvore e paralelização, porque computacionalmente é muito pesado. Mesmo com a tecnologia actual, os algoritmos multiponto para serem aplicados à escala de um reservatório em tempo útil estão limitados a templates com cerca de 90 células e para morfologias binárias. Na maior parte das vezes são a 2D. Por exemplo, um template pequeno com cinco por cinco células a 2D, onde em cada célula podem ser observados os códigos zero e um admite teoricamente 33.554.432 de combinações que têm de ser registadas em memória. Se existir informação condicionante de poços, as células que contém estes valores iniciam-se com os valores reais pelo que a simulação com estatísticas multiponto é facilmente condicional a dados de poço. Na simulação multiponto, tal como na morfologia biponto, não são tidos em conta a variação de fácies ao longo da secção do canal nem as questões de assimetria da forma. Tal como na simulação com estatísticas biponto, estes itens podem ser irrelevantes se a dimensão da malha de blocos majorar esta escala de pormenor. Embora tenha limitações computacionais, é um conceito de simulação simples e que funciona.

A simulação estocástica por objectos em estrutura vectorial é uma tecnologia alternativa às anteriores e com potencial para gerar resultados morfológicos mais realistas. Como é um algoritmo de simulação estocástico tem a característica de gerar vários cenários equiprováveis dos canais podendo avaliar-se a incerteza tal como em qualquer simulação estocástica em estrutura matricial. Estes modelos vectoriais recorrem a formas geométricas simples como rectângulos ou meias elipses para a aproximação das secções. A geração de imagens é feita seguindo estas estruturas vectoriais simples, secção a secção, por condicionamento de outros factores como os ângulos azimutais, que vão formando o eixo principal do canal (esqueleto do

canal). Alguns destes algoritmos têm em conta a evolução temporal da formação dos canais, pelo que entram na classe designada de algoritmos genéticos. A geração da morfologia meandriforme dos canais pode recorrer a imagens matriciais de azimutes locais ou então à simulação estocástica dos próprios azimutes dos canais. No primeiro caso, as imagens podem ser geradas da mesma forma como foi referido para a simulação da indicatriz, ou seja, por simulação de azimutes ou por analogia com uma imagem de um modelo digital de terreno (Kuznetsova, 2012; Kuznetsova *et al*, 2014). Outra alternativa é a simulação de azimutes, a partir de uma estrutura meandriforme de treino onde são medidos os azimutes. Qualquer alternativa que envolva a estimação ou simulação de azimutes normalmente funciona mal, ou tem de ser aplicada com limitações, porque a variável ângulos azimutais é uma variável circular, ou seja, varia entre 0° e 360° e a diferença angular não corresponde à diferença absoluta de valores.

Em síntese, a principal vantagem dos modelos de simulação estocásticos é a quantificação da incerteza (Soares, 2000). Em reservatórios, estes processos podem influenciar o ritmo de produção de hidrocarbonetos, podendo este ser otimizado consoante leis de distribuição de parâmetros dinâmicos relacionados com as características petrofísicas e da quantidade de hidrocarbonetos existente na litofácies. Qualquer que seja o método ou os métodos escolhidos para a simulação, no modelo base devem ser consideradas hipóteses de partida e simplificações apropriadas ao conjunto de dados iniciais fornecidos e à escala com que são apresentados os resultados. Os resultados têm igualmente de ser coerentes com o que é conhecido do sistema em estudo.

3.2 METODOLOGIA

Embora do ponto de vista conceptual a geometria dos canais seja simples, existem vários itens, que quando conjugados, tornam complexo o problema de modelação:

- A geometria conceptual dos canais de areia é meandriforme e de secção semielíptica, tem por isso apetência natural para ser representada topologicamente por linhas poligonais, ou seja, em estrutura vectorial.
- Ao longo de uma secção de um canal de areia, a deposição dos sedimentos não ocorre por igual, existe segregação em fácies, quer lateralmente quer em profundidade. Isto significa que as propriedades petrofísicas (porosidade e permeabilidade) ao longo da secção do canal não são homogéneas e um modelo realista deve ter em conta esta segregação conceptual.

- A secção semielíptica dos canais é assimétrica relativamente ao esqueleto do canal, e o grau de assimetria é função da intensidade da curvatura local.
- Os modelos morfológicos, de fácies e de propriedades petrofísicas destinam-se a serem utilizados em simuladores de fluídos e estes utilizam sempre matrizes de blocos ou células. Mesmo que estas malhas sejam do tipo adaptadas às estruturas meandriformes, é sempre necessário que as propriedades sejam calculadas no final para um modelo em estrutura matricial.

Estes itens, ou características que conferem realismo aos modelos, condicionam as variantes com que actualmente é feita a modelação de reservatórios siliciclásticos, em particular porque a conjugação simultânea que é o ideal pode tornar a modelação computacionalmente inviável à escala do reservatório. Assim, um modelo deverá ter em conta alguns, ou idealmente todos estes itens, adoptando as necessárias simplificações resultantes da escala da malha de blocos do reservatório.

A metodologia proposta para a modelação de canais de areia em reservatórios siliciclásticos tem como objectivo ter em conta simultaneamente os quatro itens referidos. Subdivide-se em quatro fases principais: i) preparação dos dados e estabelecimento das condições de partida; ii) geração da morfologia dos canais por simulação de objectos vectoriais a 3D (esqueleto e limites das margens e inferior); iii) conversão dos canais (objectos vectoriais) para a malha de blocos do reservatório com a atribuição de porosidades locais; iv) construção de curvas de reservas potenciais em óleo em função da intensidade vs. comprimento dos canais simulados e avaliação da incerteza.

A preparação dos dados de partida compreende o estabelecimento de uma malha de blocos do reservatório (dimensões máximas, resolução horizontal e vertical de cada bloco), leis cumulativas das dimensões largura e profundidade dos canais, uma ou várias imagens de treino de canais onde esteja identificada a linha poligonal esqueleto.

A representação dos canais recorre a duas formas de representação espacial, o vectorial para a fase da geração da morfologia e o matricial na fase de conversão da morfologia dos canais para porosidades equivalentes. A metodologia é de simulação estocástica por objectos, porque faz a geração de vários cenários equiprováveis da estrutura dos canais, a que correspondem vários cenários de porosidade. Cada cenário pode ser avaliado do ponto de vista das reservas potenciais de óleo (*hydrocarbons-in-place* – HIP). A conversão da porosidade para permeabilidade equivalente não foi explorada neste trabalho mas pode ser feita por regressão entre a porosidade e a permeabilidade.

Na simulação da morfologia dos canais de areia propõe-se a utilização e condicionamento a estatísticas multiponto das classes de azimutes, o que constitui a inovação deste trabalho. Habitualmente as estatísticas de simulação multiponto são utilizadas sobre imagens de treino matriciais e binárias, a 2D ou 3D, de forma a reproduzirem padrões binários avaliados em templates de várias formas. A simulação multiponto clássica funciona bem para pequenas regiões mas é pouco eficiente para a simulação de um reservatório inteiro, sendo cada vez mais ineficiente quanto maior for o template (que é necessário para capturar objectos com elevada complexidade morfológica) e se existirem mais de duas categorias de geomateriais. Refira-se ainda que no canal de areia a porosidade não é constante e varia lateralmente e em profundidade, de acordo com critérios estratigráficos e granulométricos, algo que se torna impossível de reproduzir num algoritmo clássico multiponto.

A metodologia envolve os algoritmos geoestatísticos de Simulação e Co-simulação Sequencial Directa na preparação de dados pelo que no ponto seguinte são apresentados de forma sumária estes conceitos (Deutsch e Journel, 1992; Soares, 2001; Nunes e Almeida, 2010). Seguidamente detalha-se a preparação de dados, o algoritmo de simulação da morfologia dos canais e a estimação dos valores de porosidade na malha de blocos do reservatório.

3.3 FUNDAMENTOS DE GEOESTATÍSTICA

Soares (2000) refere a geoestatística como a caracterização da dispersão espacial e espaciotemporal das grandezas que definem a quantidade e qualidade de recursos naturais. Esta definição já compreende a aplicabilidade da geoestatística a vários casos de estudo, incluindo sistemas ecológicos, variáveis ambientais, aquíferos, depósitos minerais e reservatórios petrolíferos.

As variáveis modeladas por metodologias geoestatísticas podem ser de dois tipos: contínuas ou categóricas (Goovaerts, 1997). As primeiras são variáveis que, à partida, podem tomar um número infinito de valores reais e correspondem a grandezas medidas. Dentro deste tipo, pode haver as variáveis de intervalo, quando o zero é arbitrariamente fixado numa escala, podendo haver valores negativos, e rácios, quando o zero define a ausência da característica a ser estudada. As variáveis categóricas ou discretas podem tomar um conjunto discreto de valores numéricos ou categorias disjuntivas, podendo verificar ou não relação de ordem.

Para a realização de um modelo geoestatístico existem duas abordagens, a simulação e a estimação (Soares, 2000). Na estimação (krigagem) é realizado um modelo que apresenta uma solução, respeita a amostragem, é não enviesado e minimiza a variância do erro de estimação.

Na simulação podem ser obtidas várias imagens de modelos equiprováveis, respeitando tanto as amostras como os variogramas e várias estatísticas. A variabilidade entre as imagens simuladas quantifica a incerteza local e global, que balança a localização e heterogeneidade e continuidade espacial dos dados reais.

3.3.1 ANÁLISE ESPACIAL

A geoestatística assenta na avaliação da continuidade espacial das variáveis em estudo, através da variografia e ajuste de funções teóricas aos variogramas experimentais (Goovaerts, 1997; Soares, 2000). Nesta análise utilizam-se a posição de pares de pontos, $Z(x)$ e $Z(x + h)$, onde h é cada vector que liga dois pontos do par.

Para diferentes vectores h , pode-se quantificar o valor do variograma experimental ou estimador do variograma. Para um conjunto de dados experimentais é calculado pela média do quadrado da diferença entre $Z(x)$ e $Z(x + h)$, pela expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

onde $N(h)$ é o número de pares de pontos considerados para cada classe de comprimento do vector h (passo).

A representação gráfica dos valores do variograma experimental em função da distância (módulo do vector h) permite avaliar a distância máxima até onde existe correlação entre amostras (amplitude), e a presença de várias estruturas, anisotropias geométricas e zonais e o chamado efeito de pepita.

O efeito de pepita (C_0) é uma fracção do patamar que quantifica a presença de erros de amostragem e variabilidade a distâncias não reconhecidas pelo espaçamento da amostragem. Este ruído reflecte-se no ajustamento de variogramas, onde a curva média intersecta o eixo yy (do variograma) num valor acima da origem.

Uma vez que as amostras são realizadas frequentemente a espaçamentos diferentes, é comum seleccionarem-se pares de pontos e utilizarem-se tolerâncias angulares e de distâncias, que executam variogramas direccionais por classes angulares.

O ajustamento do variograma experimental é uma etapa fulcral e tem carácter subjectivo. É na opção tomada de ajustamento (tipo de funções – esférica, exponencial ou outra, amplitude e patamares) que ficam reunidas as características estruturais do fenómeno e as etapas

subsequentes de estimação ou simulação. O objectivo do ajustamento é modelizar e sintetizar os principais padrões de continuidade espacial, reproduzindo as características gerais de continuidade do fenómeno em estudo (Soares, 2000).

3.3.2 SIMULAÇÃO SEQUENCIAL

A simulação geoestatística é um procedimento estocástico destinado a gerar imagens que reproduzam de forma realista a distribuição espacial e a incerteza associada às variáveis trabalhadas no âmbito das Ciências da Terra. As imagens obtidas reflectem as características do recurso estudado, nomeadamente a variabilidade do conjunto de dados, as leis de distribuição e a continuidade espacial. O resultado é um conjunto de imagens equiprováveis com as mesmas estatísticas dos dados experimentais (histograma e variograma ou continuidade espacial). Tipicamente com a simulação o objectivo não é obter a característica média da variável em estudo (este é o objectivo da estimação), mas sim obter várias soluções que correspondam a pontos de vista com a mesma probabilidade de ocorrência, e simultaneamente quantificar a incerteza.

Existem vários algoritmos na geoestatística para a geração de imagens simuladas, no presente caso de estudo utilizou-se a simulação e co-simulação sequencial directa na fase de preparação de dados para o modelo de simulação estocástica de canais por objectos pelo que se faz este breve enquadramento teórico destes métodos.

Se se designar por $Z(x)$ a variável a simular, $Z_S(x)$ o conjunto de valores simulados e $Z(x_\alpha)$, $\alpha = 1, \dots, n$ o conjunto de dados experimentais disponíveis, os resultados da simulação devem verificar as seguintes condições:

1. Para cada valor de z , $prob\{Z(x_\alpha) < z\} = prob\{Z_S < z\}$
2. $\gamma(h) = \gamma_S(h)$, sendo $\gamma(h)$ e $\gamma_S(h)$ respectivamente o variograma dos dados experimentais e o variograma dos valores simulados.
3. Em todas as localizações dos dados experimentais x_α , os valores verdadeiros $Z(x_\alpha)$ e os valores simulados $Z_S(x_\alpha)$ coincidem $Z(x_\alpha) = Z_S(x_\alpha)$.

A simulação sequencial é baseada na relação de Bayes, que transforma o processo de condicionamento num procedimento simples e sucessivo que pode ser generalizado pela relação:

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1) \cdot F(Z_2|Z_1) \cdot F(Z_3|Z_1, Z_2) \dots F(Z_N|Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1})$$

Se se considerar uma função conjunta de N variáveis aleatórias e n valores experimentais condicionantes, $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N | (n))$, para simular um conjunto de N valores z_1, z_2, \dots, z_N de $F(N)$, o processo pode ser resumido nas seguintes etapas:

- i) Simulação da primeira variável z_1 a partir da função de distribuição cumulativa condicional $F(Z_1 | (n))$. Uma vez simulado, esta variável serve de condicionamento para os restantes valores, e a informação condicionante é acrescida de n para $n + z_1$;
- ii) Simulação da segunda variável z_2 a partir da função de distribuição cumulativa condicional $F(Z_2 | (n + z_1))$. A informação condicionante é acrescida de $n + 1$ para $n + 2$;
- iii) Repetir o processo até completar toda a simulação das N variáveis.

É importante referir que as N variáveis aleatórias dependentes $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ podem representar a mesma propriedade referenciada espacialmente na malha de N células ou blocos a simular na área de estudo e que o objectivo é simular a mesma variável em várias localizações. Assim, para os n valores de informação condicionante $x_\alpha, \alpha = 1, \dots, n$, a lei de distribuição conjunta das N variáveis aleatórias é $F(N) = F(Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_N) | (n))$.

A principal limitação prática para a implementação deste procedimento é o desconhecimento das N leis cumulativas condicionais:

$$\begin{aligned} & \text{prob}\{Z(x_1) < z | (n)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_2) < z | (n + 1)\} \\ & \text{prob}\{Z(x_3) < z | (n + 2)\} \\ & \dots \\ & \text{prob}\{Z(x_N) < z | (n + N - 1)\} \end{aligned}$$

Journel e Alabert, 1989 propõem o uso da krigagem para a estimação destas leis cumulativas condicionais, em particular a krigagem da indicatriz para a simulação de variáveis categóricas e a krigagem multi-Gaussiana para as variáveis contínuas. Esta proposta leva à criação dos algoritmos de Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) e da Simulação Sequencial Gaussiana (SSG), respectivamente para variáveis categóricas e contínuas.

Como a sequência de simulação dos N nós é aleatória, assim como a simulação dos valores em cada nó por Monte Carlo, cada realização é independente. Todas as imagens são equiprováveis, e reproduzem o histograma e o variograma dos dados de partida.

3.3.2.1 Simulação e Co-simulação Sequencial Directa

A Simulação Sequencial Directa (SSD), ao invés da SSG, utiliza os dados da variável original sem quaisquer transformações. Por exemplo, a SSG utiliza uma transformação prévia dos dados para uma lei Gaussiana, fazendo a transformação inversa no fim. Este procedimento por vezes torna mais difícil a reprodução dos variogramas, principalmente para leis de distribuição muito assimétricas. Este efeito aumenta se forem utilizadas variáveis secundárias num procedimento designado de co-simulação.

A SSD conforme proposta por Soares, 2001, usa a média e variâncias locais para amostrar a lei de distribuição cumulativa global $F_Z(z)$, e com isso construir novas leis de distribuição cumulativas locais $F'_Z(z)$ com intervalos centrados no valor médio estimado e com a amplitude adequada para respeitar a variância local estimada. Estes parâmetros locais, a média e a variância, são estimados por krigagem simples no caso de se proceder a uma simulação ou por cokrigagem simples se se pretender fazer uma cosimulação (Soares, 2001; Almeida, 2010a):

$$[z(x_o)]^* - m = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}(z(x_{\alpha}) - m)$$

Uma forma de definir os intervalos e obter os valores simulados $z^s(x_o)$ de $F'_Z(z)$ é seleccionar um subconjunto de n valores contíguos $z(x_i)$ do histograma experimental global cuja média e variância dos valores seleccionados seja igual à média local estimada $[z(x_o)]^*$ e à variância estimada $\sigma_{ks}^2(x_o)$:

$$\frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n [z(x_i) - [z(x_o)]^*]^2 = \sigma_{ks}^2(x_o) \quad e \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) = [z(x_o)]^*$$

Outra forma de definir esta função é utilizar uma lei Gaussiana com o único propósito de fazer a amostragem dos intervalos de $F_Z(z)$, e não para transformar os dados originais em lei Gaussiana.

A SSD aplicada à simulação de uma variável $z(x_o)$ pode ser resumida pela aplicação dos seguintes passos:

1. Estabelecimento de um percurso aleatório por todos os nós da malha de blocos a simular.

2. Na localização do nó x_0 , a ser simulado, estimação por krigagem simples da média local $z(x_0)^*$ e variância local $\sigma_{sk}^2(x_u)$ condicional aos dados experimentais e aos nós previamente simulados (quando existam).
3. Definição dos intervalos para amostragem da lei de distribuição global $F_Z(z)$ com uma transformação Gaussiana $G([y(x_0)], \sigma_{ks}^2(x_0))$, onde $[y(x_0)]^* = \varphi([z(x_0)]^*)$, e φ é a transformada para valores Gaussianos da variável a simular.
4. Determinação do valor simulado $z^s(x_0)$:
 - a. Gerar um valor p de uma lei de distribuição uniforme $U(0,1)$,
 - b. Gerar y^s através da transformada $G(y(x_0)^*, \sigma_{sk}^2(x_0))$,
 - c. Retornar o valor simulado $z^s(x_0) = \varphi^{-1}(y^s)$ por transformação inversa do histograma para Gaussianos.
5. Repetir os passos 2-5 até todos os nós serem simulados.

3.4 SIMULAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS CANAIS DE AREIA

3.4.1 INFORMAÇÃO DE PARTIDA

A informação de partida para a construção do modelo do reservatório siliciclástico consiste em:

- Geração da malha de blocos do reservatório (coordenadas limites do reservatório, dimensões horizontal e vertical de cada bloco e número de blocos em cada direcção);
- Estabelecimento de leis cumulativas das dimensões largura e profundidade dos canais e estabelecimento de um valor de correlação entre a profundidade e largura. Esta informação pode ser obtida por interpretação geológica de formações similares em afloramentos e eventualmente por interpretação de cubos de sísmica;
- Preparação de uma ou várias imagens de canais de treino onde esteja identificada a linha poligonal esqueleto;
- Interpretação conceptual da variação da porosidade na secção do canal, com atribuição de valores médios de porosidade para as regiões / fácies previamente estabelecidas na secção.

No caso de estudo que se apresenta no capítulo seguinte, e para efeitos meramente ilustrativos, estes dados foram trabalhados como sintéticos todavia dentro de valores compatíveis com os encontrados na literatura. A aplicação informática desenvolvida no contexto deste trabalho (CHOMS v1.0) tem como entrada toda esta informação pelo que em casos de estudos reais será de esperar uma execução com performances semelhantes.

3.4.2 GERAÇÃO DOS ESQUELETOS DOS CANAIS DE AREIA POR SIMULAÇÃO MULTIPONTO DE CLASSES DE AZIMUTE E APLICAÇÃO DAS DIMENSÕES LARGURA E PROFUNDIDADE

A geração dos esqueletos dos canais de areia compreende as seguintes sub-etapas:

- 1) Digitalização do esqueleto dos canais de areia da imagem de treino como linhas poligonais abertas (ver figura 3.1a);
- 2) Regularização das linhas poligonais para n segmentos de recta de igual comprimento c (ver figura 3.1b);

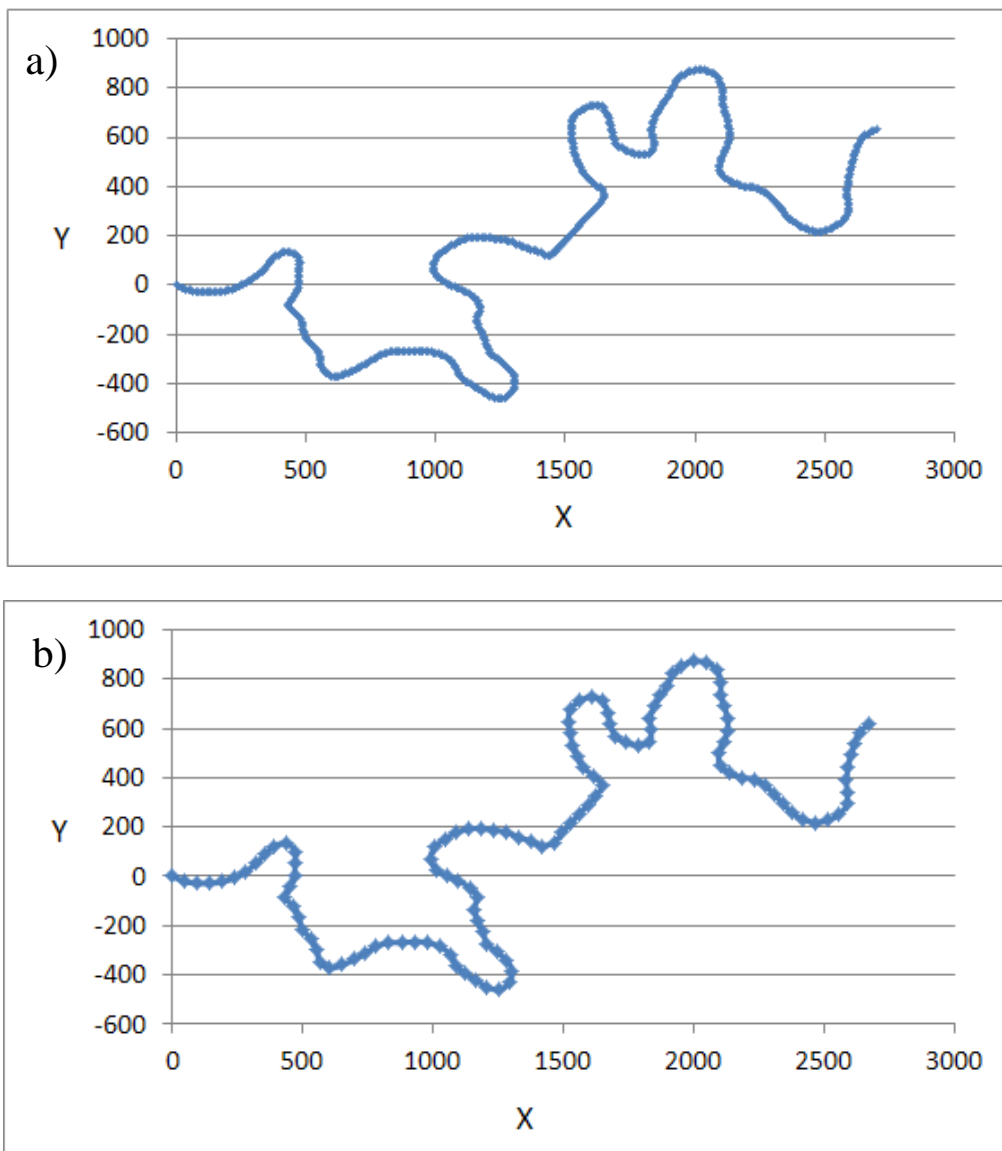


Figura 3.1 – Exemplo de um canal de treino (linha poligonal) a) não regularizada para intervalos constantes e b) após regularização para intervalos de 50 metros.

- 3) Determinação do ângulo azimutal de cada segmento de recta que constitui o canal de treino digitalizado ($A_z(x_i)$, $i = 1, \dots, n$). Os ângulos azimutais variam entre 0° e 360° (por convenção o sentido do Norte) e crescem no sentido dos ponteiros do relógio (figura 3.2a).

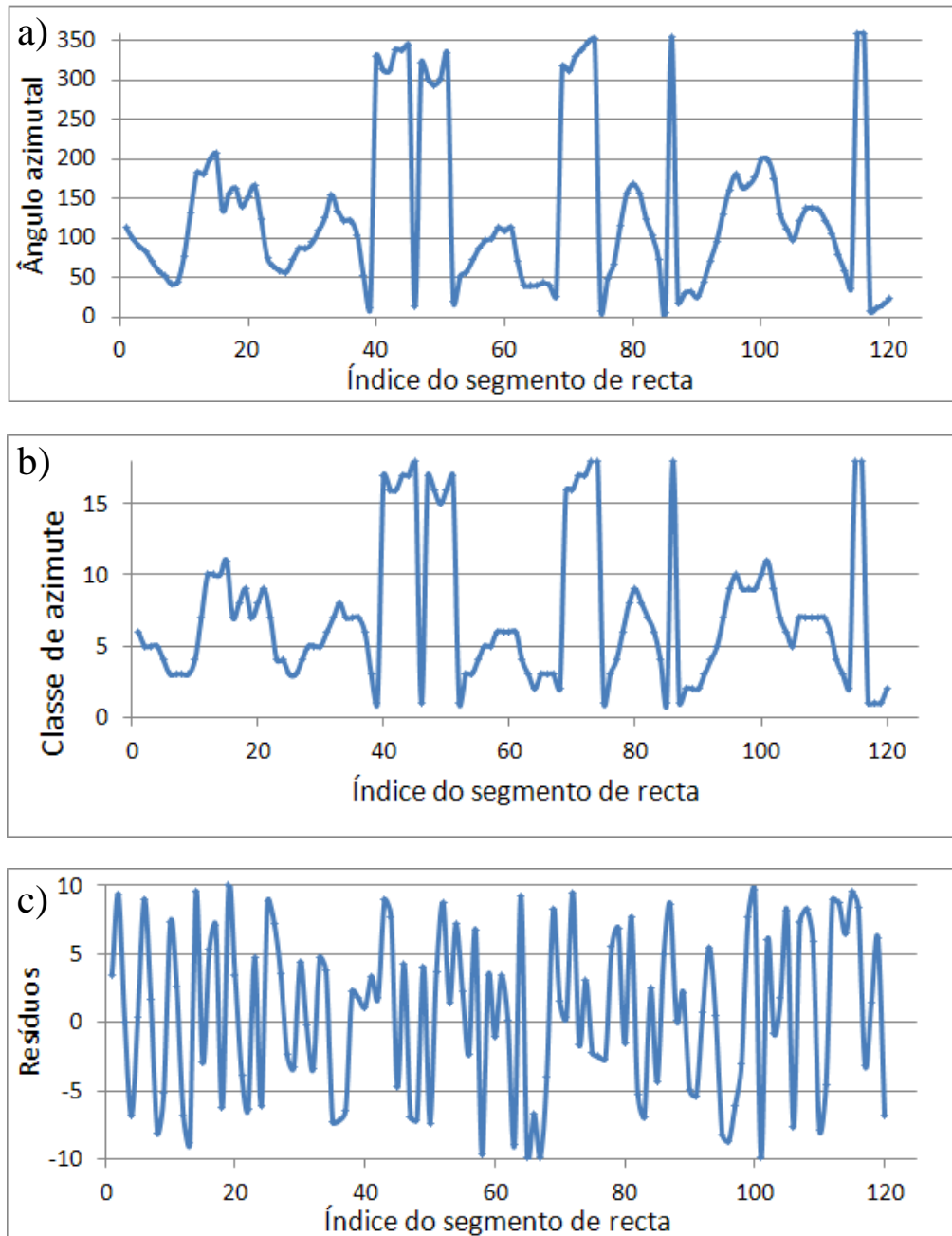


Figura 3.2 – a) Ângulos azimutais do canal de treino; b) Classes de azimute de 1 a 18 dos ângulos azimutais; c) Resíduos calculados entre o ângulo azimutal real e o ângulo médio da classe de azimute.

- 4) Conversão dos ângulos azimutais $A_z(x_i)$ para classes $C_{Az}(x_i)$. No presente caso de estudo, depois de alguns testes, optou-se por dividir os 360° em 18 classes de 20° . Cada ângulo azimutal é convertido para uma variável categórica com 18 modalidades (figura 3.2b). Simultaneamente, avaliam-se os resíduos $R(x_i)$, ou seja, para cada segmento de recta avalia-se a diferença entre ângulo azimutal calculado $A_z(x_i)$ e o ângulo azimutal que é o centro da classe $Az_C(x_i)$, $R(x_i) = Az(x_i) - Az_C(x_i)$ (figura 3.2c). Na prática observou-se que os resíduos seguem uma lei uniforme centrada nos 0° e com a amplitude da classe $[-10^\circ; 10^\circ]$.

Em síntese, os azimutes de cada canal de treino passam a ser representados por dois vectores unidimensionais, um com a lista de índices de classe de azimutes (variável categórica) e outro com os resíduos. Estes dois vectores contêm toda a informação morfológica do esqueleto* do canal de treino, e permitem reconstruir exactamente a forma original do canal a partir de um ponto origem.

- 5) Cálculo do variograma dos resíduos e ajuste de um modelo teórico.
- 6) Simulação de 10 vectores de resíduos por SSD com o variograma dos resíduos e condicional a uma lei uniforme no intervalo de amplitudes $[-10^\circ; 10^\circ]$.
- 7) Determinação de estatísticas multiponto das classes de azimute para um template unidimensional com uma dimensão previamente definida. Para o presente caso de estudo, e para efeitos ilustrativos, consideraram-se suficientes cinco segmentos de recta consecutivos $\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$. Na tabela 3.1 mostra-se um extracto do histograma multiponto, onde são combinadas todas as possibilidades de classes de azimute em conjuntos de cinco células consecutivas: $P\{s_1 = C_{Az}(i); s_2 = C_{Az}(j); s_3 = C_{Az}(k); s_4 = C_{Az}(l); s_5 = C_{Az}(m)\}$, com $i = 1, \dots, 18, j = 1, \dots, 18, k = 1, \dots, 18, l = 1, \dots, 18, m = 1, \dots, 18$. Embora possam existir no máximo 1 889 568 combinatórias possíveis das 18 classes em cinco células consecutivas (18 elevado a cinco), na prática o número de combinatórias observadas é muito menor da ordem de poucas centenas.

*O termo esqueleto é aplicado como a forma poligonal que estrutura o canal, não necessariamente simétrico à largura deste.

Tabela 3.1 – Exemplo ilustrativo de um histograma multiponto de classes de azimute de cinco células consecutivas.

Classes de azimute das células					Frequência
1	2	3	4	5	
1	1	1	1	1	0,013
1	1	1	1	2	0,004
1	1	1	2	2	0,004
1	1	2	2	2	0,008
1	1	2	3	4	0,004
1	1	17	16	16	0,004
...
18	18	18	1	1	0,004
18	18	18	18	1	0,004
18	18	18	18	18	0,004

- 8) Simulação dos esqueletos dos canais de areia no volume do reservatório. Para cada novo canal, faz-se a geração aleatória de um ponto origem do canal no volume do reservatório e geram-se sucessivamente por simulação (Monte Carlo sob o pseudo-histograma de probabilidades de pertença a cada classe) as classes de azimute condicionadas às estatísticas multiponto das classes de azimute determinadas no ponto anterior. À medida que são geradas as classes, estas são convertidas para o ângulo azimutal médio, e somam-se os resíduos previamente simulados. Com este procedimento reconstrói-se a linha poligonal que constitui o esqueleto do novo canal. De forma a dispersar os canais de forma homogénea no reservatório, a simulação dos canais evolui a partir do ponto origem com a mesma probabilidade nos dois sentidos. A simulação para um dos lados termina quando a linha poligonal do canal atinge a fronteira do reservatório. A geração aleatória do primeiro ponto do canal, e o avanço sucessivo e alternado para os dois lados, garante uma distribuição espacial tendencialmente uniforme dos canais no espaço do reservatório. Em trabalhos futuros a geração do primeiro ponto poderá ser condicionada a densidades locais de canais de areia que se pretendam impor no modelo.

Na simulação da classe de azimute no primeiro segmento de recta ainda não existem segmentos de recta adjacentes preenchidos, pelo que a probabilidade de pertença do segmento à classe de azimute $C_{Az}(i)$ é dada pela proporção global de classes de azimute:

$$P\{s_1 = C_{Az}(1)\} = \sum P\{s_1 = C_{Az}(1); s_2 = \forall; s_3 = \forall; s_4 = \forall; s_5 = \forall\}$$

$$P\{s_1 = C_{Az}(2)\} = \sum P\{s_1 = C_{Az}(2); s_2 = \forall; s_3 = \forall; s_4 = \forall; s_5 = \forall\}$$

...

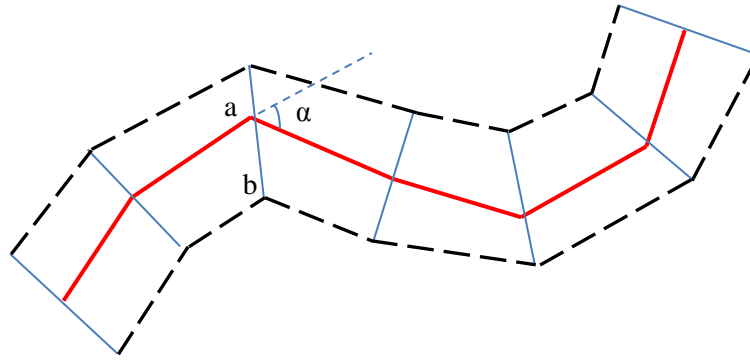
$$P\{s_1 = C_{Az}(5)\} = \sum P\{s_1 = C_{Az}(5); s_2 = \forall; s_3 = \forall; s_4 = \forall; s_5 = \forall\}$$

Um procedimento semelhante é adoptado para os segmentos adjacentes enquanto não são encontrados quatro vizinhos preenchidos (uso de um template adaptado). Durante a simulação é utilizado o template de cinco segmentos, isto é, a probabilidade de cada segmento de recta pertencer a uma classe de azimuth é estimada com base nos quatro segmentos de recta vizinhos, à esquerda ou à direita, conforme evolui a simulação.

Durante a simulação pode dar-se o caso de uma determinada sequência de classes de azimuthes se repetir indefinidamente, resultando num troço com repetição de padrões. Nesta situação, aplica-se a redução temporária do template, que passa a fazer a contabilização da probabilidade de cada classe com uma sequência mais curta de classes de azimuth.

Este caso acontece muito raramente, por exemplo, numa simulação de 25 canais com 2000 vértices cada, o número de ocorrências é inferior a três.

- 9) Depois de na etapa anterior ter sido obtido o esqueleto dos canais (linha poligonal) faz-se a atribuição das dimensões largura e profundidade em cada vértice da linha poligonal. Para tal, fez-se previamente a simulação de vectores destas dimensões de acordo com um histograma anteriormente definido destas variáveis. Utilizou-se a SSD para a simulação de vectores com a dimensão profundidade a que se seguiu a Co-SSD da largura. Considerou-se a correlação de 0,7 entre as duas dimensões. Para melhorar o realismo da morfologia dos canais de areia, a dimensão largura é aplicada de forma assimétrica relativamente ao esqueleto do canal, aparecendo deslocada para as margens esquerda ou direita de acordo com a orientação e raio de curvatura do canal (índice de assimetria). Para o efeito estabeleceu-se uma lei linear entre a relação de largura à esquerda e à direita do canal e a diferença de azimuthes entre segmentos de recta consecutivos (figura 3.3).



Índice de assimetria = $\frac{a}{b} = f(\alpha)$ com $a + b = \text{largura do canal}$

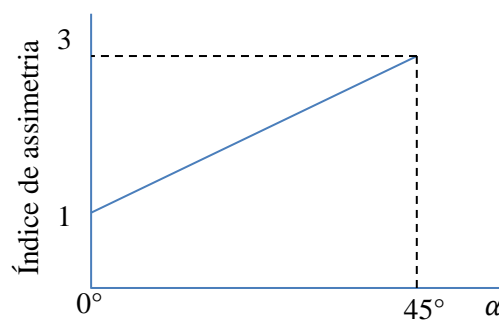


Figura 3.3 – Posicionamento assimétrico da dimensão largura do canal em função do ângulo de desvio entre dois segmentos de recta consecutivos.

A simulação da morfologia dos canais termina nesta etapa. Cada canal é representado topologicamente por quatro linhas poligonais, uma correspondente ao esqueleto (gerada na etapa 8), duas correspondentes à margem esquerda e direita do canal e outra na posição (x, y) do esqueleto mas deslocada na vertical da profundidade do canal. Na figura 3.4 mostra-se em pormenor uma fracção de um canal onde é visível o esqueleto simulado e as secções do canal posicionadas condicionalmente à curvatura.

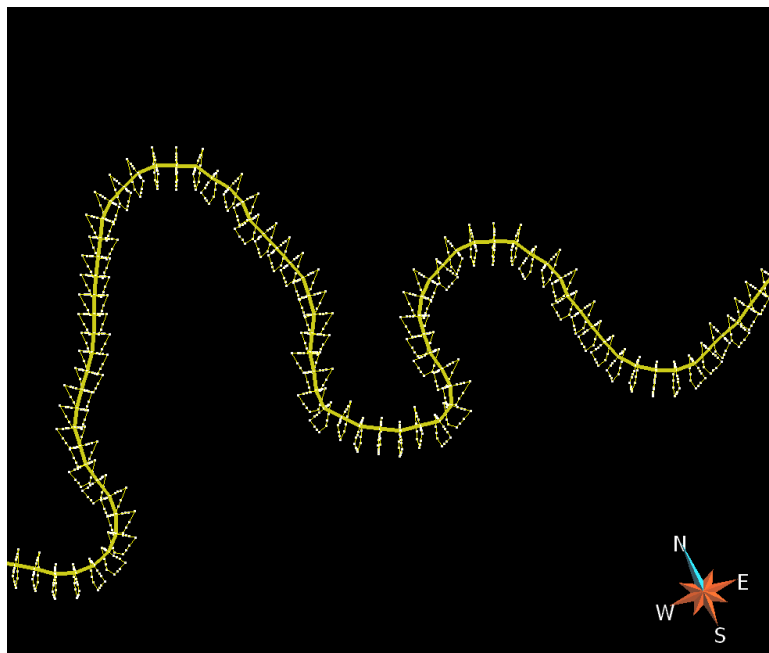


Figura 3.4 - Representação de uma fracção de canal simulada com visualização do esqueleto e secções de controlo posicionadas com igual espaçamento a cada 25 metros.

Refira-se que o conceito de simulação multiponto é aplicado na simulação dos canais para a simulação das classes de azimute, que é uma variável categórica representada a 1D. Embora no caso de estudo tenham sido consideradas 18 classes de azimute, o template contempla cinco células (segmentos de recta) a 1D pelo que a simulação é muito eficiente. Por exemplo, a geração da morfologia de 25 canais de areia demora poucos segundos.

3.5 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE NA MALHA DE BLOCOS DO RESERVATÓRIO

Na metodologia proposta, a avaliação da porosidade resulta da conversão do modelo morfológico vectorial 3D dos canais de areia para a malha de blocos do reservatório. Importa relembrar que cada canal de areia é representado topologicamente por quatro linhas poligonais, uma correspondente ao esqueleto do canal, duas às margens respectivamente esquerda e direita e outra com as coordenadas X e Y do esqueleto mais a profundidade do canal.

Para aumentar o realismo do modelo, na conversão de vectorial para matricial, teve-se em conta que na secção do canal a porosidade não é a mesma e varia quer lateralmente quer em profundidade de acordo com um modelo conceptual de fácies. Assim, de acordo com critérios geológicos e estratigráficos justificados no capítulo 2 com a segregação dos calibres dos

sedimentos, na secção do canal foram consideradas quatro zonas de porosidade diferenciada e que se ilustram na figura 3.5 (I – porosidade alta, cascalho; II – porosidade média, areia; III porosidade média-baixa, areia fina e IV – porosidade baixa, argila e areia). Considera-se ainda a fracção exterior aos canais (V) com porosidade nula. Esta diferenciação não depende da assimetria da largura e é aplicada do mesmo modo de acordo com a regra que é mostrada na figura 3.5.

A marcação das regiões é feita por pontos de controlo posicionados no topo do canal. Em cada um dos lados posicionam-se três pontos de controlo localizados respectivamente a $1/3$, $1/2$ e $2/3$ da largura, à esquerda ou à direita do esqueleto. Os pontos localizados a $1/3$ da distância à margem delimitam verticalmente as regiões IV que ocupam as áreas mais próximas da margem em rampa até metade da profundidade do canal. As regiões I, II e III posicionam-se sequencialmente na área central do canal conforme a figura 3.6. Lateralmente delimitam-se pelos pontos de controlo a $1/3$, $1/2$ e $2/3$ conforme está representado na figura 3.5.

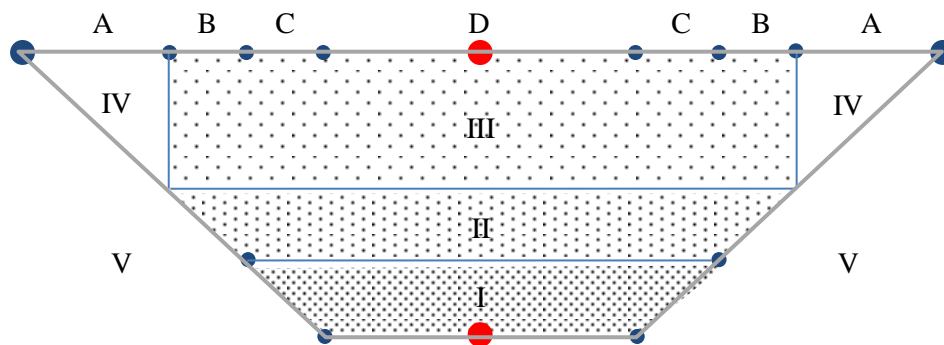


Figura 3.5 Modelo conceptual das regiões de porosidade na secção do canal e regras de construção a partir da topologia dos canais de areia (vértices de maior dimensão a cheio).

A implementação da regra das porosidades diferenciadas por fácies na secção do canal tem por objectivo determinar, para cada bloco do reservatório, qual a fracção de volume que ocupa cada região do tipo I, II, III, IV e V, conhecida a morfologia vectorial dos canais.

Para fazer a avaliação das fracções de porosidade de forma o mais rigorosa possível, e que simultaneamente possa ser executada em tempo útil, desenvolveu-se o seguinte procedimento geométrico de amostragem que envolve as etapas:

- 1) Geração da malha 3D de blocos do reservatório, optando-se por maior discretização ou menor espaçamento na direcção vertical;
- 2) Percorrer todos os blocos do reservatório por linhas e colunas (a 2D);

- 3) Para cada bloco do reservatório no plano XoY, gerar uma sub-malha de linhas de amostragem verticais entre o topo e a base do reservatório;
- 4) Para cada linha de amostragem, verificar se existe intersecção com a superfície do canal e caso exista, identificar o quadrilátero de intersecção (A, B, C ou D) conforme os pontos de controlo (entre a margem e o primeiro 1/3; entre 1/3 e 1/2; entre 1/2 e 2/3; entre 2/3 à esquerda e 2/3 à direita, etc.) (ver figura 3.6).

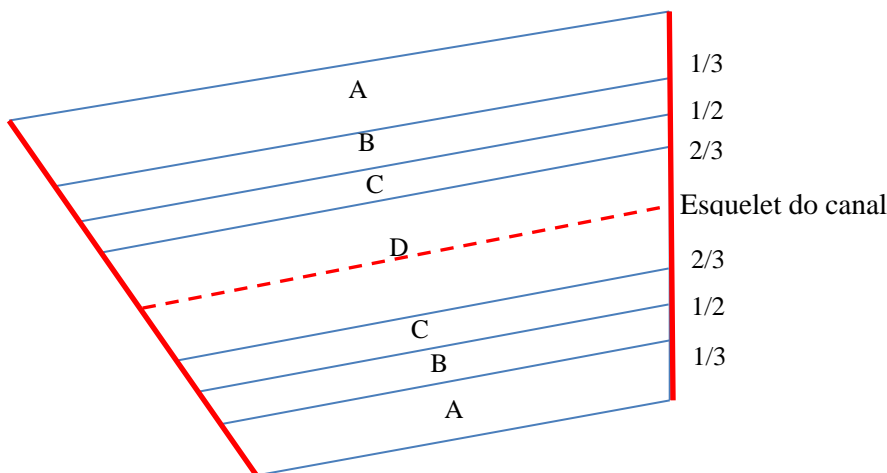


Figura 3.6 – Vista em planta de pormenor da representação vectorial de um incremento unitário de um canal de areia delimitado por duas secções (traços a cor vermelha). As linhas a cor azul representam os limites dos quadriláteros de controlo das regiões conforme indicados previamente na figura 3.5.

Todas as linhas de amostragem são iniciadas como não canal, ou seja, como de região V. Se a linha de amostragem intersectar a parte superior do canal pode fazê-lo nos quadriláteros A, B, C ou D e neste caso as fracções de participação das regiões na linha de amostragem é feita do seguinte modo:

- A) Intersecção num quadrilátero A – é atribuída à linha de amostragem uma fracção de região IV, neste caso a distância de um quarto da profundidade do canal com início na cota do topo do canal.
- B) Intersecção num quadrilátero B – é atribuída à linha de amostragem uma fracção de região III equivalente a metade da profundidade do canal e uma fracção de região II equivalente a um oitavo da profundidade do canal, sucessivamente e com início na cota do topo do canal.
- C) Intersecção num quadrilátero C – é atribuída à linha de amostragem uma fracção de região III equivalente a metade da profundidade do canal, uma fracção de região II equivalente a um quarto da profundidade do canal mais uma fracção de região I equivalente a um oitavo, tudo e sucessivamente com início na cota do topo do canal.

- D) Intersecção no quadrilátero D – é atribuída à linha de amostragem uma fracção de região III equivalente a metade da profundidade do canal, uma fracção de região II equivalente a um quarto da profundidade do canal mais uma fracção de região I equivalente a um quarto, todos sucessivamente com início na cota topo do canal.

Nesta fase, cada linha de amostragem fica segmentada verticalmente em vários troços com indicação de intersectar cada uma das regiões I, II, III, IV ou V. Depois de avaliadas todas as linhas de amostragem contidas na coluna de bloco do reservatório, para cada bloco do reservatório da coluna seleccionada são atribuídos os comprimentos das fracções das linhas de amostragem por região. Estes comprimentos são simultaneamente convertidos para proporções de comprimento, isto é, proporções de ocorrência de cada fácies. Na figura 3.7 ilustram-se as intersecções das linhas de amostragem com as quatro regiões / fácies dos canais, recorrendo a uma malha de pontos com espaçamento vertical de um metro.

As proporções de cada região são multiplicadas por valores de referência da porosidade para cada região de que resulta uma porosidade média para o bloco (ver figura 3.8).

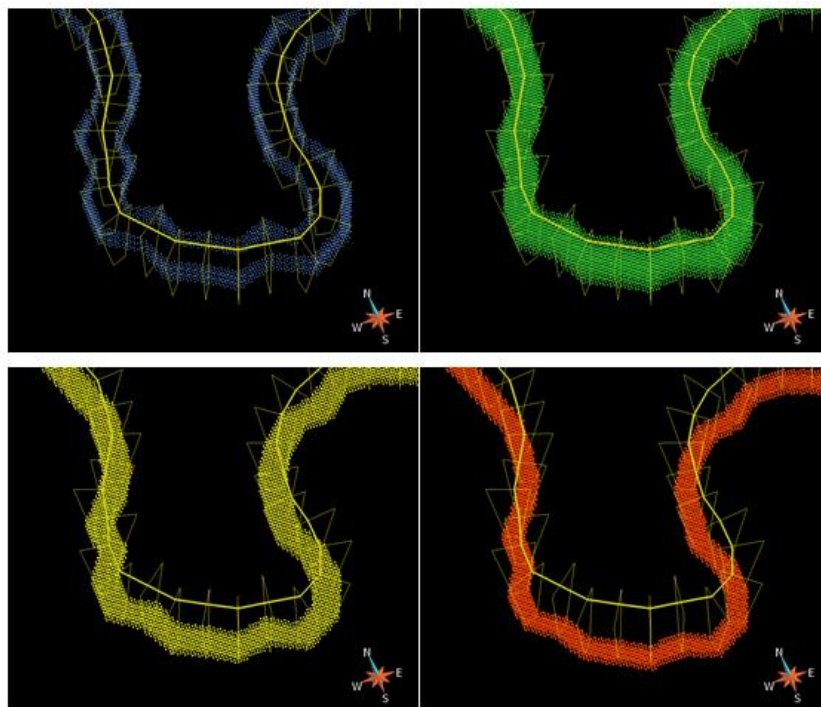


Figura 3.7 – Ilustração das quatro regiões amostradas para a estimação da porosidade dos blocos reservatório (I) maior porosidade a vermelho na base dos canais; (II) porosidade média-alta de cor amarela na parte intermédia dos canais; (III) porosidade média-baixa na parte superior dos canais; (IV) porosidade baixa nas margens esquerda e direita dos canais.

Importa referir que na simulação da morfologia os canais de areia podem aparecer sobrepostos e, no mesmo canal, acontece frequentemente que as margens meandrizadas se aproximam resultando em canais sobrepostos. Para tratar estas situações, em caso de várias intersecções para o mesmo troço da linha de amostragem é sempre contabilizada a região de maior porosidade (figura 3.9). Este procedimento poderá ser facilmente revisto em futuros trabalhos.

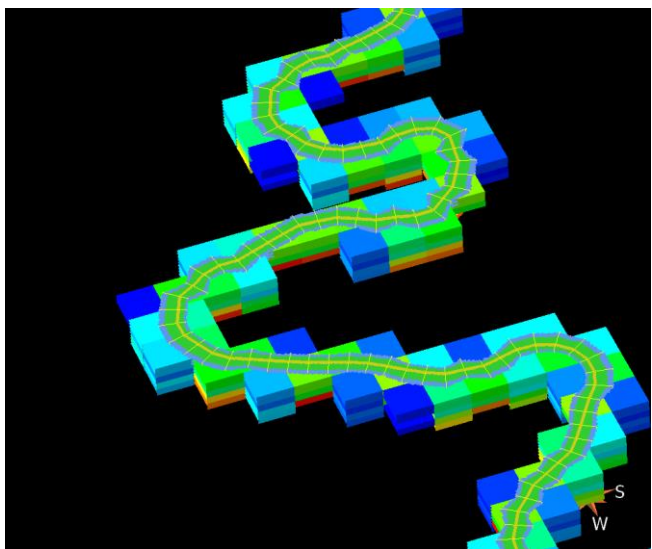


Figura 3.8 – Malha de blocos com os valores de porosidade calculados com as fracções de cada região dos canais de areia por bloco. É visível que os blocos com porosidade mais elevada a vermelho estão na base dos canais conforme o modelo conceptual

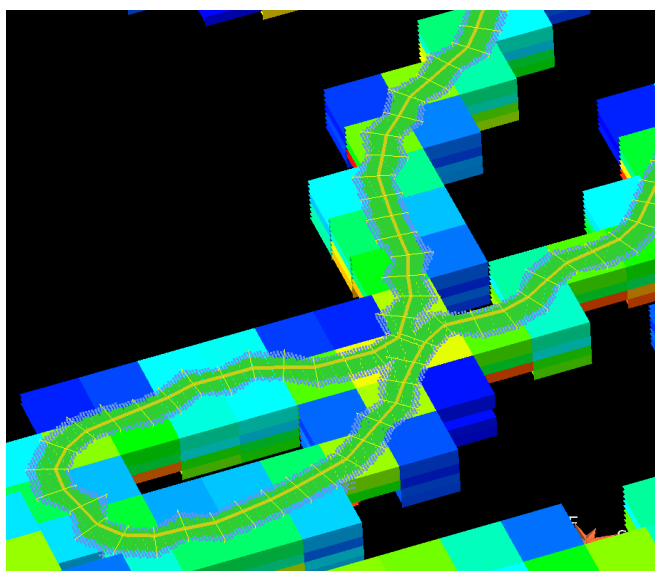


Figura 3.9 – Avaliação da porosidade numa região de aproximação das margens do canal de areia, a solução de porosidade será sempre a mais optimista das regiões intersectadas.

Esta etapa de avaliação da porosidade é a mais demorada do processo de simulação e depende da malha de blocos do reservatório e do número de linhas de amostragem que são utilizados para amostrar cada bloco reservatório. No caso de estudo foi utilizada uma malha local de 20 por 20 linhas de amostragem (para um bloco reservatório de 50 metros de lado corresponde a uma resolução de amostragem de 2,5 metros) e o processamento para um canal de areia demora cerca de 9 minutos de cálculo. Estes tempos reduzem-se na proporção da densidade das linhas de amostragem, por exemplo, se for considerada uma densidade de metade em cada direcção o tempo de cálculo reduz-se em quatro vezes. Deve-se assim balancear a resolução da amostragem com a qualidade da avaliação da porosidade, sabendo de antemão que a partir de uma certa resolução os resultados serão praticamente iguais.

3.6 QUANTIFICAÇÃO DE RESERVAS POTENCIAIS

A equação básica para a determinação de hidrocarbonetos num reservatório (*hydrocarbons-in-place - HIP*) é a seguinte (Archer e Wall, 1986):

$$HIP = Volume\ da\ rocha \times Porosidade\ Aberta \times Saturação\ em\ hidrocarbonetos \\ (x\ Coeficiente\ de\ expansão\ ou\ / \ Coeficiente\ de\ contracção)$$

Os HIP são usualmente expressos em unidades de volume à superfície. A contracção ou expansão dos volumes ocorre quando os hidrocarbonetos, respectivamente óleo e gás, são trazidos para a superfície. As chamadas reservas são o produto dos HIP por um factor de recuperação:

$$Reservas = HIP \times Factor\ de\ recuperação$$

Os factores de recuperação são muito variáveis e podem atingir valores de 30-40% em reservatórios de óleo e mais de 75% em reservatórios de gás.

No caso de estudo, que é desenvolvido com informação sintética, apresentam-se para efeitos comparativos entre as simulações as reservas com a designação de potenciais, porque não são tidos em consideração factores de recuperação, saturações ou factores de expansão ou contracção. As *reservas potenciais* consideradas são o produto do volume de rocha pela porosidade aberta ($1\ m^3 = 6,285$ barris).

4. CASO DE ESTUDO

Para a ilustração da construção do modelo dos canais por objectos e avaliação da porosidade utilizaram-se dados sintéticos com estatísticas realistas e fundamentadas conforme o enquadramento geológico apresentado no capítulo 2.

O hipotético reservatório fluvial considerado tem as dimensões de 10000 x 5000 x 100 metros e foi discretizado numa malha de blocos com as dimensões de 50m x 50m x 1m de que resultaram 200 x 100 x 100 blocos nas direcções X, Y e Z, respectivamente. Nos exemplos que se seguem consideraram-se dois canais de treino I e II, tendo sido testadas realizações com estatísticas multiponto do mesmo tipo de canal e com a mistura ponderada dos dois tipos de canais. Cada canal simulado foi previsto ter no máximo 2000 vértices (ou 1999 segmentos de recta) espaçados de 25 metros como nos canais de treino.

4.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS E ESTATÍSTICAS DE PARTIDA

A preparação dos dados envolve a geração dos valores das dimensões dos canais profundidade e largura e os resíduos dos ângulos azimutais (ver capítulo 3).

A simulação destas dimensões é feita canal a canal tendo-se previsto gerar 10 realizações, no máximo com 200 canais cada. Considerando que cada canal poderá ter 2000 vértices onde são atribuídas as respectivas dimensões largura e profundidade, foram geradas 10 imagens a 2D com 2000 nós na direcção que representa os segmentos de recta e 200 nós na direcção que representa o número ou índice do canal para as variáveis largura, profundidade e resíduos. Na simulação por SSD e Co-SSD impõe-se que os nós de cada linha são condicionais aos restantes nós da mesma linha, não se cruzando nós entre linhas. Este procedimento gera dimensões independentes para cada canal.

Para as três variáveis a simular consideraram-se leis de distribuição uniforme com intervalos de [50m; 150m], [10m; 25m] e [-10°m; 10°m], respectivamente para a largura, profundidade e resíduos dos ângulos azimutais. A simulação da largura foi feita impondo um coeficiente de correlação de 0,7 com a profundidade. Simulou-se primeiro a profundidade com a SSD a que se seguiu a largura com a Co-SSD. A simulação dos resíduos foi feita com a SSD. Nas simulações não foi feito condicionamento a dados locais apenas aos histogramas das leis uniformes. Relativamente aos variogramas, para as variáveis profundidade e largura foram utilizados modelos esféricos com amplitude de 500 nós (a que correspondem na escala do reservatório 1250 metros = 500 x 25m). Como a simulação se refere a um reservatório sintético a escolha

desta amplitude é empírica. Para os resíduos, foi feita uma avaliação do variograma baseada nos canais de treino tendo-se chegado à conclusão que a amplitude era de dois nós, isto é, cada valor de resíduo tem correlação espacial com o valor do resíduo do segmento de recta anterior e o seguinte e não mais do que isso. Na figura 4.1 mostra-se o variograma dos resíduos de um dos canais de treino considerados no estudo; refira-se que o segundo canal de treino tem o mesmo comportamento de continuidade espacial.

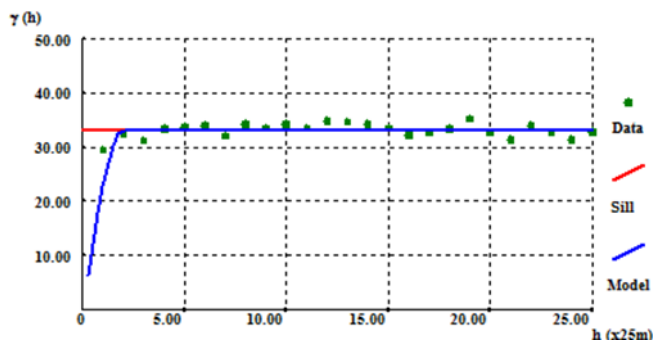


Figura 4.1 – Variograma dos resíduos dos ângulos azimutais para o canal de treino I e modelo teórico ajustado.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram o resultado da simulação das variáveis profundidade (a primeira a ser simulada) e largura. Na malha de nós, a direcção esquerda-direita representa os 2000 nós e a direcção perpendicular os 200 canais que podem ser simulados. Cada linha de valores representa a listagem de dimensões a associar a cada canal.

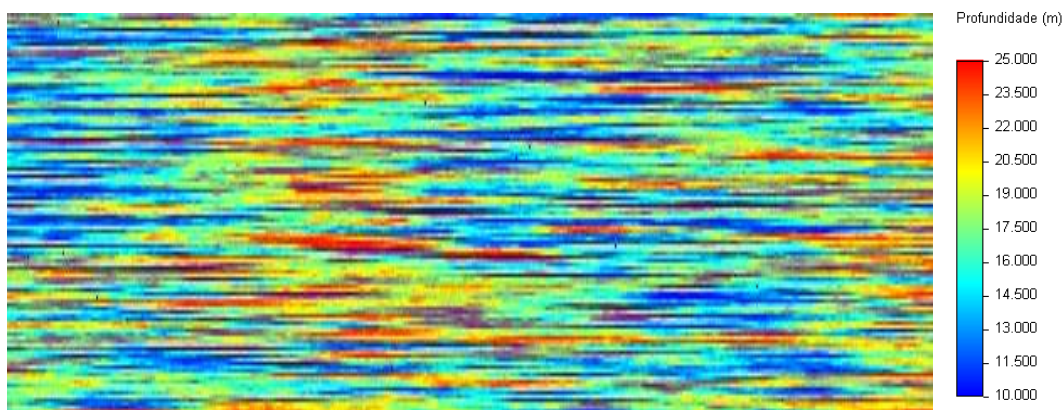


Figura 4.2 – Representação dos valores simulados de profundidade a associar aos canais a simular.

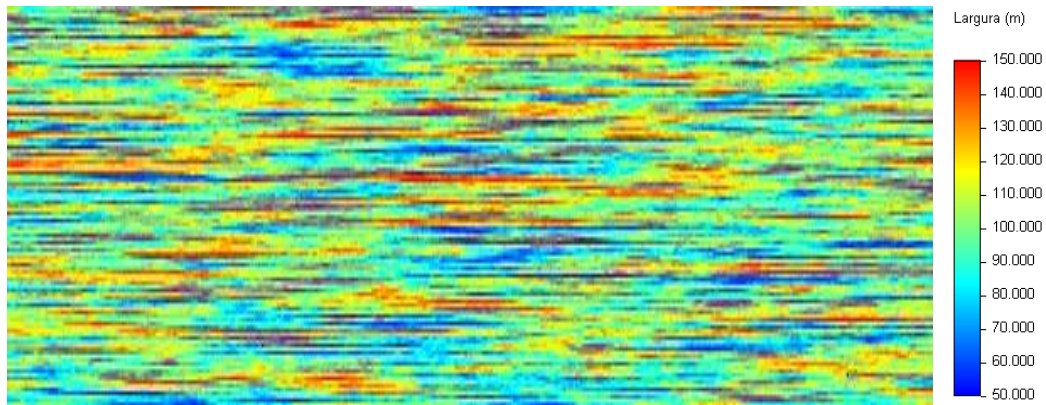


Figura 4.3 – Representação dos valores simulados de largura a associar aos canais a simular evidenciando correlação linear de 0,7 com os valores de profundidade.

Relativamente aos resíduos, a imagem simulada ilustrada na figura 4.4 mostra a quase ausência de correlação de valores entre nós na direcção do canal o que está de acordo com o esperado que é uma amplitude de apenas dois nós.

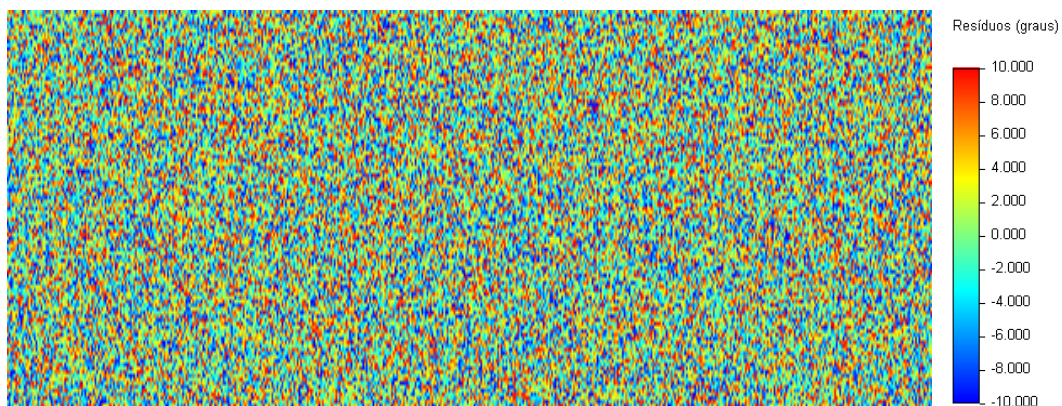


Figura 4.4 – Representação dos resíduos simulados.

4.2 SIMULAÇÃO DOS CANAIS DE AREIA

Com o intuito de entender o comportamento da simulação e os resultados apresentados, na simulação dos canais de areia utilizaram-se duas imagens de treino distintas (canais I e II). A morfologia do esqueleto dos dois canais de treino foi obtida de uma rede hidrográfica da região centro do país. Esta parte do trabalho foi obtida com recurso ao *software* ArcGIS®. Como referido anteriormente, as imagens de treino permitem o cálculo de estatísticos multiponto que são utilizados na simulação de novos canais.

Para cada tipo de canal, e para avaliar a variabilidade dos resultados à escala do reservatório, foram geradas 10 realizações da morfologia e da porosidade, tendo sido observados os resultados parciais para 1, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 e 200 canais. Este conjunto de testes possibilitou a análise da porosidade na relação com o número de canais simulados e o respectivo comprimento, fixados os histogramas das dimensões largura e profundidade.

Numa segunda fase, simularam-se o mesmo número de realizações e de canais compondo os dois tipos de canais de treino, nas proporções 35% de canais de tipo I e 65% de canais de tipo II.

4.2.1 CANAL DE TREINO I

A primeira imagem de treino consiste num troço bastante sinuoso, com algumas situações de bancos em ponta muito próximos (figura 4.5). A sua forma resulta num gráfico de ângulos azimutais que percorre todos os valores (figura 4.6), onde existem intervalos com valores altos, seguidos de outros com valores baixos, correspondentes a curvas acentuadas no canal. Refira-se que transições entre valores elevados e baixos quando cruzam a direcção do Norte não correspondem necessariamente a grandes desvios.

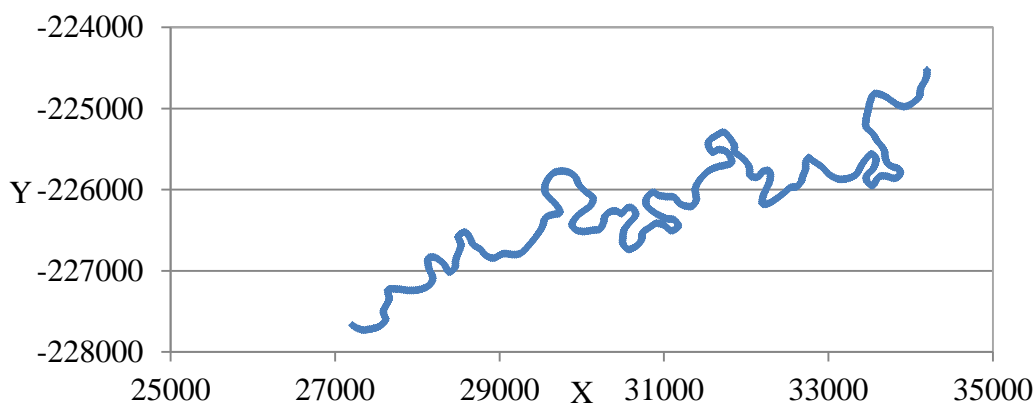


Figura 4.5 – Representação do canal de treino I no plano horizontal.

Na figura 4.7 representam-se as classes de azimute numeradas de 1 a 18 e na figura 4.18 os resíduos calculados pela diferença entre o azimute observado e o valor central da classe de azimute. Note-se que nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 o eixo horizontal representa o índice do segmento de recta, e cada um mede 25 metros. Refira-se ainda que as classes de azimute mais os resíduos permitem reconstruir de forma exacta a forma do esqueleto do canal.

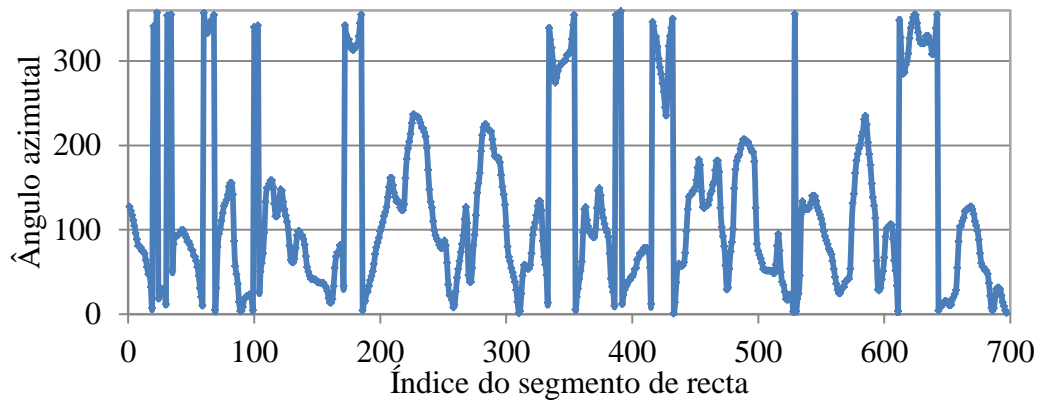


Figura 4.6 – Ângulos azimutais do canal de treino I.

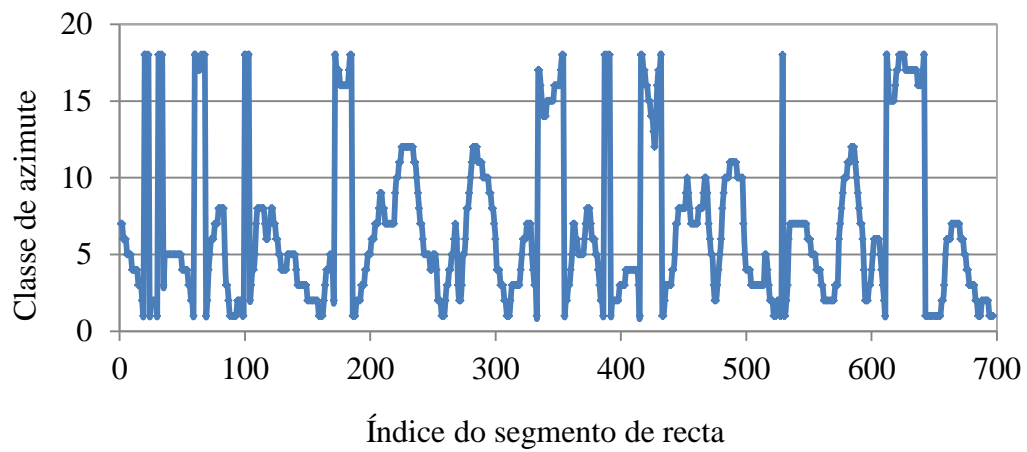


Figura 4.7 – Classes azimutais do canal de treino I.

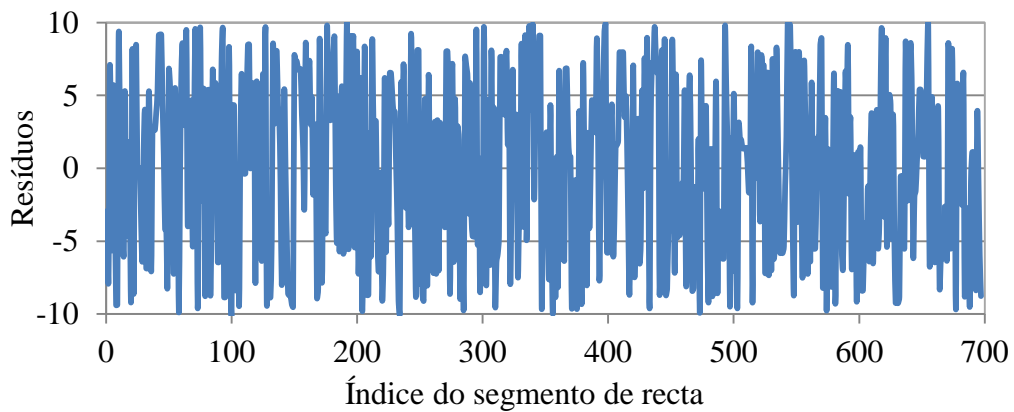


Figura 4.8 – Resíduos dos ângulos azimutais do canal de treino I.

A título de exemplo, na figura 4.9 mostra-se o resultado de uma realização após a simulação de cinco esqueletos de canais, condicionados pelas estatísticas multiponto das classes de azimute da figura 4.7 a que se acrescentaram os resíduos angulares inicialmente simulados. Verifica-se a permanência de um padrão sinuoso e uma direcção preferencial semelhante à da imagem de treino, sendo observados a repetição de alguns padrões em particular. Na figura 4.10 mostra-se o resultado para 25 canais simulados a que se soma a representação das secções do canal conforme a figura 3.5 do capítulo 3.

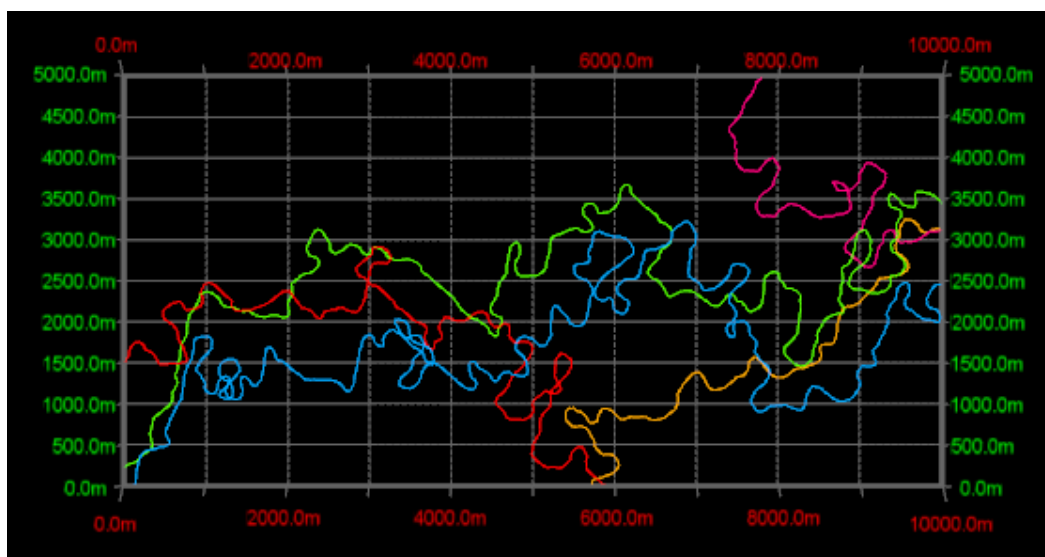


Figura 4.9 – Representação de cinco canais simulados a partir do canal de treino I.

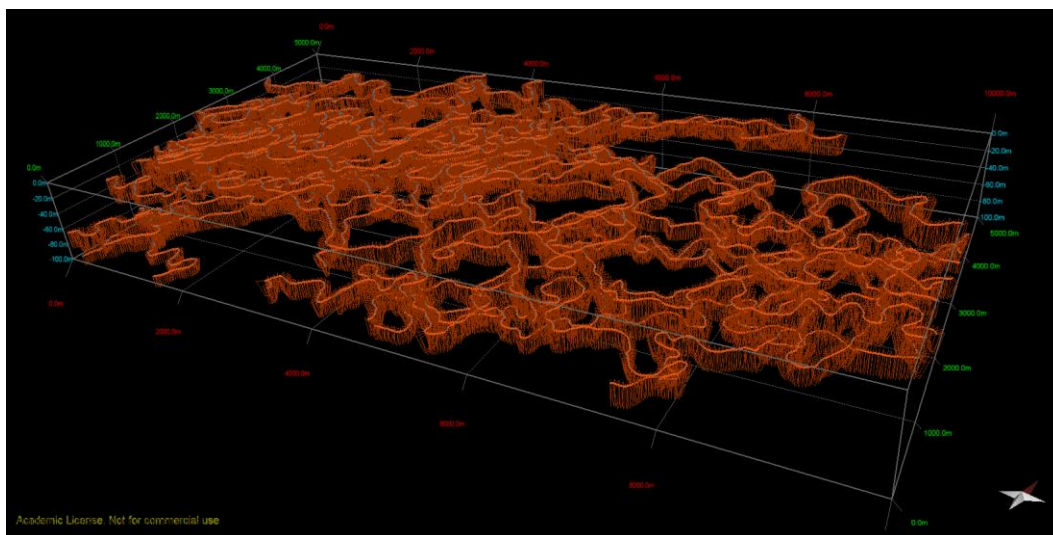


Figura 4.10 – Representação 3D de uma realização com 25 canais e respectivas secções separadas de 25 metros a partir do canal de treino I.

Depois da simulação estocástica dos canais de areia em representação vectorial, para cada realização foram calculados os valores da porosidade equivalente na malha de blocos do reservatório. Para a secção do canal foram consideradas quatro regiões a que correspondem as porosidades médias de I-0,3, II-0,2, III-0,1 e IV-0,05 (ver figura 3.5).

Na figura 4.11 (esq.) mostra-se um pormenor em representação 3D das porosidades obtidas para uma região do reservatório e na figura 4.11 (dir.) as porosidades do mesmo local com um corte a 15% na porosidade. Observa-se que a porosidade é mais elevada próximo do eixo do canal e ainda maior na base do canal onde prevalecem as contribuições de 30% correspondentes à zona IV.

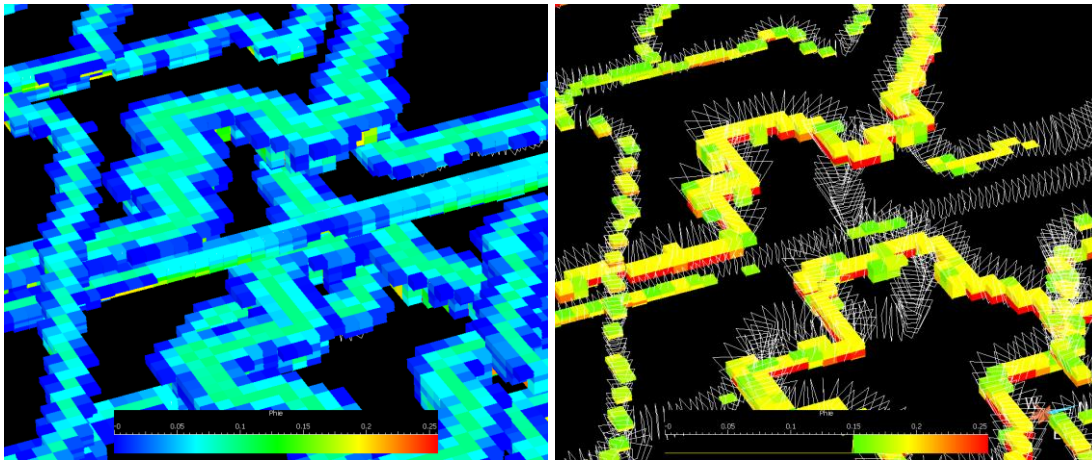


Figura 4.11 – Pormenor dos valores de porosidade equivalente na malha de blocos do reservatório para valores superiores a 0% (à esquerda) e superiores a 15% (à direita).

Para mostrar os resultados de forma mais detalhada, nas figuras 4.12 e 4.13 apresentam-se resultados em planta (para um nível intermédio a 30m do topo do reservatório) e em perfil para 25, 50, 100 e 200 canais simulados. Refira-se que nas representações em perfil, e para realçar a variação vertical dos valores, foi utilizada sobre-elevação. Na figura 4.14 apresenta-se o histograma, box-plot e estatísticos básicos dos valores de porosidade obtidos a partir de 25 canais simulados. O histograma cumulativo permite ter uma noção da fracção de blocos (ou do reservatório) que exibem porosidade acima ou abaixo de um determinado valor; neste exemplo, 20% dos blocos que são reservatório têm porosidade média acima de 15% (0,15 em fracção de vazios).

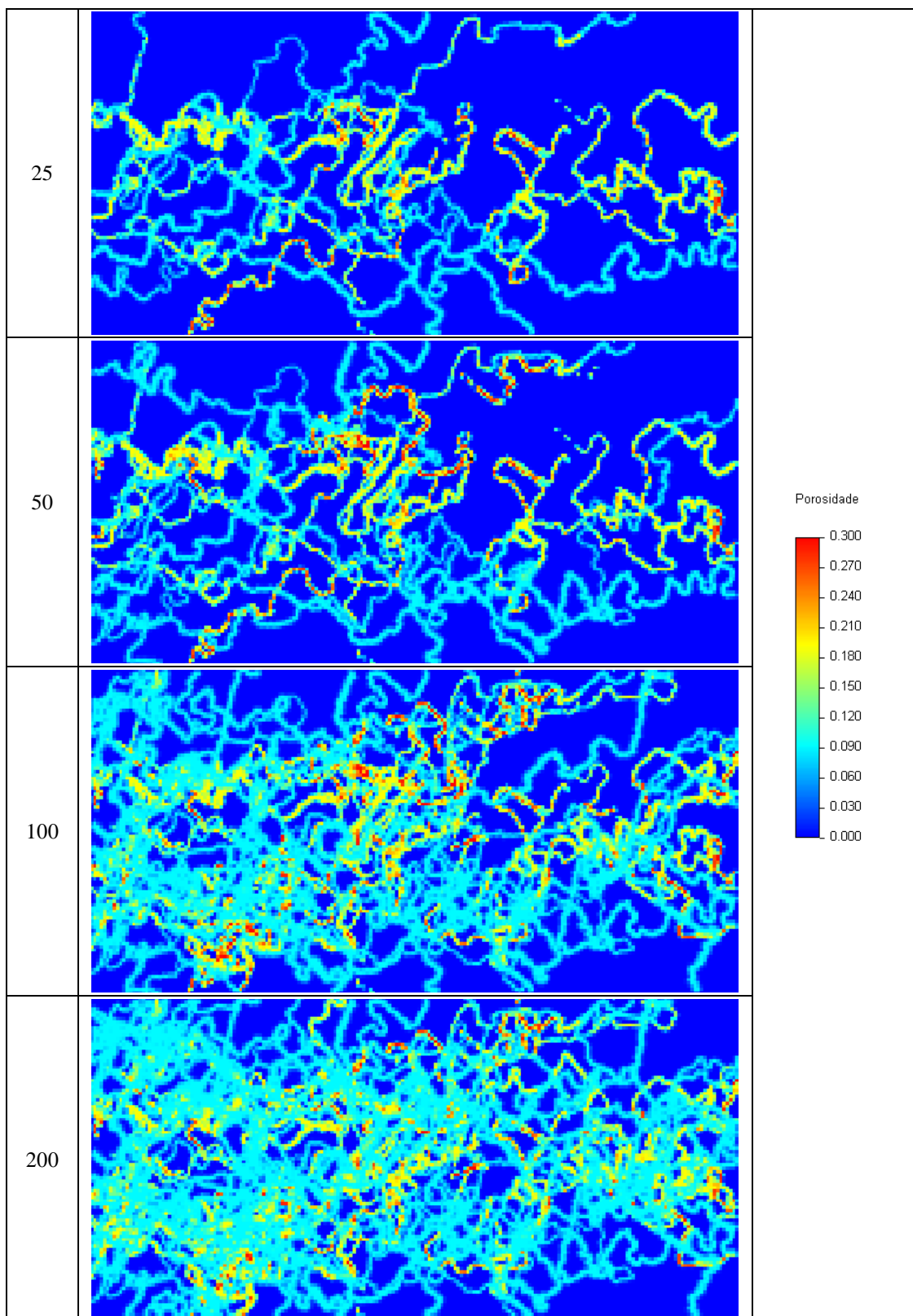


Figura 4.12 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino I em planos horizontais ($Z=30m$).

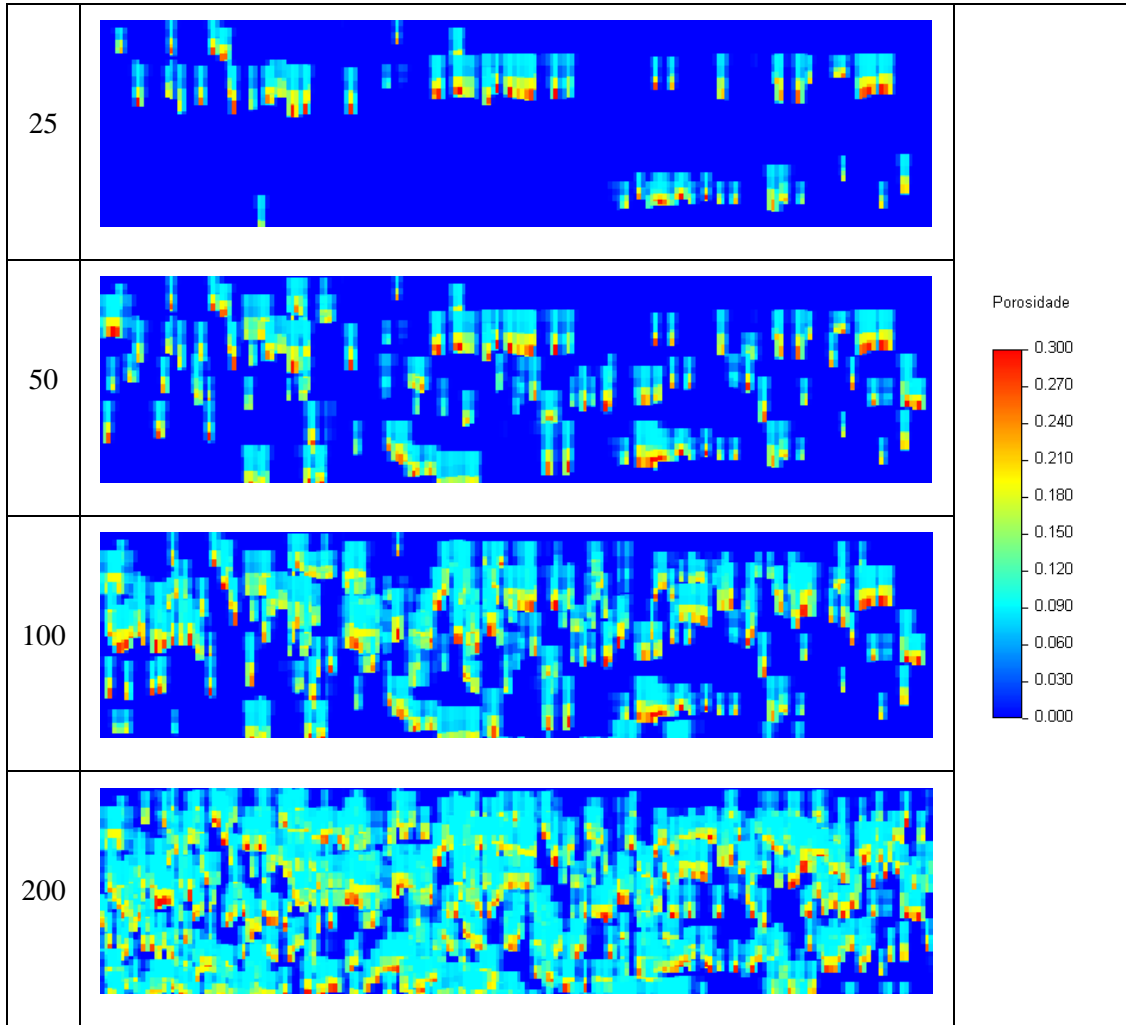


Figura 4.13 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino I num plano vertical intermédio.

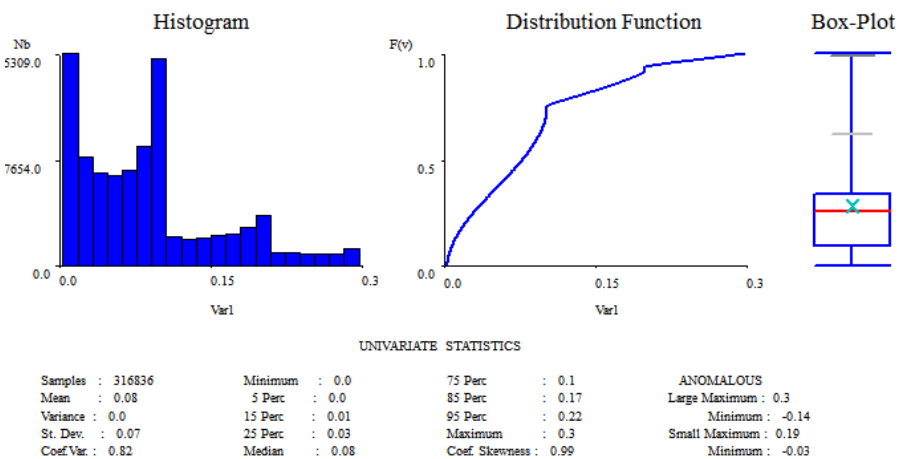


Figura 4.14 – Histograma das porosidades nos blocos reservatório para a simulação de 25 canais a partir do canal de treino I.

Os valores de porosidade estão compreendidos no intervalo entre 0 e 0,3, onde 0 corresponde a um bloco que não contém nenhuma fracção de canal e 0,3 é um bloco que está todo contido na região I de canal. Todos os valores intermédios são obtidos pelo produto entre a fracção de cada região e os valores de referência. Por exemplo, o valor de 0,05 pode ser obtido por um bloco completamente contido na zona IV-0,05 ou então é um bloco repartido 50:50 entre as zonas III-0,1 e fora do canal (porosidade = 0%).

As imagens em planta e em perfil também são esclarecedoras de que o zonamento sugerido pelo modelo conceptual de quatro fácies utilizado na avaliação da porosidade está bem aplicado. Os valores de porosidade mais elevada com tons avermelhados são sinal de que o nível de blocos corta a base do canal, com cascalho e a areia grossa. Os valores mais baixos a azul significam que os blocos cortam o topo do canal. Nesta última situação é visível a gradação de valores mais elevados no eixo do canal e mais baixos na periferia onde predominam a areia fina e as argilas. Nalguns locais, nas representações em planta, é ainda possível observar que o eixo do canal não está centrado na largura do canal, embora esta assimetria seja atenuada na fase de avaliação dos valores de porosidade e na relação com a dimensão dos blocos que foi utilizada.

A tabela 4.1 sintetiza os resultados parciais obtidos para uma realização ao fim de serem simulados 1, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 e 200 canais. A fracção de blocos de canal é o quociente entre os blocos com porosidade superior a 0% e a totalidade dos 2 000 000 de blocos. A porosidade global do modelo foi calculada pelo produto da porosidade média com a fracção de blocos com canal, e as reservas pelo produto entre o parâmetro anterior, o número total de blocos e as suas dimensões convertidos para barris.

Na figura 4.15 representam-se graficamente as porosidades médias calculadas para os blocos com canal, e para todos os blocos, em função do comprimento dos canais simulados (índice geométrico da densidade de canais) para as 10 realizações. A dispersão das linhas é um indicador da incerteza das simulações e aumenta com o número de canais simulados por via das maiores sobreposições.

Tabela 4.1 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir do canal de treino I.

Nº de canais	Comprimento total dos canais (m)	Fracção de blocos com $\Phi > 0\%$	Porosidade média (em fracção)		Reservas potenciais \equiv volume de vazios (barris)
			Blocos canal	Todos os blocos	
1	14775	0,009456	0,0008	0,000008	6018
5	73375	0,037308	0,0032	0,000119	94975
10	150050	0,071945	0,0060	0,000432	343411
15	213650	0,101535	0,0084	0,000853	678516
20	286275	0,135909	0,0114	0,001549	1232583
25	335075	0,158418	0,0134	0,002123	1688784
50	699325	0,307740	0,0265	0,008155	6487746
100	1381925	0,489331	0,0447	0,021873	17401013
200	2994525	0,714132	0,0719	0,051346	40848095

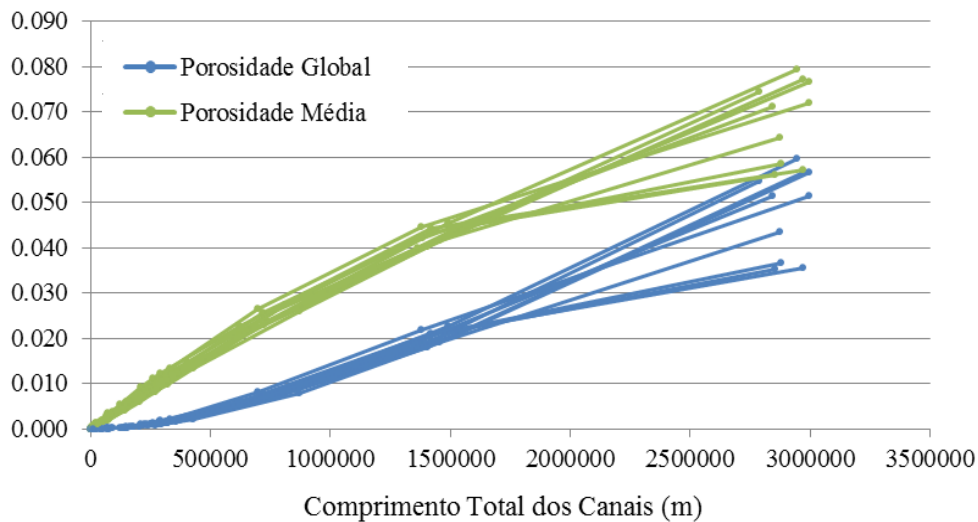


Figura 4.15 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir do canal de treino I.

4.2.2 CANAL DE TREINO II

O segundo canal de treino foi escolhido como um troço menos sinuoso e com uma direcção distinta do da primeira imagem (figura 4.16). Este comportamento reflecte-se no gráfico dos ângulos azimutais (figuras 4.17) e respectivas classes (figura 4.18) que não chegam a valores superiores a 280° . Já o comportamento dos resíduos na figura 4.19 é semelhante.

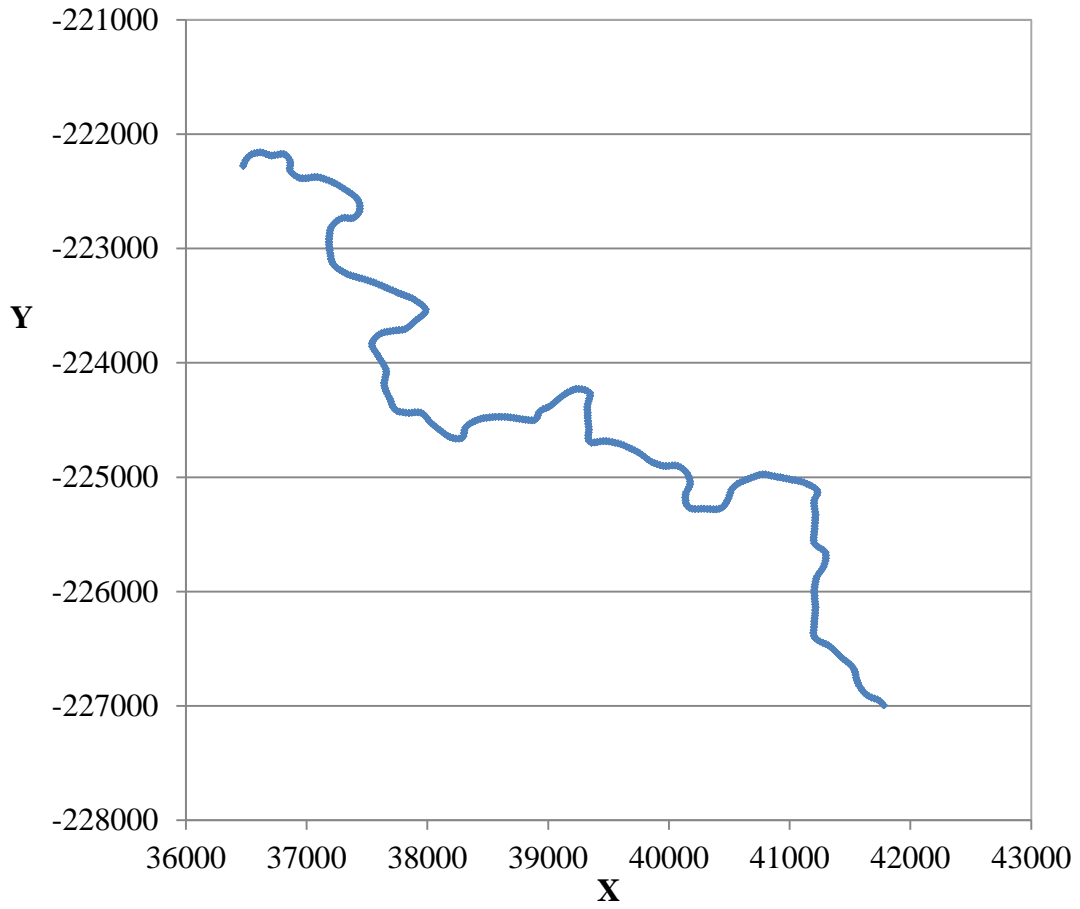


Figura 4.16 – Representação do canal de treino II no plano horizontal.

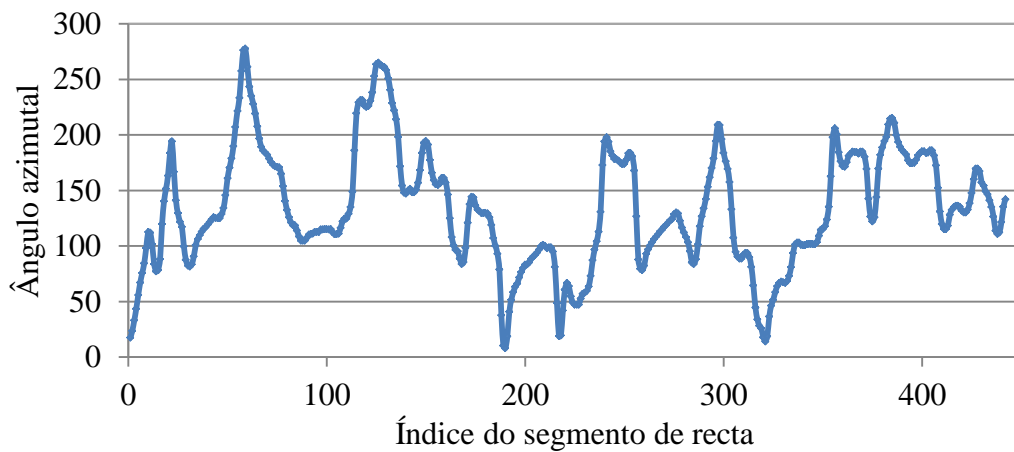


Figura 4.17 – Ângulos azimutais do canal de treino II.

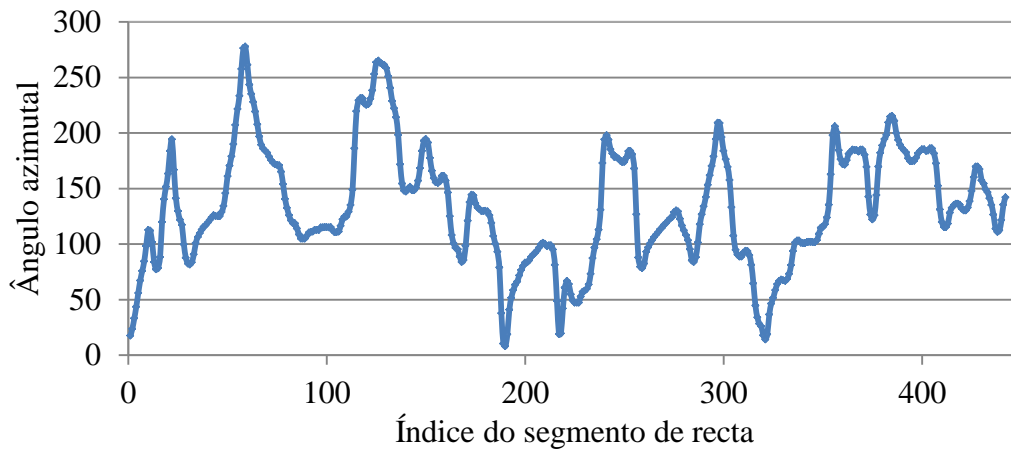


Figura 4.18 – Classes azimutais do canal de treino II.

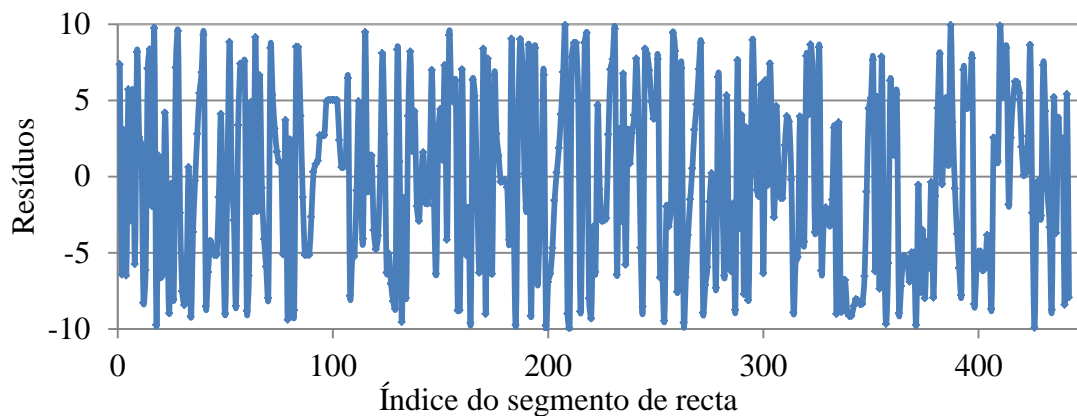


Figura 4.19 – Resíduos dos ângulos azimutais do canal de treino II.

A título de exemplo, na figura 4.20 mostra-se o resultado de uma realização após a simulação de cinco esqueletos de canais, condicionados pelas estatísticas multiponto das classes de azimute da figura 4.18 a que se acrescentaram os resíduos angulares simulados. Verifica-se a permanência de um padrão com sinuosidade e direcção preferencial semelhante à da imagem de treino.

A tabela 4.2 sintetiza os resultados parciais obtidos para uma realização ao fim de serem simulados 1, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 e 200 canais e as colunas têm o mesmo significado das da tabela 4.1.

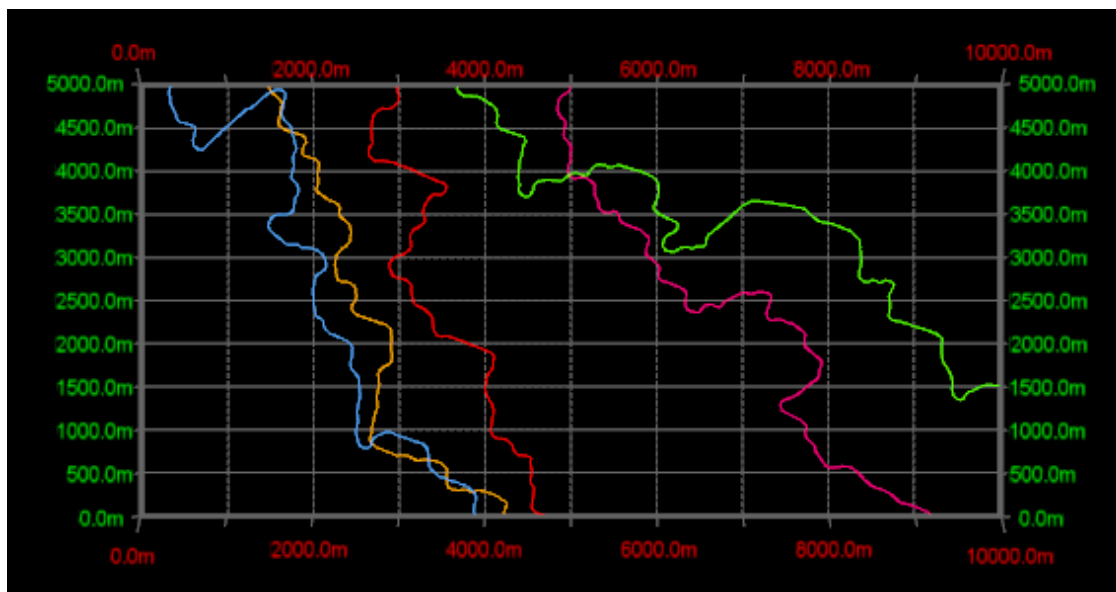


Figura 4.20 – Representação de cinco canais simulados a partir do canal de treino II

Tabela 4.2 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir do canal de treino II.

Nº de canais	Comprimento total dos canais (m)	Fracção de blocos com $\Phi > 0\%$	Porosidade média (em fracção)		Reservas potenciais \equiv volume de vazios (barris)
			Blocos canal	Todos os blocos	
1	8349	0,005524	0,0005	0,000003	2197
5	35550	0,018568	0,0014	0,000026	20680
10	75550	0,029262	0,0021	0,000061	48885
15	123475	0,051145	0,0038	0,000194	154615
20	177350	0,076940	0,0058	0,000446	355014
25	216225	0,096653	0,0074	0,000715	568999
50	388200	0,171259	0,0134	0,002295	1825667
100	839975	0,343976	0,0287	0,009872	7850515
200	1730400	0,616726	0,0605	0,037312	29683312

Também para o canal de treino II, nas figuras 4.21 e 4.22 apresentam-se resultados em planta (num nível intermédio a 30m do topo do reservatório) e em perfil para 25, 50, 100 e 200 canais simulados. Na figura 4.23 apresenta-se o histograma, box-plot e estatísticos básicos dos valores de porosidade obtidos a partir de 25 canais simulados.

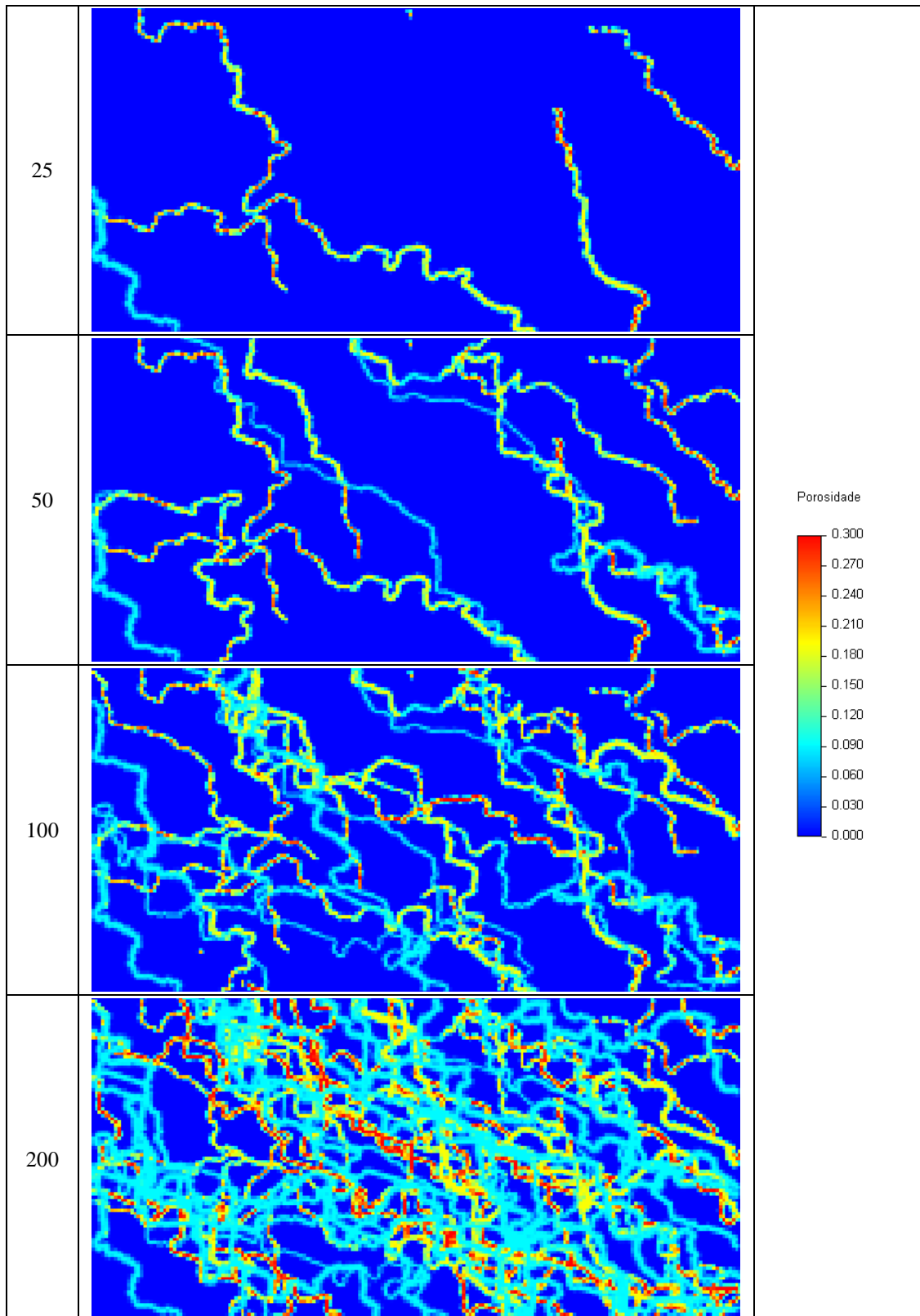


Figura 4.21 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino II em planos horizontais (Z=30m).

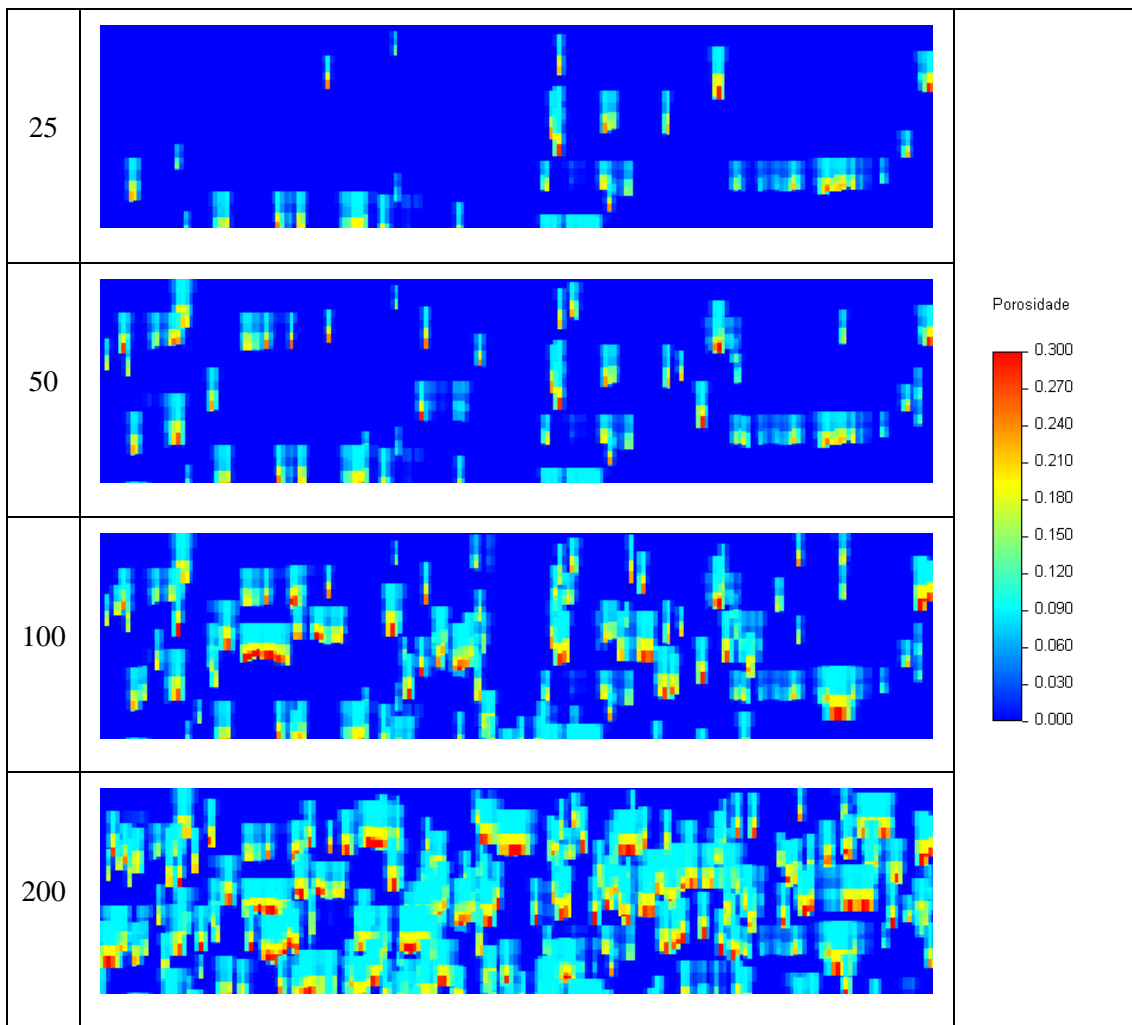


Figura 4.22 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir do canal de treino II num plano vertical intermédio.

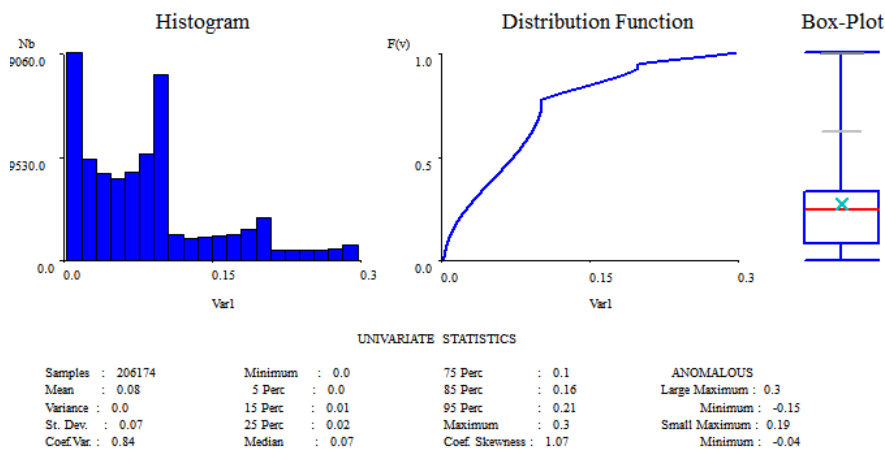


Figura 4.23 – Histograma das porosidades nos blocos reservatório referentes a uma simulação de 25 canais a partir do canal de treino II.

Na figura 4.24 representam-se graficamente as porosidades médias calculadas para os blocos canal ou para todos os blocos em função do comprimento dos canais simulados (índice geométrico da densidade de canais) para as 10 realizações. A dispersão das linhas representadas é também neste exemplo um indicador da incerteza das simulações.

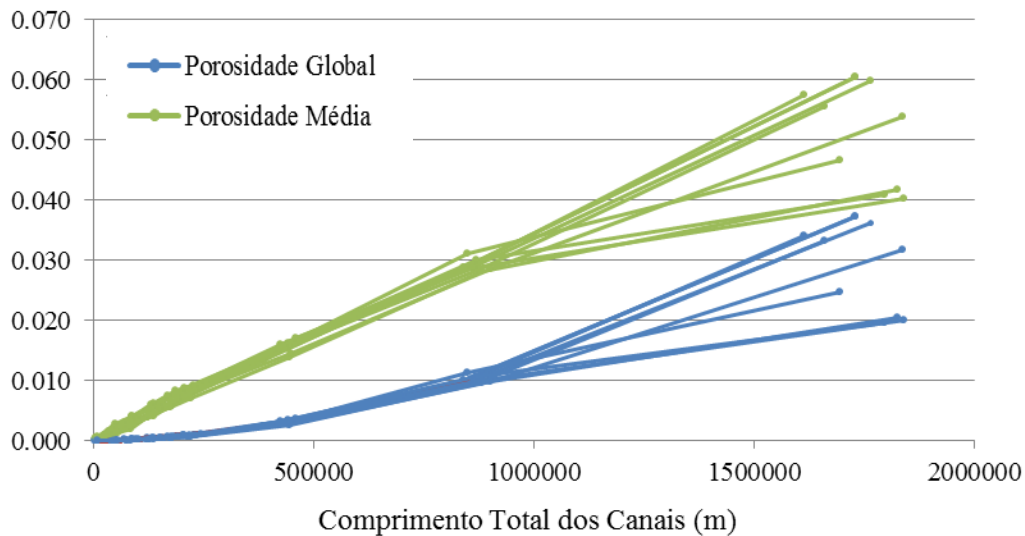


Figura 4.24 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir do canal de treino II.

4.2.3 SIMULAÇÃO SIMULTÂNEA DOS CANAIS I E II

Nesta terceira execução simularam-se em simultâneo canais condicionados às estatísticas multiponto obtidas pelo canal de treino I e pelo canal de treino II, tendo sido simulados o mesmo número de realizações e de canais dos exemplos anteriores. Simularam-se 35% em número de canais condicionados às estatísticas do canal de treino I e 65% como de canal de treino II. A simulação conjunta permite identificar melhor as diferenças entre a geometria dos dois canais de treino.

Na figura 4.25 mostra-se uma representação 3D de uma realização com 25 canais. O comportamento dos canais a cor azul, pertencentes a simulações condicionais ao canal de treino I, são mais sinuosos e têm uma direcção média próxima de O-E, semelhante ao respectivo canal de treino. Já os canais de cor vermelha são menos sinuosos e seguem a tendência de orientação do canal de treino II.

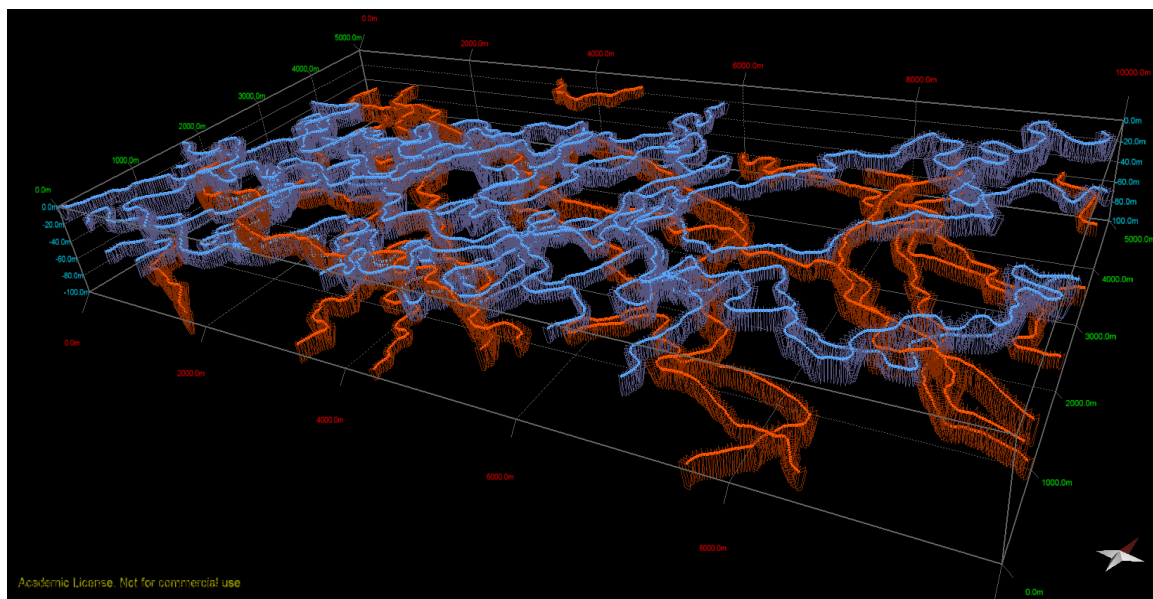


Figura 4.25 – Representação de uma realização com 25 canais simulados e respectivas secções condicionadas a estatísticas multiponto dos dois tipos de canais. A azul representam-se os canais condicionados ao canal de treino I e a cor vermelha os condicionados ao canal de treino II.

Também nesta etapa do caso de estudo onde se misturam simulações condicionais aos canais de treino I e II, nas figuras 4.26 e 4.27 apresentam-se resultados em planta (num nível intermédio a 30m do topo do reservatório) e em perfil para 25, 50, 100 e 200 canais simulados.

A tabela 4.3 sintetiza os resultados parciais obtidos para uma realização ao fim de serem simulados 25, 50, 100 e 200 canais e as colunas têm o mesmo significado das da tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.3 – Síntese de resultados de uma realização obtida a partir dos canais de treino I e II.

Nº de canais	Comprimento total dos canais (m)	Fracção de blocos com $\Phi > 0\%$	Porosidade média (em fracção)		Reservas potenciais \equiv volume de vazios (barris)
			Blocos canal	Todos os blocos	
25	216050	0,117374	0,0094	0,001103	877737
50	478474	0,218424	0,0179	0,003910	3110413
100	968750	0,394993	0,0340	0,013430	10683979
200	2067900	0,595468	0,0561	0,033406	26575757

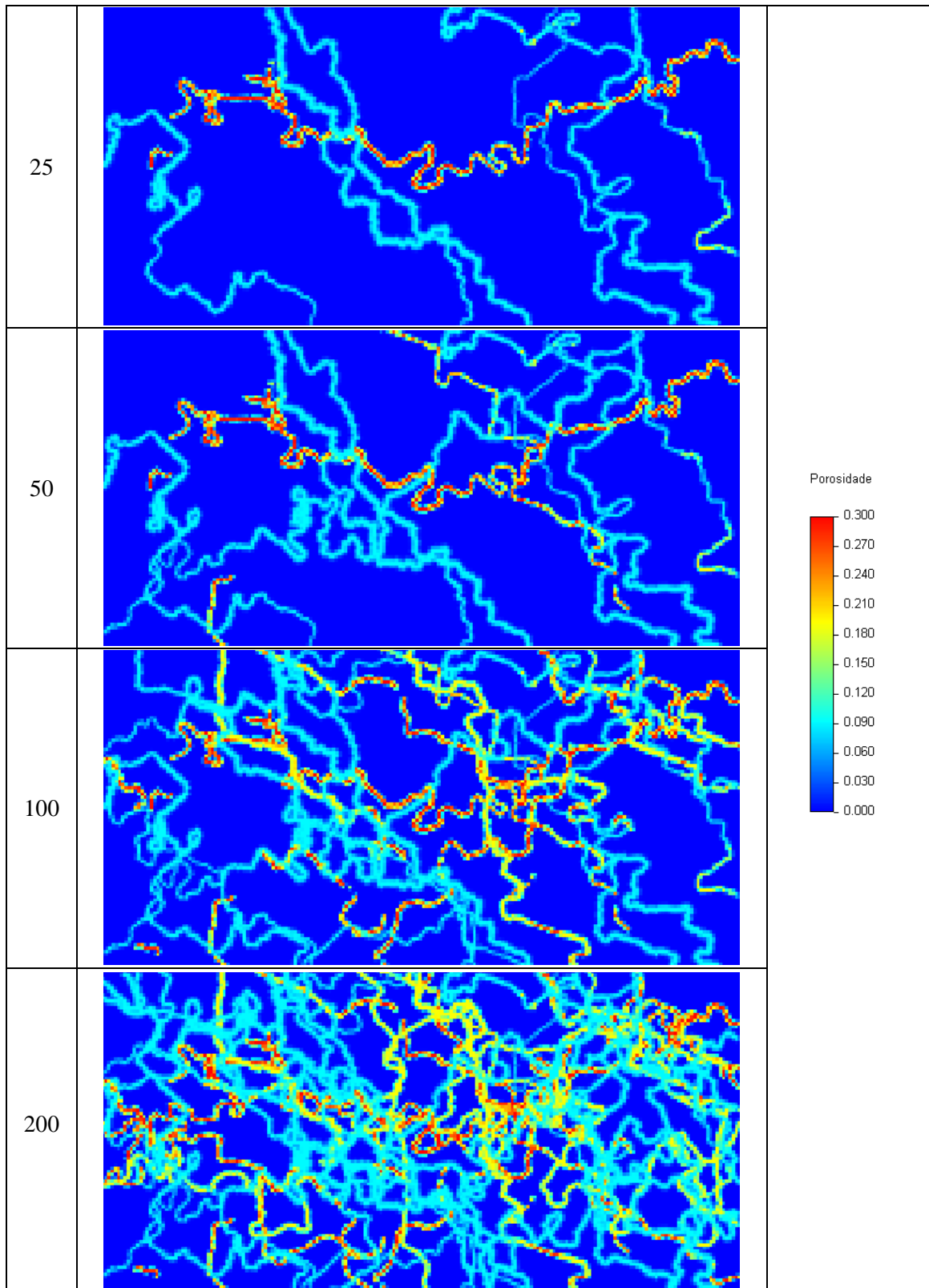


Figura 4.26 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir dos canais de treino I e II em planos horizontais ($Z=30\text{m}$).

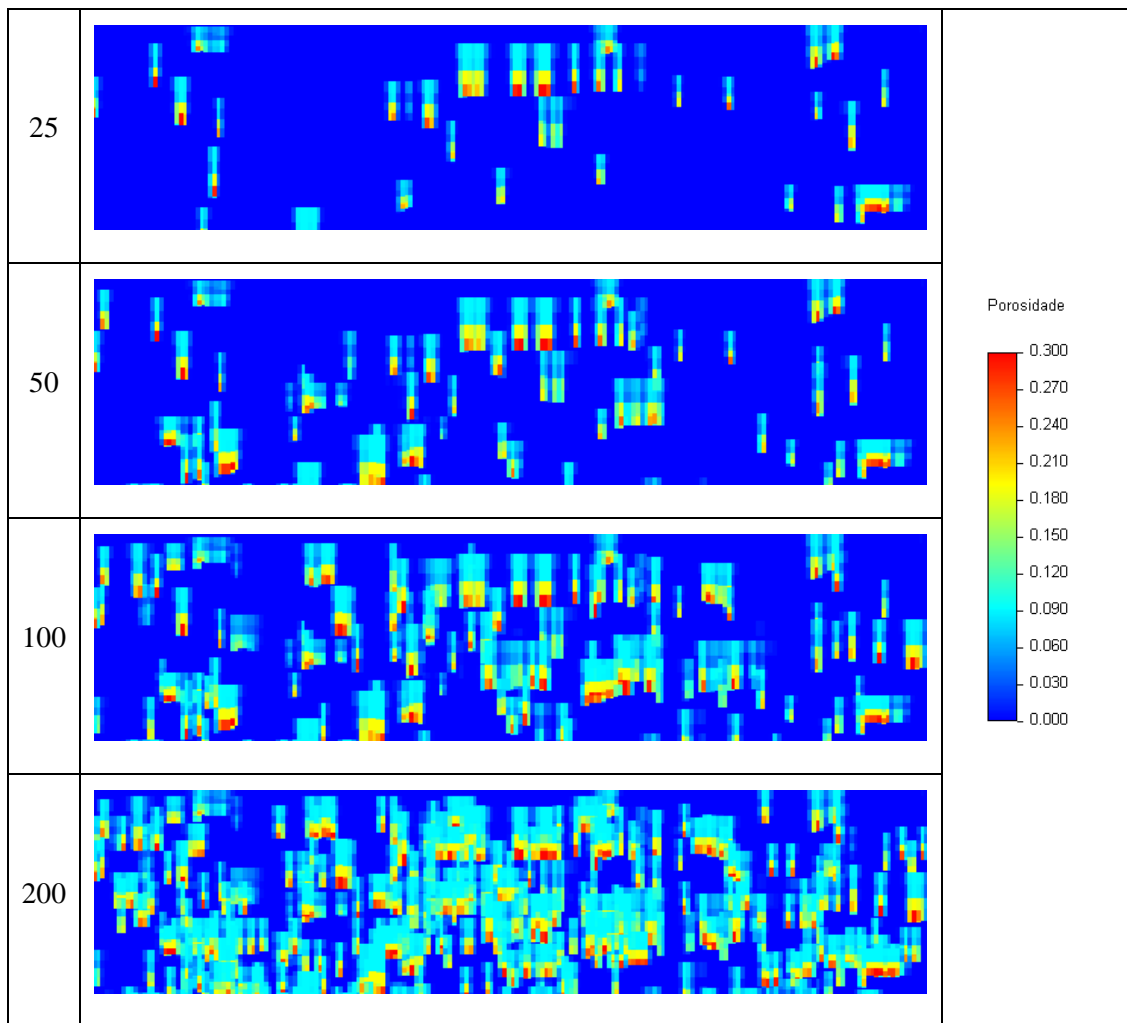


Figura 4.27 – Representação da porosidade equivalente calculada a partir de 25, 50, 100 e 200 canais simulados no volume do reservatório a partir dos canais de treino I e II num plano vertical intermédio.

Tal como nos exemplos anteriores, na figura 4.28 representam-se graficamente as porosidades médias calculadas para os blocos canal ou para todos os blocos em função do comprimento dos canais simulados para as 10 realizações, mas agora só com o número de canais igual a 25, 50, 100 e 200. Um menor número de canais não respeitaria a proporcionalidade entre o número de canais tal qual foi considerada de 65% e 35%, respectivamente para I e II.

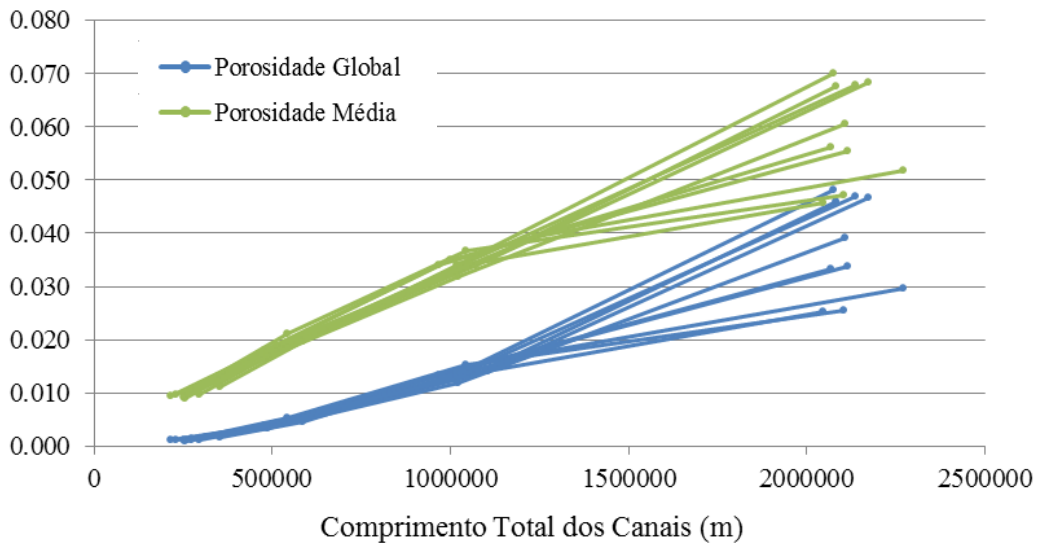


Figura 4.28 – Representação gráfica das porosidades médias calculadas nos blocos canal ou nos blocos totais para as 10 simulações obtidas a partir dos canais de treino I e II.

4.3 DISCUSSÃO

Na discussão que se segue tecem-se comentários relativos à preparação dos dados de partida, à simulação da morfologia dos canais de areia e à avaliação da porosidade para a malha de blocos.

4.3.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS DE PARTIDA

Relativamente à preparação dos dados de partida:

1. A simulação das variáveis profundidade, largura e resíduos foi executada a 2D, em vez de a 1D, para reduzir o número de simulações e simplificar a execução sem todavia desvirtuar os resultados que se pretendem obter. Nas imagens a 2D, cada linha representa um canal e as colunas representam os segmentos de recta dos canais (por isso as simulações são de 200 linhas \equiv 200 canais máximo a simular e 2000 colunas \equiv 2000 vértices simulados no máximo por linha poligonal). Na simulação por SSD e Co-SSD impõe-se que são apenas condicionais os nós da mesma linha, não se cruzando linhas.
2. O variograma dos resíduos tem uma amplitude muito reduzida, cerca de 1,5 nós, e isto significa que cada valor de resíduo tem alguma correlação com o valor adjacente mas já não tem correlação com o valor à distância de dois segmentos.
3. As leis estatísticas consideradas para as dimensões profundidade e largura foram assumidas como de lei uniforme (alta incerteza). Estes valores poderão ser facilmente

reavaliados num caso de estudo real onde exista informação sobre a morfologia de pelo menos alguns canais, proveniente por exemplo de uma imagem de sísmica 3D, de forma a serem integrados nesta metodologia. Mesmo que a lei de distribuição de um caso real seja diferente da lei uniforme, o que é espectável, esta alteração não altera em nada o fluxograma proposto.

4.3.2 SIMULAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS CANAIS DE AREIA

Já relativamente à simulação da morfologia dos canais de areia:

1. Neste trabalho são apenas apresentados resultados utilizando um template com cinco células, todavia foram feitos alguns testes com menor número de células que deram resultados menos satisfatórios. Este parâmetro, número de células consideradas na estatística multiponto, deverá ser testado mais exaustivamente em futuros trabalhos. Não se espera um grande incremento do tempo de execução se o template aumentar para mais alguns segmentos de recta, todavia maiores templates darão resultados simulados mais semelhantes entre si.
2. Na simulação da morfologia dos esqueletos dos canais observou-se que ocorrem cruzamentos entre a linha poligonal do mesmo canal, mesmo que tal evidência não ocorra na imagem de partida. Na avaliação da porosidade, um cruzamento da mesma linha poligonal acaba por ser tratado como se fosse apenas a aproximação, sem sobreposição, entre as duas partes da mesma linha poligonal pelo que os resultados são consistentes. Em casos de estudo reais pode-se aplicar um filtro de forma a não permitir que um novo troço de canal simulado não aproxime a menos de uma determinada distância da restante da linha poligonal já simulada.
3. A metodologia proposta pode ser aplicada sem grandes alterações para a simulação de canais em bacias aluvionares, onde existe grande intensidade de canais numa região limitada, pelo que a simulação dos canais seria condicionada a proporções locais. A vantagem da simulação de canais seria o condicionamento da porosidade a variações de fácies em profundidade, como que se tratasse de pequenos canais dentro de um grande canal.
4. Para condicionar os canais simulados à localização de poços, basta que a reconstrução do canal no reservatório se inicie nas proximidades da localização do poço em vez de numa localização gerada ao acaso. O posicionamento exacto do primeiro ponto do canal terá de ter em atenção a largura e profundidade do canal de forma a serem coincidentes com o traço de canal identificado no poço, pelo que a localização deste primeiro ponto será nas

imediações do poço e não na exacta localização do poço. Caso existam estudos dinâmicos ou outros que comprovem que dois poços façam parte do mesmo canal, uma sugestão seria gerar canais por tentativa e erro até que dois pontos de um canal correspondam à distância geométrica e orientação azimutal dos poços, obrigando o esqueleto simulado a passar nesses poços.

4.3.3 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE NA MALHA DE BLOCOS

Relativamente à avaliação da porosidade para a malha de blocos, que corresponde à conversão entre a estrutura vectorial da morfologia dos canais para a estrutura matricial da malha de blocos do reservatório, tecem-se os seguintes comentários:

1. As dimensões dos blocos do reservatório tiveram em conta as dimensões dos canais profundidade e largura e a variação vertical de fácies, apresentando muito maior resolução na direcção vertical 50:1 precisamente para melhor capturar as variações de fácies em profundidade.
2. A dimensão dos blocos da malha não interferem com o cálculo da porosidade média do reservatório, ou mesmo com as reservas totais. Todavia, se os blocos forem de maior dimensão, os valores de porosidade de cada bloco tenderão a esbater-se, porque existirão muito menos blocos no total e a fracção de blocos intersectada por canais será maior. Se na avaliação de reservas os valores totais serão praticamente os mesmos, numa avaliação da permeabilidade por correlação com a porosidade existirão tendencialmente valores mais baixos, pelo que num caso real onde se avalia também a permeabilidade a dimensão do bloco passa a ser um aspecto importante a ter em conta e esta questão deverá ser discutida no início do estudo de modelação.
3. A utilização de malhas adaptadas pode ser uma solução em reservatórios onde existam poucos canais de grande dimensão, mas em situações de maior heterogeneidade não há vantagem na utilização deste tipo de malhas. Uma malha adaptada tem desvantagens, por exemplo quando existe sobreposição de canais, onde a malha de blocos de um canal geralmente não se adapta ao outro que se atravessa. Também a geração de uma malha de blocos por canal não permitiria a simulação dinâmica do conjunto.
4. A porosidade média e a porosidade global crescem com o aumento do comprimento dos canais simulados todavia de forma distinta; no entanto, parecem convergir para a porosidade máxima considerada de 0,3. Este facto deve-se ao sucessivo preenchimento dos blocos do reservatório por canais, sendo que a partir de um certo número a intensidade e o comprimento dos canais é irrealista à escala regional. Para tal contribui o

detalhe do algoritmo desenvolvido onde, em caso de sobreposição de canais, em cada bloco é contabilizado o valor de maior porosidade, tratando-se assim de um modelo otimista. Uma outra forma eventualmente mais realista será considerar que os canais mais recentes serão os que estão a cota superior, e será sempre a porosidade dos de cota mais superior que prevalece.

5. Os tempos para simulação dos canais e avaliação da porosidade em cada corrida do código são maiores à medida que o número de canais é maior, variando entre 30-40 segundos no caso de só haver um canal e, aproximadamente 50 minutos, na existência de 200 canais. A relação de tempo de cálculo para a simulação da morfologia dos canais e a avaliação da porosidade rondará 10% e 90% dos tempos de cálculo, respectivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inovação deste trabalho reflecte-se em dois aspectos interligados: primeiro a geração da morfologia dos canais é feita por simulação estocástica numa representação por estrutura de dados por objectos de tipo vectorial, com estatísticas multiponto, que impõem a orientação e a sinuosidade dos canais e, em segundo, a avaliação da porosidade é feita na etapa de conversão da morfologia vectorial em matricial para a malha de blocos do reservatório sendo condicional a um modelo conceptual de fácies, com variações laterais e em profundidade na secção do canal.

A metodologia proposta é classificada como de tipo estocástico, porque todos os parâmetros intervenientes são deduzidos a partir de leis de distribuição pelo procedimento de Monte Carlo, o que permite que esta metodologia possa ser utilizada em todos os casos de estudo onde se conheçam, ou pelo menos se assumam, leis de distribuição para estes itens. Algumas variáveis intervenientes, como as dimensões do canal, podem ainda ser trabalhadas com algoritmos da geoestatística.

Os algoritmos de simulação que recorrem às estatísticas multiponto são conhecidos por serem pouco eficientes mesmo após a optimização computacional recente. Porém, a inovação proposta de utilização das estatísticas multiponto para a simulação das classes de azimuth é muito eficiente porque funciona a 1D e apresentou bons resultados, com a reprodução de padrões de imagens de treino nos troços simulados, como se pode verificar, por exemplo, na sinuosidade ou na direcção preferencial. Pontualmente, conseguem-se distinguir, nos canais simulados, comportamentos idênticos aos da imagem de partida.

No que diz respeito ao estudo da porosidade, tal como esperado, a malha deste parâmetro indica que as litologias mais porosas se encontram na base e no centro do canal, correspondendo ao cascalho e areias grossas, enquanto que as litologias com porosidades mais baixas se encontram no topo e margens do canal, onde se situam as areias finas e argilas. A porosidade média e global tendem a crescer e estabilizar num patamar máximo de 0,3, correspondente à litologia mais porosa.

Esta etapa de avaliação da porosidade pode evoluir facilmente para uma simulação geoestatística, onde em vez de se contabilizar a fracção de bloco que está contida em cada fácies e assumir um valor de porosidade de referência por fácies, passa-se a construir uma lei de distribuição local da porosidade por blocos, que resulte da composição ponderada das leis de distribuição da porosidade por fácies. Sobre estas leis de distribuição pode-se aplicar no final um algoritmo de simulação geoestatístico como o *Probability Field Simulation* - PFS de forma a

impor um variograma ou modelo de continuidade espacial à malha de porosidades, assim como gerar vários cenários de porosidade para a mesma morfologia dos canais.

Este estudo revela-se bastante promissor no que diz respeito à simulação da morfologia dos canais de areia em reservatórios ditos siliciclásticos, sendo esperada a sua aplicabilidade para estudo de reservatórios e propriedades dentro deste meio e o seu reconhecimento como alternativa aos métodos de simulação actuais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahr, W.M. (2008) *Geology of Carbonate Reservoirs*, Wiley, USA, 13-75.
- Allan, J.D., Castillo, M.M. (2007) *Stream Ecology*, Springer Netherlands, (3) 33-56.
- Almeida, J.A., Soares, A., Pereira, M.J., Daltaban, T.S. (1996) Upscaling of permeability: implementation of a conditional approach to improve the performance in flow simulation. *Proceedings of the 1st European 3D Reservoir Modelling Conference*, paper #35490.
- Almeida, J.A. (1999) Use of geostatistical models to improve reservoir description and flow simulation in heterogeneous oil fields. *Tese de doutoramento*, IST, 161 p.
- Almeida, J.A. (2010a) Modelling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. *Engineering Geology* 114 (1-2), 26-33.
- Almeida, J.A. (2010b) Stochastic Simulation Methods for Characterization of Lithoclasses in Carbonate Reservoirs, *Earth Science Reviews* 101, 250-270.
- Alves, F., Almeida, J.A., Silva, A.P. (2014) Simulation of acoustic impedance images by stochastic inversion of post-stack seismic reflection amplitudes and well data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 121, 52-65.
- Archer, J.S., Wall, C.G. (1986) *Petroleum Engineering Principles and Practice*, Ed. Graham and Trotman, Alden Press, Oxford, 362 p.
- Crichlow, H. B. (1977) *Modern Reservoir Engineering: a Simulation Approach*, Prentice-Hall, 354p.
- Cowan, E.J. (1991) The Large-Scale Architecture of the Fluvial Westwater Canyon Member. Morrison Formation (Upper Jurassic). San Juan Basin, New Mexico. *In* Miall, A. e Tyler, N. (eds.) *The Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and Its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery*. Tulsa, SEPM, *Concepts in Sedimentology and Paleontology* 3, 80-93.
- Da Costa e Silva, A. J. 1984. *Characterisation of reservoir heterogeneities at different scales*, *Tese de Mestrado*, Imperial College University, London.
- Deutsch, C.V., Journel, A. (1992) *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, Stanford.
- Folk, R. (1980) *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, 182 p.

Friend, P.F. (1983) Towards the Field Classification of Alluvial Architecture or Sequence *in* Collinson, J.D., Lewin, J. (ed.) Modern and Ancient Fluvial Systems, International Association Sedimentologists Special Publication, 345-354.

Gibling, M.R. (2006) Width and Thickness of Fluvial Channel Bodies and Valley Fills in the Geological Record: A Literature Compilation and Classification, *Journal of Sedimentary Research* 76, 731-770.

Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 480 p.

Haldorsen, H. and L. W. Lake. 1982. A new approach to shale management in field scale simulation models, SPE 57th Technical Conference, (September 1982), New Orleans.

Haliburton (2001) *Basic Petroleum Geology and Log Analysis*.

Hantschel, T. e Kauerauf (2009) *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*, Springer, Berlin, 476 p.

Jahn, F., Cook, M., Graham, M. (2008) *Hydrocarbon Exploration and Production*. *Developments in Petroleum Science* (55) 444 p.

Journel, A.G., Alabert, F.G. (1989) Non Gaussian data expansion in the earth sciences, *Terra Nova*, Vol.1: 123-134.

Journel, A.G., Gunderso, R., Gringarten, E., Yao, T. (1998) Stochastic modelling of a fluvial reservoir: a comparative review of algorithms. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (21) 95–121.

Júnior, P., Castro P. (2001) Associação Vertical de Fácies e Análise de Elementos Arquiteturais: Concepções Concorrentes e Complementares na Caracterização de Ambientes Aluviais, *Revista Electrónica de Ciências da Terra* 1, nº1, 1-35, Sociedade Geológica Portuguesa.

Kuznetsova, A., Almeida, J.A., Legoinha, P. (2014) Improved realism of channel morphology in object modelling with analogue data constraints. *ECMOR XIV-14th European conference on the mathematics of oil recovery*.

Kuznetsova, A. (2012) *Stochastic Simulation of the Morphology of Fluvial Sand Channels Reservoirs*. Tese de mestrado, FCT-UNL, 78 p.

Leeder, M. (1999) *Sedimentology and Sedimentary Basins: from Turbulence to Tectonics*, Blackwell Science Ltd, 592 p.

- Luis, J., Almeida, J.A. (1997) Stochastic Characterization of Fluvial Sand Channels, Geostatistics Wollongong'96, Volume 1, eds. E. Y. Baafi and N. A. Schofield. Kluwer Academic Publ., Netherlands, pp. 477-488.
- Miall, A., (1996). The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. Springer, Berlin, 582 p.
- Miall, A., (2014) Fluvial Depositional Systems, Springer Geology, Springer International Publishing Switzerland, IX, 316 p.
- Nunes, R., Almeida, J.A. (2010) Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. Computers & Geosciences 36 (8), 1042-1052
- Powers, M.C. (1953) A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. Journal of Sedimentary Research (SEPM) (23:2), 117-119.
- Quental, P., Almeida, J.A., Simões, M. (2012) Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. Advances in Water Resources 39, 18–32.
- Rosa, A., Carvalho, R., Xavier, J. (2006) Engenharia de Reservatórios de Petróleo, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 729 p.
- Selley, R.C. (2000) Applied Sedimentology, Academic Press, San Diego, 523 p.
- Soares, A. (2000) Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente, Instituto Superior Técnico Press, Lisboa, 206 p.
- Soares, A. (2001) Direct Sequential Simulation and Cosimulation. Mathematical Geology, 33(8), 911–926.
- Strebelle, S. (2002) Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point geostatistics. Mathematical Geology. 34: 1-22.
- Suguio, K. (2003) Geologia Sedimentar, Edgard Blucher, 400 p.
- Walker, R.G. e Cant, D.J. (1984) Sand Fluvial Systems *in* Walker, R.G. (ed.) Facies Models. Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series 1, 71-90.
- Walker, R. G. (1984) General Introduction: Facies, Facies Sequences and Facies Models *in* Walker, R. G. (ed.) Facies Models. Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series 1, 1-10.