

# UM ESTUDO SOBRE PARÂMETROS DE SEDIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO COM BASE EM MODELAGEM MATEMÁTICA EM PROVETA

Hariel Udi Santana Mendes <sup>1</sup>  
Antonio Santos Silva <sup>2</sup>

## RESUMO

O estudo do movimento gravitacional de suspensão particulada é de grande importância para o estabelecimento de parâmetros fenomenológicos do processo e para a previsão de valores de parâmetros necessários aos cálculos de projetos de sedimentadores e da sedimentação de partículas sólidas de fluido de perfuração de poços de petróleo. Neste trabalho, com base nos testes de proveta para o movimento gravitacional, consideram-se as regiões de sedimentação livre, de transição e de compactação, ocupadas pela suspensão durante o processo. Os parâmetros de sedimentação de sólidos adensantes em fluidos de perfuração foram estudados com base na região de transição. A suspensão na proveta foi modelada por um meio poroso com restrição de incompressibilidade que, sob certas condições, permite o estabelecimento de equações para as funções porosidade e velocidades na região de transição. Na equação que fornece diretamente a função porosidade para a região de transição surgem parâmetros constantes que precisam ser determinados, os quais também aparecem nas equações que descrevem a altura da interface superior descendente. Foram determinados resultados numéricos que mostram que o comportamento da curva da interface superior descendente se ajusta a resultados experimentais, e que o comportamento da porosidade e velocidades para a região de transição estão de acordo com formas da literatura.

**Palavras-chave:** Funções porosidade e velocidades, região de transição, sedimentação, fluidos de perfuração

## INTRODUÇÃO

O estudo do movimento gravitacional de uma suspensão particulada é importante tanto do ponto de vista teórico, como em diferentes situações que podem ocorrer na prática e que podem ser aplicadas nas diversas áreas da Engenharia. Na Engenharia de Processos Químicos diversas operações unitárias envolvem esta aplicação, como por exemplo, na sedimentação e projetos de sedimentadores (Cremasco, 2013). Na Engenharia de Petróleo, os fluidos de perfuração utilizados para perfuração de poços de petróleo são exemplos de suspensões particuladas, que possuem diversas funções, tais quais: manter estáveis a parede do poço,

<sup>1</sup> Mestre pelo Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe - UFS, [harieludi@hotmail.com](mailto:harieludi@hotmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: doutor, Departamento de Matemática - UFS, [ass@infonet.com.br](mailto:ass@infonet.com.br);

controlar a hidrostática do poço para evitar influxos indesejados da formação para dentro do poço, resfriar a broca de perfuração, dentre outras finalidades (Thomas, 2001).

O trabalho de Ribeiro Junior (2016) mostrou que a sedimentação de sólidos suspensos em fluidos de perfuração pode gerar diversas situações indesejáveis, que podem causar acidentes, ou problemas irreversíveis no poço de petróleo e buscou descrever a dinâmica de sólidos adensantes em fluidos de perfuração. Omland et al. (2013) fizeram um estudo do processo de sedimentação em função da temperatura, da rotação da coluna de perfuração e da composição dos fluidos e como estes parâmetros podem alterar a deposição das partículas, a fim de tomar precauções necessárias para um melhor controle de poço.

Segundo Basset (1888), através da mecânica do contínuo para uma partícula sólida, é importante frisar que o movimento de queda acelerada de uma partícula num fluido é de extrema importância para se obter diversas informações a respeito dos parâmetros de uma suspensão particulada. Do ponto de vista de um meio poroso saturado com fluido, modelado pela Teoria Contínua de Misturas Sólido-Fluido sem reações químicas, considerando que a densidade do sólido e do fluido puros são constantes, ou seja, com restrição de incompressibilidade, a formulação teórica proposta por Silva et al. (2013) fornece equações de balanço generalizadas, envolvendo grandezas constitutivas e arbitrárias.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo acerca das funções porosidade e velocidades na região de transição do movimento gravitacional de uma suspensão particulada em proveta, através de modelagem matemática e comparar dados experimentais com resultados teóricos de altura da interface superior descendente *versus* tempo.

## METODOLOGIA

### Balances Básicos:

Ao utilizar a modelagem matemática proposta por Silva et al. (2013), da suspensão na proveta como um meio poroso com restrição de incompressibilidade, os seguintes balanços de massa e quantidade de movimento linear podem ser utilizados.

- Balanços de massa

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon V_1) = 0 \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} ((1 - \varepsilon) V_2) = 0 \quad (1)$$

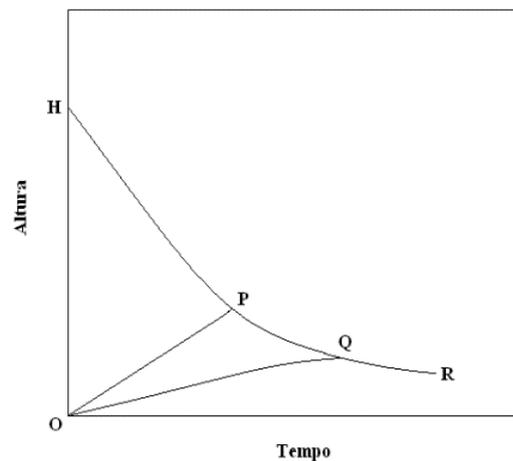
- Balanços de quantidade de movimento linear

$$\begin{aligned} \rho_1 a_1 &= -\varepsilon \frac{\partial P_f}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial y} + m + \rho_1 g_1 \\ \rho_2 a_2 &= -(1 - \varepsilon) \frac{\partial P_s}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial y} - m + \rho_2 g_2 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\partial \Pi_{sf}}{\partial y} &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial \Pi_{sf}}{\partial t}, \quad \Pi_{sf} = P_s - P_f \\ g_1 &= g_2 = -g \\ \rho_1 &= \varepsilon \rho_f \quad \rho_2 = (1 - \varepsilon) \rho_s \\ a_\alpha &= \frac{\partial V_\alpha}{\partial t} + V_\alpha \frac{\partial V_\alpha}{\partial y} \quad \alpha = 1, 2 \end{aligned} \quad (2)$$

sendo  $P_f(y, t)$  e  $P_s(y, t)$  pressões arbitrárias,  $a_\alpha$  a aceleração,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  a parte constitutiva do tensor tensão,  $m(y, t)$  a força difusiva ou resistiva,  $\rho_f$  e  $\rho_s$  as massas específicas do fluido e do sólido, respectivamente e  $g$  a aceleração da gravidade.

### Modelo Matemático:

Conforme o modelo proposto por Libório (2016), Mendes e Silva (2018) e Mendes (2019), a sedimentação das partículas sólidas de um fluido particulado em proveta, que tem início com o movimento de queda das partículas do topo da proveta até o seu fundo, pode ser caracterizada por meio de uma curva *Altura versus Tempo*. Esta curva é dividida em sub-regiões, que podem ser caracterizadas através da Figura 1.



**Figura 1:** Gráfico representativo do processo de sedimentação em proveta.

Cada uma destas regiões possui denominações específicas: HPQR até a altura H representa a Região de Líquido Puro, OPHO representa a Região de Sedimentação Livre (SL), OPQO representa a Região de Transição (RT) e a região limitada por OQR e o eixo dos tempos

representa a Região de Compactação. As curvas HPQR, OP e OQ dizem respeito, respectivamente, às alturas da Interface Superior Descendente, da Onda de Aceleração e da Interface Inferior Ascendente.

As seguintes relações podem ser escritas de cada uma das curvas da Figura 1:

$$x(t), 0 \leq t \leq \infty \quad h(t), 0 \leq t \leq t_0 \quad z(t), 0 \leq t \leq t_c \quad (3)$$

sendo  $t$  a variável tempo,  $x(t)$  a altura da interface superior descendente,  $h(t)$  a altura da onda de aceleração e  $z(t)$  a altura da interface inferior ascendente. O tempo  $t_0$  indica o instante de encontro da interface superior descendente com a onda de aceleração e o tempo  $t_c$  indica o instante de encontro das duas interfaces. As alturas satisfazem as condições iniciais (4) e as condições de contorno (5).

$$x(0) = H \quad h(0) = 0 \quad z(0) = 0 \quad (4)$$

$$h(t_0) = x(t_0) \equiv x_0 \quad x(t_c) = z(t_c) \equiv x_c \quad (5)$$

sendo  $H$  a altura inicial da suspensão na proveta. Além disso, considera-se  $y$  como a coordenada espacial (posição) orientada para cima de tal modo que  $y = 0$  representa o fundo da proveta ou o eixo dos tempos na Figura 1. A função porosidade da suspensão na proveta é definida através de (6).

$$\varepsilon(y, t) \quad 0 \leq y \leq x(t) \quad 0 \leq t < \infty \quad (6)$$

A função porosidade satisfaz a condição inicial:

$$\varepsilon(y, 0) = \varepsilon_0 = \text{constante} \quad 0 \leq y \leq H \quad (7)$$

Com a seguinte notação no fundo da proveta:

$$\varepsilon(0, t) = \varepsilon_m(t) \quad 0 \leq t \leq \infty \quad \varepsilon_{mf} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_m(t) \quad (8)$$

As velocidades do fluido e do sólido, são definidas, respectivamente, por:

$$V_1(y, t) \text{ e } V_2(y, t) \quad 0 \leq y \leq x(t) \quad 0 \leq t < \infty \quad (9)$$

e são nulas no fundo da proveta, expressando as condições de contorno:

$$V_1(0, t) = V_2(0, t) = 0 \quad 0 \leq t < \infty \quad (10)$$

Como, das equações (1), tem-se que a função  $\varepsilon V_1 + (1 - \varepsilon)V_2$  não depende de  $y$ , a partir da equação (10), nota-se que:

$$\varepsilon V_1 + (1 - \varepsilon)V_2 = 0 \quad 0 \leq y \leq x(t) \quad 0 \leq t < \infty \quad (11)$$

### Região de Sedimentação Livre:

A função porosidade para a região de sedimentação livre pode ser determinada por:

$$\varepsilon(y, 0) = \varepsilon_0 \quad h(t) \leq y \leq x(t) \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (12)$$

A altura da interface superior descendente é denotada por  $x(t)$ , onde nesta região:

$$x(t) = H - u_0 t \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (13)$$

em que  $u_0$  é velocidade de sedimentação livre.

### Região de Transição:

A região de transição é limitada pela proveta e por

$$\begin{aligned} z(t) \leq y \leq h(t) \quad 0 \leq t \leq t_0 \\ z(t) \leq y \leq x(t) \quad t_0 \leq t \leq t_c \end{aligned} \quad (14)$$

onde,

$$h(t) = w_0 t \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (15)$$

$w_0$  é a velocidade da onda de aceleração, e, por (5) e (15),

$$t_0 = \frac{H}{u_0 + w_0} \quad x_0 = \frac{Hw_0}{u_0 + w_0} \quad (16)$$

Segundo Libório (2016), uma das relações que pode ser utilizada para esta região é:

$$\int_{\varepsilon}^{\varepsilon_0} A(\varepsilon) d\varepsilon = w_0 t - y \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (17)$$

As soluções exatas para o cálculo da interface superior descendente fornecem:

$$\int_{\varepsilon^-}^{\varepsilon_0} A(\varepsilon) d\varepsilon = w_0 t - x \quad t_0 \leq t \leq t_c \quad (18)$$

$$\frac{dx}{dt} = w_0 - (u_0 + w_0) \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon^-} \quad t_0 \leq t \leq t_c \quad (19)$$

Ao utilizar  $A(\varepsilon)$  como segue-se:

$$A(\varepsilon) = A_m \left( \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} \right)^\beta, \quad A_m = A(\varepsilon_0) \quad (20)$$

em que  $A_m$  e  $\beta$  são constantes. Porém, vale ressaltar que outras formas de  $A(\varepsilon)$  podem ser utilizadas. Nesta pesquisa, a equação (20) apresentou melhores aproximações.

Substituindo a equação (20) em (17), obtém-se a seguinte função porosidade para a região de transição

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \left[ \frac{1}{1 - \Delta(w_0 t - y)} \right]^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (21)$$

tal que

$$\Delta = \frac{\beta - 1}{A_m(1 - \varepsilon_0)} \quad (22)$$

A partir de (18) e (20), a função porosidade na interface superior descendente pode ser escrita como:

$$\varepsilon^- = 1 - (1 - \varepsilon_0) \left[ \frac{1}{1 - \Delta(w_0 t - x)} \right]^{\frac{1}{\beta-1}} \quad (23)$$

Pode-se definir a seguinte expressão para a localização da interface superior descendente na região de transição,  $x(t)$ , utilizando (19) e (23):

$$x(t) = w_0 t - \frac{1}{\Delta} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\Delta}{\gamma} (u_0 + w_0)(t - t_0) \right]^\gamma \right\} \quad (24)$$

sendo

$$\gamma = \frac{\beta - 1}{\beta - 2} \quad (25)$$

O cálculo da função porosidade depende dos valores de  $u_0$ ,  $w_0$ ,  $x_0$ ,  $t_0$ ,  $x_c$  e  $t_c$ . A velocidade de sedimentação livre corresponde à inclinação de reta HP (Figura 1), e a velocidade da onda de aceleração é dada por:

$$w_0 = \frac{x_0}{t_0} \quad (26)$$

quando o ponto final do segmento de reta HP é bem definido.

Quando isto não ocorre, o valor de  $w_0$  é dado como sendo o mínimo positivo da função velocidade  $w$ , definida por:

$$w = \frac{u_0 x^2}{2H(H - x) - (2H - x)u_0 t} \quad 0 < t < \frac{H}{u_0} \quad (27)$$

sendo o valor mínimo obtido por substituição em (27) de pontos experimentais  $x$  versus  $t$  da altura da interface superior descendente.

O ponto de encontro das interfaces ( $x_c$ ,  $t_c$ ) é o ponto onde ocorre o mínimo de

$$W = \frac{u_0 x}{2(H - x) - u_0 t} \quad (28)$$

obtido do mesmo modo do mínimo de (27).

Assim, por (13), (14), (15), (16), (21), (22), (23), (25), (27), (28), a porosidade da região de transição fica completamente estabelecida.

A partir das soluções exatas do sistema formado pelas equações (1) e (2), as velocidades dos constituintes sólido e fluido para a região de transição, são dadas, respectivamente, por:

$$V_2 = w_0 - (u_0 + w_0) \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} \quad (29)$$

$$V_1 = w_0 + \frac{u_0 - \varepsilon_0(u_0 + w_0)}{\varepsilon} \quad (30)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na modelagem matemática descrita na metodologia, juntamente com dados experimentais obtidos em Ribeiro Júnior (2016), de altura da interface superior descendente *versus* tempo de dois ensaios de sedimentação de fluidos de perfuração com adensantes, foi possível se chegar a resultados para as funções porosidade e velocidades.

O primeiro ensaio é de um fluido com barita com uma concentração volumétrica inicial de 12% e o segundo ensaio é de um fluido com calcita com uma concentração volumétrica inicial de 12%. As Tabelas 1 e 2 apresentam estes dados, que foram necessários para se obter os parâmetros necessários para cálculo da porosidade e velocidades do movimento em estudo.

**Tabela 1:** Dados experimentais de altura de interface superior descendente para a sedimentação de barita com porosidade inicial  $\varepsilon_0 = 0,88$ .

Tempo (seg)	Altura da interface (cm)	Tempo (seg)	Altura da interface (cm)	Tempo (seg)	Altura da interface (cm)
0	32,5	1400	14	2800	9,9
200	28,7	1600	12,4	3000	9,8
400	25,7	1800	11	3200	9,7
600	22,9	2000	10,6	3400	9,6
800	20,3	2200	10,3	3600	9,6
1000	17,9	2400	10,2		
1200	15,9	2600	10		

**Tabela 2:** Dados experimentais de altura de interface superior descendente para a sedimentação de calcita com porosidade inicial  $\varepsilon_0 = 0,88$ .

Tempo (seg)	Altura da interface (cm)	Tempo (seg)	Altura da interface (cm)	Tempo (seg)	Altura da interface (cm)
0	32,5	1600	16,5	3200	10,5
200	29,9	1800	15,4	3400	9,9
400	27,6	2000	14,5	3600	9,4
600	25,4	2200	13,6	3800	9
800	23,3	2400	12,9	4000	8,7
1000	21,2	2600	12,2	4200	8,6
1200	19,4	2800	11,6		
1400	17,8	3000	11,1		

### Região de Sedimentação Livre

Desta região, pode-se calcular a velocidade de sedimentação livre ( $u_0$ ), que é obtida a partir da equação (13). Os valores de altura da interface superior descendente apresentados das Tabelas 1 e 2 foram convertidos de segundos para minutos, para a unidade de  $u_0$  ser cm/min.

Os resultados de  $u_0$  podem ser observados na Tabela 3 para as quatro suspensões estudadas. A porosidade para esta região é constante e de igual valor numérico à porosidade inicial, conforme apresentado na metodologia.

**Tabela 3:** Velocidades de sedimentação livre ( $u_0$ ).

Suspensão de barita ( $\varepsilon_0 = 0,88$ )	Suspensão de calcita ( $\varepsilon_0 = 0,88$ )
$u_0 = 1,005$ cm/min	$u_0 = 0,72$ cm/min

### Região de Transição

Os parâmetros que podem ser obtidos a partir da região de transição são a velocidade da onda de aceleração ( $w_0$ ), definida através do mínimo positivo da equação (27), o ponto de encontro da onda com a interface superior descendente ( $x_0, t_0$ ) foi calculados através de (16) e o ponto de encontro das interfaces ( $x_c, t_c$ ) foi obtido através do mínimo positivo da equação (28). A Tabela 4 apresenta estes parâmetros calculados para as suspensões particuladas estudadas.

**Tabela 4:** Parâmetros calculados.

Suspensão de barita ( $\varepsilon_0 = 0,88$ )					
Parâmetro	$w_0$ (cm/min)	$x_0$ (cm)	$t_0$ (min)	$x_c$ (cm)	$t_c$ (min)
Valor	2,057	21,824	10,609	11,744	28,500
Suspensão de calcita ( $\varepsilon_0 = 0,88$ )					
Parâmetro	$w_0$ (cm/min)	$x_0$ (cm)	$t_0$ (min)	$x_c$ (cm)	$t_c$ (min)
Valor	1,403	21,478	15,308	14,072	34,667

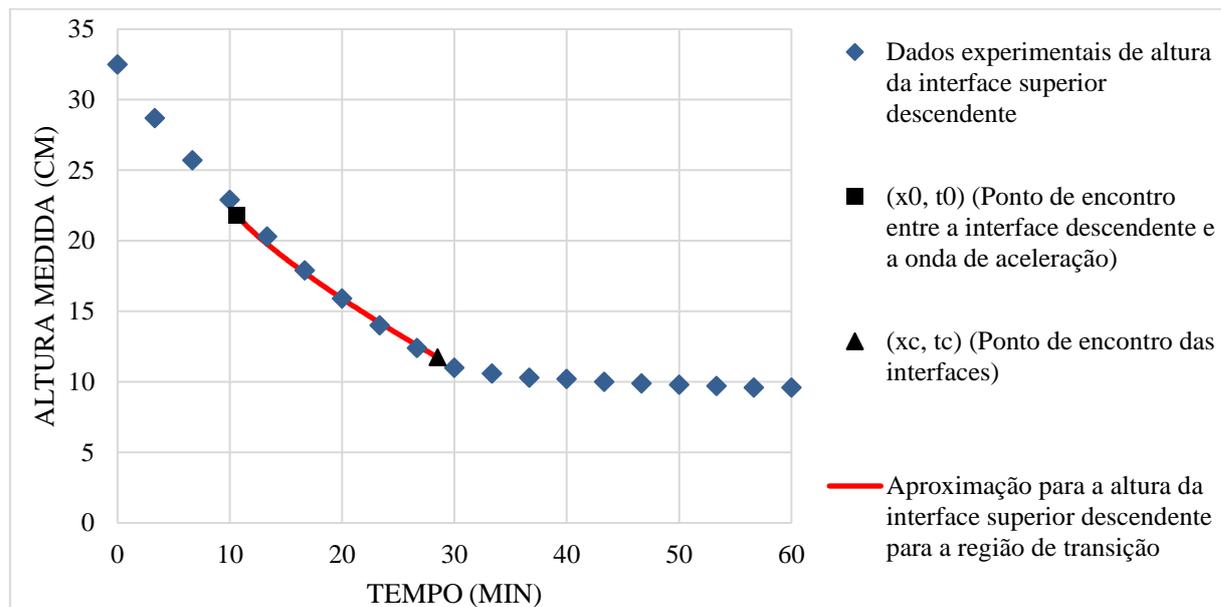
Para aproximação da curva da interface superior descendente para a região de transição é necessário que o valor das constantes  $\Delta$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $A_m$  sejam calculados para cada uma das suspensões. Como  $u_0$ ,  $w_0$ ,  $t_0$ ,  $t_c$  e  $x_c$  são parâmetros conhecidos e apresentados nas Tabelas 3 e 4, é possível reescrever a equação (24) para  $t = t_c$  e  $x(t) = x_c$  e para um  $t = \bar{t}$ , tal que  $t_0 <$

$\bar{t} < t_c$  e seja  $\bar{x}$  seu  $x(t)$  correspondente. A partir deste sistema com duas equações não lineares são fornecidos os valores de  $\Delta$  e  $\gamma$ . Com estes valores, podem ser obtidos  $\beta$  e  $A_m$ , a partir das equações (25) e (22), respectivamente. Estes valores calculados estão apresentados na Tabela 5 para as suspensões estudadas.

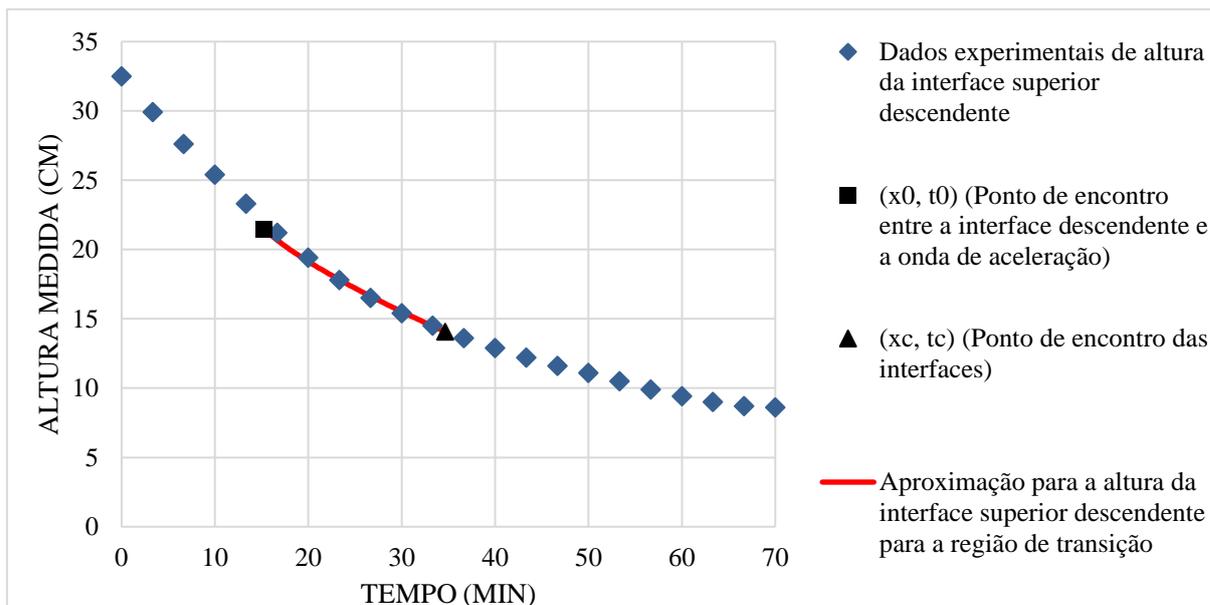
**Tabela 5:** Constantes  $\Delta$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $A_m$ .

Suspensão de barita ( $\epsilon_0 = 0,88$ )			
$\Delta = -1,8974$	$\gamma = 0,9582$	$\beta = -21,9234$	$A_m = 100,6789 \text{ cm}$
Suspensão de calcita ( $\epsilon_0 = 0,88$ )			
$\Delta = -1,9924$	$\gamma = 0,9505$	$\beta = -18,2020$	$A_m = 80,3135 \text{ cm}$

As aproximações gráficas para a altura da interface superior descendente em relação às curvas experimentais estão ilustradas nas Figuras 2 e 3 para as quatro suspensões estudadas.



**Figura 2:** Aproximação da curva de altura da interface superior descendente para a região de transição, para a suspensão de barita ( $\epsilon_0 = 0,88$ ).



**Figura 3:** Aproximação da curva de altura da interface superior descendente para a região de transição, para a suspensão de calcita ( $\varepsilon_0 = 0,88$ ).

Para cálculo da função porosidade  $\varepsilon^-$  na interface superior descendente foi utilizada a equação (23) com os dados das Tabelas 3, 4 e 5. Também foram utilizados estes dados e as equações (29) e (30), para cálculos das velocidades dos constituintes sólido ( $V_2$ ) e fluido ( $V_1$ ), respectivamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Os resultados numéricos para a função porosidade mostram que seu valor diminui ao longo da interface superior descendente, mostrando um comportamento que está de acordo com a teoria de Tiller (1981).

É importante observar que os resultados para  $V_2$  estão negativos, visto que o sentido do eixo considerado para altura está no sentido inverso da ação da gravidade, ou seja, a altura aumenta de baixo para cima, enquanto que a gravidade atua de cima para baixo e a massa da partícula vai ocupando a massa do fluido.

Pode-se notar, a partir dos resultados da Tabela 6, que tanto os valores numéricos das velocidades do constituinte sólido ( $V_2$ ), em módulo, quanto os valores numéricos das velocidades do constituinte fluido ( $V_1$ ), tendem a diminuir, na interface superior descendente, estando de acordo com a condição de contorno (10) adotada, na qual as velocidades são nulas no fundo da proveta.

**Tabela 6:** Resultados numéricos para a porosidade e velocidades na interface superior descendente da região de transição.

<b>Suspensão de barita (<math>\epsilon_0 = 0,88</math>)</b>				
<b>Tempo (min)</b>	<b>x(t) (cm)</b>	<b><math>\epsilon^-</math></b>	<b><math>V_2</math> (cm/min)</b>	<b><math>V_1</math> (cm/min)</b>
11	21,46551	0,873747	-0,85336	0,123306
13	19,98446	0,865434	-0,67356	0,104732
15	18,70902	0,862144	-0,60838	0,09728
17	17,53503	0,86003	-0,56814	0,092465
19	16,42915	0,858464	-0,53909	0,08888
21	15,37449	0,857216	-0,51639	0,086014
23	14,36087	0,856176	-0,49779	0,083621
25	13,38142	0,855285	-0,48206	0,081565
27	12,43123	0,854504	-0,46843	0,07976
<b>Suspensão de calcita (<math>\epsilon_0 = 0,88</math>)</b>				
<b>Tempo (min)</b>	<b>x(t) (cm)</b>	<b><math>\epsilon^-</math></b>	<b><math>V_2</math> (cm/min)</b>	<b><math>V_1</math> (cm/min)</b>
16	21,04003	0,871351	-0,57727	0,08523
18	20,01759	0,863765	-0,46701	0,073657
20	19,13563	0,860198	-0,41929	0,068144
22	18,3294	0,857816	-0,38876	0,064438
24	17,57525	0,856017	-0,36638	0,061625
26	16,86076	0,854568	-0,34874	0,05935
28	16,17823	0,853351	-0,33421	0,057435
30	15,52245	0,852303	-0,32188	0,055779
32	14,88963	0,85138	-0,31117	0,054319
34	14,27693	0,850556	-0,30171	0,053012

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo matemático apresentado neste trabalho fornece as funções porosidade e velocidades para a região de transição envolvendo parâmetros, os quais podem ser determinados a partir do movimento da interface superior descendente dos testes de sedimentação gravitacional em proveta. A comparação de dados experimentais com resultados teóricos da interface superior descendente determinam os parâmetros envolvidos nas equações que fornecem as funções porosidade e velocidades na região de transição.

Para as suspensões testadas, verificou-se um bom ajuste da curva proposta para a interface inferior descendente em relação aos dados experimentais de teste de proveta. Os resultados obtidos para as funções porosidade e velocidades na interface inferior descendente comportam-se de acordo com as condições de contorno adotadas e com a física do problema.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- BASSET, A. B. Dynamic simulation of sheared suspensions. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 179, p. 43-63, 1888 (also in A treatise on hydrodynamics: with numerous examples, 2 vol. Dover Publications, 1961. 592 p).
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. 2nd ed. São Paulo: Blucher, 2014, 423 p.
- LIBÓRIO, D. O. **Construção de uma base de informações para a diferença de pressões arbitrárias em uma suspensão particulada**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil, 2016.
- MENDES, H. U. S.; SILVA, A. S. 2018. Um estudo sobre função porosidade da região de compactação no movimento gravitacional de uma suspensão particulada em proveta. **Anais do III CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**, Salvador: Realize, 2018, p 1-8.
- MENDES, H. U. S. **Funções porosidades e velocidades no movimento gravitacional de uma suspensão particulada em proveta**. 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil, 2019.
- OMLAND, T. H.; HODNE, H.; SAASEN, A.; MJØLHUS S.; AMUNDSEN, P. A. Drilling Fluid Weight Material Sedimentation—Sedimentation of Suspensions. **Petroleum Science and Technology**, v.31, n. 18, p.1908-1915, 2013.
- RIBEIRO JÚNIOR, J. M. **Modelagem e simulação de sólidos adensantes em fluidos de perfuração**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2016.
- SILVA, A. S.; JESUS, E.; PAGANO, R. L.; MENESES, L. D. M.; ROCHA C. P. S. Equações do movimento de suspensões particuladas com restrição de incompressibilidade. **Scientia Plena**, v. 9, n. 11, p. 114201-1, 2013.
- TILLER, F. M. Revision of Kynch sedimentation theory. **AIChE Journal**. V. 27, p. 823-829, 1981.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001, 267 p.