5
Metodologia de Solução Numérica

Neste capítulo será descrito a metodologia para a validação do modelo, através dos seguintes itens:

- Definição do Problema;
- Adimensionalização do Problema;
- Condições de Contorno;
- Hipóteses do Modelo;
- Testes de Malha.

5.1.
Definição do Problema

Para realizar a simulação numérica do escoamento, é necessário determinar os diâmetros e as vazões envolvidas na etapa de cimentação. O escoamento ocorre na região anular, onde um fluido desloca outro, conforme ilustra a Figura 5.1.

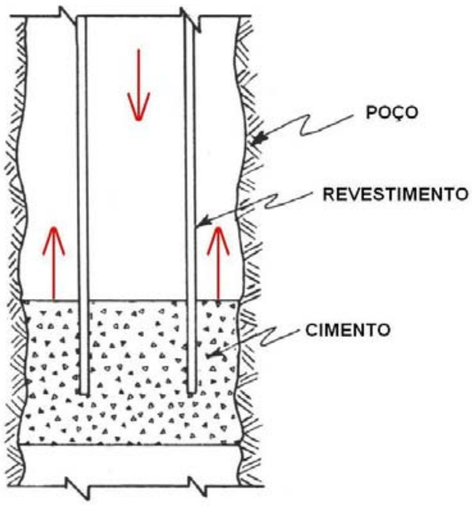

Figura 5.1 – Processo de deslocamento do cimento (Bourgoyne, 1991)

As características do processo de cimentação variam, conforme abaixo:

- Vazão (Q): 1bpm (0,00265m³/s) e 10bpm (0,02651m³/s);
- Diâmetro interno do poço (D_i): 8 ½" (0,216m) a 19" (0,483m);

- Diâmetro externo do tubo (d_e): 5" (0,127m) a 7" (0,178m).

Podem ser realizados dois tipos de simulação: modelo de dimensões reais ou em modelo com dimensões reduzidas. Não há grande diferença no processamento matemático destes modelos, entretanto há um ganho significativo na execução de testes experimentais caso seja utilizado um modelo com dimensões reduzidas.

Para definir os diâmetros e as vazões do modelo reduzido foi utilizada a razão entre diâmetros no espaço anular, D_i/d_e, conforme eq. 5-1.

$$\left\langle \frac{D_i}{d_e} \right\rangle_{POÇO} = \left\langle \frac{D_i}{d_e} \right\rangle_{MODELO} \quad (5\text{-}1)$$

A razão entre diâmetros $\langle D_i/d_e \rangle_{POÇO}$ varia entre a faixa abaixo (eq. 5-2 e 5-3):

$$\left\langle \frac{D_i}{d_e} \right\rangle_{POÇO} > \left\langle \frac{8\,\frac{1}{2}"}{7"} \right\rangle = 1{,}2 \quad (5\text{-}2)$$

$$\left\langle \frac{D_i}{d_e} \right\rangle_{POÇO} < \left\langle \frac{19"}{5"} \right\rangle = 3{,}8 \quad (5\text{-}3)$$

Foi utilizada uma razão de diâmetros $D_i/d_e = 1{,}8$. Tubos comerciais utilizados para experimentos, que poderão ser utilizados futuramente, possuem as seguintes dimensões:

- Tubo interno $d_{e,red} = 0{,}030m$ $d_{i,red} = 0{,}024m$;
- Tubo externo $D_{e,red} = 0{,}060m$ $D_{i,red} = 0{,}054m$.

Utilizando a mesma razão de diâmetros $D_i/d_e = 1{,}8$ para as dimensões reais do poço, obtêm-se os seguintes dados:

- Tubo interno $d_{e,poço} = 5"\ (0{,}127m)$ $d_{i,poço} = 4\,¼"\ (0{,}108m)$;
- Tubo externo $D_{e,poço} = 9¼"\ (0{,}235m)$ $D_{i,poço} = 9"\ (0{,}229m)$.

5.2. Adimensionalização do Problema

Como este trabalho consiste em um escoamento anular, o fluxo ocorre predominantemente em um escoamento de cisalhamento. Logo, o comprimento característico (L_C), que foi utilizado para adimensionalizar o problema, deve ser medido perpendicularmente à direção do fluxo. Para tanto, neste processo foi utilizada a folga entre o diâmetro externo e o interno, conforme eq. 5-4.

$$L_C = \frac{(D_i - d_e)}{2} \qquad (5\text{-}4)$$

A partir das dimensões mencionadas no item 5.1, calcula-se o comprimento característico (L_C) para o modelo em escala reduzida e para as dimensões reais do poço, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comprimento característico (L_C) para modelos reduzido/ real

Modelo em escala reduzida	0,012m
Dimensões reais do poço	0,051m

Para determinação da velocidade, primeiramente é realizado o cálculo nas dimensões reais do poço, conforme eq. 5-5, considerando a vazão de bombeamento (Q) igual a 1bpm (0,00265m³/s).

$$u_{anular} = \frac{Q}{A_{anular}} = \frac{4Q}{\pi(D_i^2 - d_e^2)} \qquad (5\text{-}5)$$

Considerando a hipótese que o modelo reduzido possui a mesma taxa de deformação característica que o modelo real ($\dot{\gamma}_c = u_c / L_c$), pode-se calcular a velocidade nas dimensões reduzidas (eq. 5-6).

$$u_{anular,red} = u_{anular,poço}\left(\frac{D_{H,red}}{D_{H,poço}}\right) \qquad (5\text{-}6)$$

A partir da eq. 5-5 e 5-6, determina-se as velocidades do anular (u_{anular}) para o modelo em escala reduzida e para as dimensões reais do poço, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Velocidade do anular (u_{anular}) para modelos reduzido/ real

Modelo em escala reduzida	0,093m/s
Dimensões reais do poço	0,022m/s

A partir destes dados, dimensiona-se o modelo para a análise do escoamento, conforme Figura 5.2.

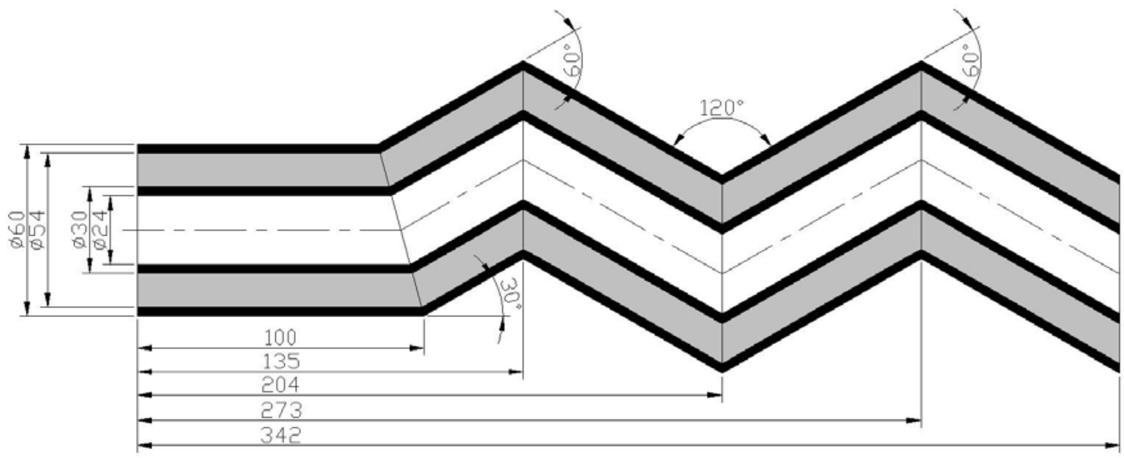

Figura 5.2 – Modelo em ziguezague (área do escoamento em cinza)

5.3. Condições de Contorno

5.3.1. Entrada (Velocidade Prescrita com Perfil Uniforme)

A condição de entrada utilizada é a de velocidade uniforme e normal à superfície de entrada, conforme eq. 5-7 a 5-9.

$$u_x(x, y, 0) = 0 \tag{5-7}$$

$$u_y(x, y, 0) = 0 \tag{5-8}$$

$$u_z(x, y, 0) = u_E \tag{5-9}$$

A velocidade de entrada é usada para definir a velocidade do escoamento, junto com todas as propriedades escalares relevantes, em superfícies de entrada.

Aplicando os parâmetros adimensionais à condição de contorno de entrada, obtêm-se as eq. 5-10 a 5-12:

$$u_x^*(x^*, y^*, 0) = 0 \tag{5-10}$$

$$u_y^*(x^*, y^*, 0) = 0 \tag{5-11}$$

$$u_z^*(x^*, y^*, 0) = u_E^* \tag{5-12}$$

onde $u_E^* = u_E / (\dot{\gamma}_C L_C)$.

5.3.2. Saída (Difusão Desprezível na Saída)

Foi selecionada a condição de fluxo difusivo nulo de todas as variáveis na direção do escoamento, na superfície de saída. Ou seja, que o escoamento esteja localmente desenvolvido (eq. 5-13). Essa condição pode parecer uma imposição forte para esse problema, no entanto, a região de interesse se encontra a uma distância suficientemente grande para que os efeitos na saída não afetem o formato da interface.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z}(x, y, L) = 0 \tag{5-13}$$

Esta condição de contorno é utilizada para modelar as saídas do escoamento onde os detalhes de velocidade e pressão não são conhecidos antes da solução do problema. As informações requeridas são extrapoladas a partir dos dados do interior do escoamento.

Escoamentos completamente desenvolvidos são aqueles em que o perfil da velocidade de escoamento é constante no sentido do escoamento. É importante notar que os gradientes no sentido perpendicular ao escoamento podem existir, nesta condição de contorno. Somente os escoamentos de difusão na direção normal ao plano da saída são nulos.

Aplicando os parâmetros adimensionais à condição de contorno de saída, obtém-se a eq. 5-14:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z^*}\left(x^*, y^*, L^*\right) = 0 \tag{5-14}$$

onde $L^* = L/L_C$.

5.3.3. Parede (Não Deslizamento e Impermeabilidade)

A condição de não deslizamento é a padrão, e indica que o fluido move-se com a mesma velocidade da parede. No caso, se a parede estiver parada, a velocidade é nula.

A hipótese de impermeabilidade, tanto na parede da tubulação, quanto na parede do poço representa que foi desconsiderada a perda de fluido para a formação rochosa.

Estas condições de contorno estão representadas nas eq. 5-15 e 5-16.

$$u(r_I \cos\theta, r_I sen\theta, z) = 0 \tag{5-15}$$

$$u(r_O \cos\theta, r_O sen\theta, z) = 0 \tag{5-16}$$

onde r_I é o raio do cilindro interno, r_O é o raio do cilindro externo e θ é a variação do ângulo no plano xy.

Aplicando os parâmetros adimensionais à condição de contorno na parede, obtêm-se as eq. 5-17 e 5-18:

$$u^*(r_I^* \cos\theta, r_I^* sen\theta, z^*) = 0 \tag{5-17}$$

$$u^*(r_O^* \cos\theta, r_O^* sen\theta, z^*) = 0 \tag{5-18}$$

onde $r_I^* = r_I / L_C$ e $r_O^* = r_O / L_C$.

5.3.4. Simetria

A condição de contorno de simetria é usada quando a geometria física e o campo de escoamento previsto têm uma correspondência de partes situadas em lados opostos de um plano. Esta condição pode ser resumida conforme abaixo:

- Fluxo convectivo (velocidade normal) nulo no plano de simetria, conforme eq. 5-19;

$$u_y(0, y, z) = 0 \tag{5-19}$$

- Fluxos difusivos (gradientes normais) nulos de todas variáveis no plano de simetria, conforme eq.5-20.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y}(0, y, z) = 0 \tag{5-20}$$

Aplicando os parâmetros adimensionais à condição de contorno de simetria, obtêm-se as eq. 5-21 e 5-22:

$$u_y^*(0, y^*, z^*) = 0 \tag{5-21}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z^*}(0, y^*, z^*) = 0 \tag{5-22}$$

5.4. Hipóteses do Modelo

Foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Regime transiente;
- Fluidos incompressíveis;
- Fluidos newtonianos e não newtonianos (modelo Souza Mendes e Dutra)
- Escoamento isotérmico;
- Inércia desprezível;
- Tensão superficial desprezível;
- Impermeabilidade e não deslizamento na parede do poço.

Como condição inicial, considerou-se que o fluido a ser deslocado ocupa todo o interior do domínio computacional. A partir do instante inicial, $t \geq 0$, o fluido deslocador é instantaneamente bombeado e cruza a superfície de entrada.

5.5. Testes de Malha

A geometria do modelo tridimensional foi desenvolvida no *software* GAMBIT, com escoamento em região anular (Figura 5.3). Foi utilizada simetria no plano XY, de modo a economizar tempo (custo computacional).

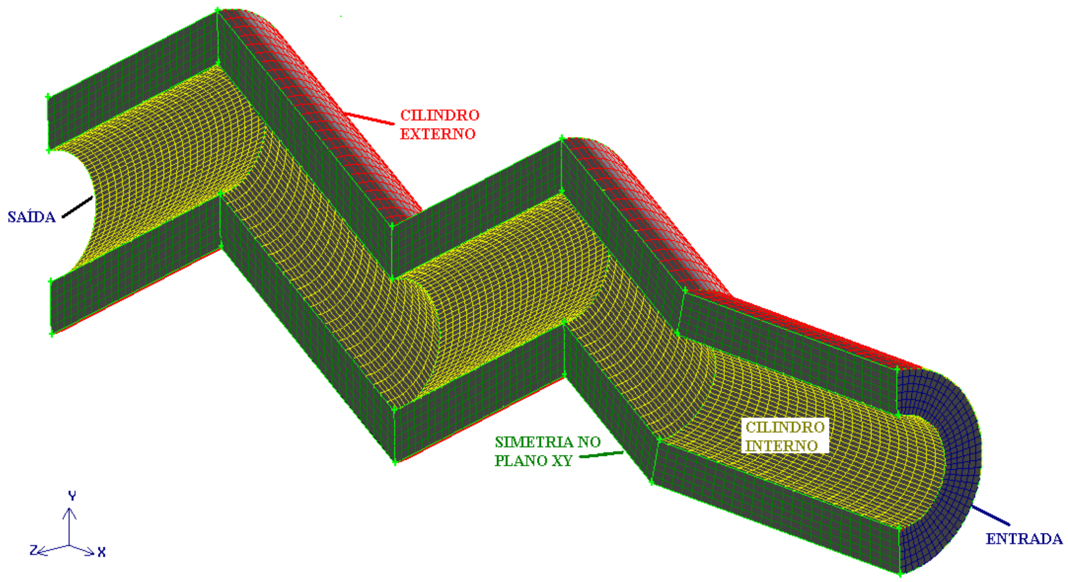

Figura 5.3 – Malha tridimensional do escoamento

As simulações foram realizadas no *software* FLUENT. Para verificação do modelo proposto, foram realizados testes para validação do tamanho da malha e do passo de tempo, utilizando dois fluidos newtonianos. Em seguida, foram realizados testes para validação do modelo reológico.

Este teste de malha foi realizado com intenção de definir qual seria o maior tamanho de malha, que fornecesse os mesmos resultados de uma malha mais refinada. Ou seja, a malha possuiria o grau de refinamento requerido para não alterar o resultado do escoamento. Além disso, a malha não deveria ser computacionalmente dispendiosa, de forma a não inviabilizar a simulação.

Foram utilizados três parâmetros para avaliar a qualidade da malha:

- A eficiência de retirada do fluido;
- O perfil da interface avaliado em três instantes de tempo;
- O tempo de simulação.

A eficiência do deslocamento é avaliada através de dois parâmetros:

- Volume percentual da fase deslocadora contido no interior do volume anular ($V^* = V_{FASE\ 2} / V_{TOTAL}$). Onde $V_{FASE\ 2}$ é o volume da fase deslocadora em um determinado instante de tempo e V_{TOTAL} é o volume total;
- Tempo adimensional ($t^* = u_E \cdot t / L$), proposto por Dutra et al (1995). Onde u_E é a velocidade média na superfície da entrada, t é o tempo de bombeamento e L é o comprimento do tubo anular. Ou seja, $t^* = 1{,}0$ corresponde ao tempo necessário para deslocar um volume completo caso o escoamento ocorresse com um perfil prescrito de velocidade.

5.5.1. Teste 1: Análise do Refinamento da Malha

Para verificar a malha, foram utilizados dois fluidos newtonianos: água e óleo. No instante inicial, a região anular está completa com a fase 1. Injeta-se a fase 2, deslocando a fase 1 com uma velocidade prescrita na região de entrada.

Serão analisados dois tipos de escoamento:

- Fase 1 (óleo) deslocando fase 2 (água);
- Fase 1 (água) deslocando fase 2 (óleo).

Primeiramente, foi realizada a simulação com óleo deslocando água (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Teste de malha (óleo deslocando água)

SIMULAÇÃO	Tamanho do elemento (mm)			Quantidade de elementos	Eficiência de remoção	Resíduo		Tempo de simulação (horas)
	X	Y	Z			Massa	Momento	
MALHA 1 (HC→H2O)	4,0	4,0	4,0	5.280	98,53%	1,00E-06	1,00E-07	8,0
MALHA 2 (HC→H2O)	2,0	2,0	2,0	27.600	98,49%	1,00E-09	1,00E-09	45,0
MALHA 3 (HC→H2O)	1,5	1,5	2,0	69.120	98,46%	1,00E-09	1,00E-09	220,0

Analogamente, foi realizada a simulação com água deslocando óleo (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Teste de malha (água deslocando óleo)

SIMULAÇÃO	Tamanho do elemento (mm)			Quantidade de elementos	Eficiência de remoção	Resíduo		Tempo de simulação (horas)
	X	Y	Z			Massa	Momento	
MALHA 1 (H20→HC)	4,0	4,0	4,0	5.280	44,64%	1,00E-06	1,00E-07	5,0
MALHA 2 (H20→HC)	2,0	2,0	2,0	27.600	42,03%	1,00E-09	1,00E-09	28,0
MALHA 3 (H20→HC)	1,5	1,5	2,0	69.120	42,04%	1,00E-09	1,00E-09	150,0

- **Eficiência de retirada do fluido**

Verifica-se que as simulações “MALHA 1 (HC→H2O)”, “MALHA 2 (HC→H2O)”e “MALHA 3 (HC→H2O)” apresentam uma boa eficiência de remoção da água, utilizando óleo como fluido deslocador.

Para as simulações onde a água desloca o óleo, não foram obtidas boas eficiências de remoção da água, visto que a água “fura” o óleo. Entretanto, as simulações “MALHA 1 (H2O→HC)” e “MALHA 2 (H2O→HC)” apresentam eficiências semelhantes.

- **Tempo de simulação**

As simulações “MALHA 3 (HC→H2O)” e “MALHA 3 (H2O→HC)” foram desconsideradas, pois iriam requerer elevado custo computacional.

- **Perfil da interface**

A interface entre os fluidos para diferentes malhas pode ser analisada nas Figuras 7.4 e 7.5.

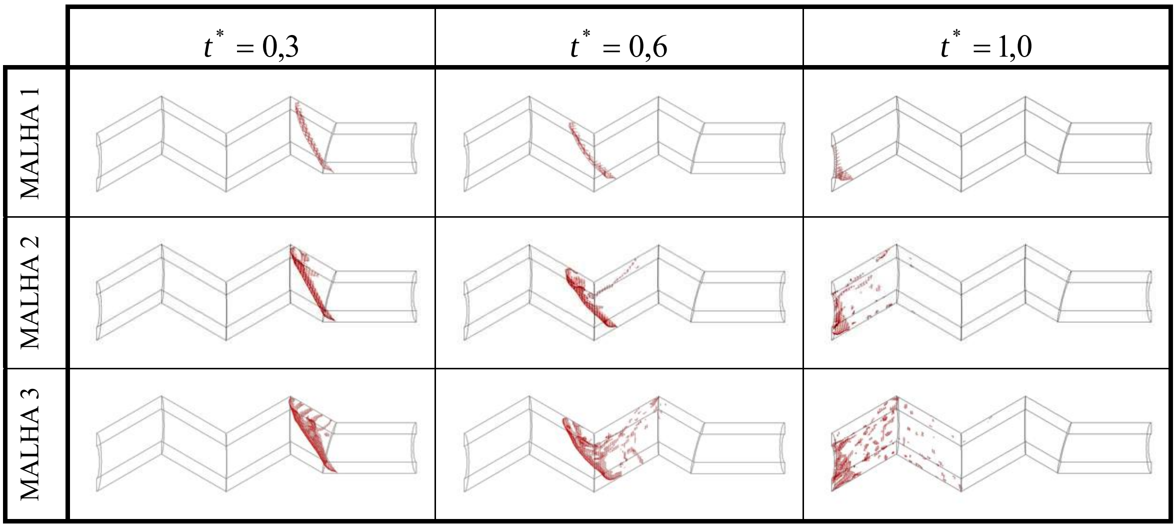

Figura 5.4 – Teste da malha – Análise da interface (óleo-água)

Nota-se que as simulações “MALHA 2 (HC→H2O)” e “MALHA 3 (HC→H2O)” bem como as “MALHA 2 (H2O→HC)” e “MALHA 3 (H2O→HC)” possuem perfil semelhante. Desta forma, a MALHA 2 (com 27.600 elementos) foi escolhida para realizar as simulações, pois apresenta um custo computacional menor do que a MALHA 3 (com 69.120 elementos).

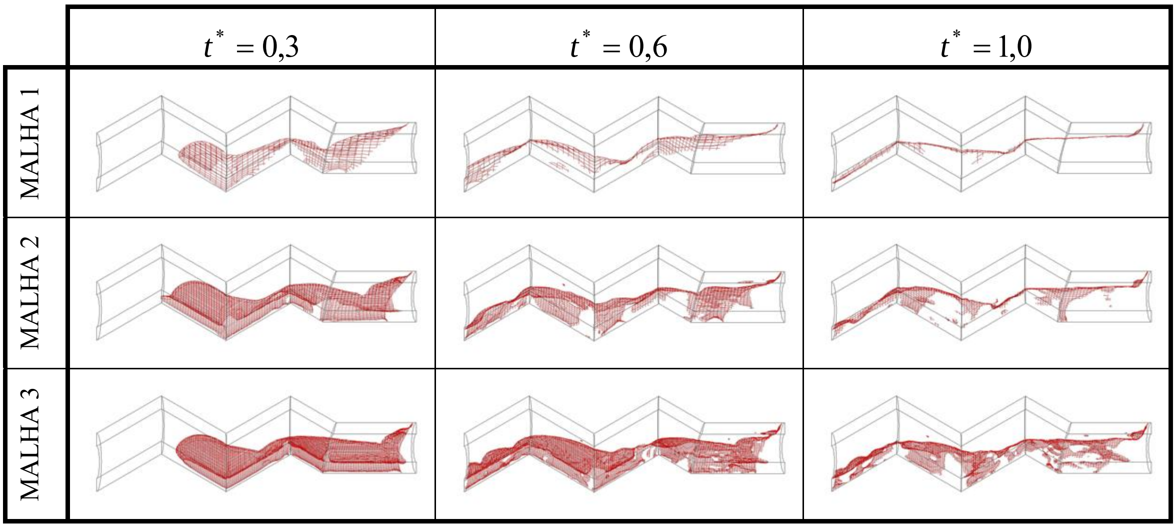

Figura 5.5 – Teste da malha – Análise da interface (água-óleo)

5.5.2. Teste 2: Análise do Passo de Tempo

Após analisar o tamanho da malha, deve ser realizada a análise do passo de tempo. Para tanto, foi utilizada a malha com 27.600 elementos. Foram realizados testes com três passos de tempo diferentes: 0,0025s, 0,0050s e 0,0100s.

Neste teste, serão avaliados:

- Eficiência de remoção do fluido;
- Tempo de simulação.

Primeiramente, foi realizada a simulação com óleo deslocando água (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Teste de passo de tempo (óleo deslocando água)

SIMULAÇÃO	Passo de tempo (segundos)	Eficiência de remoção	Resíduo		Tempo de simulação (horas)
			Massa	Momento	
PASSO 1 (HC→H2O)	0,0025	98,49%	1,00E-09	1,00E-09	45,0
PASSO 2 (HC→H2O)	0,0050	98,64%	1,00E-09	1,00E-09	32,0
PASSO 3 (HC→H2O)	0,0100	98,87%	1,00E-09	1,00E-09	12,0

Analogamente, foi realizada a simulação com água deslocando óleo (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Teste de passo de tempo (água deslocando óleo)

SIMULAÇÃO	Passo de tempo (segundos)	Eficiência de remoção	Resíduo		Tempo de simulação (horas)
			Massa	Momento	
PASSO 1 (H2O→HC)	0,0025	42,03%	1,00E-09	1,00E-09	28,0
PASSO 2 (H2O→HC)	0,0050	42,07%	1,00E-09	1,00E-09	20,0
PASSO 3 (H2O→HC)	0,0100	41,58%	1,00E-09	1,00E-09	17,0

- **Eficiência de retirada do fluido**

Verifica-se que as simulações com passo de tempo igual a 0,0050s apresentam eficiências muito próximas das simulações com 0,0025s.

- **Tempo de simulação**

Também verifica-se que o tempo de simulação para o passo de tempo de 0,0050s é um pouco menor do que o tempo de simulação com 0,0025s.

Desta forma, será utilizado nas próximas simulações, a malha tamanho 27.600 elementos, com passo de tempo de 0,0050s.

5.5.3. Teste 3: Análise do Modelo Reológico

Como o modelo reológico a ser utilizado nas simulações (SMD - Souza Mendes e Dutra) é uma função definida pelo usuário (UDF - *User-Defined Function*) foi realizado um teste para validação da mesma. Para tanto, gerou-se uma malha bidimensional, axissimétrica (Figura 5.6), para verificação do modelo reológico. Estes testes serão comparados com os resultados obtidos através do método de cálculo numérico unidimensional, descrito no Apêndice C.

Nos testes anteriores realizaram-se os estudos utilizando um modelo em dimensões reduzidas. Entretanto, a partir da análise do modelo reológico, decidiu-se realizar o estudo utilizando parâmetros adimensionais.

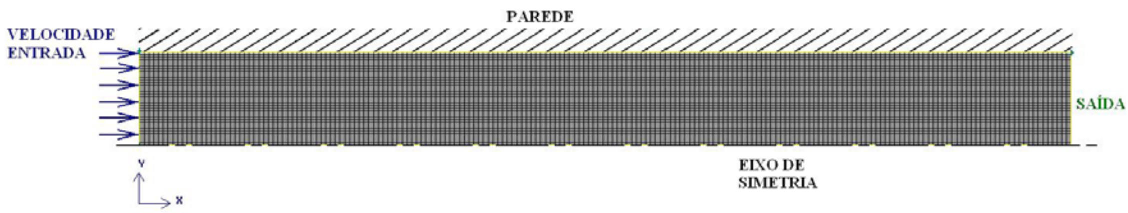

Figura 5.6 – Malha bidimensional para verificação do modelo reológico

Neste teste foi realizada uma análise qualitativa do modelo reológico, através da simulação de um escoamento de um fluido não newtoniano, em regime permanente.

O fluido analisado possui as propriedades adimensionais conforme Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Dados reológicos do fluido não newtoniano

Modelo	n	J
SMD	0,5	1000

O escoamento foi analisado em três níveis de velocidade adimensional:

- $u^* = 0,5$;
- $u^* = 1,0$;
- $u^* = 5,0$.

Foram considerados efeitos inerciais desprezíveis. Ou seja, a densidade dos fluidos foi determinada, considerando o número de Reynolds igual a 0,001 (eq. 5-23).

$$\mathrm{Re} \equiv \frac{\rho u_C L_C}{\eta_C} \tag{5-23}$$

Substituindo os parâmetros adimensionais ($L_C = 1,0$; $\eta_C = 1,0$ e $u_C = 5,0$) na eq. 5-23, obtém-se $\rho = 0,0002$. Este valor foi utilizado para ambos os fluidos.

Foram realizadas simulações em uma malha bidimensional, com dimensões de 1 (altura) x 10 (comprimento), subdividida em 40 x 200 elementos, respectivamente.

Pode ser observado na Figura 5.7 que o perfil de velocidade está condizente com o comportamento não newtoniano, apresentando um platô de velocidade.

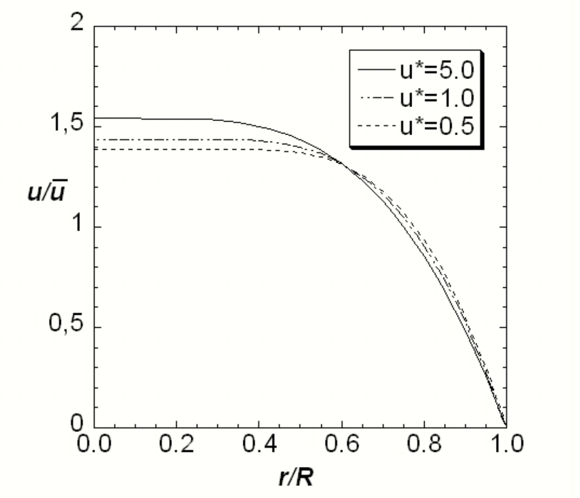

Figura 5.7 – Teste do modelo reológico – Perfil de velocidade ($u/\bar{u}$)

A Figura 5.8 mostra que a taxa de deformação ($\dot{\gamma}^*$) aumenta na região próxima à parede, onde $r/R = 1$. Ao analisar a taxa de deformação, juntamente com o perfil de velocidade, confirma-se que o platô do perfil de velocidade diminui com o aumento da velocidade.

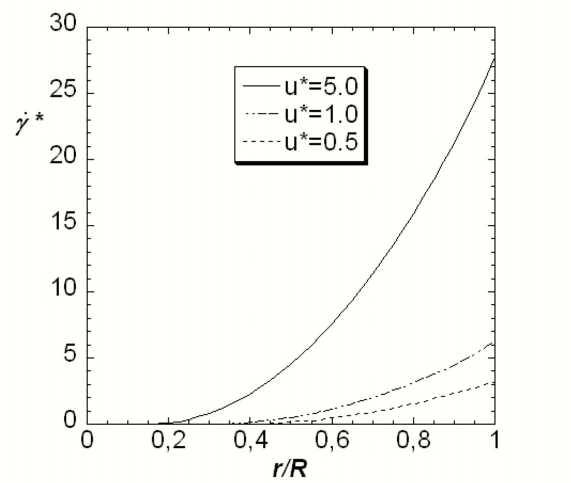

Figura 5.8 – Teste do modelo reológico – Taxa de deformação ($\dot{\gamma}^*$)

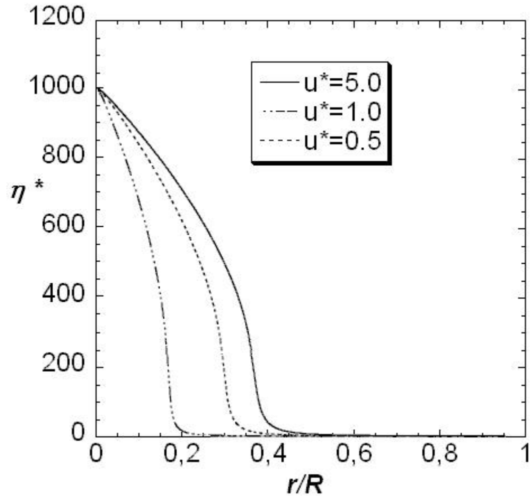

Figura 5.9 – Teste do modelo reológico – Viscosidade (η^*)

A taxa de deformação ($\dot{\gamma}^*$) tende a zero, quando $r/R = 0$. Consequentemente, a viscosidade (η^*) tende a 1000, conforme observado na Figura 5.9. Esta observação está condizente com o modelo SMD, conforme observado na eq. 5-24, onde $J = 1000$.

$$\begin{aligned} \eta^*(0) &= \lim_{\dot{\gamma}^* \to 0} \frac{\left(1 - \exp\left(-(J+1)\dot{\gamma}^*\right)\right)}{\dot{\gamma}^*}\left(1 + \dot{\gamma}^{*n}\right) \\ &= \lim_{\dot{\gamma}^* \to 0} \frac{(J+1)\exp\left(-(J+1)\dot{\gamma}^*\right)}{1}\left(1 + \dot{\gamma}^{*n}\right) = J + 1 \end{aligned} \tag{5-24}$$

Estes gráficos de perfil de velocidade, taxa de deformação e viscosidade são idênticos aos obtidos através do método descrito no Apêndice C.

A análise com parâmetros adimensionais foi realizada com o intuito de se verificar mais precisamente a faixa de viscosidade em que ocorre o escoamento. Os demais estudos foram realizados somente com parâmetros adimensionais. Para tanto, torna-se necessário avaliar o valor de J.

5.5.4. Teste 4: Análise do Número de Salto

Geralmente J apresenta valores elevados, difíceis de serem mensurados em laboratório, pois $\dot{\gamma}$ está muito próximo de zero. Outro ponto que deve ser levado em consideração é o processamento numérico de fluidos não newtonianos. Quanto maior o valor de J, mais difícil é a convergência do algoritmo.

Logo, foram simulados diferentes valores de J para verificar a influência deste parâmetro no comportamento do escoamento.

Para tanto, gerou-se uma malha bidimensional, axissimétrica (Figura 5.10), para verificação do modelo reológico. Foram realizadas simulações em uma malha com dimensões de 1 (altura) x 10 (comprimento), subdividida em 40 elementos (altura) x 200 elementos (comprimento).

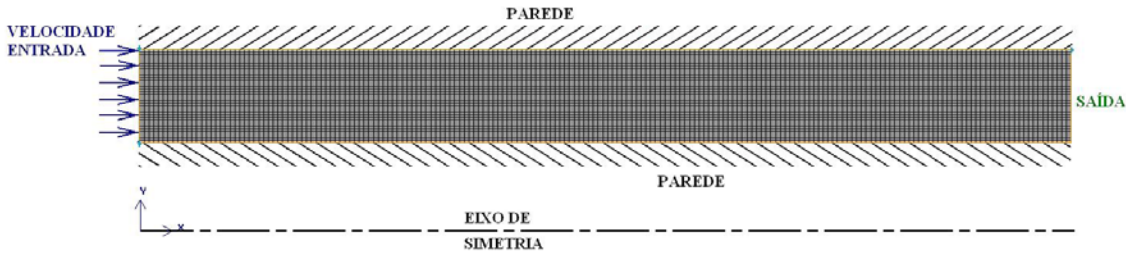

Figura 5.10 – Malha bidimensional para verificação de J

Neste teste foi realizada uma análise qualitativa de J, simulando o deslocamento de um fluido por outro, em regime transiente. Foi analisado o escoamento de um fluido newtoniano deslocando um fluido não newtoniano, e vice-versa.

O fluido newtoniano possui viscosidade $\eta = 1{,}0$. O fluido não newtoniano possui as propriedades adimensionais descritas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Dados reológicos dos fluidos não newtonianos

Fluido	n	J
SMD-A	1,0	1000
SMD-B	1,0	10000
SMD-C	1,0	100000
SMD-D	1,0	1000000

O escoamento foi analisado em dois níveis de velocidade adimensional:

- $u^* = 0{,}1$
- $u^* = 1{,}0$

As simulações foram realizadas em uma malha bidimensional, com dimensões de 1 (altura) x 10 (comprimento), subdividida por 40 (altura) x 200 (comprimento).

5.5.4.1. Fluido Newtoniano Deslocando Fluido Não Newtoniano

Primeiramente, foi analisado o escoamento onde um fluido newtoniano desloca um fluido não newtoniano. Foram simulados os casos, conforme Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Teste de J (newtoniano deslocando não newtoniano)

Simulação	Velocidade	Newtoniano	Não newtoniano	
		η	J	n
CASO 1A (N→NN)	0,1	1,0	1000	1,0
CASO 1B (N→NN)	0,1	1,0	10000	1,0
CASO 1C (N→NN)	0,1	1,0	100000	1,0
CASO 1D (N→NN)	0,1	1,0	1000000	1,0
CASO 2A (N→NN)	1,0	1,0	1000	1,0
CASO 2B (N→NN)	1,0	1,0	10000	1,0
CASO 2C (N→NN)	1,0	1,0	100000	1,0
CASO 2D (N→NN)	1,0	1,0	1000000	1,0

A partir destas simulações foi obtido o perfil de velocidade, avaliado na metade do comprimento, em $t^* = 1{,}0$, conforme Figuras 7.11 e 7.12.

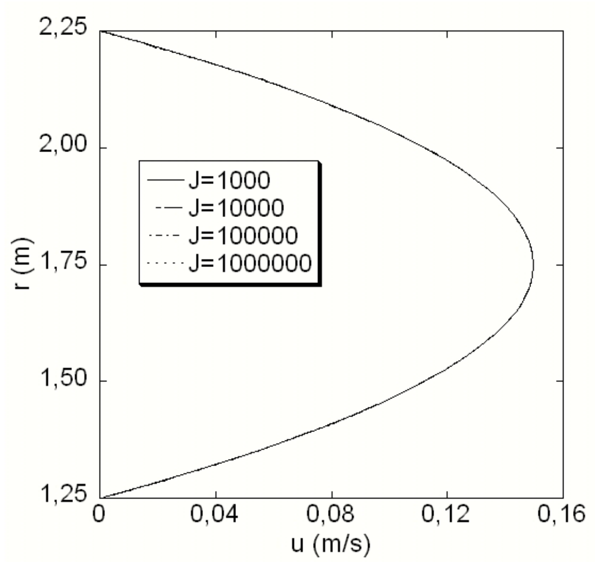

Figura 5.11 – Teste de J, newtoniano deslocando não newtoniano ($u^* = 0{,}1$)

Observa-se que, em ambos os casos, o perfil parabólico da velocidade identifica a característica de escoamento laminar, do fluido newtoniano. Verifica-se o fenômeno de *fingering*, na Figura 5.11, onde o fluido deslocador tende a "furar" o fluido deslocado. Em ambas figuras, o valor de J não altera o comportamento do escoamento.

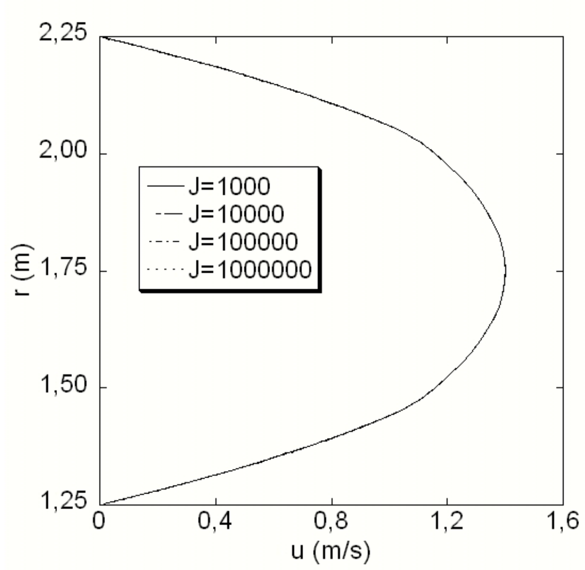

Figura 5.12 – Teste de J, newtoniano deslocando não newtoniano ($u^* = 1{,}0$)

5.5.4.2. Fluido Não Newtoniano Deslocando Fluido Newtoniano

Posteriormente, foi analisado o escoamento onde um fluido não newtoniano desloca um fluido newtoniano. Foram simulados os casos, conforme Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Teste de J (não newtoniano deslocando newtoniano)

Simulação	Velocidade	Não newtoniano		Newtoniano
		J	n	η
CASO 3A (NN→N)	0,1	1000	1,0	1,0
CASO 3B (NN→N)	0,1	10000	1,0	1,0
CASO 3C (NN→N)	0,1	100000	1,0	1,0
CASO 3D (NN→N)	0,1	1000000	1,0	1,0
CASO 4A (NN→N)	1,0	1000	1,0	1,0
CASO 4B (NN→N)	1,0	10000	1,0	1,0
CASO 4C (NN→N)	1,0	100000	1,0	1,0
CASO 4D (NN→N)	1,0	1000000	1,0	1,0

A partir destas simulações foi obtido o perfil da velocidade, avaliado na metade do comprimento, em $t^* = 1{,}0$, conforme Figuras 7.13 e 7.14.

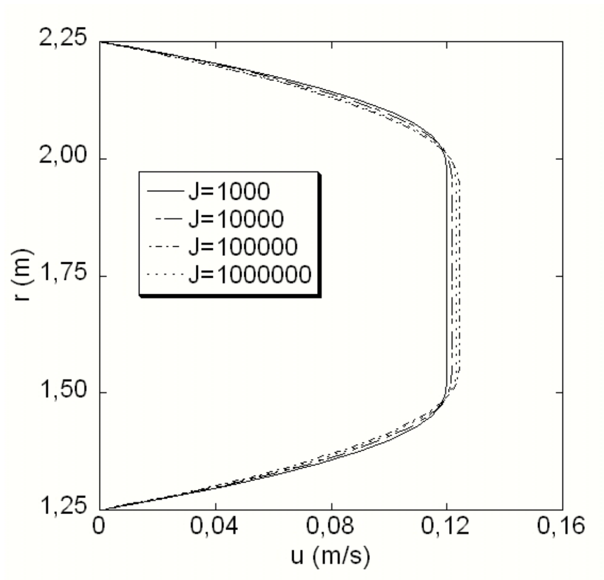

Figura 5.13 – Teste de J, não newtoniano deslocando newtoniano ($u^* = 0{,}1$)

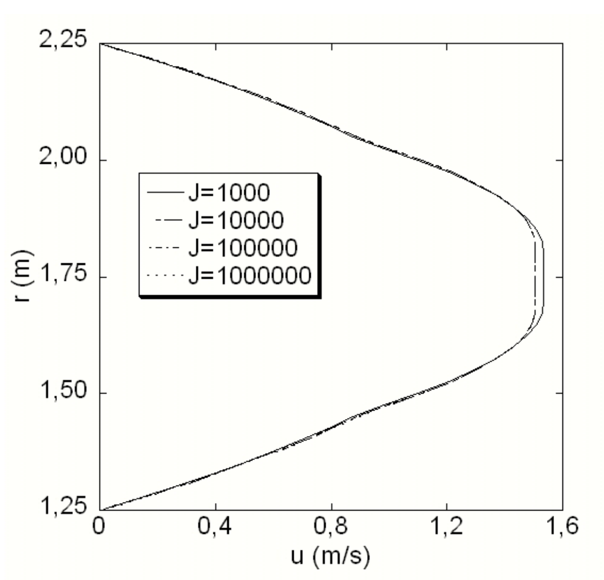

Figura 5.14 – Teste de J, não newtoniano deslocando newtoniano ($u^* = 1{,}0$)

Observa-se, em ambos os casos, o platô identificando o escoamento do fluido não newtoniano. O platô é menor na Figura 5.14, onde a velocidade é maior, condizente com a característica do modelo SMD. Foi adotado o valor de J igual a 100000, pois este dado está condizente com valores observados na literatura. Concomitantemente, nenhum caso simulado teve problemas de convergência.