

Referências Bibliográficas

API 10 SPEC A (ISO 10426-1:2000). **Specification for Cements and Materials for Well Cementing** American Petroleum Institute, 32nd edition, 2002.

BAKER HUGHES, **In Depth Catalogue**, vol. 10, 2004.

BAKHTIYAROV, S.; SIGINER, D. A. **Fluid Displacement in a Horizontal Tube**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 65, p. 1-15, 1996.

BEIRUTE, R. M.; FLUMERFELT, R. W. **Mechanics of the Displacement Process of Drilling Muds by Cement Slurries Using an Accurate Rheological Model**. Society of Petroleum Engineers, 1977.

BIEZEN, E.; WERFF, N.; RAVI K. **Experimental and Numerical Study of Drilling Fluid Removal from a Horizontal Wellbore** Society of Petroleum Engineers, 2000.

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids**, v. 1, John Wiley and Sons Inc., USA, 2nd edition, 1987.

BITTLESTON, S. H.; FERGUSON, J.; FRIGAARD, I. A. **Mud Removal and Cement Placement During Primary Cementing of an Oil Well Laminar non-Newtonian Displacements in an Eccentric Annular Hele-Shaw Cell**. Journal of Engineering Mathematics, v. 43, p. 229-253, 2002.

BOURGOYNE, A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG, F. S. **Applied Drilling Engineering** Society of Petroleum Engineers, 2nd edition, 1991

BRAND, F.; PEIXINHO, J.; NOUAR, C. **A Quantitative Investigation of the Laminar-to-Turbulent Transition: Application to Efficient Mud Cleaning**. Society of Petroleum Engineers, 2001.

BRICE, J. W. JR; HOLMES, B. C. **Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques**. Journal of Petroleum Technology, v. 16, n 5, p. 503-508, 1964.

CARNEY, L. L. **Cement Spacer Fluid**. Society of Petroleum Engineers, 1974.

CARRASCO-TEJA, M., FRIGAARD, I. A.; SEYMOUR, B. R.; STOREY, S. **Viscoplastic Fluid Displacements in Horizontal Narrow Eccentric Annuli: Stratification and Travelling Wave Solutions** Journal of Fluid Mechanics, v. 605, p. 293–327, 2008.

- CLARK, C. R.; CARTER, L. C. **Mud Displacement with Cement Slurries**. Journal of Petroleum Technology, v. 25, n. 7, p. 775-783, 1973.
- DUTRA E. S. S.; MARTINS, A. L.; MIRANDA, C. R.; ARAGÃO, A. F. L.; MENDES, P. R. S.; NACCACHE, M. F. **Dynamics of Fluid Substitution While Drilling and Completing Long Horizontal-Section Wells**. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- FLUENT, Inc. **FLUENT 6.2 – User’s Guide**, 2005.
- FLUENT, Inc. **FLUENT 6.1 – UDF Manual**, 2003.
- FLUENT, Inc. **GAMBIT 2.2 – User’s Guide**, 2003.
- FRIGAARD, I. A.; ALLOUCHE, M.; GABARD, C. **Setting Rheological Targets for Chemical Solutions in Mud Removal and Cement Design**. Society of Petroleum Engineers, 2001.
- FRIGAARD, I. A.; PELIPENKO, S. **Effective and Ineffective Strategies for Mud Removal and Cement Slurry Design**. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- GUILLOT, D. J.; COUTURIER, M.; HENDRIKS, H.; CALLET, F. **Design Rules and Associated Spacer Properties for Optimal Mud Removal in Eccentric Annuli**. Society of Petroleum Engineers, 1990.
- GUILLOT, D. J.; DESROCHES, J. FRIGAARD, I. A. **Are Preflushes Really Contributing to Mud Displacement During Primary Cementing?** Society of Petroleum Engineers, 2007.
- GRAVES, W. G.; COLLINS, R. E. **Non-Newtonian Fluid Displacement in an Irregular Annulus of Axial Symmetry**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 8, p. 43-58, 1981.
- HALLIBURTON, **AquaLinear® HT Gravel Pack Fluid Service Catalogue**, 2005.
- HALLIBURTON, **Geo-Pilot® Rotary Steerable System Catalogue**, 2007.
- HALLIBURTON, **FracPac Completion Services Catalogue**, 2009.
- HAUT, R. C.; CROOK, R. J. **Primary Cementing: The Mud Displacement Process**, Society of Petroleum Engineers, p. 23-26, 1978.
- HAUT, R. C.; CROOK, R. J. **Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids**. Society of Petroleum Engineers, p. 1828-1834, 1981.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. **Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundary** Journal of Computational Physics, v. 39, p. 204-225, 1981.

- JAKOBSEN, J.; STERRI, N.; SAASEN, A.; AAS, B. **Displacements in Eccentric Annuli During Primary Cementing in Deviated Wells**. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- JPT ONLINE, **Frontiers of Technology – Horizontal and Multilateral Wells**, vol. 7, Journal of Petroleum Technology, 1999.
- KELESSIDIS, V. C.; GUILLOT, D. J.; RAFFERTY, R.; BORRIELL, G.; MERLO, A. **Field Data Demonstrate Improved Mud Removal Techniques Lead to Successful Cement Jobs**. Society of Petroleum Engineers, 1995.
- KROKEN, W.; SJTIHOLM, J.; OLSEN, A. S. **Tide Flow: A Low Rate Density Driven Cementing Technique for Highly Deviated Wells**. Society of Petroleum Engineers, 1996.
- LEE, A. G.; SHAQFEH, E. S. G.; KHOMAMI, B. **A Study of Viscoelastic Free Surface Flows by the Finite Element Method: Hele–Shaw and Slot Coating Flows**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 108, p. 327–362, 2002.
- LOCKYEAR, C. F.; HIBBERT, A. P. **Integrated Primary Cementing Study Defines Key Factors for Field Success**. Society of Petroleum Engineers, 1989.
- LOCKYEAR, C. F., RYAN, D. F.; GUNNINGHAM, M. M. **Cement Channeling: How to Predict and Prevent**. SPE Drilling Engineering, v. 5, n. 3, p. 201-208, 1990.
- MCPHERSON, S. A. **Cementation of Horizontal Wellbore**. Society of Petroleum Engineers, 2000.
- MENDES, P. R. S.; DUTRA, E. S. S. **Viscosity Function for Yield Stress Liquids**. Applied Rheology, v. 14, n. 6, p. 296–302, 2004.
- MENDES, P. R. S.; DUTRA, E. S.; SIFFERT, S. J. R. R.; NACCACHE, M. F. **Gas displacement of viscoplastic liquids in capillary tubes**, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 145, p. 30–40, 2007.
- MENDES, P. R. S. **Dimensionless non-Newtonian Fluid Mechanics**, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 147, p. 109-116, 2007.
- MOYERS-GONZÁLEZ, M. A.; FRIGAARD, I. A.; SCHERZER, O.; TSAI, T.-P. **Transient Effects in Oilfield Cementing Flows: Qualitative Behaviour**. European Journal of Applied Mathematics, v. 18, p. 477–512, 2007.
- MUKHALALATY, T.; SUWAIDI, A. A.; SHAHEEN, M. **Increasing Well Life Cycle by Eliminating the Multistage Cementer and utilizing a Light Weight High Performance Slurry**. Society of Petroleum Engineers, 1999.

PAPANASTASIOU, T. C. **Flows of Materials with Yield**. Journal of Rheology, v. 31, n. 5, p. 385-404, 1987.

PELIPENKO, S.; FRIGAARD, I. A. **Mud Removal and Cement Placement During Primary Cementing of an Oil Well Part 2; steady-state displacements**. Journal of Engineering Mathematics, v. 48, p. 1–26, 2004.

PELIPENKO, S.; FRIGAARD, I. A. **Two-Dimensional Computational Simulation of Eccentric Annular Cementing Displacements**. IMA Journal of Applied Mathematics, v. 69, p. 557–583, 2004.

RAVI, K.; BIEZEN, E. N.; LIGHTFORD, S. C.; HIBBERT, A.; GREAVES, C. **Deepwater Cementing Challenges**. Society of Petroleum Engineers, 1999.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA D.; ANDRADE R. **Perfuração Direcional** Interciência, 2ª ed, 276p, 2006.

SCHLEIZER, A. D; BONNECAZE, R. T. **Displacement of a Two-Dimensional Immiscible Droplet Adhering to a Wall in Shear and Pressure-Driven Flows**. Journal of Fluid Mechanics, v. 383, p. 29-54, 1999.

SCHLUMBERGER **Powerpack - Steerable Motor Handbook**, Schlumberger, 2004.

SILVA, M. G. P. **Avaliação do Regime de Escoamento de Fluidos de Perfuração em Seções Anulares**. Primeira Mesa-Redonda sobre Fluidos de Perfuração, p. 29-38, 1988.

SILVA, M. G. P.; MARTINS, A. L.; OLIVEIRA, A. A. J **Avaliação do Comportamento Reológico de Fluidos de Perfuração no Escoamento Anular**. Seminário de Fluidos de Perfuração, p. 3-18, 1989.

SOARES, E. J.; CARVALHO, M. S.; MENDES, P. R. S. **Immiscible Liquid-Liquid Displacement in Capillary Tubes**. Journal of Fluid Mechanics, v.127, p. 24-31, 2005.

SOARES, E. J.; CARVALHO, M. S.; MENDES, P. R. S. **Gas-displacement of non-Newtonian liquids in capillary tubes**. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 27, p. 95-104, 2006.

SZABO, P.; HASSAGER, O. **Displacement of one Newtonian Fluid by Another: Density Effects in an Axial Annular Flow**. International Journal of Multiphase Flow, v. 23, n.1, p. 113-129, 1997.

TEHRANI, A.; FERGUSON, J.; BITTLESTON, S. H. **Laminar Displacement in Annuli: A Combined Experimental and Theoretical Study**. Society of Petroleum Engineers, 1992.

Apêndice A – Modelos Reológicos

Existem diversos modelos para descrever o comportamento reológico de fluidos puramente viscosos. Estes modelos estão divididos em newtonianos e não newtonianos.

Fluidos newtonianos – função viscosidade é constante (eq. A-1).

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{A-1})$$

onde μ é a viscosidade absoluta e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação.

Fluidos não newtonianos – função viscosidade depende da cinemática do escoamento, ou seja, depende da taxa de deformação. Os fluidos utilizados no processo de perfuração de poços apresentam este tipo de comportamento.

No presente trabalho foi utilizado o modelo reológico SMD, conforme descrito na seção 3.3. A seguir estão descritos outros modelos reológicos utilizados no escoamento em poços.

A.1

Modelo *Power-law*

O modelo *power-law* foi utilizado nos primeiros estudos de escoamento em poços. Este modelo é utilizado para representar a viscosidade da maioria dos fluidos não newtonianos. A viscosidade neste modelo é descrita conforme eq. A-2.

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (\text{A-2})$$

onde k é o índice de consistência (viscosidade média do fluido) e n é o índice de comportamento (desvio do comportamento newtoniano). O valor de n determina a classe do fluido:

- o $n = 1$ fluidos newtonianos;
- o $n > 1$ fluidos dilatantes (*shear thickening fluids*);
- o $n < 1$ fluidos pseudoplásticos (*shear thinning fluids*).

A.2

Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo *power-law* descrito acima é válido para os fluidos tais que a tensão cisalhante é zero quando a taxa de deformação é zero. Entretanto, os fluidos utilizados no processo de perfuração, apresentam comportamento viscoplástico.

Fluidos viscoplásticos são os materiais que têm uma tensão limite de escoamento. Abaixo deste valor, se comportam como um fluido de elevada viscosidade, e acima deste valor, se comportam como um fluido pseudoplástico.

Para fluidos viscoplásticos é necessário utilizar uma função de viscosidade capaz de prever uma tensão limite de escoamento diferente de zero.

Modelo de Bingham – propõe uma correlação linear entre tensão cisalhante e taxa de deformação. Entretanto, a tensão cisalhante é diferente de zero quando a taxa de deformação é zero, conforme eq. A-3.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{A-3})$$

onde τ_0 é a tensão limite de escoamento (tensão mínima a ser aplicada ao fluido para que este inicie o escoamento).

Modelo de Herschel-Bulkley – combina os efeitos dos plásticos de Bingham e o comportamento de *power-law* em um fluido. Para baixas taxas de deformação ($\tau \leq \tau_0$), o material age como um fluido muito viscoso, com viscosidade η_0 (onde η_0 é a viscosidade a baixas taxas de deformação). Quando a taxa de deformação aumenta e atinge a tensão limite de escoamento, τ_0 , o comportamento fluido é descrito pelo modelo *power-law*, conforme observado na eq. A-4.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 & \tau < \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n & \tau > \tau_0 \end{cases} \quad (\text{A-4})$$

Quando $n = 1$, esta equação se reduz à função tradicional de plástico de Bingham (eq. A-5):

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 & \tau < \tau_0 \\ \tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} & \tau > \tau_0 \end{cases} \quad (\text{A-5})$$

onde μ_p é a viscosidade plástica. Ambas as equações preveem uma viscosidade infinita para o limite onde a taxa de cisalhamento tende a zero.

Apêndice B – User Defined Functions

B.1 Definição

Uma função definida pelo usuário (*UDF - User-Defined Function*) é uma função programada pelo usuário que pode ser carregada dinamicamente com o algoritmo para melhorar o modelo de escoamento. Segue abaixo as principais características das UDF's:

- UDF's são escritas em linguagem de programação C.
- UDF's são executadas como funções interpretadas/ compiladas pelo FLUENT.
- Os valores das variáveis entre o algoritmo e a UDF devem ser especificados em unidades SI.

As UDF's são executadas conforme a sequência descrita na Figura B.1.

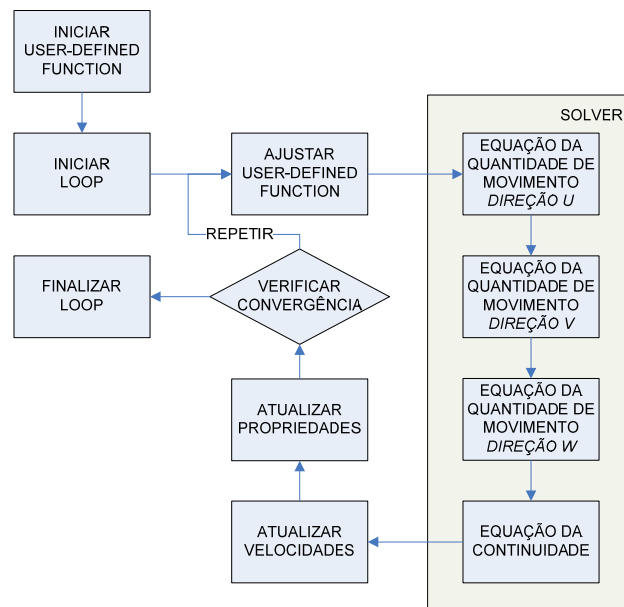


Figura B.1 – Procedimento de solução do algoritmo segregado

B.2 UDF – Função Viscosidade SMD

O código de programação definindo a viscosidade do fluido em função do modelo reológico SMD pode ser observado a seguir:

```

#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, c, t)
{
/*declaracao das variaveis*/
real mu_SMD, /*variavel local*/
real tauz,    /*variavel local*/
real etaz,    /*variavel local*/
real ak, /*variavel local*/
real an, /*variavel local*/
real suplim,  /*variavel local*/
real inflim;  /*variavel local*/

/*deve ser utilizadas unidades SI*/
taz=1;
etaz=100000;
ak=1;
an=0.5;
suplim=100000;
inflim=0.00001;

/*calculo da viscosidade*/
mu_SMD = ((1 - exp((-etaz*C_STRAIN_RATE_MAG(c, t))/taz))*(taz +
ak*pow(C_STRAIN_RATE_MAG(c, t),an))/C_STRAIN_RATE_MAG(c, t);

/*teste para altas taxas de deformacao*/
if (C_STRAIN_RATE_MAG(c, t) > suplim)
mu_SMD = ((1 - exp((-etaz*suplim)/taz))*(taz + ak*pow(suplim,an)))/suplim;

/*teste para baixas taxas de deformacao*/
if (C_STRAIN_RATE_MAG(c, t) < inflim)
mu_SMD = ((1 - exp((-etaz*inflim)/taz))*(taz + ak*pow(inflim,an)))/inflim;

/*retorno da variável para o algoritmo*/
return mu_SMD;}

```

Apêndice C – Validação do modelo reológico SMD

C.1

Método unidimensional para escoamento em tubos

Mendes et al (2007) estudaram o escoamento plenamente desenvolvido de um fluido não newtoniano descrito pelo modelo reológico SMD, em uma seção circular.

Para ocorrer o escoamento plenamente desenvolvido, através de um tubo de raio R , conduzido por gradiente de pressão axial, um balanço de forças fornece a eq.C-1:

$$-\tau_{r\theta}(R) = \tau(R) = \tau_R = \frac{dp}{dz} \frac{R}{2} \quad (C-1)$$

A equação da conservação de quantidade de movimento linear informa que a tensão cisalhante $\tau_{r\theta}$ é uma função linear da coordenada radial r . Dessa forma, pode ser escrito, na forma adimensional:

$$\tau^* = \tau_R^* r^* \quad (C-2)$$

Para o escoamento plenamente desenvolvido, a taxa de cisalhamento adimensional é obtida através da eq. C-3.

$$\dot{\gamma}^* = -\frac{du^*}{dr^*} \quad (C-3)$$

onde $u^* \equiv u/\dot{\gamma}_1 R$ é a velocidade axial adimensional. Combinando as Eqs. 3-38 e C-2, obtém-se a eq. C-4.

$$\tau_R^* r^* = (1 - \exp[-(J+1)\dot{\gamma}^*])(1 + \dot{\gamma}^{*n}) \quad (C-4)$$

A eq. C-4 fornece $\dot{\gamma}^*(r^*)$, que pode ser combinada com a eq. C-3, e integrada para o perfil de velocidade $u^*(r^*)$.

A integração é executada numericamente em uma malha não uniforme de 2000 pontos nodais ao longo da coordenada radial r^* . A metade dos pontos nodais (1000) é concentrada na região de elevado gradiente de velocidade, ou seja, em torno da posição radial $r_o^* = 1/\tau_R^*$, onde $\tau^* = 1$. Esta malha mostra que os resultados são independentes da

malha para todos os casos investigados. Para cuidar da natureza não linear desta equação, para cada conjunto de valores dos parâmetros $\{\tau_R^*, J, n\}$, a seguinte estratégia de solução foi adotada:

1. Para cada ponto nodal, a eq. C-4 é resolvida iterativamente para cada $\dot{\gamma}^*$;
2. A eq. C-3 foi integrada utilizando a regra do trapézio. Foram utilizadas as condições de contorno de simetria axial e não deslizamento, ou seja, $\dot{\gamma}^*(0) = 0$ e $u^*(1) = 0$, respectivamente.