

## Referencia Bibliográfica

- [1] ABOU, B.; BONN, D.; MEUNIER, J.. **Aging dynamics in a colloidal glass of laponita.** 2001.
- [2] ASTARITA, G.. **The engineering reality of yield stress.** J. Rheol., 34: 275-77.
- [3] AZEVEDO, L.. **Notas de aula métodos experimentais.** PUC-Rio, 2009.
- [4] BARNES, H.A.. **A handbook of elementary rheology.** University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
- [5] BARNES, H.A.. **The yield stress- a review.** J. Non-Newtonian Fluid Mech., 81:133-177, 1999.
- [6] BARNES, H.A.. **Thixotropy-a Review.** J Non-Newtonian Fluid Mech., 70:1-33, 1997.
- [7] BINGHAM, E.C.. **Fluidity and Plasticity.** Mc Graw-Hill, New York, 1922.
- [8] BIRD, B.; ARMSTRONG, R.; HASSAGER, O.. **Dynamics of polymeric liquid.** John Wiley & Sons, Toronto, 1987.
- [9] BONN, D.; TANASE, S.; ABOU, B.; TANAKA, H.; MEUNIER, J.. **A model for Cage formation in colloidal suspensions of laponite.** Physical Review Letters, 89, 2001.
- [10] CHENG, D.C.. **Thixotropy.** Iht. J. Cosmetic Sci., 9: 151- 191, 1987.

- [11] CHENG, D.C.. **Yield stress: a time dependent property and how to measure it.** Rheol. Acta., 25: 542-54, 1988.
- [12] COCARD, S.; NICOLAI, T.; TASSIN, J-F.. **Thixotropic behavior of laponite suspensions as studied by rheo-optical techniques.** XIIIth International Congress on Rheology, 4: 160- 162, Cambridge, 2000.
- [13] COUSSOT, P.; LEONOW, I.; PIAU, J.M.. **Rheology of concentrated dispersed systems in a low molecular weight matrix.** J. Non-Newtonian Fluid Mech., 46:179-217, 1993.
- [14] COUSSOT, P.; NGUYEN, Q.D.; HUYNH, H.T.; BONN, D.. **Avalanche Behavior in yield stress fluids.** Physical Review Letters, 88:17-21, 2002.
- [15] COUSSOT, P.; NGUYEN, Q.D.; HUYNH, H.T.; BONN, D.. **Viscosity bifurcation in thixotropic, yield fluid,** J. Rheol., 46: 573-590, 2002.
- [16] ESCUDIER, M.P.; JONES, D.M.; GOULDSON, I.W.. **Fully developed pipe flow of shear-thinning liquids.** VI International Symposium on Applications of laser Techniques to fluid Mechanics., 1.3, 1992.
- [17] ESCUDIER, M.P.; POOLE, R.J.; PRESTI, F.; DALES, C.; NOUAR, C.; DESAUBRY, C.; GRAHAM, L.; PULLUM.. **Observations of asymmetrical flow behavior in transitional pipe flow of yield-stress and other shear-thinning liquids.** J. Non-Newtonian Fluid Mech., 127: 143-155, 2005.
- [18] ESCUDIER, M.P.; PRESTI, F.. **Pipe flow of a thixotropic liquid.** J.Non-Newtonian Fluid Mech., 62: 291-306, 1996.
- [19] ESCUDIER, M.P.; SMITH, S.. **Turbulent flow of Newtonian and shear-thinning liquids though a sudden axisymmetric expansion.** Experiments in Fluids, 27(5): 427-434, 1999.

- [20] HERMAN, Z.; CUMMINS.. **Liquid, glass, gel: The phases of colloidal Laponite**. Journal of Non-Crystalline Solids, 353: 3891–3905, 2007.
- [21] HOUWINK, R.. **Elasticity, Plasticity and Structure of Matter**. Cambridge University Press, Third edition, 2009
- [22] KNAEBEL, A.; BELLOUR, M.; MUNCH J.P.; VIASNOFF, V.; LEQUEUX, F.; HARDEN, J.L.. **Aging behavior of laponite clay particle suspensions**. Europhysics Letter, 52 (1): 73, 2000.
- [23] LABANDA, J.; LLORENS, J.. **A structural model for thixotropy of colloidal dispersions**. Rheol Act., 45: 305-314, 2006.
- [24] LABANDA, J.; LLORENS, J.. **Effect of aging time on the rheology of Laponite dispersions**. Colloids and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects, 329: 1-6, 2008.
- [25] LABANDA, J.; LLORENS, J.. **Rheology of Laponite colloidal dispersions modified by sodium polyacrylates**. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 249:127–129, 2004.
- [26] LABANDA, J.; SABATÉ, J.; LLORENS, J.. **Rheology change of Laponite aqueous dispersions due to addition of sodium polyacrylates of different molecular weights**. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 301: 8–15, 2007.
- [27] MEWIS, J.. **Thixotropy a general review**. J Non-Newtonian Fluid Mech., 6: 1-20, 1979.
- [28] MONGONDRY, P.; NICOLAI, T.; TASSIN., J.F.. **Influence of pyrophosphate oxide on the aggregation and gelation of aqueous laponite dispersions**. Journal of Colloid and Interface Science, 275: 191-196, 2004.

- [29] MONGONDRY, P.; NICOLAI, T.; TASSIN., J.F.. **Thixotropic Behaviour laponite suspensions as studied by Rheo-optical techniques**. XIIIth International Congress on Rheology, Cambridge, 2000.
- [30] MOSSA, S.; DE MICHELE, C.; SCIORTINO, F.. **Aging in a Laponite colloidal suspension: A Brownian dynamics simulation study**. J. Chem. Phys., 126: 014905 , 2007.
- [31] MOURCHID, A.; DELVILLE, A.; LAMBARD, J.; LEVITZ,P.. **Diagram of Colloidal Dispersions of Anisotropic Particles: Equilibrium Properties, Structure, and Rheology of Laponite Suspensions**. Langmuir, 11(6): 1942-1950, 1995.
- [32] NGUYEN, Q. D.; BOGER, V.. **Yield stress measurement for concentrated suspensions**. J. Rheol., 27: 321–349 ,1983.
- [33] NICOLAI, T.; COCARD, S.. **Dynamic Light-Scattering Study of Aggregating and Gelling Colloidal Disks**. Journal of Colloid and Interface Science, 244: 51-57, 2001.
- [34] PARK, J.T.; MANNHEIMER.. **Pipe flow measurements of a transparent non-Newtonian slurry**. J. Fluids Eng 111: 331-336, 1989
- [35] PARMAR, K.P.; MÉHEUST, Y.; SCHJELDERUPSEN, B.; FOSSUM, J.O.. **Electrorheological suspensions of Laponite in Oil: Rheometry**. Langmuir, 24: 1814-1822, 2007.
- [36] PEREIRA, A.S.; PINHO, A.S.. **Recirculation Turbulent flow of thixotropic fluids**. J Non-Newtonian Fluid Mech., 99: 183-201, 2001.
- [37] PEREIRA, A.S.; PINHO, F.T.. **Reologia de Suspensões tixotrópicas de base argilosa (Laponite)**. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões - Mecânica Experimental, 51-63, 1999.

- [38] PEREIRA, A.S.; PINHO F.T.. **The effect of the expansion ratio on a turbulent-Newtonian recirculation flow**. Experiments in Fluids, 32: 458-471, 2002.
- [39] PEREIRA, A.S.; PINHO F.T.; **Turbulent pipe of thixotropic fluids**. International Journal of Heat and Fluid Flow, 23: 36-51, 2001.
- [40] PIGNON, F.; MAGNIN, A.; PIAU, J.M.. **Butterfly Light Scattering Pattern and Rheology of a Sheared Thixotropic Clay Gel** Physical Review Letters, 79, 1997.
- [41] PIGNON, F.; MAGNIN, A.; PIAU., J.M.. **Thixotropic behavior of clay dispersion: Combinations of scattering and rheometric techniques**. J. Rheol. 42(6): 1349-1374, 1998.
- [42] RAFAEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J.. **Particles Image Velocimetry**. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Second Edition, 2007.
- [43] ROCKWOOD ADDITIVES, Laponite disponível em: <<http://www.scprod.com/pdfs/LaponiteBrochureE.pdf>>, Acesso em: Maio 2011.
- [44] RUZICKA, B.; ZULIAN, L.; RUOUCCO, G.. **More on the phase diagram of laponite**. Langmuir 22: 1106-1111, 2006.
- [45] SHANHIN, A.; YOGESH, M.; JOSHI.. **Irreversible Aging Dynamics and generic phase behavior of aqueous suspensions of laponite**. Langmuir, 26(6): 4219-4225, 2010.
- [46] SOUZA MENDES, P.R.; NACCACHE, M.F.; VARGES, P.R.; MARCHESINI, F.H.; **Flow of viscoplast liquids through axisymmetric**

**expansions-contractions.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mech., 142: 207-217. 2007.

- [47] SOUZA MENDES, P.R.. **Modeling the thixotropic behavior of structured fluids.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mech., 164(1-3): 66-75, 2009.
- [48] TANAKA, H.; JABBARI-FAROUJI, S.; MEUNIER, J.; BONN, D.. **Kinetics of ergodic-to nonergodic transitions in charged colloidal suspensions: Aging and gelation.** Physical Review Letters, 71, 2005.
- [49] YOGESH, M.; JOSHI, RANJITH, G.; REDDY, A.; KULKARNI.. **Rheological behavior of laponite: new insights into the ageing phenomena.** Proceedings of the royal society, 464: 469-489, 2008.

## A

### Anexo A

#### A.1.

#### Informação adicional sobre a caracterização Reológica

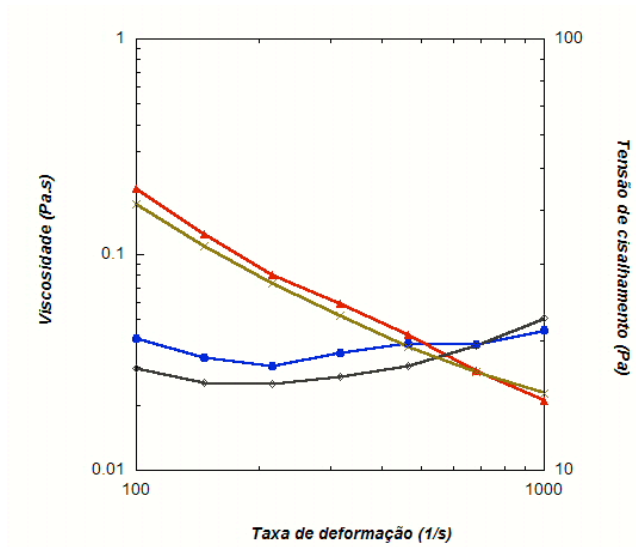
##### A.1.1.

##### Seleção da geometria para teste no reômetro.

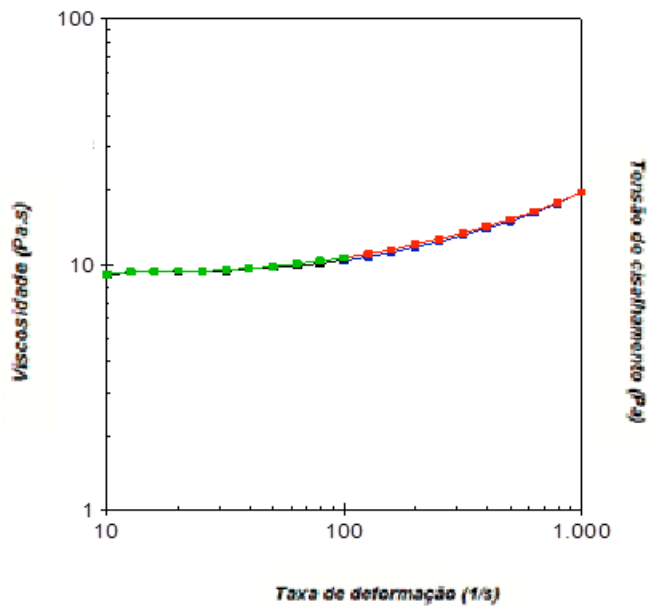
Para selecionar a geometria, testaram-se três tipos de geometrias: placa paralelas lisas, cone -placa, e a geometria de Couette. A escolha da geometria dependeu do tipo de fluido, faixa de viscosidade e taxa de deformação. Todas as geometrias antes vistas poderiam trabalhar com a laponita, mas cada uma delas tem suas limitações que afetam de forma não igual os resultados. Selecionou-se a geometria para cada teste em função das características. O deslizamento observado nos testes, apresentados por uma mudança abrupta na viscosidade em função do tempo, não foi visível para taxas de deformação altas, e para baixas foi só visível para alguns testes os quais foram repetidos.

Nas geometrias de cone-placa e placas paralelas, os resultados são mais afetados pela evaporação da mostra. A colocação das amostra nestas geometrias também é outro problema, é muito mas difícil de trabalhar com essa geometrias que com geometria de Couette

Para as condições de fluxo testou-se as geometrias, e devido aos argumentos antes descritos pode-se ver a falta de repetitividade quando se trabalha com as geometrias cone-placa. Placas paralelas também foi ideal para trabalhar com laponita, mas é mais complicado para a colocação da mostra que a geometria Couette. A geometria Coutte apresentou uma boa repetitividade, sendo assim foi utilizada para os testes de fluxo.



**Figura A-1:** Teste *flow curve* de 1000 a 100 (1/s) utilizando a geometria cone-placa



**Figura A-2:** Teste *flow curve* de 1000 a 100 (1/s) utilizando a geometria Couette.

A geometria placas paralelas lisas foi utilizada para testes oscilatórios porque fornece melhores resultados por trabalhar com baixas frequências e amplitudes.



Os teste para avaliar a geometria foram feitos no reometro PAAR Physica MCR 501.

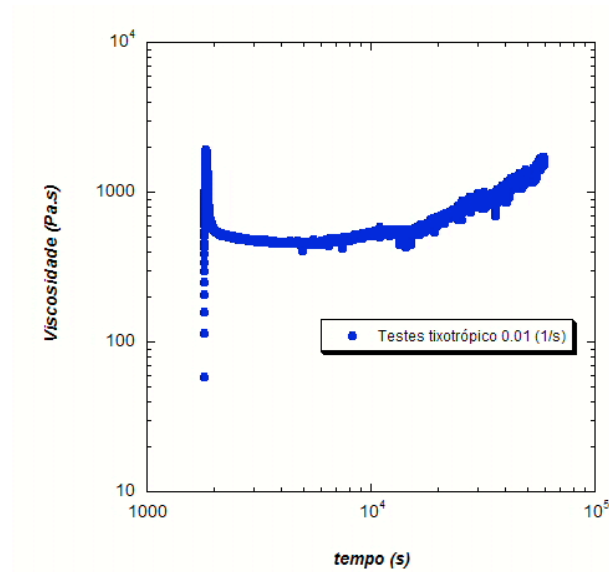
As geometrias testadas forma das seguintes características: A geômetra placas paralelas, com um *gap* de 1 mm, tem um diâmetro de 49.937 mm, concentricidade de  $\pm 6\mu\text{m}$  e paralelismo de  $\pm 4\mu\text{m}$ . Geometria cone-placa que tem uma diâmetro de 49.932 mm, concentricidade de  $\pm 5\mu\text{m}$ , paralelismo de  $\pm 3\mu\text{m}$  e ângulo de  $0.995^\circ$ .

### **A.1.2.**

#### **Influencia da evaporação.**

A evaporação da amostra durante o teste acontece apesar de colocar a tampa protetora. A tampa diminui o processo de evaporação, mas não elimina. Isto foi visível já que depois de fazer os testes, conseguia-se ver gotas pequenas de água na superfície da tampa. Pode-se observar a simples vista que trabalhando com as geometrias: discos paralelos lisos, placas paralelas e cone-placa acontece maior evaporação que com a geometria de Couette. Esta observação foi baseada na quantidade de água que tinha cada tampa após a realização de cada teste. Na Figura A-3 pode observar o efeito da evaporação nos testes. Este teste foi realizado por longo período de tempo com a tampa que diminui a evaporação com a geometria de discos de placas. Ao final do teste observou-se água na tampa.

A diminuição da água na dispersão é visível no aumento da viscosidade da dispersão, na Figura A-3, se não fosse pelo efeito da evaporação da mostra durante o teste, a viscosidade deveria atingir um patamar de regime permanente. Conforme a água presente na laponita evapora, a concentração da dispersão é alterada, logo testa-se um fluido diferente a cada instante de tempo.



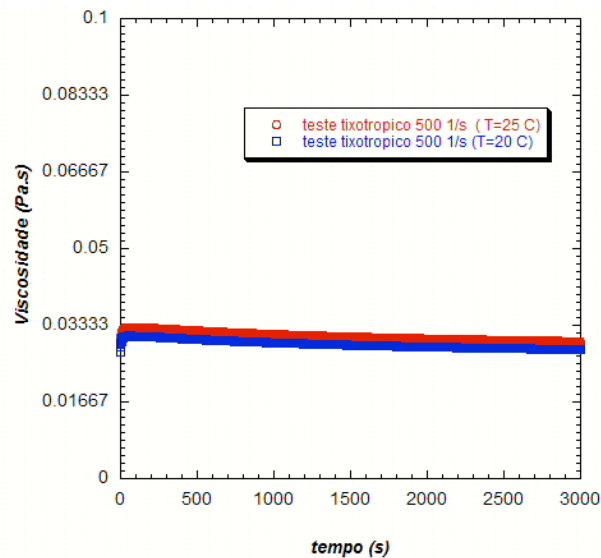
**Figura A-3:** Testes tixotrópico a 0.01 (1/s) com a geometria de discos de placas , utilizando tampa, que apresenta a influencia da evaporação nos teste.

Através do teste feito observo-se que as mostras podem estar no reômetro sem mostrar modificações nos resultados até aproximadamente 7000 segundos

### A.1.3.

#### Influencia da temperatura nos testes.

Para conhecer a influência da temperatura nas propriedades reológicas de fluxo da dispersão de laponita, foram feitos dois testes tixotrópicos, um a 20 °C e outro a 25 °C com um pré-cisalhamento de 1500 1/s por 250 s. Estes testes são observados na Figura A-4. As temperaturas selecionadas foram 20 °C e 25 °C pois representam a variação de temperatura durante os experimentos de visualização.



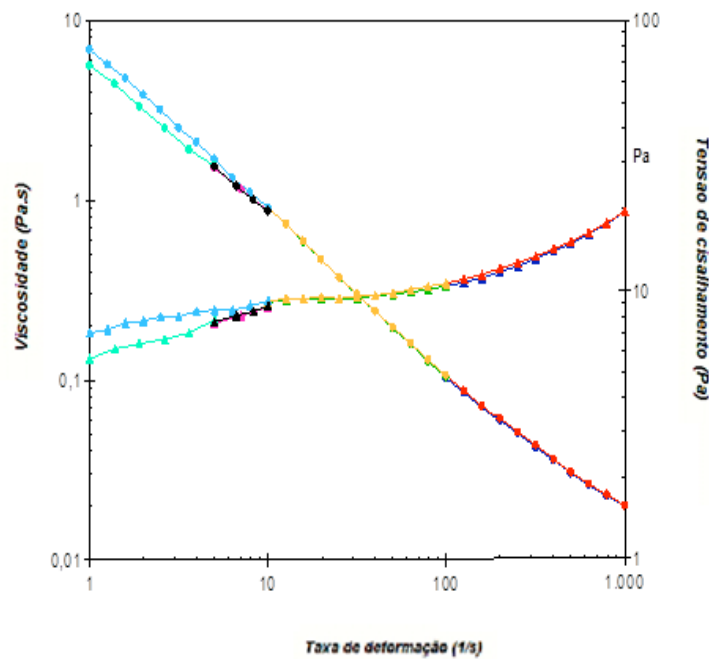
**Figura A-4:** Testes tixotrópicos a 500 1/s com um pré-cisalhamento de 250 s, a 25 °C e 20 °C.

Conforme observado na Figura A-4, a dispersão de laponita preparada é pouco sensível a variações de temperatura. Os testes foram feitos no reometro ARES G2 utilizando a geometria de Couette.

#### **A.1.4.**

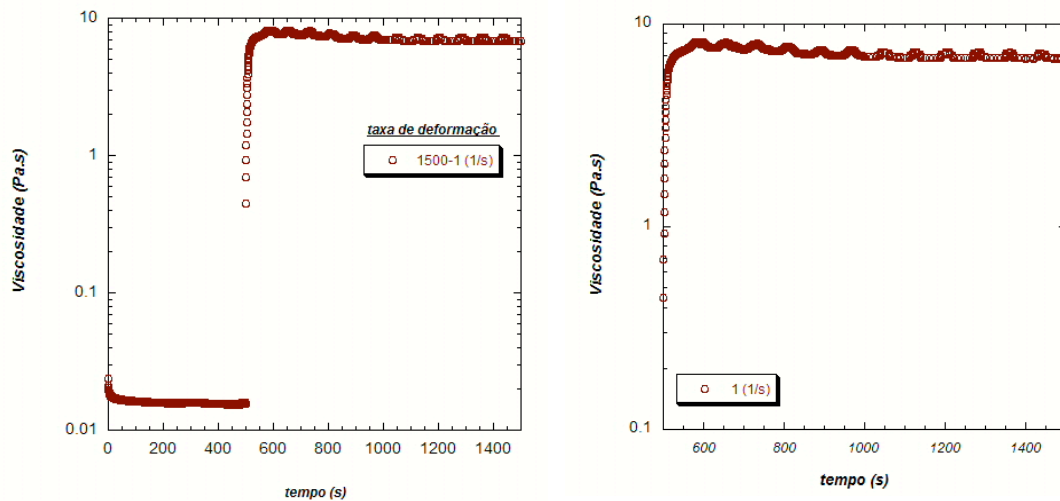
#### **Influência do pré-cisalhamento e dificuldade de obtenção de dados a baixas taxas de deformação.**

Depois de superado o problema da seleção da geometria correta para fazer os testes em condições de fluxo, apresentou-se um problema descrito por Coussot P, Nguyen Q, Huynh H e Bonn D [37] sobre a dificuldade de trabalhar a baixas taxas de deformação com fluidos tixotrópicos. Como pode-se ver na Figura A-5 existe um limite que permite uma boa repetitividade e uma tendência de tensão limite de escoamento com o mesmo reômetro. Para taxas de deformação inferiores a 10 (1/s) observa-se ausência da linha de tendência que indica a tensão limite de cisalhamento e além falta de repetitividade o qual concorda como o trabalho [4] [41] [43]. Os testes foram realizados utilizando o reômetro PAAR Physica MCR 501. Outra hipótese para fato de repetitividade refere ao fato de reômetro PAAR Physica MCR 501 ser de tensão controlada, o que dificulta a convergência a taxas de deformação baixas.



**Figura A-5:** Dificuldade de toma de dados para baixas taxas de deformação e falta de repetitividade.

Uma vez já identificado a faixa com problema de repetitividade e falta de tendência de tensão limite, foi realizado um teste *step change* para verificar se o problema era em função de diferença na preparação das amostras ou por diferenças relativas aos equipamentos utilizados. Este teste *step change* é apresentado na Figura A-6.



**Figura A-6:** (a) Testes de *step change* de 1500 a 1 (1/s), (b) ampliação da região com taxa de deformação 1 (1/s).

Como pode-se ver na Figura A-6, a dispersão de laponita submetida a uma taxa de deformação 1 1/s, atinge uma patamar de regime permanente, mas tem o problema de uma instabilidade que pode ser consequência da falta de controle da tensão de cisalhamento imposta para esta taxa de deformação, devido à utilização de um reômetro de taxa com tensão controlada. Este fenômeno foi repetitivo o qual descartou a possibilidade de falta de repetitividade devido a diferença nas amostras testadas. Outra causa deste fenômeno pode ser descrito em alguns trabalhos sobre o comportamento das argilas tixotrópicas [4] [41] [42]. Nestes trabalhos detalha-se a existência de uma bifurcação (detalhado no capítulo 1). Embora fosse possível que este comportamento ocorresse para taxas de deformação mais baixa que 1 1/s, fez-se testes *step change* no reômetro ARES G2 de taxa de deformação controlada, os quais já eliminaram esta instabilidade, mas mostraram deslizamento em alguns deles. Os testes que apresentaram deslizamento fossem repetidos até conseguir resultados sem a presença de deslizamento.

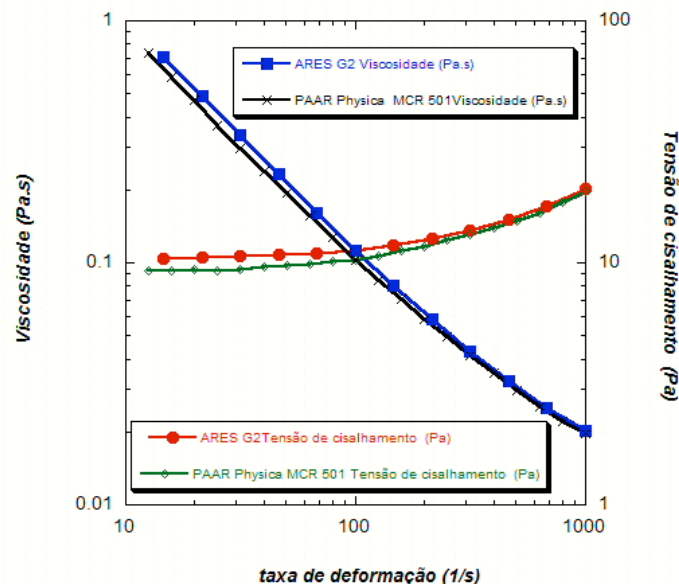
Depois de verificar que o reômetro ARES G2 de controle de taxa de deformação fornece melhores resultados para taxas de deformação baixas era preciso verificar se os resultados para taxas de deformação elevada feitos no reômetro PAAR Physica estavam corretos, o qual será visto amplamente a seguir.

Com o reômetro ARES G2 controlou-se a flutuações nos patamares de regime permanente, mas os patamares atingiam valores diferentes de regime permanente para taxas de deformação baixas. Por tal razão foi imposto um pré-cisalhamento de 1500 1/s por 250 segundos, que representa o tempo que demora em atingir regime permanente nesta taxa de deformação. Após foram feitos testes de *step change* de 100 (1/s) para cada valor da faixa de 10 a 1 1/s, deste jeito conseguiu-se uma boa repetitividade e uma tendência de tensão limite de escoamento. Os resultados para taxas de deformação acima de 10 (1/s) não apresentaram diferentes patamares de regime permanente com ou sem pré-cisalhamento.

#### A.1.5.

#### Diferença na utilização do reômetro de taxa de deformação controlada e o reômetro com tensão de cisalhamento controlada.

Para observar a diferença entre a *flow curve* de cada um dos reômetros, foram obtidos uma *flow curve* de cada reômetro e comparadas. Na Figura A-7 pode-se ver esta comparação desses resultados.



**Figura A-7:** Diferença nas *flow curve* utilizando o reômetro ARES G2 (taxa de deformação controlada) e o PAAR Physica MCR 501 (tensão de cisalhamento controlada).

Como pode ser na Figura A-7, para altas taxa de deformação não há diferença entre fazer os testes com qualquer dos reômetros, mas para taxas de deformação baixas há diferença. Os dados da faixa de taxa de deformação inferior a 10 foram obtidos dos testes *step changes* feitos no reômetro ARES G2.

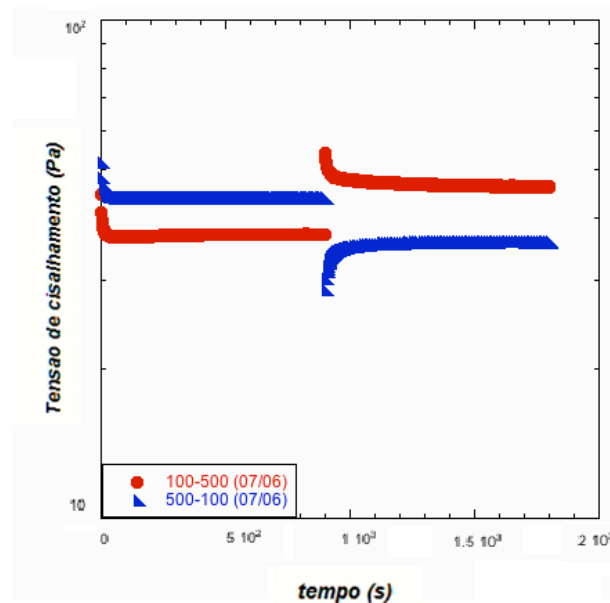
As medidas feitas nos dois reômetros apresentam a mesmas tendência para taxas de deformação altas, acima de 130 1/s, o qual mostra que não existe falta de controle da tensão de cisalhamento e além que a amostra está sendo cisalhado corretamente no *gap* das geometrias para a faixa acima de 130 1/s, isto concorda como o trabalho [42]. Para explicar o problema da falta de concordância dos resultados dos reômetros e além das geometrias para as mesmas taxas de deformação como é estudado em [42], cogitou-se a existência de uma taxa de deformação crítica a qual estabelece dos comportamentos diferentes. Pignon F., Magnin, A., Piau, J-M., [42] estudaram o comportamento tixotrópico das argilas sob condições de fluxo, combinando medições reométricas e técnicas de dispersão de luz estática.

No estudo conseguiram ver que para taxas de deformação acima da taxa crítica, que para ambos trabalhos esta taxa é de 130 1/s, não existe alinhamento das partículas e que a maior parte das aglomerações foram quebradas, o qual faz que o efeito cisalhante fosse predominante. Mas para taxas de deformação baixas, submetido ao efeito das forças hidrodinâmicas, os aglomerados unem-se e enrolam-se entre eles formando formas cilíndricas na suspensão. Estas formas cilíndricas são alinhadas em direção perpendicular ao escoamento. Assim os testes dependem da geometria e o tipo de controle do reômetro utilizado. Embora quando novamente é superado a tensão limite os rolos dos aglomerados são quebrados.

### A.1.6.

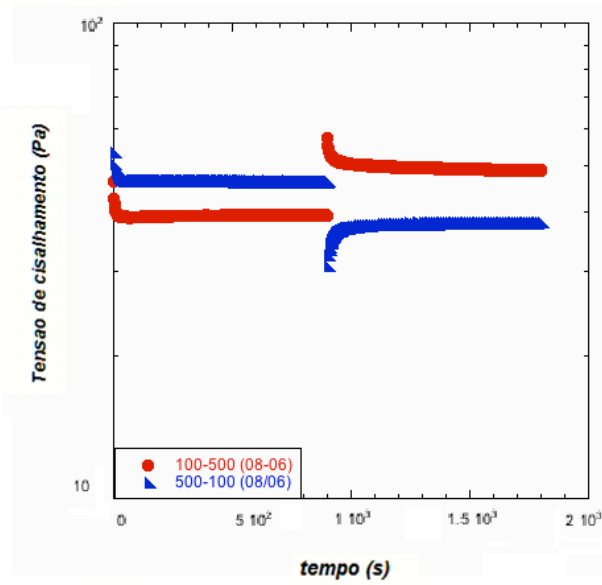
#### Influencia do tempo de repouso após a preparação de dispersão.

Uma variável importante para a caracterização reológica foi o tempo de repouso da suspensão, devido às mudanças estruturais que acontecem após a preparação. Nos trabalhos [46] [31] [25] [24] menciona-se que as mudanças estruturais que produz diferentes resultados nas medições reométricas acontecem durante um ano, mas que a maior parte de eles acontecem durante os primeiros 7 dias. Para comprovar a validade desta afirmação foram feitos testes *step change* durante os primeiros 8 dias. Estes testes estão nas Figura A-8, Figura A-9, Figura A-10, Figura A-11.

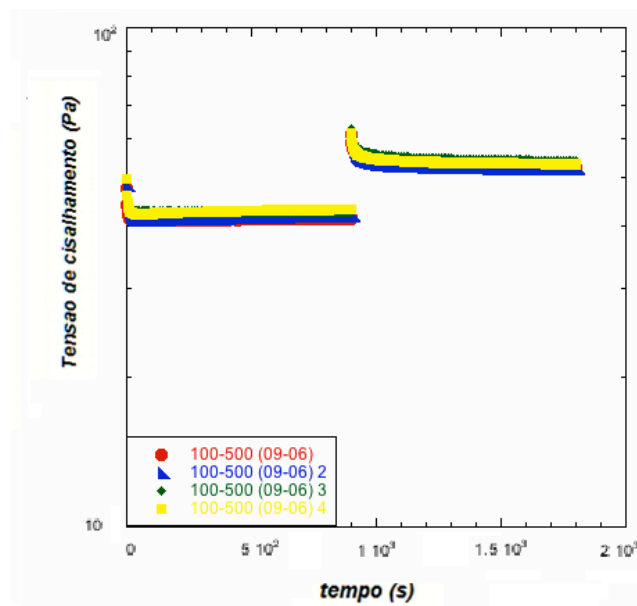


**Figura A-8:** Teste step change de 100 a 500 (1/s) e 500 a 100 (1/s) , cinco dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD.

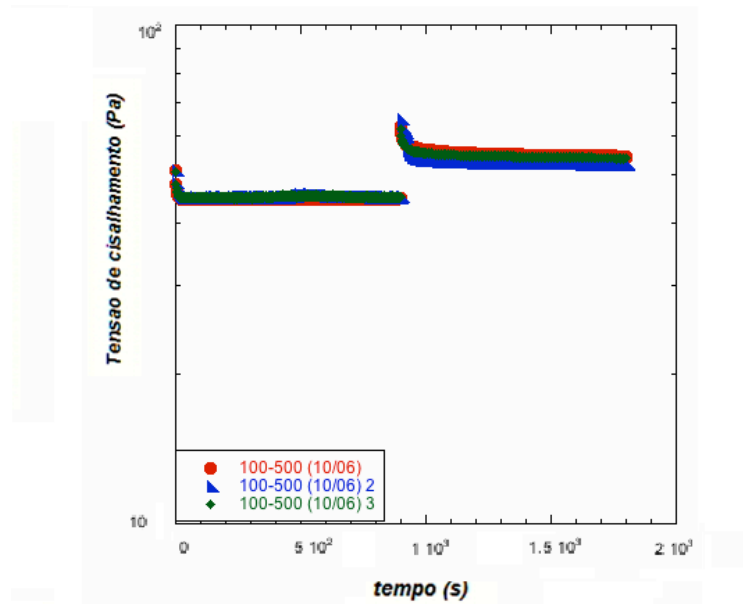




**Figura A-9:** Teste step change de 100 a 500 (1/s) e 500 a 100 (1/s) , seis dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD.

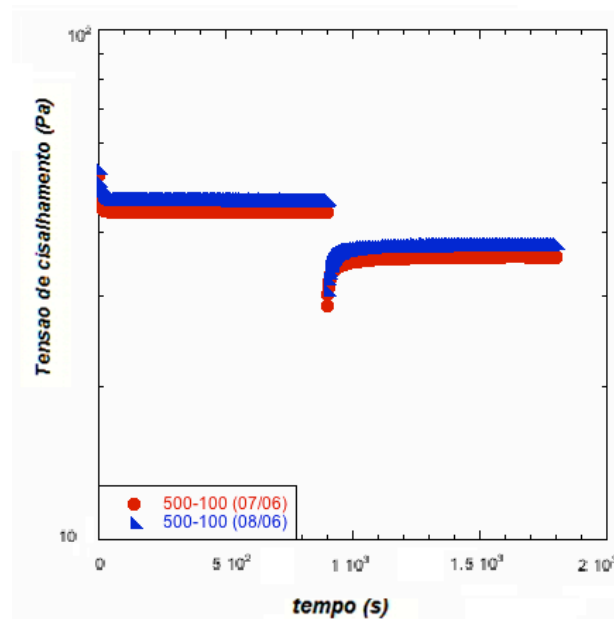


**Figura A-10:** Teste step change de 100 a 500 (1/s), sete após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD



**Figura A-11:** Teste step change de 100 a 500 (1/s), oito dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD

Os testes feitos apresentaram que efetivamente a amostra seu comportamento dependendo do tempo da realização dos testes após a preparação. Embora as maiores mudanças acontecem nos primeiros 6 dias. Os testes feitos no mesmo dia são diferentes e atingem patamares de regime permanente diferentes. Para o sétimo e oitavo dia a dispersão apresenta diferenças pequenas entre os testes feitos no mesmo dia, inclusive pequenas diferenças entre um dia e outro, como ilustrado na Figura A-12.



**Figura A-12:** Comparação dos testes step-change de 100 a 500 (1/s), do sétimo e oitavo dia após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD

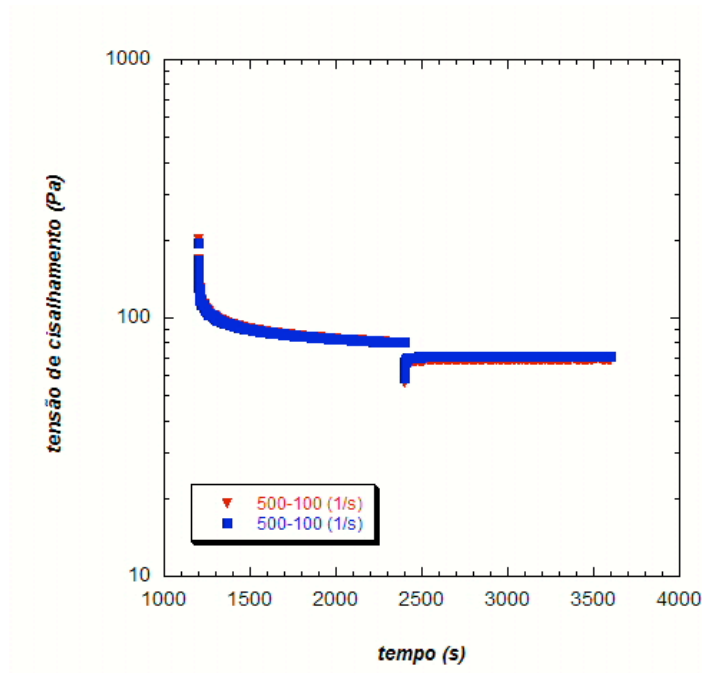
As mudanças estruturais acontecem por efeito do envelhecimento da solução, por o qual o material muda de gel para cristal, incrementando sua viscosidade com o tempo, por tal razão para avaliar-se as mudanças estruturais que afetam os testes reológicos de fluxo terminam quando o gel muda por cristal. Um teste aquecendo a dispersão foi feito depois de seu processo de preparação durante 2 dias a temperatura de 100 °C. Isto foi feito para fornecer à dispersão a maior quantidade de energia que permita sua acontecer todas as mudança até formar cristal. Deste jeito acelera-se o processo de cristalização que acontece durante todo o tempo no gel viscoplástico de laponita.



**Figura A-13:** Dispersão de laponita, aquecida por 2 dias após a preparação

A Figura A-13 apresenta a dispersão de laponita aquecida por 2 dias. Observa-se que efetivamente amostra tem a forma de um cristal. Nos testes *step-change* não foram observados diferenças em 2 dias de teste, conforme a esta na Figura A-14. Apesar que o trabalho de Coussot [15] menciona que a resposta para o escoamento de um fluido com tensão limite de escoamento e um sistema cristalino são similares. O cristal coloidal não foi utilizado neste trabalho devido a sua alta viscosidade que dificultava o escoamento e à dificuldade existente para eliminar as bolhas de ar presentes na amostra.

Os testes *step change* como são para taxas de deformação alta foram feitos utilizando o reômetro PAAR Physica MCR e a geometria discos paralelos, com um *gap* de 1 mm. A geometria tem um diâmetro de 49.937 mm, concentricidade de  $\pm 6\mu\text{m}$  e paralelismo de  $\pm 4\mu\text{m}$ .



**Figura A-14:** Teste step change de 500 a 100 (1/s), aquecida 2 dias após a preparação da dispersão de laponita e ao testada ao quarto e quinto dia.

**B****Anexo B****B.1.****Análise de Incerteza**

O presente apêndice destina-se a apresentar a metodologia utilizada para a estimativa dos níveis de incerteza associada ao escoamento do fluido. Os resultados foram apresentados em função do número de Reynolds e a vazão mássica.

Neste trabalho para avaliar a incerteza foi adotada a metodologia comumente utilizada para o estudo de propagação de incertezas, conforme descrito por Kleine e McClinton [3].

Quando se tem um resultado  $R$  como função de  $n$  variáveis independentes, precisamos avaliar como estas incertezas se propagam no cálculo. Seja  $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $\delta R$  a incerteza no resultado de  $R$ , e  $\delta x_i$  a incerteza em cada variável  $x_i$ . As derivadas parciais são chamadas de coeficientes de sensibilidade e medem o quão sensível o resultado  $R$  é a cada variável  $x_i$ .

$$\delta R = \left\{ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{B-1})$$

**B.1.1.****Calculo da incerteza na medição de vazão mássica**

A vazão mássica foi calculada com a equação B-2, onde os parâmetros  $m$  (massa) e  $\Delta t$  (tempo) são medidos experimentalmente como explica-se no capítulo 2.

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \left( \frac{g}{s} \right) \quad (\text{B-2})$$

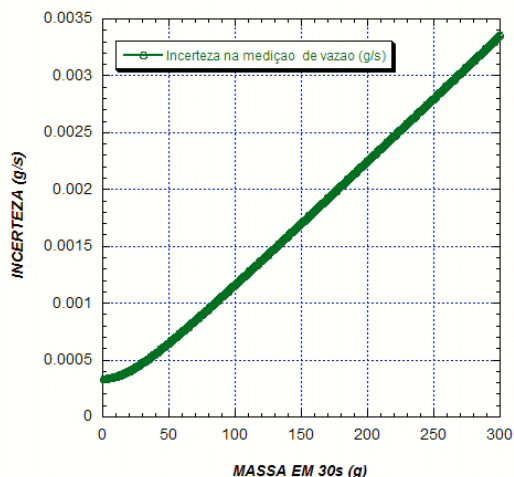
Para a vazão medida através da equação (B-2), as variáveis independentes são: a massa medida com uma balança e o tempo medido com um cronômetro.

A incerteza da balança e o cronômetro foram aproximados à menor precisão dos aparelhos.

$$d\dot{m} = \left[ \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial m} dm \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t} d\Delta t \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-3})$$

$$d\dot{m} = \left[ \left( \frac{1}{\Delta t} dm \right)^2 + \left( \frac{m}{\Delta t^2} d\Delta t \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-4})$$

$$d\dot{m} = \left[ \left( \frac{1}{30} 0.01 \right)^2 + \left( \frac{m}{30^2} 0.01 \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-5})$$



**Figura B-1:** Incerteza na medição de vazão mássica

Para determinar a vazão foi medida da quantidade e massa que passa em 30 segundos, e obteve-se que a menor quantidade medida fora 5 gramas e a maior é de aproximadamente 260 gramas. Portanto a incerteza medida encontra-se na faixa de 0.03% e 0.2 %

### B.1.2.Cálculo da incerteza da função viscosidade

Quando apresenta-se o resultado de medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado. É necessário, portanto, que há um procedimento, de fácil compreensão e aceitação geral, para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza.

O erro pode ser definido como “a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro de uma grandeza”. Como normalmente não se conhece o valor verdadeiro de uma grandeza, define-se o conceito de incerteza. Incerteza Experimental é um valor possível que o erro pode assumir. Define uma faixa onde se estima estar localizado o valor da grandeza medida, dentro de um determinado nível de probabilidade. A incerteza experimental é dada pela faixa  $x \pm 2\sigma$ , onde  $x$  é a média das medidas, com 95,4 % de probabilidade de ocorrência. A escolha de  $\pm 2\sigma$  é arbitrária. Uma maneira completa de se reportar uma medida é  $m \pm \delta m$  ou



$m \pm \delta m/m$ , onde  $\delta m$  é a incerteza absoluta e  $\delta m/m$  é a incerteza relativa da medida

A incerteza associada a cada polinômio interpolado é calculado da seguinte forma:

$$dn = \sqrt{(dn_{exp})^2 + (dn_{ajus})^2} \quad (B-6)$$

$(dn_{ajus})$  : incerteza que considera a diferença entre os valores do polinômio interpolado e os pontos obtidos no experimento.

Para calcular a incerteza experimental é preciso utilizar a seguinte equação de todas as incertezas associadas na obtenção de dados.

$$(dn_{exp})^2 = (dn_{pad})^2 + (dn_{sis})^2 \quad (B-7)$$

$(dn_{pad})$  : a incerteza da medição do padrão, obtida de calibrações do reômetro

$(\delta n_{sis})$  : a incerteza produzida pelas variações no estado durante o experimento, neste caso assume-se 0

Utilizando a equação 4-23 e com os dados experimentais calculou-se  $\sigma = 0.222$ , o que implica que  $dn_{ajus} = \pm 0.444 \%$ . A incerteza de calibração do Reômetro ARES G2 e PAAR Physica MCR 501 é de  $\pm 3.2 \%$ . Finalmente utilizando as equações B-6 e B-7 calculou-se a incerteza da viscosidade 3.230 %.

### B.1.3. Cálculo da incerteza do número de Reynolds

O número de Reynolds que é um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia e viscosas, o qual foi utilizado para a apresentação dos resultados é calculado com a equação 4-4. Onde  $\rho$  é a densidade da dispersão de laponita,  $D$  é o diâmetro do tubo,  $V$  é a velocidade média do fluido e  $\eta$  é a viscosidade. Simplificando esta equação obtém-se a equação B-2.

$$Re = \frac{4.m}{\pi.D.n} \quad (\text{B-8})$$

De acordo com a equação B-1, a incerteza no calculo do numero de Reynolds é estimada por:

$$dRe = \left[ \left( \frac{\partial Re}{\partial \rho} d\rho \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial D} dD \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial \dot{m}} d\dot{m} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial n} dn \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-9})$$

Da equação B-9, obtém-se a incerteza porcentual que apresenta-se ao seguir:

$$\frac{dRe}{Re} = \left[ \left( \frac{d\rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{dD}{D} \right)^2 + \left( \frac{d\dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{dn}{n} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-10})$$

A incerteza da densidade é considerada a apreciação mínima do equipamento 0,0001 g/ml. A incerteza do diâmetro é  $\pm 0.02$  mm. A incerteza dos reômetros explica-se anteriormente.

$$\frac{dRe}{Re} = \left[ \left( \frac{0.0001 \text{ g/ml}}{1.0154 \text{ g/ml}} \right)^2 + \left( \frac{0.02 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 + \left( \frac{d\dot{m}}{\dot{m}} \right)^2 + (0.032)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{B-11})$$

Finalmente a incerteza fica em função da vazão mássica que já foi calculado antes do qual conclui-se que a incerteza do número de Reynolds esta na faixa de 3.236% e 3.240 %