

Referências Bibliográficas

- [1] BARNES, H. A.. **A handbook of elementary rheology**. University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
- [2] BARNES, H. A., Hutton, J.E., Walters, F. R. S. **An introduction to rheology**. 1ª edição, Elsevier, 1989.
- [3] BENSIMIN,D., KADANOFF, L. P., LIANG, S., SHRAIMAN, B. I., TANG, C.. **Viscous flows in two dimensions**. Reviews of modern Physics. Vol. 58, n. 4. 1986.
- [4] BIRD, R.B. ARMSTRONG, R.C. ,HASSAGER, O., **Dynamics of polymeric liquids**, John Wiley & Sons, 1987.
- [5] BONN,D., MEUNIER, J.. **Viscoelastic Free-Boundary Problems: Non-Newtonian Viscosity vs Normal Stress Effects**. Physical review letters, Vol. 79, N. 14. 1997.
- [6] BONN,D., MEUNIER, J.. **Viscoelastic Free-Boundary Problems: Non-Newtonian Viscosity vs Normal Stress Effects**. Physical review letters, Vol. 79, N. 14. 1997.
- [7] BORGES, C. D., VENDRUSCOLO, C. T., MARTINS, A. L., LOMBA, F. T.. **Comportamento reológico de xantana produzida por Xanthomonas arboricola pv pruni para aplicação em fluido de perfuração de poços de petróleo** . Polímeros vol.19, n.2. São Carlos Apr./June .2009.
- [8] CAENN,R. DARLEY, H. C. H. GEORG, R. G. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. 6ª edição, Gulf Professional Publishing, p 720. 2011.
- [9] CHAN, C. K. and LIANG, N. Y. **Observations of Surfactant Driven Instability in a Hele-Shaw Cell**.Physical review letters, Vol. 79, 22, p.4381-4384. 1997.

- [10] CHEVALIER, C., BEN AMAR, M., BONN, D., LINDNER, A.. **Inertial effects on Saffman–Taylor viscous fingering**. J. Fluid Mech. vol. 552, pp. 83–97. 2006.
- [11] COUSSOT, P.. **Saffman–Taylor instability in yield-stress fluids**. J. Fluid Mech., vol. 380, pp. 363–376.1999.
- [12] DAMME,H. V., LAROCHE, C., GATINEAU, L., LEVITZ, P.. **Viscoelastic effects in fingering between miscible fluids**. J. Physique, 48. 1987.
- [13] FOX, R.W. McDONALD, A.T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 814 p. 2006.
- [14] **Fundamentos de Filtração de Poços de Petróleo**. 1ª edição. In: Curso de Fluidos de Perfuração e Completação, Universidade integrada do Brasil-UNITBR. Macaé, 2014.
- [15] GLENN, E. E., SLUSSER, M. L., HUITT, J. L.. **Factors Affecting Well Productivity - I. Drilling Fluid Filtration**. Petroleum Transactions, AIME, Vol. 210, p. 126-131.1957.
- [16] GLENN, E. E., SLUSSER, M. L.. **Factors Affecting Well Productivity - II. Drilling Fluid Particle Invasion into Porous Media**. Petroleum Transactions, AIME, Vol. 210, p. 132-139.1957.
- [17] GREENKORN, R.A., HARING, R. E., JAHNS, H. O..**Flow in Heterogeneous Hele-Shaw Models**. Society of Petroleum Engineers Journal-SPE-999-PA, p. 307-309.1964.
- [18] GUITERAS,O. H. J. **Metodologia de Análise Global para o desenvolvimento de um Campo de Gás Natural** . 2003. 285 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica)- Departamento de engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [19] GUSTAFSSON, B., VASIL'EV A. **Conformal and Potential Analysis in Hele-Shaw cells**. Stockholm, Valparaíso, 189p, 2004.
- [20] HELE-SHAW, H.S. **On the motion of a viscous fluid between two parallel plates**, Trans. Inst. Naval Arch. 40, 21, 1898.
- [21] HOMSY,G. M.. **Viscous fingering in porous media**. Ann. Rev. Fluid Mech, 19. p 271-311. 1987.

- [22] LINDNER, A., BONN,D., MEUNIER, J.. **Viscous fingering in complex fluids**. Journal of Physics, Vol. 12, N. 8A. 2000.
- [23] LINDNER, A., BONN,D., MEUNIER, J.. **Viscous fingering in a shear-thinning fluid**. Physics of fluid, Vol. 12, N. 2. 2000.
- [24] LINDNER, A., COUSSOT, P., MEUNIER, J.. **Viscous fingering in a yield stress fluid**. Physics review letters, Vol. 85, N. 2. 2000.
- [25] LINDNER, A., BONN, D., MEUNIER, J. **Viscous fingering in complex fluids**. J.of Physics-Condensed Matter, 12(8A):A477-A482, 2000.
- [26] MARTINS, A. L. WALDMANN, A. T. A., RIBEIRO, D. C., **O Projeto Conceitual de um Fluido de Perfuração não invasivo isento de sólidos**, Boletim técnico da produção de petróleo, Rio de Janeiro - volume 2, n° 1, p. 7 - 27.
- [27] MCLEAN, J. W.; SAFFMAN, P. G.. **The effect of surface tension on the shape of fingers in hele-shaw cell**. J. Fluid Mech., 102, p. 455-469,1981.
- [28] MENDES, P. R. S. **Diretrizes para o programa de comparação interlaboratorial de caracterização reológica de um fluido de perfuração**. In: Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás (ENAHPE), Teresópolis, 5., 2013.
- [29] MENDES, P. R. S., NACCACHE, M., CARVALHO, M.. **Viscosidade e Outras Propriedades Reológicas: Medição e Aplicações**. In: Mini curso de Reologia - Grupo de reologia da PUC-Rio (GREO), Rio de Janeiro, 2013.
- [30] MILAS, M., RINAUDO, M., KNIPPER, M., SCHUPPISER, J. L.. **Flow and viscoelastic properties of xanthan gum solutions**. Macromolecules, vol. 23, n.9, p 2506-2511, 1990.
- [31] MORENO, R. B. Z. L., BONET, J. E., WALDMANN, A. T. A., MARTINS, A. L.. **Metodologia para obtenção de dados visando a avaliação da invasão de soluções poliméricas em meios porosos**. In:4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO), Campinas-SP, 2007.

- [32] NARVAEZ, E. H. C. **Escoamento permanente de um fluido tixotrópico através de expansões-contrações abruptas axissimétricas**. 2013. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica)- Departamento de engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [33] OLTEAN, C., GOLFIER, F., BUÈS, M. A.. **Experimental and numerical study of the validity of hele-shaw cell as analogue model for variable-density flow in homogeneous porous media**. *Advances in Water Resources*, Vol.31, p 82–95. 2008.
- [34] PENG, Y. J. **An inverse problem in petroleum exploitation**. *Inverse Problems*, 1533, 1997.
- [35] PETTITT, D. J. **Xanthan gum**. *Food Hydrocolloids*. Boca Raton, Ed. CRC Press, vol. 1, p. 127-149. 1982.
- [36] ROCHEFORT, W. E., MIDDLEMAN, S.. **Rheology of xanthan gum: salt, temperature, and strain effects in oscillatory and steady shear experiments**. *Journal of Rheology*, Vol.31,n. 4, p 337-369. 1987.
- [37] SAFFMAN, P. G.. **Viscous fingering in Hele-Shaw cells**. *J. Fluid Mech*, vol. 173, p.73- 94, 1986.
- [38] SAFFMAN, P. G.; TAYLOR, G. I.. **The penetration of a fluid into a porous medium or hele-shaw cell containing a more viscous liquid**. *Proc. R. Soc. Lond.*, A245, p.312- 329, 1958.
- [39] SCHRAMM, G. **Reologia e Reometria Fundamentos Teóricos e Práticos**. 2ª edição, Rio de Janeiro: Artliber editora,291 p., 2006.
- [40] TADMOR,Z., GOGOS, C. G.. **Principles of polymer processing**. 2ª edição, Canadá: John Wiley & Sons, 2006.
- [41] VARGES, P. R. **Deslocamento de líquidos em célula de Hele-Shaw considerando efeitos não newtonianos**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica)- Departamento de engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- [42] WALDMANN, A. T. A. **Mecanismos que governam a efetividade de agentes obturantes no controle da invasão de fluidos de perfuração na rocha reservatório de petróleo.** 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica)- Departamento de engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [43] WHITCOMB, P. J., MACOSKO, C. W..**Rheology of Xanthan Gum.** Journal of Rheology. Vol. 22, p. 493, 1978.
- [44] WILSON, S. D.R.. **The Taylor-Saffman problem for a non-Newtonian liquid.** J. Fluid Mech. vol 220. p 413-425. 1990.
- [45] WU, S. **superficial tension polymer interface and adhesion .** Impresso nos Estados Unidos: Marcel Derkker, INC, 621 p, 1982.
- [46] YAMAMOTO, T. , KAMIKAWA, H., TANAKA, H., NAKAMURA, K., MORI, N.. **Viscous fingering of non-Newtonian fluids in a rectangular Hele-Shaw cell.** The Society of Rheology, Japan. Vol.29, No.2, 81- 87, 2001.
- [47] YAMAMOTO, T. , KAMIKAWA, NAKAMURA, K., MORI, N.. **Numerical simulation of viscous fingering in non-Newtonian fluids in a Hele-Shaw cell.** Journal of the Society of Rheology, Japan Vol.30, No.3, p 121-127.2002.
- [48] YAMAMOTO, T. , KIMOTO, R., MORI, N.. **Tip velocity of viscous fingers in shear-thinning fluids in a Hele-Shaw cell.** JSME International Journal . Vol.48, No.4, p 756- 762, 2005.
- [49] YAMAMOTO, T. , NAKAMURA, Y., YAMASHITA, A., HASHIMOTO, T., MORI, N.. **Anomalous motion of viscous fingers in surfactant solutions in a Hele-Shaw cell.** Rheol Acta . Vol.45, p 250- 259, 2005.

A

Goma Xantana

Goma Xantana é um polissacarídeo da espécie de bactérias do gênero *Xanthomonas*. Sua utilização como espessante e estabilizante aumentou com o passar dos anos, principalmente no campo petrolífero, onde é utilizada nos fluidos de perfuração e na recuperação terciária de poços de petróleo.

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e às vezes gases. São tradicionalmente classificados, de acordo com seu constituinte principal, em fluidos à base de gás à base de óleo e à base de água. A utilização de um determinado tipo de fluido depende da profundidade do poço e do tipo de formação a ser perfurada.

Os polímeros mais utilizados na formulação do fluido de perfuração à base de água eram a carboximetilcelulose (CMC), a celulose polianiônica (PAC) e poliácridamida parcialmente hidrolisada (PHPA). Entretanto, esses polímeros são muito sensíveis às condições de alta salinidade, baixando sua eficiência. Dessa forma, a goma xantana passou a ser amplamente utilizada para este propósito, pois suas propriedades são estáveis à variação do pH, força iônica e temperatura (7).

A goma xantana é altamente estável em ampla faixa de pH, sendo afetada com valores de $\text{pH} > 11$ e $< 2,5$. Essa estabilidade depende da concentração: quanto maior a concentração, maior a estabilidade da solução. A goma xantana é também estável em ampla faixa de temperatura (10°C a 90°C) e sua viscosidade é pouco afetada na presença de sais (35).

Apesar do grande mercado consumidor de goma xantana e de suas diferentes aplicações e potencialidades, poucos são os países que a produzem. A maior parte da goma xantana utilizada no Brasil ainda é importada, entretanto o país possui os insumos básicos utilizados durante o processo, como o açúcar de cana e o etanol, o que o torna um centro potencial para a produção desse polímero (7).

Além das características citadas acima a goma xantana também apresenta:

- Irreversibilidade de ser degradada em altas taxas de cisalhamento;
- Mesmo em baixas concentrações, apresenta um alto valor de viscosidade, sendo usado como um agente espessante efetivo;
- As características pseudoplásticas garantem a facilidade de seu bombeamento;
- Apresenta uma excelente estabilidade durante o congelamento e sua adição não afeta o ponto de congelamento do fluido;
- A adição de galactomanonas (gomas) resulta em um aumento significativo da viscosidade.

O método de preparo da goma xantana utilizado foi o seguinte (41):

- Seleciona-se a porcentagem de polímero desejada;
- Coloca-se o volume desejado de água deionizada em um recipiente;
- O recipiente é posicionado no agitador mecânico (marca Fisaton, modelo 723) com a pá âncora a 300 rpm;
- Acrescenta-se a goma xantana aos poucos, pela lateral, evitando despejar o pó na pá;
- A solução é agitada por 15 minutos;
- A seguir, adicionam-se os seguintes bactericidas para evitar a degradação da goma xantana: Benzoato de Sódio e Sorbato de Potássio. A concentração utilizada foi de 0,5% de cada bactericida;
- Mistura-se a solução por 1 hora;
- Mantém-se a solução em repouso por 24 horas antes dos testes.

B Poliacrilamida

A poliacrilamida é um polímero sintético que deriva da polimerização do monómero de acrilamida. É um sólido branco e quebradiço contendo geralmente 5 – 15% de umidade. Esse polímero é um hidrogel devido à sua elevada capacidade de absorção de água, conseguindo absorver quantidades de água superiores ao seu próprio peso. Isso se deve ao fato de existirem ligações de hidrogênio entre o polímero e a água.

A poliacrilamida não é tóxica, no entanto o seu monómero, a acrilamida, é tóxico, levando a um cuidado extra na sua manipulação.

Atualmente, a poliacrilamida pode ser utilizada em várias aplicações industriais, como nos processos de tratamento de água para aumentar a sedimentação de sólidos, nas operações de mineração, nos fluidos de perfuração e como controlador da mobilidade da água nas formulações empregadas para recuperação de petróleo.

A poliacrilamida possui alto peso molecular e nos fluidos de perfuração atua como um controlador dos fluidos, isso por ser capaz de encapsular os sólidos (contaminantes) presentes nos fluidos e formar flocos que se depositam no fundo dos tanques de decantação. A ação de captura de contaminantes pela poliacrilamida se deve a diferença de cargas existentes, já que a poliacrilamida é aniônica e os sólidos/partículas apresentam cargas positivas (8).

O método de preparo da poliacrilamida é parecido com o da goma xantana, Anexo A. Sendo esse:

- Seleciona-se a porcentagem de polímero desejada;
- Coloca-se o volume desejado de água deionizada em um recipiente;
- O recipiente é posicionado no agitador mecânico (marca Fisaton, modelo 723) com a pá âncora a 300 rpm;
- Acrescenta-se a poliacrilamida aos poucos, pela lateral, evitando despejar o pó na pá;
- Mistura-se a solução por 1 hora;

C

Reologia

Reologia Rotacional

Reologia é a ciência da deformação e escoamento da matéria. Estuda como os materiais respondem a uma dada sollicitação. Neste contexto, os materiais podem ser sólidos, líquidos ou gases.

O conhecimento da reologia é essencial para o desenvolvimento de novos produtos e processos, tendo em vista que muitos desses materiais apresentam um comportamento diferente do newtoniano.

Na indústria o estudo reológico é de grande utilidade para a determinação de cálculos em processos de engenharia, tais como cálculos de vazões para seleção de bombas, determinação de perda de carga em tubulações, além da caracterização de outros materiais complexos, como cosméticos, alimentos (maionese, ketchup, iogurte ...), fluidos de perfuração, óleos parafínicos gelificados, cimento, entre outros.

De maneira geral, os fluidos podem ser classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento, pois ao submetê-los a qualquer tensão externa, eles se deformam continuamente até encontrar uma barreira física capaz de impedir o seu escoamento. Na Figura C.1 observa-se a classificação dos fluidos newtonianos e não newtonianos.

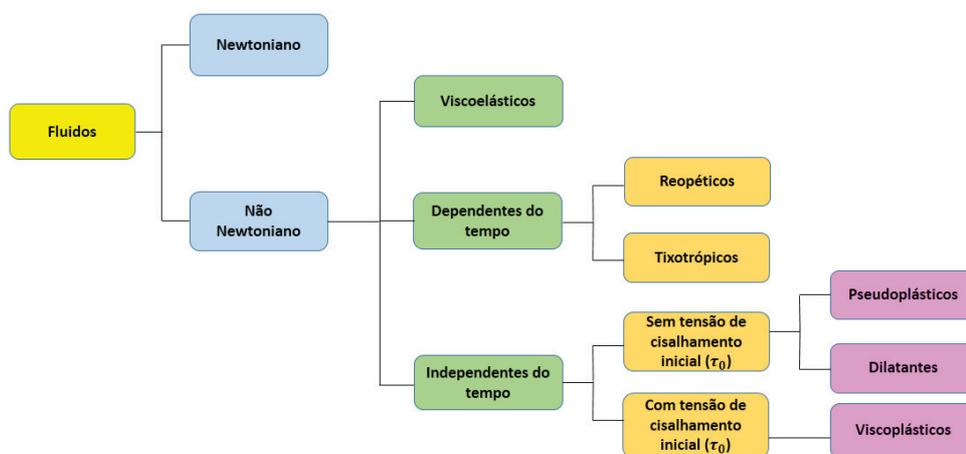


Figura C.1: Classificação reológica dos fluidos.

⊙ **Fenômenos newtonianos:**

São considerados fluidos newtonianos aqueles que apresentam uma relação constante entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento, independente da deformação e do tempo, isto é, a tensão cisalhante é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, cuja constante de proporcionalidade μ é denominada viscosidade dinâmica de acordo com a lei de Newton para um escoamento unidimensional (Equação C-1). A água, o óleo mineral, soluções muito diluídas, entre outros, são exemplos de fluidos newtonianos.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \tag{C-1}$$

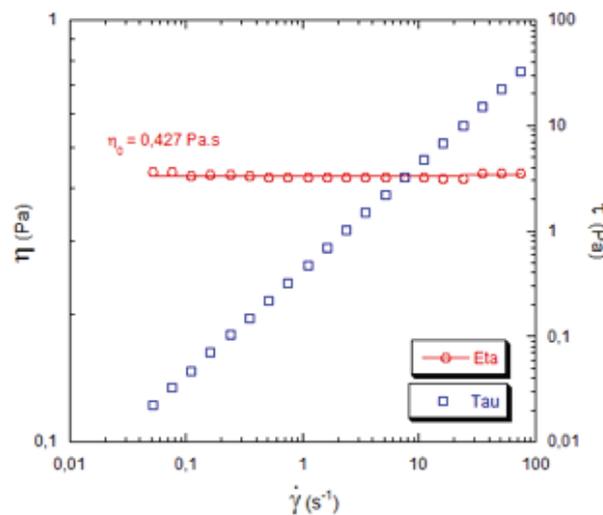


Figura C.2: Curva de viscosidade de um líquido Newtoniano.

⊙ **Fenômenos não newtonianos:**

Fluidos não newtonianos são aqueles nos quais a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento não são diretamente proporcionais. Como consequência, os fluidos não newtonianos não possuem viscosidade constante. Essas substâncias são melhores estudadas através de suas propriedades reológicas que mostram as relações entre a tensão aplicada e a taxa de deformação sob diferentes condições de escoamento. Essas relações são relacionadas através de leis constitutivas.

Os fenômenos não newtonianos são divididos em três grandes classes:

- Independentes do tempo,
- Dependentes do tempo,
- Viscoelásticos.

Fenômenos não Newtonianos independentes do tempo:

São aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

- Fenômeno da Potência:

Ao examinar determinados fluidos sob escoamento cisalhante, Ostwald verificou que esses exibiam comportamentos diferentes dos previstos por Newton. Os fluidos observados por Ostwald apresentavam uma relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) não linear. Desta forma, Ostwald propôs um modelo que pode ser descrito matematicamente pela Equação 3-13.

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

Onde k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento.

- Fenômeno da Dilatância

O fluido dilatante apresenta comportamento de viscosidade aparente crescente com o aumento da taxa de cisalhamento. A dilatância é manifestada em sistemas com mais de uma fase, desde que uma delas seja constituída de partículas grandes e assimétricas, que dificultam o empacotamento, sob elevadas taxas de deformação. Exemplos: suspensões concentradas de PVC misturadas com líquidos plastificantes, maisena, etc. Esses fluidos podem ser descritos pelo modelo de Ostwald-de-Waele (ou modelo *power law*) representado pela Equação C-2, sendo nesse caso n maior que 1.

- Fenômeno Pseudoplástico

Muitos líquidos apresentam uma diminuição drástica na viscosidade quando a taxa de cisalhamento passa de níveis baixos para níveis mais altos. Exemplos: óleos de motor, soluções poliméricas, etc. Esses fluidos podem ser descritos pelo modelo de Ostwald-de-Waele (ou modelo *power law*) representado pela Equação C-2, sendo nesse caso n menor que 1.

• Viscoplasticidade

Materiais viscoplásticos são aqueles que apresentam uma tensão limite de escoamento, tensão abaixo da qual o material não escoar, se comportando como um sólido, e acima da qual o material escoar como um líquido. Na literatura, encontram-se inúmeras funções viscosidade que descrevem esse comportamento. Entre elas pode-se citar as equações de *Bingham* e de *Herschel-Bulkley*, por serem as mais utilizadas. Exemplos: pastas de dente, maionese, ketchup, etc.

Modelo de *Bingham* (Equação C-3): esse tipo de fluido apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \tag{C-3}$$

Modelo de *Herschel-Bulkley* (Equação C-4): também chamado de *Bingham* generalizado. Esse tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}^n \tag{C-4}$$

Onde τ_0 é a tensão limite de escoamento, μ_p é a viscosidade plástica e n é o índice de comportamento.

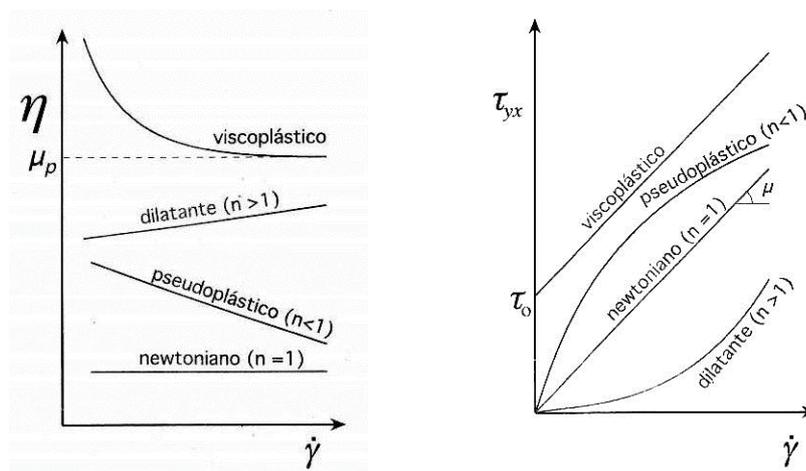


Figura C.3: Classificação dos fluidos.

Fenômenos não newtonianos dependentes do tempo:

São fluidos nos quais a viscosidade varia em função do tempo a uma dada taxa de cisalhamento.

- Fenômeno da Tixotropia:

Fluidos tixotrópicos são aqueles caracterizados pela diminuição da viscosidade aparente do líquido com o tempo de aplicação a uma dada taxa de deformação. Após a retirada da força cisalhante, o sistema volta à conformação original, recuperando novamente a viscosidade aparente inicial. Para esses materiais, qualquer que seja a taxa de cisalhamento aplicada, existirá um tempo necessário para a viscosidade cair e depois manter-se constante. É importante observar que todo fluido tixotrópico é pseudoplástico, mas nem todo fluido pseudoplástico é tixotrópico. Exemplos: tintas, suspensões coloidais, emulsões.

- Fenômeno da Reopexia:

Os fluidos que apresentam comportamento oposto aos fluidos tixotrópicos são denominados de reopéxicos. Esses fluidos apresentam um aumento da viscosidade aparente com o tempo a uma dada taxa de cisalhamento. Exemplos: argila bentonita, suspensões e não coloidais.

Viscoelásticos

O termo viscoelasticidade é utilizado para descrever a existência simultânea de propriedades elásticas e viscosas em um material. A resposta de uma amostra em um determinado experimento depende da escala de tempo do experimento em relação ao tempo de relaxação do material. Assim, se o experimento é relativamente lento, a amostra parecerá ser mais viscosa que elástica e vice-versa. Em escalas de tempo intermediárias, uma resposta viscoelástica é observada.

A determinação da resposta viscoelástica linear dos materiais é importante para o entendimento de diversos processos, como estabilidade de emulsões, extrusão e desenvolvimento de produtos, pois fornece parâmetros relacionados à microestrutura do material.