

Modelagem assistida de lobos turbidíticos baseada em dados de testes de formação

Thiago de Menezes, Abelardo Barreto, Sinesio Pesco

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, Gávea, Brasil

thiagoomenez@mat.puc-rio.br, abelardo.puc@gmail.com e sinesio@puc-rio.br

Resumo—Correntes de turbidez são correntes gravitacionais turbulentas transportando grãos em alta velocidade e formando uma solução de água e sedimentos esparramados, sendo responsáveis pela formação de um tipo de reservatório petrolífero. O lobo turbidítico é um importante elemento arquitetural nos reservatórios turbidíticos e neste trabalho propomos uma modelagem assistida deste objeto, a partir de dados de pressão medidos durante um teste de formação. Para isto, foi desenvolvido um método de estimar as permeabilidades e parâmetros geométricos dos lobos com auxílio de um simulador de fluxo comercial e da interpretação assistida do teste de formação simulado, utilizando como base os dados de pressão extraídos de testes de formação de referência. Na modelagem do lobo turbidítico incluímos a alocação de uma superfície de base¹.

I. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tipos de reservatórios, os *turbiditos* possuem sua importância exaltada, principalmente no Brasil, por serem os responsáveis de grande parte da produção de petróleo e gás no país. Desta forma, o entendimento de suas características tanto geométricas como geológicas se tornam cruciais para minimizar os riscos envolvidos numa possível extração de óleo deste tipo de meio poroso.

Os turbiditos são formados por correntes de turbidez, que são correntes gravitacionais turbulentas. Elas transportam grãos, formando uma solução composta por água e sedimentos esparramados. São originados por causas naturais como tempestades, avalanches subaquáticas, descarga de rios e etc.

Os depósitos turbiditos são caracterizados por um complexo morfológico composto por uma distribuição de corpos arenosos distribuídos em lobos e canais. Eles se espalham para formarem um depósito turbidito que ocupam uma parte do solo. Um lobo pode ser construído por uma sucessão de correntes de turbidez que depositam cada vez mais sedimentos ao longo do tempo. Este fenômeno pode ser ilustrado na Figura 1.

Ao todo, três problemas foram abordados neste trabalho: (i) alocação de uma superfície de base aos lobos turbidíticos apresentados em [1]; (ii) aproximação de permeabilidades de canais turbidíticos em relação a um caso real e (iii) ajuste de parâmetros geométricos do reservatório, comparando-o com um caso de referência.

Os reservatórios turbidíticos localizam-se em águas profundas. Além disso, como são formados por correntes de

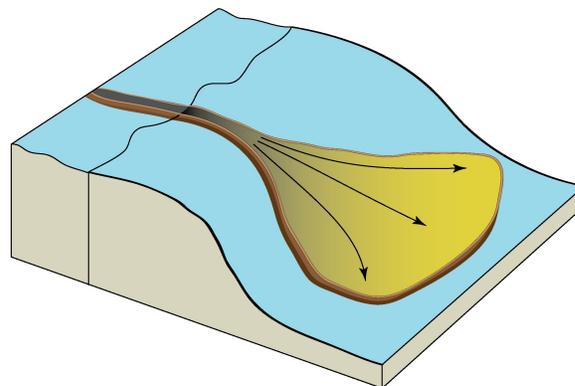


Fig. 1. Exemplo da arquitetura de um lobo turbidítico.

turbidez, que percorrem todo leito marinho até se assentarem e formarem o lobo turbidítico, moldam-se de acordo com os sedimentos que foram carregados pelas correntes marítimas e com o solo marinho. Consequentemente, torna-se necessária essa modelagem do corpo geológico construído através de ferramentas computacionais a uma superfície de base.

Já os problemas (ii) e (iii) se justificam pela impossibilidade de visualização dos turbiditos, que encontram-se no fundo do mar. A aproximação das permeabilidades é uma ferramenta que possibilita uma melhor descoberta das características geológicas do corpo, com objetivo de minimizar os custos de uma possível extração de óleo do reservatório. O ajuste dos parâmetros geométricos se torna importante para exprimir uma rigorosidade na localização do reservatório e tornar mais preciso a decisão de alocação de um poço para a produção de petróleo. Com isto, pretendemos mostrar que testes de formação podem ser grandes aliados na modelagem baseada em objetos de reservatórios de petróleo.

II. MODELAGEM DO LOBO TURBIDÍTICO

O modelo geométrico adotado para a construção do lobo baseia-se em três parâmetros independentes: a profundidade, largura e comprimento. Na Figura 2 podemos ver como estes parâmetros escolhidos definem a geometria do objeto, sendo estes os critérios mais importantes para a simulação. Esta proposta de modelagem de lobos turbidíticos foi apresentada em [1].

Ainda na Figura 2, conseguimos observar a disposição de três camadas de lobos, formando, assim, um grande reser-

¹Este trabalho se refere à uma dissertação de mestrado.

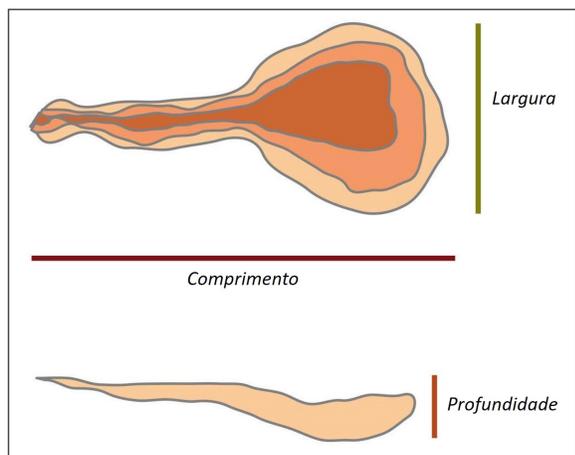


Fig. 2. Modelo conceitual do lobo turbidítico.

vatório. No processo de criação do objeto, primeiramente é construído o maior e mais profundo lobo, para, então, construir os dois seguintes de maneira deposicional, levando em consideração os parâmetros definidos para o primeiro. O objeto final será construído utilizando-se um *grid* em um espaço tridimensional.

A. Objeto *grid*

Um *grid* é uma divisão do domínio em polígonos, podendo ser congruentes ou não. Para este trabalho, utilizaremos um *grid* cartesiano, dividindo o domínio em cubos com lado 1.

que terá como parâmetros de entrada somente as dimensões em cada coordenada: n_x representando a divisão do domínio no eixo x , n_y representará a do eixo y e n_z , para o eixo z . Como nosso *grid* é cartesiano, temos $n_x = n_y = n_z$. Dadas estas informações, obteremos os cubos formadores do *grid*. Cada cubo será referido pelo seu centro, simbolizado por (p_x, p_y, p_z) .

A cada elemento do *grid* será associado um valor inteiro, que representará a localização de cada cubo do *grid* no espaço. Como trataremos de lobos turbidíticos com até três camadas, estes valores servirão para localizar cada célula nas diferentes camadas e fora do reservatório. Para isso, é criada uma matriz 3D para armazenar estes valores. Como exemplo, Podemos observar este processo no plano através da Figura 3, onde cada célula contida no objeto A recebe o valor 2, no objeto B , o valor 3 e em C , o valor 5. As células que não pertencem a nenhum objeto, receberão o valor 1.

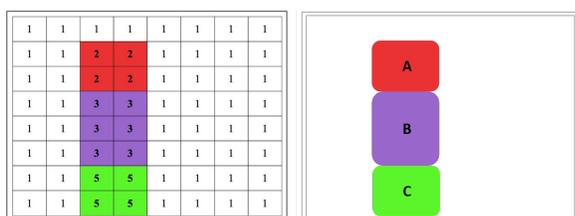


Fig. 3. Exemplo da localização das células no *grid*.

Considere a matriz 3D $g[i][j][k] \in N$, onde $i \in \{0, \dots, nx\}$, $j \in \{0, \dots, ny\}$ e $k \in \{0, \dots, nz\}$. Estes são os índices de cada cubo do *grid*. No primeiro momento $g[i][j][k] = 1 \forall i, j, k \in N$, pois ainda não foi construído nenhum objeto.

B. Parâmetros do lobo turbidítico

Na modelagem do lobo foram incluídos dois parâmetros para a largura, para permitir a representação de lobos assimétricos e dois parâmetros para a profundidade, totalizando cinco parâmetros: comprimento l , largura direita w_r , largura esquerda w_l , profundidade superior t_{sup} e profundidade inferior t_{inf} .

Além destes parâmetros, são necessários o ponto de origem (x_o, y_o, z_o) do lobo turbidítico, que determina qual parte do domínio ele terá o seu início e, também, precisamos da direção d que define o ângulo rotação do eixo- x em torno da origem.

C. Curvas B-Spline univariadas

Este é um tipo de curva B-Spline planar não racional usada para aproximar $y = f(x)$ em coordenadas cartesianas (x, y) [2], [5], onde f representa um polinômio (ou $z = g(x)$ no plano (x, z) com g representando um polinômio). A curva $C(t)$ de grau m é definida por uma sequência de pontos $\{t_0, \dots, t_{n+2(m-1)}\}$, tal que seu domínio é restrito a $t \in \{t_0, \dots, t_{n+m-1}\}$, definida em n intervalos. Os pontos de controle são $P_i = (x_i, y_i)$, onde:

$$x_i = \frac{1}{n} [t_0 + \dots + t_{i+m-1}], \quad i = 0, \dots, n$$

Essas curvas podem ser escritas da forma $C(t) = (t, f(t))$ e estamos interessados em funções f expressas em termos de bases de função B-Spline.

$$f(x) = \sum_{i=0}^{n+m-1} y_i N_{i,m}(t)$$

$$N_{j,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } t_j \leq t \leq t_{j+1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$N_{j,k}(t) = \frac{t - t_j}{t_{j+k} - t_j} N_{j,k-1}(t) + \frac{t_{j+k+1} - t}{t_{j+k+1} - t_{j+1}} N_{j+1,k-1}(t).$$

A Figura 4 exibe um exemplo de curva B-Spline univariada descrita como gráfico de uma função. O domínio é o intervalo $[0, 1]$, particionado em n pontos. Também podemos ver o polígono gerado pelos pontos de controle.

D. Design das curvas B-Spline univariadas

Para a modelagem das curvas B-Spline foram utilizados 14 pontos de controle igualmente espaçados no eixo x , escolhidos aleatoriamente de forma que o objeto assumisse a forma de um turbidito como encontrado na literatura [4]. Com isto, a construção do primeiro lobo será feita através da construção de quatro curvas para delimitar os parâmetros B_{left} , para modelar o parâmetro w_l , B_{right} , para modelar w_r , B_{sup} , para t_{sup} e B_{inf} , para t_{inf} , como podemos observar na Figura 6.

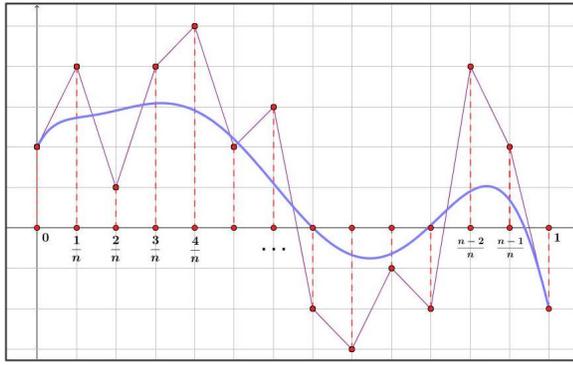


Fig. 4. Exemplo de curva B-Spline univalorada.

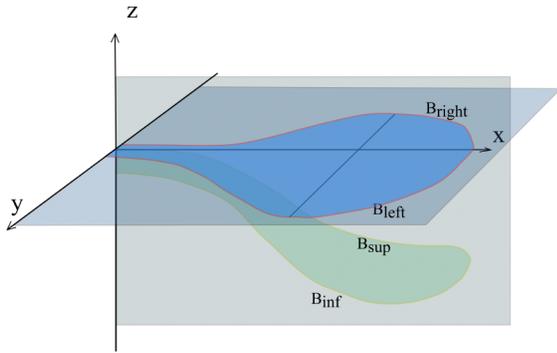


Fig. 5. Curvas B-Spline univaloradas para cada parâmetro do turbidito.

E. Conectando curvas B-Spline univaloradas

A construção da superfície que delimita o objeto lobo é feita utilizando-se um quarto de elipse conectando as curvas da largura com as da profundidade. A altura das elipses serão definidas pela curva t_{sup} e a base, pela curva t_{inf} . Um segmento de reta será conectado aos pontos do eixo x transladado curva t_{sup} e conectará a curva w_l até a t_{inf} através de um quarto de uma elipse. O mesmo processo é efetuado com a curva w_r , como podemos ver na Figura 6. Na Figura 7, podemos ver como é construído o interior do objeto.

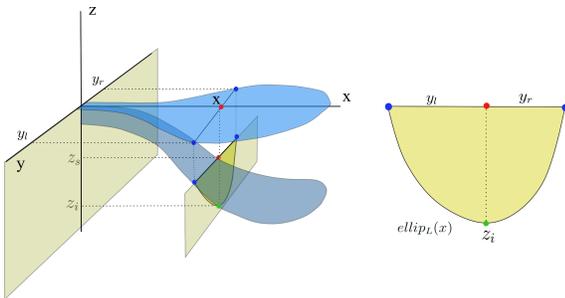


Fig. 6. Conectando as curvas com um quarto de elipses.

F. Objeto de saída do grid

Um função chamada in_out foi definida para o processo descrito na Figura 3. Ela se encarrega de marcar a célula

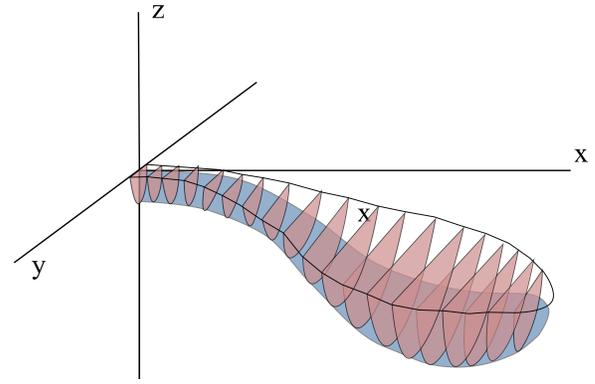


Fig. 7. Volume interior do objeto gerado.

do $grid$ com a sua devida localização. A Figura 8 ilustra como esta função funciona. Na esquerda temos uma célula do $grid$, representada pelo seu ponto central e , e na direita, temos o teste que responde se cada célula pertence ou não a cada camada objeto, bastando para isso testar a inclusão do ponto na equação do quarto de elipse elipse associado.

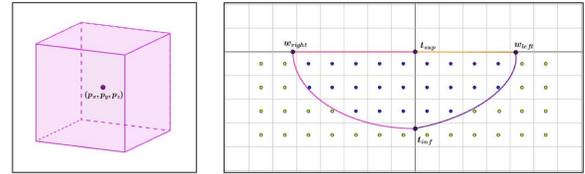


Fig. 8. Teste feito pela função in_out .

A seguir exibimos alguns exemplos de lobos gerados, onde cada camada foi indicada por uma cor diferente. Para a geração das imagens, foi utilizado um $grid$ com dimensão $100 \times 100 \times 100$. Na Figura 9 é apresentado um turbidito com três camadas com os seguintes parâmetros: $l = 10$, $d = 200$, $t_{inf} = 1$, $t_{sup} = 1.2$, $w_r = 5$, $w_l = 4$, com origem em $(5, -2, 0)$. Já na Figura 10, apresentamos um turbidito com $l = 5$, $d = 200$, $t_{inf} = 2$, $t_{sup} = 1$, $w_r = 1$, $w_l = 3$, com origem em $(0, 0, 0)$.

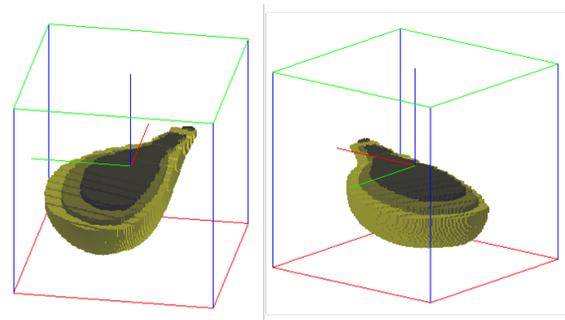


Fig. 9. Exemplo de turbidito com três camadas.

III. A SUPERFÍCIE DE BASE

Considere $f : \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ uma função contínua. Definiremos a superfície de base \mathcal{S} como o gráfico de f , onde

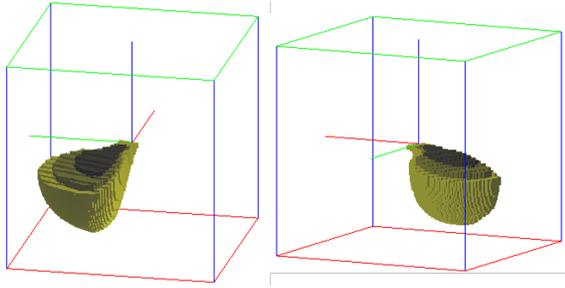


Fig. 10. Exemplo de turbidito com três camadas.

$D = [x_{min}, x_{max}] \times [y_{min}, y_{max}]$ é o domínio da mesma. A partir deste ponto, o teste de definição de quais pontos do *grid* pertencem ou não ao reservatório sofre mais uma alteração, pois as células que se encontram abaixo de S serão classificadas como não reservatório. Para isso, para cada célula do *grid*, representada pelo seu centro (p_x, p_y, p_z) , o seguinte teste é feito:

1. Se $p_z < f(p_x, p_y)$, $g[i][j][k] = 1$.
2. Se $p_z > f(p_x, p_y)$, então $g[i][j][k]$ receberá os valores como definido anteriormente pela função *in_out*.

Para a construção da superfície que definirá a base do lobo turbidítico, utilizaremos o método de interpolação de Shepard [6] para construir uma função através de um conjunto de pontos cedidos pela Petrobras que representa o solo submarino da Baía de Monterey, nos EUA. Abaixo, na Figura 11, exibimos a superfície interpoladora construída.

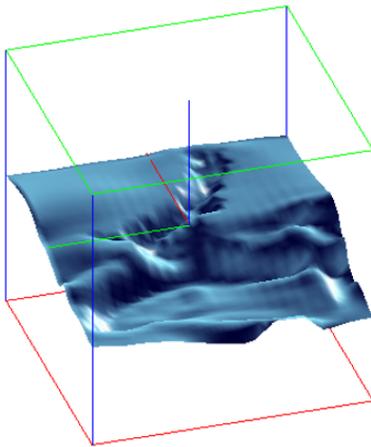


Fig. 11. Superfície interpoladora utilizada como base para o lobo turbidítico.

Na Figura 12 é exibido o mesmo lobo turbidítico apresentado na Figura 9, porém modelado superfície de base. Podemos observar como sua modelagem geométrica se torna mais realística e fiel s encontradas na natureza.

IV. AJUSTE DE PERMEABILIDADES

Nesta seção, utilizaremos o objeto criado nas seções anteriores para efetuar simulações de testes de produção, uma metodologia largamente utilizada antes da exploração de óleo

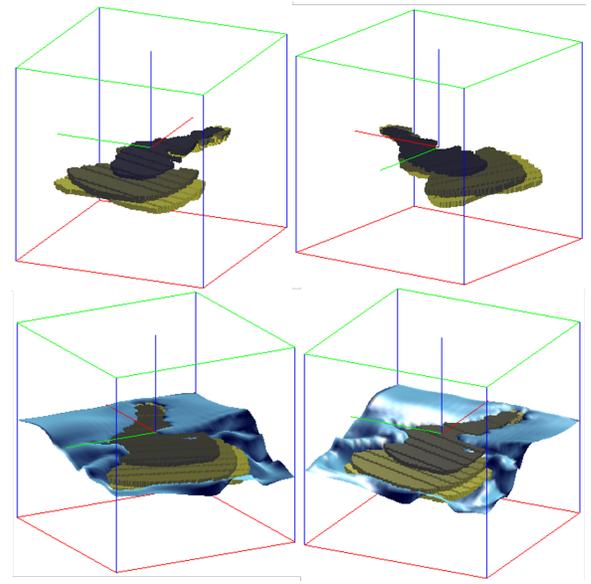


Fig. 12. Exemplo de lobo turbidítico com a superfície de base.

em reservatórios, com objetivo de estimar propriedades da formação. Para efetuar as simulações, utilizaremos o IMEX, um simulador de fluxo da Computer Modeling Group (CMG) baseado no método das diferenças finitas.

A permeabilidade K de um meio poroso é uma medição da sua capacidade de transmitir fluidos. Por exemplo, uma esponja possui uma permeabilidade alta. Um dos focos principais deste trabalho é estimar as melhores permeabilidades de reservatórios turbidíticos de acordo com valores obtidos de um teste de formação de referência. Quando é feito um teste desse tipo, podemos ter acesso a diversos dados importantes do reservatório. Um deles é o de pressão no fundo do poço. Com isto, podemos comparar resultados de um teste feito com um turbidito de referência com um simulado pelo nosso algoritmo, com objetivo de minimizar a diferença desses resultados buscando aprimorar a qualidade do modelo representativo daquele turbidito.

Definidos os dados de pressão observados de referência, para compararmos com os simulados, precisamos das seguintes definições:

- i) $\Delta p_i = p_i - p(t_i)$;
- ii) $\Delta p'_i = t_i \times \frac{\partial \Delta p_i}{\partial t_i}$.

Onde p_i é a pressão inicial do reservatório, medida no instante zero da produção; $p(t_i)$ é o valor da pressão no reservatório medida no tempo t_i , que é o tempo discretizado (neste caso, $i \in \{0, \dots, 50\}$) e $\partial t_i = t_i - t_{i-1}$.

Com isto, podemos calcular o erro entre as duas simulações construindo uma função objetivo calculada a partir da soma dos quadrados das diferenças entre o logaritmo natural dos $\Delta p'_i$ [3], exibida a seguir:

$$f_{obj} = \sum_{i=1}^{50} \left(\frac{\log(\Delta p'_{i,ref}) - \log(\Delta p'_{i,sim})}{\log(\Delta p'_{i,ref})} \right)^2$$

Onde $\Delta p'_{i,ref}$ representa os dados que definiremos como caso referência e o $\Delta p'_{i,sim}$ o caso simulado no tempo t_j .

Além disso, também definimos uma função auxiliar f_{aux} para definir se as permeabilidades do caso simulado estão maiores ou menores comparando com o caso de referência. Se $f_{aux} < 0$, temos que $K_{ref} < K_{sim}$. Caso contrário, $K_{ref} > K_{sim}$.

$$f_{aux} = \sum_{i=1}^{50} \left(\frac{\log(\Delta p'_{i,ref}) - \log(\Delta p'_{i,sim})}{\log(\Delta p'_{i,ref})} \right)$$

Suponha um lobo turbidítico criado com 3 camadas, definindo a permeabilidade como K_1 para a camada superior, K_2 para a intermediária e K_3 para a camada mais profunda. Assim, o terno de permeabilidades deste corpo é (K_1, K_2, K_3) . Na Figura 13 são exibidas duas séries representando o gráfico de $\Delta p'$ para o turbidito apresentado na Figura 12 utilizando dois ternos de permeabilidades diferentes: (100, 100, 100), exibido na Série A e, (100, 250, 1000) Série B. Desta forma, podemos ver como a permeabilidade altera estes valores. Ainda neste exemplo, obtivemos $f_{aux} = 28.62$ e $f_{obj} = 25.72$.

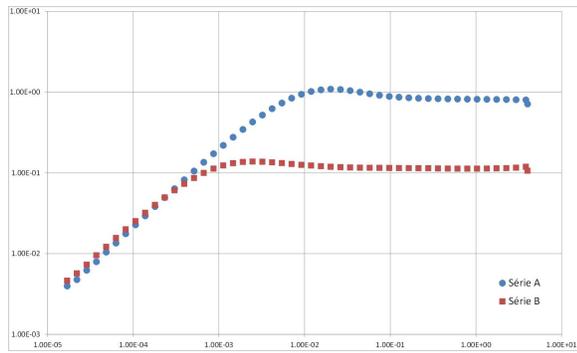


Fig. 13. Gráficos de $\Delta p'$ para dois ternos de permeabilidades diferentes.

Além dos valores de pressão medidos no teste de formação, outra informação importante que podemos retirar desta avaliação é o de vazão de produção q^j em cada camada j . Esta informação é muito útil pois se $q^j_{sim} > q^j_{ref}$, então temos que $K_{sim} > K_{ref}$ e, assim, conseguimos aproximações mais precisas.

No diagrama exposto na Figura 14, é exibido o método utilizado para ajustar as permeabilidades de um turbidito com 3 camadas. Após a criação do objeto e da definição das permeabilidades de cada camada, simulamos um teste de formação com um simulador de fluxo comercial. Após este processo, são calculadas f_{obj} e f_{aux} . Então, é feita a comparação de f_{obj} com o erro previamente definido. Caso $f_{obj} < erro$, o programa encerra e exibe o terno de permeabilidades em que f_{obj} obteve o menor valor. Caso contrário, as permeabilidades são alteradas em função de f_{aux} e q^j e uma nova simulação de teste de formação é feita.

Na Tabela I é exibido o resultado de um ajuste de permeabilidades de um turbidito com 3 camadas, começando com permeabilidades (100, 100, 100), tendo como caso de referência

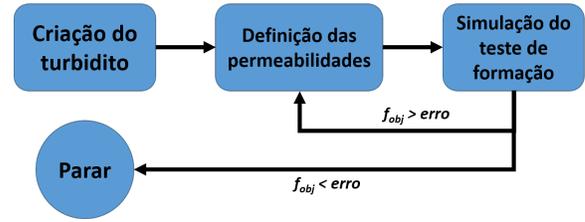


Fig. 14. Diagrama com o método de ajuste de permeabilidades.

o mesmo objeto, mas com permeabilidades (100, 250, 1000). Foi definido um erro de 0.0008 e, na iteração de número 118 foi encontrado um terno de permeabilidades com $f_{obj} = 0.00067 < erro$. É mostrado os valores de permeabilidades e f_{obj} para algumas iterações.

iteração	Permeabilidade	f_{obj}
0	(100, 100, 100)	61.02
1	(96, 96, 144)	29.31
2	(92, 92, 206)	13.53
3	(88, 88, 296)	5.96
4	(84, 84, 426)	2.75
5	(80, 120, 408)	3.15
6	(76, 115, 586)	1.21
7	(72, 165, 562)	1.29
8	(68, 158, 808)	0.4458
9	(81, 190, 799)	0.1983
10	(80, 229, 790)	0.2749
11	(96, 225, 955)	0.02145
12	(94, 247, 951)	0.01345
13	(102, 246, 1047)	0.02184
14	(107, 258, 994)	0.0108
15	(101, 245, 1043)	0.0255
...
116	(106, 253, 1007)	0.001814
117	(100, 240, 1057)	0.04726
118	(104, 251, 1004)	0.00067

TABELA I
AJUSTE DE PERMEABILIDADES TENDO COMO CASO DE REFERÊNCIA
(100, 250, 1000).

A Figura 15 exibe o gráfico da função objetivo em escala semi logarítmica durante o processo de ajuste de permeabilidades.

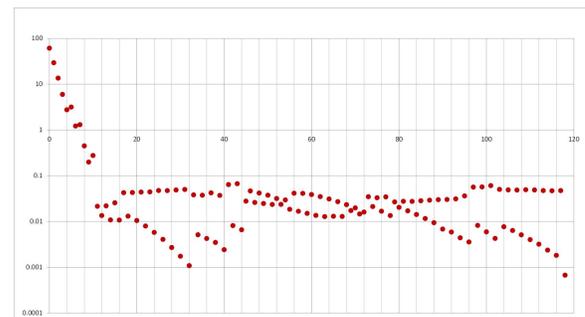


Fig. 15. Variação de f_{obj} durante o processo de ajuste.

V. AJUSTE DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Como as permeabilidades serão mantidas constantes, os valores de q^j não serão considerados, somente avaliando os valores de pressão através de $\Delta p'$. Conforme modificamos os parâmetros do turbidito, $\Delta p'$ também é modificado. Ao analisarmos um gráfico apresentando os valores de $\Delta p'$ entre dois turbiditos com diferentes parâmetros, obteremos um comportamento similar ao apresentado na Figura 13. Este fato será crucial para definirmos o melhor valor para os parâmetros.

Neste caso, escolheremos um parâmetro do reservatório para ser ajustado. Assim, um turbidito com parâmetro $y = y_{ref}$ é definido como caso de referência e será comparado com a simulação do mesmo objeto com parâmetro $y = y_{sim}$, através de f_{obj} definida na seção anterior. Também será utilizada f_{aux} , definida na seção anterior, para decidir se y_{sim} é maior ou menor que y_{ref} .

No diagrama exposto na Figura 16, é exibido o método utilizado para ajustar o parâmetro y de um turbidito com 3 camadas. Primeiramente o objeto é criado com todos os seus parâmetros definidos previamente, como exposto na Seção 2. Assim, um teste de formação é simulado e é calculado os valores de f_{obj} e f_{aux} . Então, é feita a comparação de f_{obj} com o erro previamente definido. Caso $f_{obj} < erro$, o programa encerra e exibe o melhor valor para o parâmetro y . Caso contrário, y será alterado levando em consideração f_{aux} . Um novo turbidito é criado com o novo valor para y e o processo se repete.

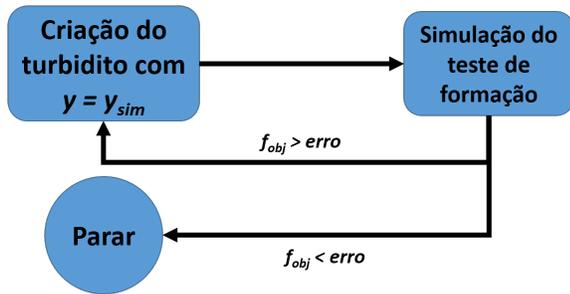


Fig. 16. Diagrama com o método de ajustes de parâmetro geométricos.

Na Tabela II exibimos o resultado de um ajuste do comprimento l de um turbidito com 3 camadas, começando com $l = 7$ e tendo como caso de referência um turbidito com as mesmas permeabilidades, mas com $l = 10$. Foi definido um erro de 0.0008 e, com 5 iterações, foi encontrado um valor para l tal que $f_{obj} = 0.0003431 < 0.0008$. Mostramos estas iterações com o respectivo valor de l e f_{obj} . Além disso, na Figura 17 podemos observar o crescimento do comprimento do turbidito até se ajustar ao caso de referência.

VI. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, além de melhor representar os lobos turbidíticos, importantes elementos arquiteturais dos reservatórios turbiditos, foi de mostrar que os testes de formação podem ser um grande aliado na modelagem geométrica de reservatórios de petróleo.

iteração	l	f_{obj}
0	7	38.6918
1	7.7	20.1206
2	8.47	5.1627
3	9.317	0.1128
4	9.50334	0.01484
5	9.69341	3.431e-5

TABELA II

APROXIMAÇÃO DO COMPRIMENTO $l = 10$.

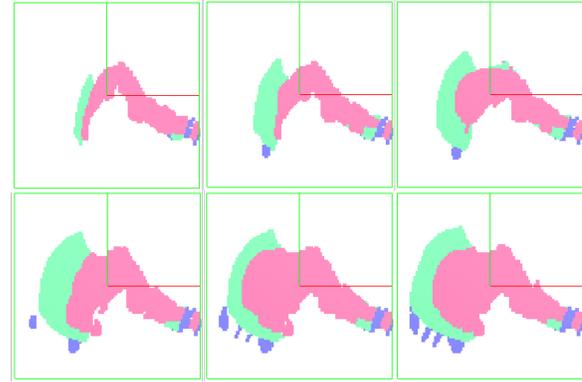


Fig. 17. Progressão de crescimento do comprimento l do lobo turbidítico.

Primeiramente foi alocada a superfície de base na modelagem apresentada por [1], tornando-a mais realística. Com isto, foi possível realizar simulações de testes de formação utilizando um simulador comercial, podendo, assim, desenvolver dois métodos booleanos capazes de estimar as permeabilidades e parâmetros geométricos de um modelo de reservatório.

Este processo se mostra importante dado que a imprecisão do conhecimento destes corpos na natureza é alta e os custos relacionados a extração de óleo e gás também são muito grandes e, com um maior conhecimento do complexo morfológico em questão, estas imprecisões diminuem, diminuindo, também, os riscos.

VII. ACKNOWLEDGMENTS

Os autores gostariam de agradecer à PETROBRAS.

REFERENCES

- [1] CARDONA, Y. A. 2016. Object-based Modelling of Turbidity Lobes using single-valued B-Splines *Dissertação de Mestrado. Departamento de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.*
- [2] FARIN, G. 1997. Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design: A Practical Code. *Academic Press Inc., fourth edition.*
- [3] HAMD, H. E SOUSA, M. C. 2016. Calibrating Multi-Point Geostatistical Models Using Pressure Transient Data. *Society of Petroleum Engineers*, doi:10.2118/180163-MS.
- [4] KUENEN, PH. H. 1957. Sole markings of graded greywacke beds. *Journal of Geology*, 65:231–258.
- [5] SÁNCHEZ-REYES, J. 1994. Single-valued tubular patches. *Computer Aided Geometric Design*, 11(5):565–592.
- [6] SHEPARD, D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. *Nova Iorque, EUA. Trabalhos do 23 ACM Press.*