

## 4

### Resultados e discussão

#### 4.1.

##### Caracterização Reológica

Conforme explicado anteriormente no capítulo 3, o fluido utilizado nos testes de visualização é laponita RD, preparado como indica o protocolo do mesmo capítulo.

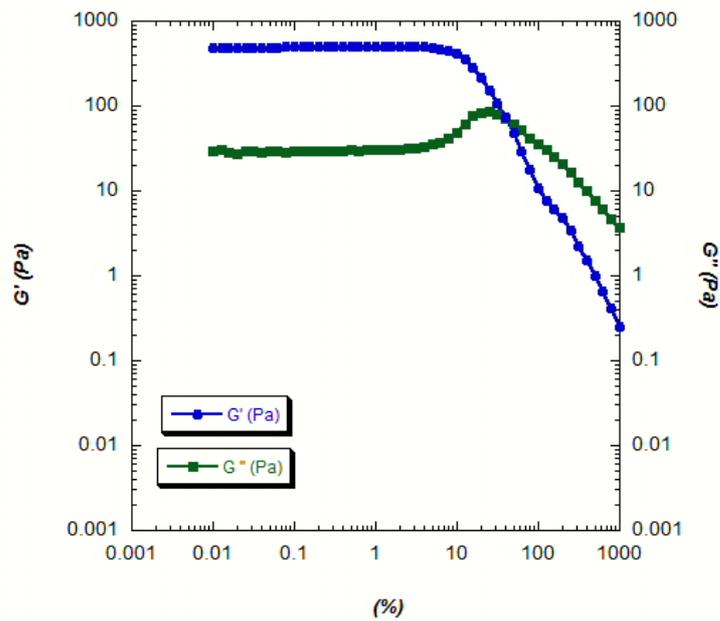
O procedimento para a caracterização reológica do comportamento tixotrópico está descrito no item 3.2. Detalha-se a descrição dos testes em condições de regime permanente e em testes oscilatórios. A análise, discussão e caracterização estão baseadas nestes testes.

A caracterização reológica envolve algumas complicações experimentais que afetam os resultados, tais como: evaporação da amostra, falta de repetitividade para baixas taxas de deformação, influência das mudanças de temperatura, influência do tipo de controle do reômetro, seleção da geometria correta de trabalho. As consequências de cada um deles nos resultados explicam-se no Anexo A.

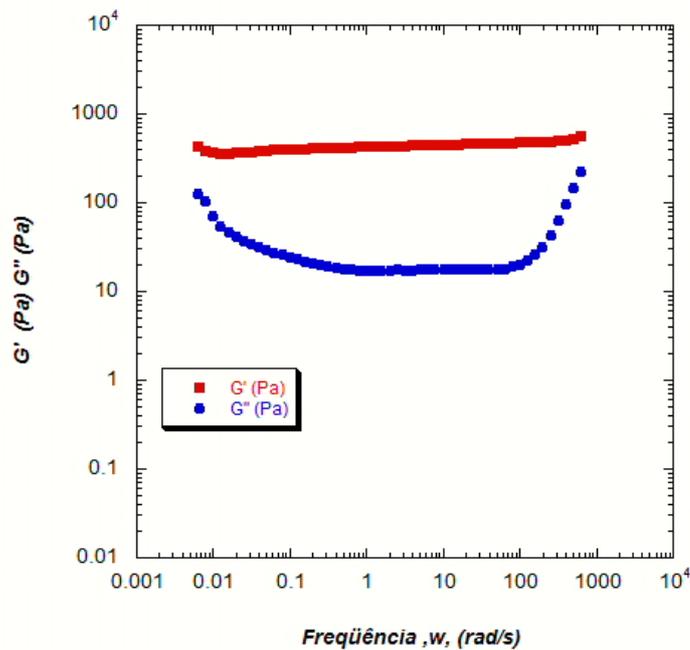
##### 4.1.1.

##### Testes Oscilatórios

Conforme mencionou-se no item 3.2, para definir a região viscoelástica linear com as propriedades reológicas dependentes do tempo deve-se determinar a região onde o módulo viscoso e elástico são paralelos para avaliar a recuperação da amostra.



**Figura 4-1:** Teste *Strain sweep* da dispersão de 2 % de laponita RD.



**Figura 4-2:** Teste *frequency sweep* da dispersão de 2 % de laponita RD.

No primeiro teste, o teste tipo *stain sweep*, para a frequência fixa de 1 Hz e temperatura de 25 °C, estudou-se o comportamento da amostra submetida a deformações de 0.01 a 1000%. Deste teste é possível ver que na faixa de 0.01 até 10 %, o módulo de armazenamento e o módulo dissipação são paralelos, o que significa que as deformações estão na região viscoelástica linear.

Uma vez já conhecida uma aproximação dos limites da região viscoelástica linear, selecionou-se o valor de 0.1% de deformação, o qual é um valor de deformação nesta região. Este valor é utilizado para o estudo do teste tipo *frequency sweep* que apresenta-se na figura 4-2.

No teste, *frequency sweep*, com uma amplitude de deformação de 0.1 % e temperatura de 25 °C, monitorou-se a recuperação da amostra para uma faixa de frequência oscilatória de 0.01 a 1000 Hz. Não Foi possível estudar o comportamento em uma faixa maior por limitação do equipamento.

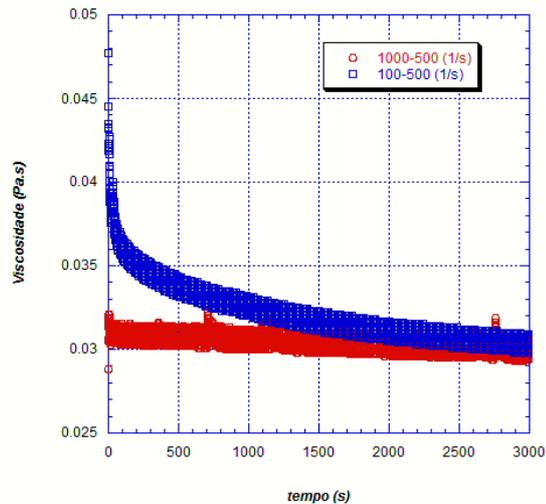
Pode-se observar que na faixa de frequência de 0.01 a 1000 Hz, há predominância do módulo de armazenamento (Figura 4-2) na região linear viscoelástica, o que implica que o material nesta região é mais elástico que viscoso. Do antes mencionado é possível concluir que o material é elástico.

Nos trabalhos de Labanda e Llorens [24] [25], as amostras de laponita de 2% testadas ao sétimo dia após a preparação , na faixa de frequência de 0.01 a 10 Hz, a traves dos testes oscilatórios mostraram uma predominância do módulo de armazenamento, o qual é ratificado neste trabalho. Embora os valores dos resultados não sejam iguais, os resultados qualitativos são semelhantes, permitindo confirmar o comportamento elástico do material.

#### **4.1.2.**

#### **Testes em condições de regime permanente**

Os testes tipo *step change* são empregados para distinguir os efeitos da elasticidade e avaliar a tixotropia. Este teste consiste em inicialmente aplicar uma taxa de deformação constante, e seguidamente mudar a taxa de deformação, onde esse valor é reduzido ou incrementado. A resposta da tensão de cisalhamento é analisada.

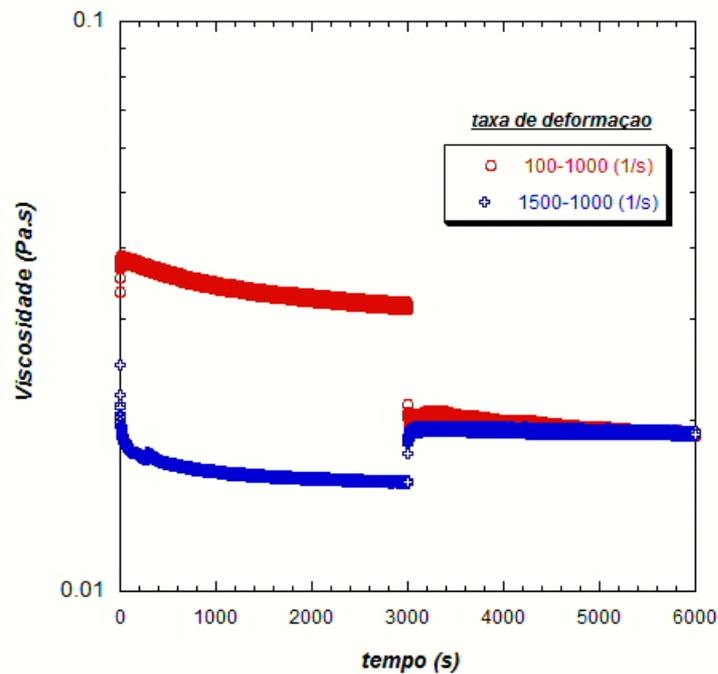


**Figura 4-3:** Evolução de viscosidade com o tempo de uma suspensão aquosa de 2 % de laponita RD, correspondente á aplicação no instante  $t=0s$  de uma taxa de deformação de 500 1/s. Azul:  $\dot{\gamma}=100$  1/s para  $t<0$  s, Vermelho  $\dot{\gamma}=1000$  1/s para  $t<0$  s.

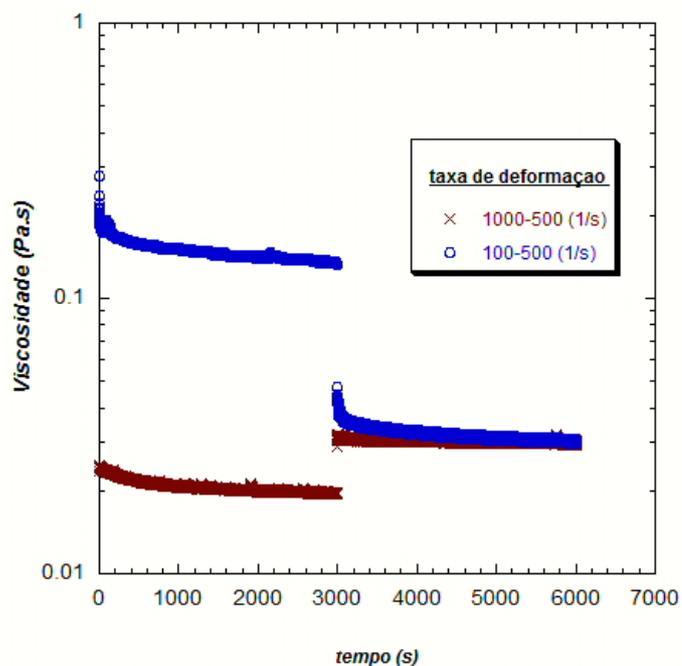
Inicialmente, como o fluido encontra-se em repouso, aplica-se uma taxa de deformação alta, onde há desestruturação da microestrutura e a tensão limite diminui com o tempo até alcançar um patamar de regime permanente. Depois quando aplica-se uma taxa de deformação diferente, seja maior ou menor, há uma nova desestruturação se a taxa de deformação é maior, e existe reconstrução se a taxa de deformação é menor. O tempo para atingir os novos estados de regime permanente depende da taxa de deformação anterior, ou seja, do nível de estruturação que tinha o material antes. A dependência do estado de estruturação anterior apresenta a existência do comportamento tixotropico.

Na Figura 4-3 pode-ser observar que o patamar de regime permanente não é atingido no mesmo tempo quando varia-se a taxa de deformação inicial. Este tempo depende do estado estrutural anterior do fluido.

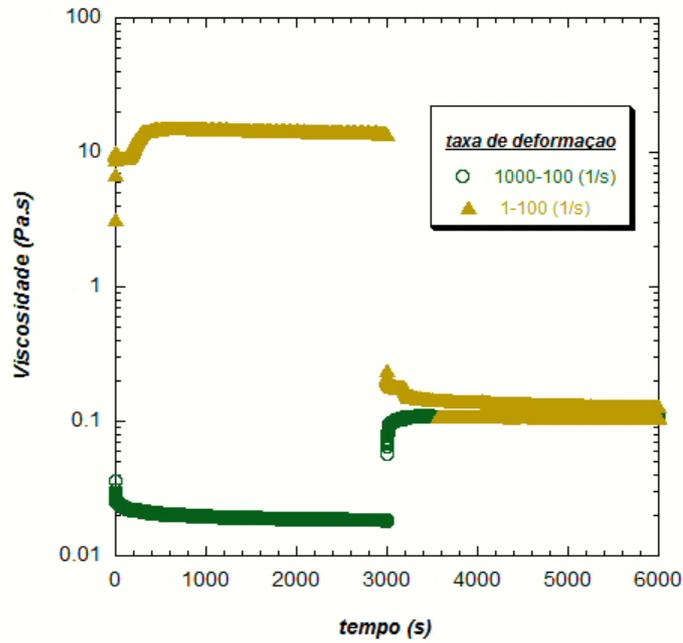
As Figuras 4-4 a 4-7 apresentam as curvas da evolução da viscosidade com o tempo, quando aplica-se uma taxas de deformação constantes e depois muda-se para outro valor. Pode-se observar que a laponita RD é um fluido com características dependentes do tempo e que atinge patamares de viscosidade iguais, mas o tempo necessário para atingir o regime permanente depende do histórico de cisalhamento da mostra, ou seja, possui características tixotrópicas.



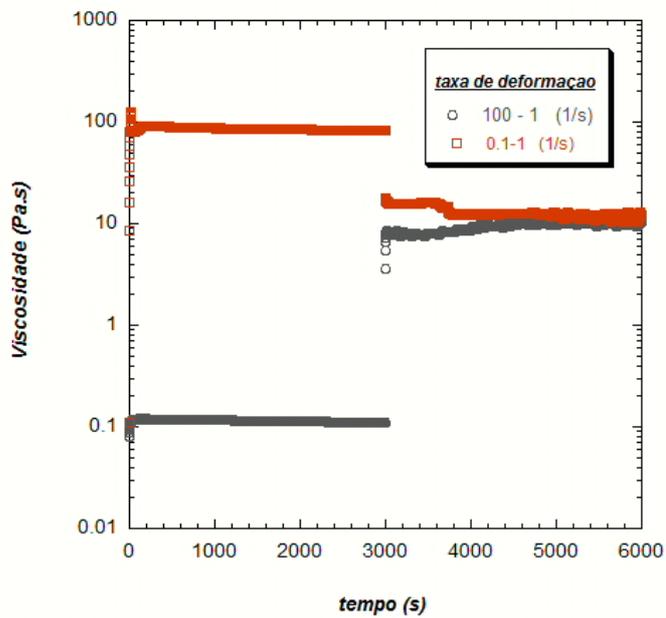
**Figura 4-4:** Teste *step change* de 100 a 1000 (1/s) e *step change* de 1500 a 1000 (1/s) para a suspensão aquosa de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.



**Figura 4-5:** Teste *step change* de 1000 a 500 (1/s) e *step change* de 100 a 500 (1/s) com pré-cisalhamento de 1500 1/s para a suspensão aquosa de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.

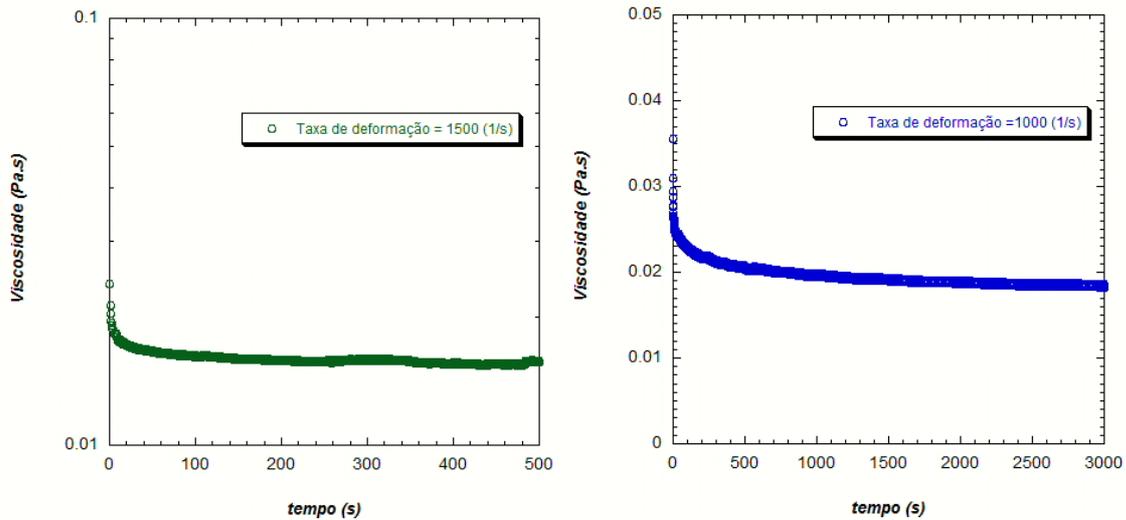


**Figura 4-6:** Teste *step change* de 1000 a 100 (1/s) e *step change* de 1 a 100 (1/s) com pré-cisalhamento de 1500 1/s, para a suspensão aquosa de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.

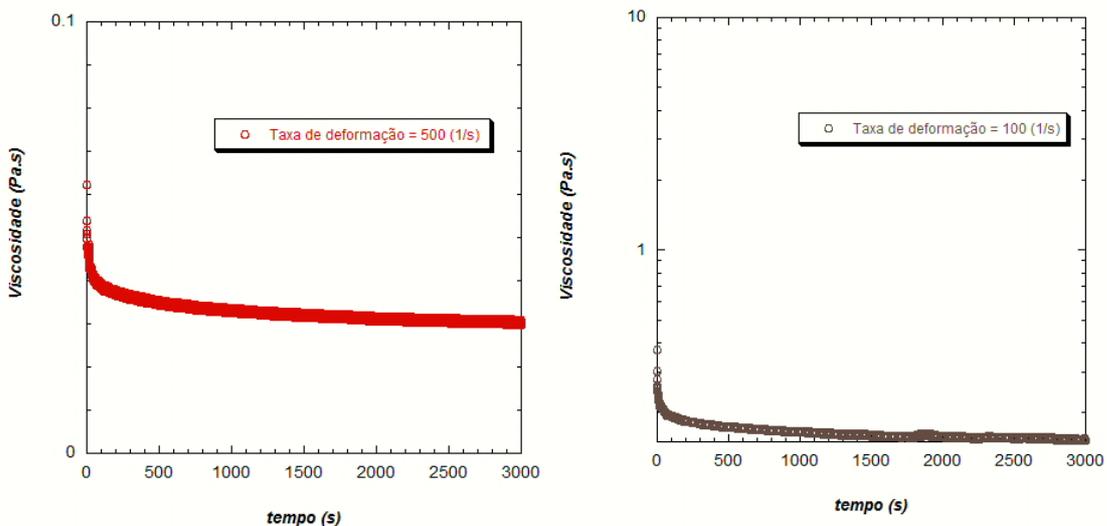


**Figura 4-7:** Teste *step change* de 100 a 1 (1/s) e *step change* de 0.1 a 1 (1/s) com pré-cisalhamento de 1500 1/s, para a suspensão aquosa de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.

A função de viscosidade da suspensão aquosa de 2% de laponita RD foi obtida com a utilização dos dois reômetros apresentados no capítulo 3. Para a faixa de 1000 a 100 1/s utilizou-se os dois reômetros, mas para taxas de deformação menores que 100 1/s, os valores da função foram obtidos no reômetro ARES-G2 devido à carência do controle na taxa de deformação imposta pelo reômetro PAAR Physical MCR 501.



**Figura 4-8:** Testes tixotrópicos de 1500 e 1000 (1/s) de suspensões de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.



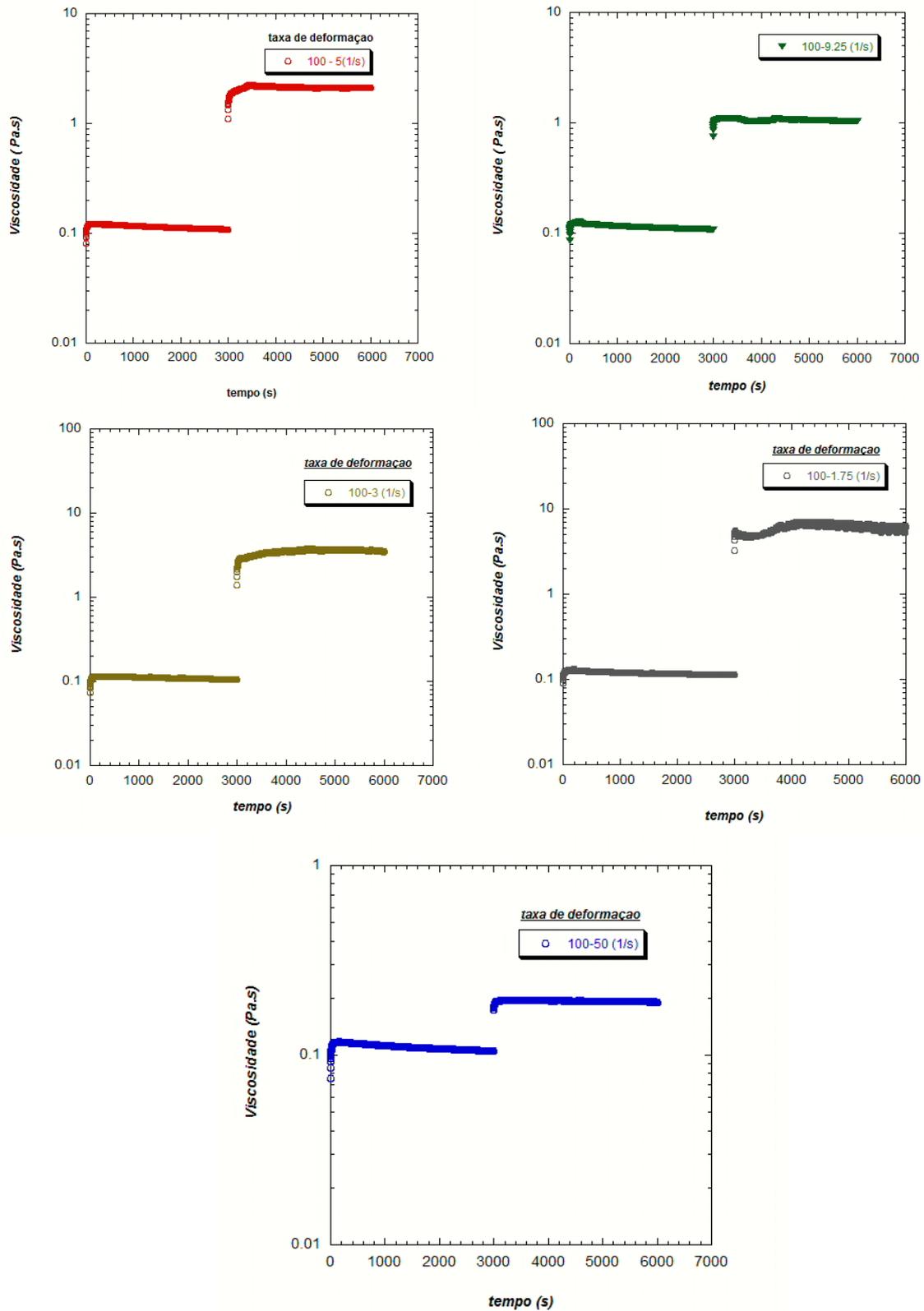
**Figura 4-9:** Teste tixotrópicos de 500 e 100 (1/s) de suspensões de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.

Outro fator influente nos resultado foi o deslizamento que acontecia em alguns testes, além da evaporação da mostra no reômetro, entretanto a suspensão não apresentou sensibilidade às variações de temperatura entre 20 e 25 °C. Todos estes fatores são analisados no anexo A. A partir dos testes tixotrópicos, foi definido um tempo de leitura de cada ponto da curva de escoamento para que o regime permanente fosse atingido. Para cada valor de taxa de deformação, foi realizada uma leitura. O testes tixotrópicos estão na Figura 4-8 e 4-9.

O tempo para atingir o patamar de regime permanente depende da faixa de taxa de deformação. Para a faixa de 1000 a 10 1/s, o tempo de estabilização foi de 1000 segundos. A suspensão apresentou estabilidade aos 1500 segundos quando encontra-se submetido a uma taxa de deformação abaixo de 100 (1/s). Embora nos testes tipo *step changes*, que são apresentados ao seguir, seja possível ver que o tempo de estabilização varia dependendo da taxa de deformação anterior. Depois do pré-cisalhamento de 1500 1/s por 250 segundos, nos testes tipo *step-changes* conseguiu-se observar que para faixas de taxa de deformação de 1000 a 10 1/s um tempo para atingir o regime permanente de 300 segundos é suficiente

Para evitar valores errados na função de viscosidade, realizou-se testes tipo *step changes* para cada ponto menor a 10 1/s. Na Figura 4-10 pode-se ver os testes tipo *step change* para taxas de deformação abaixo de 10 1/s. Cada ponto da função da viscosidade têm uma tolerância menor a 0.1 %, assim assume-se que houve convergência.

Observou-se na Figura 4-11, a função viscosidade da laponita preparada, e é possível ver que material tem um comportamento viscoplástico, devido que a viscosidade diminui com a taxa de deformação e que atinge um patamar que pode ser extrapolado como a tensão limite de escoamento. A função viscosidade de Herschel-Bulkey [8] foi empregada para fazer um ajuste da curva de tensão de cisalhamento e obter os parâmetros reológicos.



**Figura 4-10:** Teste *Step change* de 100 a 9.25 1/s, 100 a 5 1/s, 100 a 3 1/s, 100 a 1.75 1/s, 100 a 1 1/s e 100 a 50 1/s para a suspensão aquosa de laponita RD, com pré-cisalhamento de 1500 1/s.

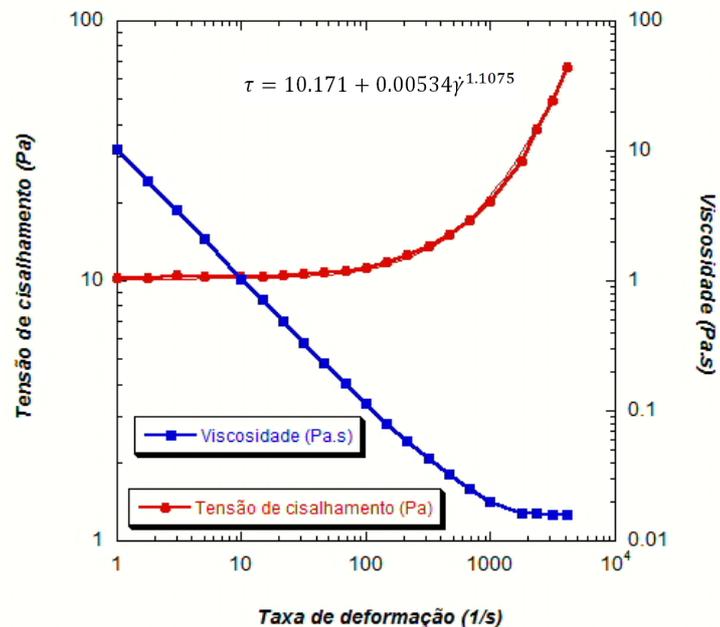
A função viscosidade de Herschel-Bulkley combina as propriedades do fluido Power-Law e do plástico de Bingham, sendo um modelo bastante usado para matérias viscoplásticos. A tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação é definido pela equação:

$$\tau = \tau_o + k\dot{\gamma}^n \quad (4-1)$$

Sendo K é o índice de consistência, n o índice de comportamento,  $\tau_o$  é a tensão limite de escoamento e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação. Para que a equação 4-1 seja válida, os termos de inércia e as componentes radiais da velocidade são depreciáveis e o movimento acontece em condições de cisalhamento simples.

$$\eta = \begin{cases} \infty & \tau < \tau_0 \\ \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} & \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (4-2)$$

Conforme a expressão anterior, sua origem está no fluido power-Law.



**Figura 4-11:** Reologia em regime permanente da laponita RD preparada.

A Tabela 2-1 apresenta os parâmetros reológicos e a densidade da suspensão de 2 % de laponita RD. A densidade foi obtida no Laboratório de Caracterização

de Fluidos (LCF) da PUC-Rio e não varia com a temperatura na faixa de 0 °C a 100 °C.

**Tabela 4-1:** Características da suspensão de 2% de laponita RD preparada.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
K [ <i>Pa.s<sup>n</sup></i> ]	0.00534
<i>n</i> [ ]	1.10750
$\tau_0$ [ <i>Pa</i> ]	10.171
Densidade [ <i>kg/m<sup>3</sup></i> ]	1054

A função da viscosidade da dispersão de 2 % de laponita RD preparada é:

$$\tau = 10.171 + 0.00534\dot{\gamma}^{1.10750} \quad (4-3)$$

A dispersão de 2% de laponita RD é um fluido viscoplástico que ajustou-se perfeitamente à equação de viscosidade de Herschel-Bulkey, isto concorda com muitos trabalhos que estudaram as dispersões de laponita RD em condições de fluxo. [16] [17] [18] [19] [36] [37] [38] [39], embora eles utilizassem uma concentração de laponita RD de 1.5 %. As *flow curves* não são comparáveis umas com outras devido que são totalmente diferentes por a concentração e o tempo de análise após a preparação. Por exemplo, nos trabalho de Pereira e Pinho [36][39] as características reológicas do fluido de 1.5% de laponita RD são muito diferentes ao obtinas neste trabalho. O índice de comportamento *n* para este trabalho é 1.107, mas nos trabalhos de Pereira e Pinho [36][39] é 0.676; a tensão limite de escoamento medida com método indireto utilizando a extrapolação da equação de Herschel-Bulkey para este trabalho é 10.17 Pa e para os trabalhos de Pereira e Pinho [36][39] é 0.9 Pa.

Nos trabalhos de Pereira e Pinho [36][39] o fluido tem um índice de comportamento  $n < 1$ , mas neste trabalho o *n* é maior a 1. Isto pode-se ser resultado primeiramente pela concentração de laponita RD, mas também um fator muito influente no resultado é a quantidade de pontos acima de 1000 1/s que tomara-se na *flow-curve*, já que quando analisou-se a *flow curve* com pontos na faixa de 1 a 1000 1/s, o *n* é menor a 1.

### 4.1.3.

#### **Comparação dos resultados dos testes oscilatórios e testes em condições de regime permanente**

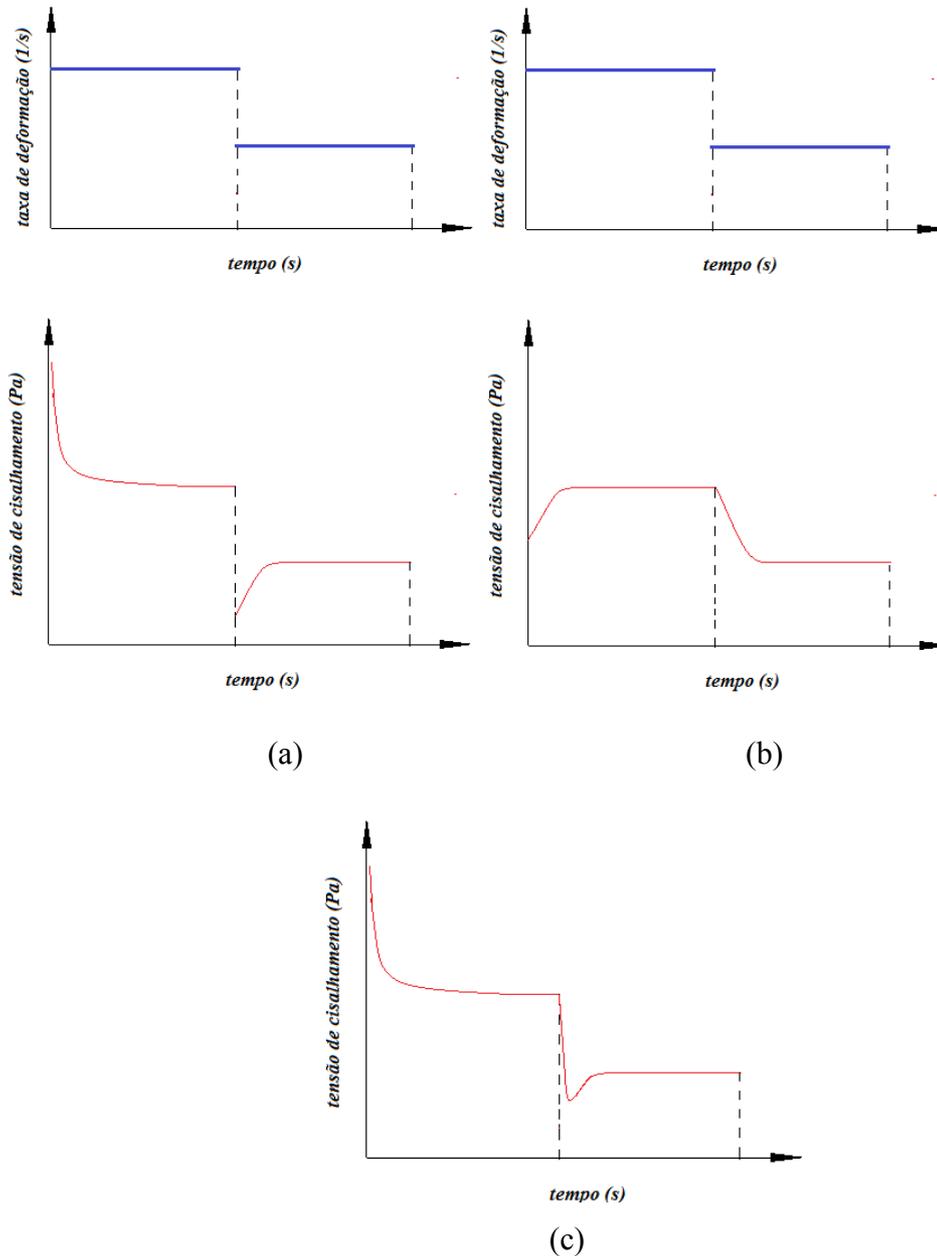
Do análise dos resultados dos testes oscilatórios, item 4.1.1, e os testes em condições de regime permanente, item 4.1.2. Na Figura 4-12 pode-se observar a influência da tixotropia combinada com a elasticidade na dispersão de 2% de laponita RD. Na Figura 4-12 (a), observa-se o comportamento do fluido puramente tixotrópico, e na Figura 4-12 (b) é visível o comportamento do fluido puramente elástico. Finalmente na Figura 4-12 (c) observa-se a combinação dos dois fenômenos. À medida que alguns dos fenômenos fosse maior que o outro, dependendo da taxa de deformação, os testes tipo *step-change* tornaram-se mais semelhantes ao caso puramente tixotrópico ou elástico. Através dos testes *step-change* é possível ver que o tempo para atingir o patamar de regime permanente depende do cisalhamento anterior como é caso principalmente da figura 4-3 , além nas figuras 4-4 a 4-7 apresenta-se que o tempo para atingir o regime permanente depende do pré-cisalhamento anterior , com o qual concluiu-se que a dispersão de 2 % de laponita RD efetivamente é um fluido tixotrópico.

Da análise no anexo A, destacou-se que a dispersão de 2% de laponita RD não apresenta sensibilidade para pequenas variações de temperatura 20 a 25 °C. A falta de repetitividade dos resultados está principalmente relacionado à geometria e o reômetro utilizado, o qual concorda com os trabalhos [40] [41].

Os principais problemas de repetitividade estão envolvidos na aplicação de taxas de deformação baixas onde o fluido começa novamente a reestruturar-se, esta reestruturação depende da forma da geometria do reômetro e a forma de controle do reômetro utilizado para a medição. O problema da falta de repetitividade é a existência de uma reestruturação heterogenia do material. Quando este material é desestruturado a traves da aplicação de uma taxa de deformação e logo permite-se uma nova reestruturação, os enlaces próprios do material fazem que a nova estruturação seja maior em determinados pontos geométricos, mostrando diferenças na medições as quais dependem da geometria e a forma da aplicação da taxa de deformação.

De igual maneira para taxas de deformação baixas por este mesmo fenômeno de reestruturação heterogênea o fluido sem pré-cisalhamento atinge

patamares de regime permanente diferentes devido a que tem aglomerações heterogêneas, por tal razão o pré-cisalhamento é fundamental para a repetitividade a baixas taxas de deformação, sem esquecer da seleção adequada da geometria que permita a mesma reestruturação em cada teste.



**Figura 4-12:** Explicação da combinação do comportamento tixotrópico e elástico em um fluido. (a) fluido puramente tixotrópico, (b) fluido puramente elástico, c) fluido com características tixotrópicas e elásticas.

Considerando o antes mencionado o fluido tixotrópico , 2% de laponita RD, atinge patamares de regime permanente iguais, seja antes submetido a uma taxa de deformação maior ou menor, mas os tempos para atingir o regime permanente variam dependendo da taxa de deformação anterior. Nos testes oscilatórios é possível ver o comportamento elástico que tem o material na região viscoelastica.

## 4.2.

### Experimentos de visualização

A forma da “superfície de cedência” do fluido, resultado entre a interface do fluido que escoar e a que não escoar, da dispersão de 2 % de laponita RD através da seção de expansão-contração ambas abruptas, foi observada através de fotografias. No trabalho estudou-se a influencia da geometria de escoamento, numero de Reynolds e o tempo que o fluido está escoando a vazão constante imposta pela bomba.

O numero de Reynolds é parâmetro calculado de acordo com o procedimento indicado a seguir. Uma dificuldade encontrada na visualização do escoamento é que a laponita RD não é um fluido totalmente transparente dificultando o tratamento das imagens obtidas.

No Anexo A apresenta-se a influencia do pré-cisalhamento nos experimentos de reologia.

#### 4.2.1.

#### Cálculo do número de Reynolds do escoamento na entrada da secção de expansão-contração

O parâmetro adimensional Reynolds é calculado com a equação 4-4.

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\eta(\dot{\gamma})} \quad (4-4)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da dispersão de laponita,  $D$  é o diâmetro do tubo,  $V$  é a velocidade média do fluido e  $\eta(\dot{\gamma})$  é a viscosidade.

A velocidade  $V$  é calculada utilizando a equação 4-5, onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica medida, conforme item 2.4.

$$V = \frac{4.\dot{m}}{\rho.\pi.D^2} \quad (4-5)$$

A viscosidade é calculada com a equação 4-6, onde  $\tau$  que a tensão de cisalhamento é obtida da equação 4-3 cujos parâmetros são obtidos experimentalmente.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4-6)$$

Para calcular a taxa de deformação equivalente utiliza-se a equação 4-7 [8].

$$\dot{\gamma} = \left(8 \frac{V}{D}\right) \left(\frac{3n+1}{4n}\right) \quad (4-7)$$

Para obter o valor da tensão de cisalhamento  $\tau$  utiliza-se a função viscosidade (4-2).

#### 4.2.2.

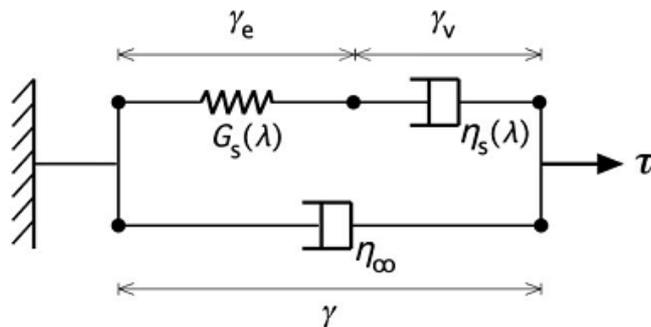
#### **Parâmetro $t_{eq}$ (tempo característicos de mudanças de um nível estrutural $\lambda$ para outro)**

No estudo dos materiais tixotrópicos, uma chave muito utilizada para a abordagem de modelos constitutivos é a existência de uma microestrutura nos materiais tixotrópicos, que pode ser descrito pelo parâmetro escalar  $\lambda$ . O parâmetro  $\lambda$  significa o nível de estruturação que tem um material tixotrópico, sendo 1 quando o material encontra-se totalmente estruturado e 0 quando o material encontra-se totalmente desestruturado.

Souza Mendes [47] propôs um modelo constitutivo para fluidos estruturados. O modelo tem a capacidade de prever tixotropia, viscoelasticidade e fluência. Duas equações diferenciam compõem o modelo, uma para a tensão de cisalhamento e outra para o parâmetro estrutural  $\lambda$ . A equação para a tensão é obtida de uma analogia mecânica simples composta por um nível estrutural dependente do elemento de Maxwell em paralelo com o elemento Newtoniano.

A equação diferencial para a tensão de cisalhamento  $\tau$  usada neste modelo é derivada em base à analogia mecânica apresentada na Figura 4-13. Na Figura,  $G_s(\lambda)$  é o módulo de cisalhamento da microestrutura;  $\eta_s(\lambda)$  é a viscosidade estrutural; a função que descreve a resposta puramente viscosa da microestrutura é  $\eta_\infty$ , o qual é a viscosidade correspondente ao estado do material totalmente desestruturado;  $\gamma_e$  é a deformação elástica da microestrutura quando aplica-se

uma tensão de cisalhamento  $\tau$ ;  $\gamma_v$  é a deformação viscosa e  $\gamma$  é a deformação total.



**Figura 4-13:** Analogia mecânica do modelo proposto por Souza Mendes [47].

Da Figura 4-13 é possível obter a equação da tensão de cisalhamento que apresenta-se ao seguir:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\tau = G_s(\gamma_e - \gamma_{e,n}) + \eta_\infty \dot{\gamma} \quad (4-8)$$

O parâmetro estrutural  $\lambda$  obedece à equação da evolução:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{t_{eq}} ((1 - \lambda)^a - f(\tau)\lambda^b) \quad (4-9)$$

Na equação 4-8, o parâmetro  $t_{eq}$  é o tempo característico de mudança do estado estrutural  $\lambda$  para outro. O parâmetro  $a$  e  $b$  são constantes adimensionais positivas, o primeiro termo no lado direito é o termo de estruturação, embora o segundo e o termo de desestruturação.

### 4.2.3.

#### Influência do número de Reynolds

##### 4.2.3.1.

#### Análise do escoamento para números de Reynolds baixos sem efeitos de inércia em função da geometria

A Análise com número de Reynolds baixos permite estudar o comportamento do escoamento sem efeitos de inércia, por o qual os resultados

estão apresentados para os números  $Re$  mais baixos possíveis, para assim desprezar os efeitos da inércia.

A apresentação dos resultados é inicialmente fixando a relação da geometria  $d-D-d$  (1-3-1 e 1-5-1). Uma vez fixada a relação geométrica  $d-D-d$  deve-se fixar a relação geométrica  $L/D$  (1/0.5, 1/1 e 1/1.5). Separando cada caso geométrico estudou-se a influencia que têm as variações de vazão mássica. É importante mencionar que as fotografias foram tomadas cinco minutos após a imposição da vazão mássica.

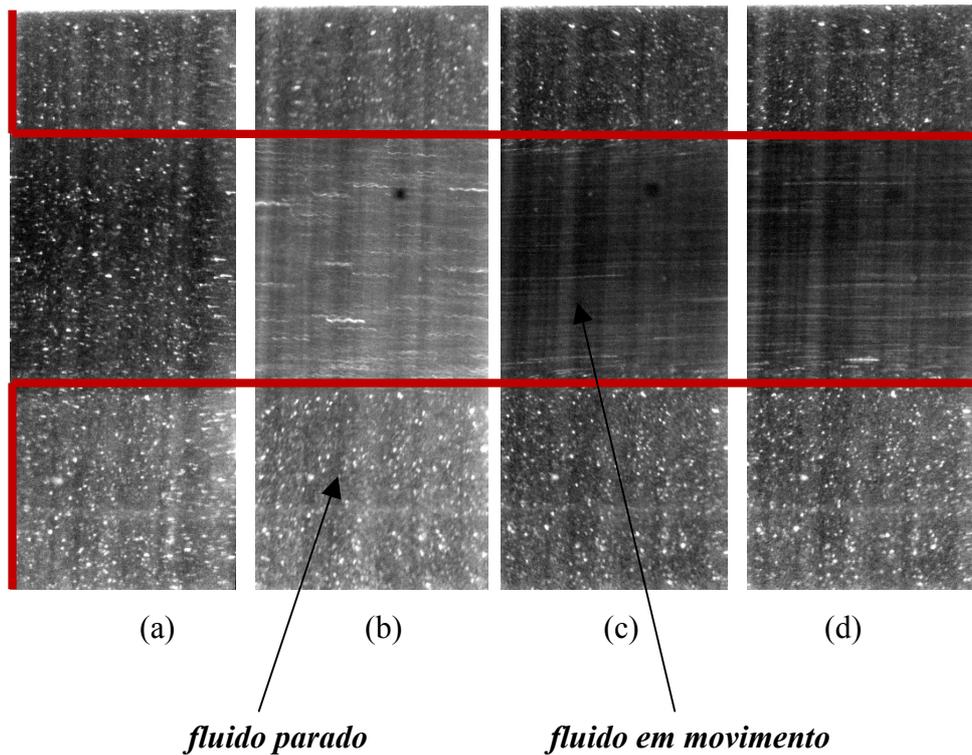
Da Figura 4-14 á 4-25 apresentam as imagens do escoamento da dispersão de 2% de laponita RD na geometria de expansão–contração. As figuras são apresentadas em ordem crescente de vazão mássica e separadas de acordo com a geometria da seção de expansão-contração.

$$\underline{d-D-d = 1-3-1}$$

A Figura 4-14 apresenta o escoamento do fluido tixotrópico estudado, laponita RD, na seção de expansão-contração  $d-D-d=1-3-1$  e  $L/D=1/0.5$ . Nesta geometria a forma da “superfície de cedêndia” não muda com a vazão mássica imposta.

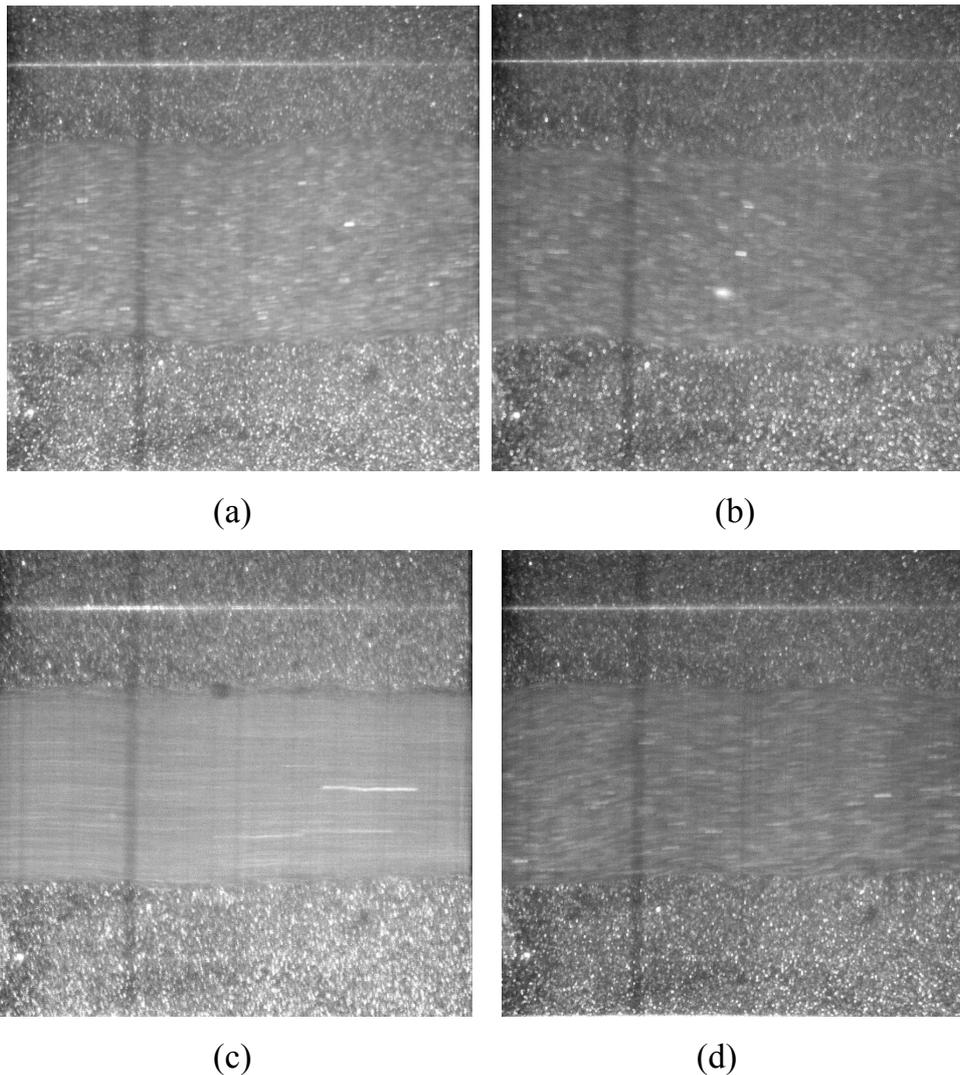
*“superfície de cedêndia”*





**Figura 4-14:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$  e  $L/D=0.5/1$  para diferentes vazões mássicas: (a)  $\dot{m}=0.223$  g/s ,  $Re=0.006$ , (b)  $\dot{m}=1.244$  g/s,  $Re=0.150$ , (c)  $\dot{m}=1.999$  g/s,  $Re=0.346$ , (d)  $\dot{m}=3.147$  g/s,  $Re=0.749$ .

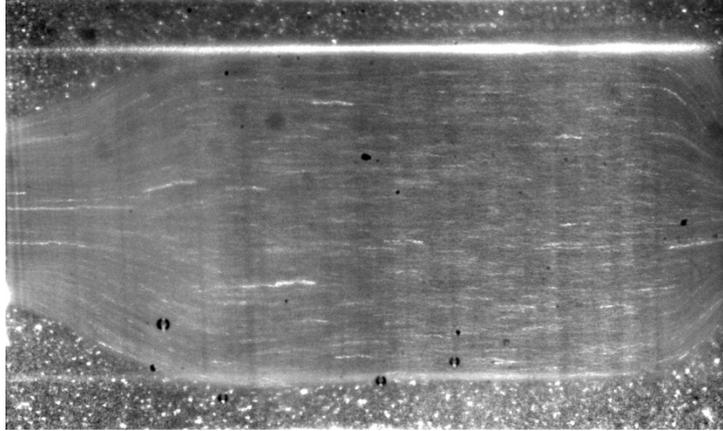
No escoamento na geometria  $d-D-d=1-3-1$ ,  $L/D=1/1$ , de igual maneira ao escoamento na geometria  $d-D-d=1-3-1$ ,  $L/D=0.5/1$ , o fluido escoava em forma tubular igual à entrada, sem mudar até sair pela contração, como pode-se ver na Figura 4-15. A forma de “superfície de cedência” não muda com a vazão mássica imposta para os Reynolds de 0.067 a 0.495.



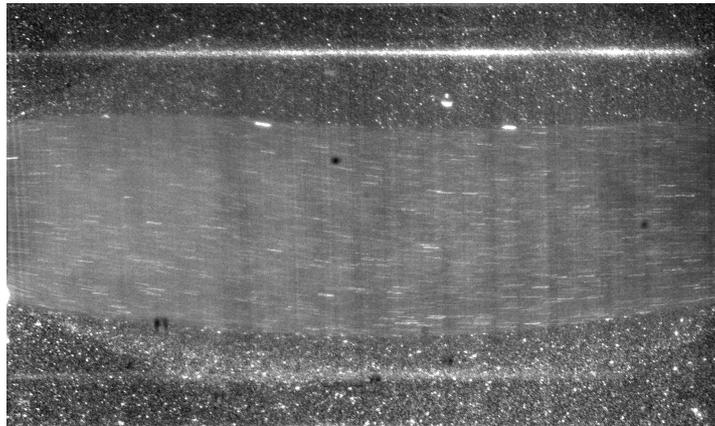
**Figura 4-15:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1/1$ , para diferentes vazões mássicas: (a)  $\dot{m}=0.801$  g/s,  $Re=0.067$ , (b)  $\dot{m}=1.010$  g/s,  $Re=0.103$ , (c)  $\dot{m}=1.689$  g/s,  $Re=0.258$  (d)  $\dot{m}=1.940$  g/s,  $Re=0.495$ .

Na geometria  $d-D-d=1-3-1$ ,  $L/D=1,5/1$ , a forma da “superfície de cedência” formado pelo escoamento para  $Re=0.04$  não é igual ao escoamento na entrada. A “superfície de cedência” amplia-se como está na Figura 4-16. A quantidade de fluido escoando é maior que nas geometrias antes mencionadas, mas à medida que incrementa-se o  $Re$ , o fluido escoamento forma mais de uma zona, e cada zona escoando com velocidades diferentes como é possível ver nas Figuras 4-17,4-18, 4-19. A “superfície de cedência” produto do fluido escoando a

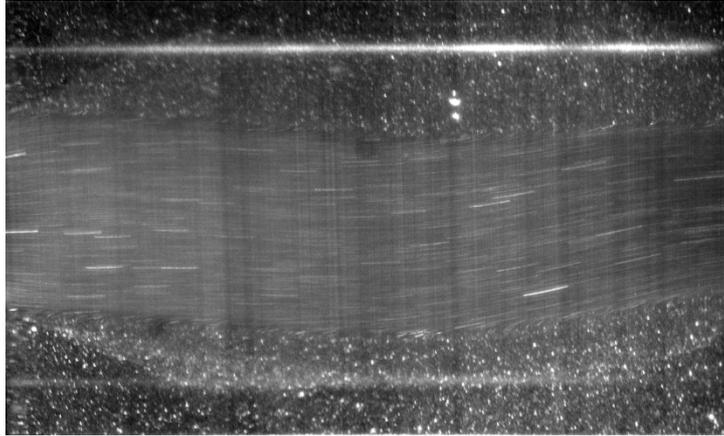
diferentes velocidades tem a mesma forma da superfície de cedência ampliada, mas tem zonas escoando com velocidades diferentes. O fluido que escoar a maior velocidade atinge uma forma que depende de um caminho preferencial de viscosidade menor como é possível ver nas Figuras 4-17, 4-18 e 4-19.



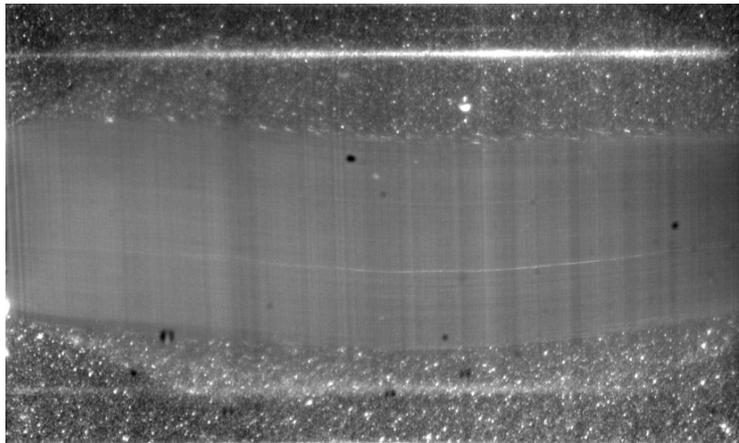
**Figura 4-16:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 0.610$  g/s,  $Re= 0.04$ .



**Figura 4-17:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 1.016$  g/s,  $Re= 0.104$ .



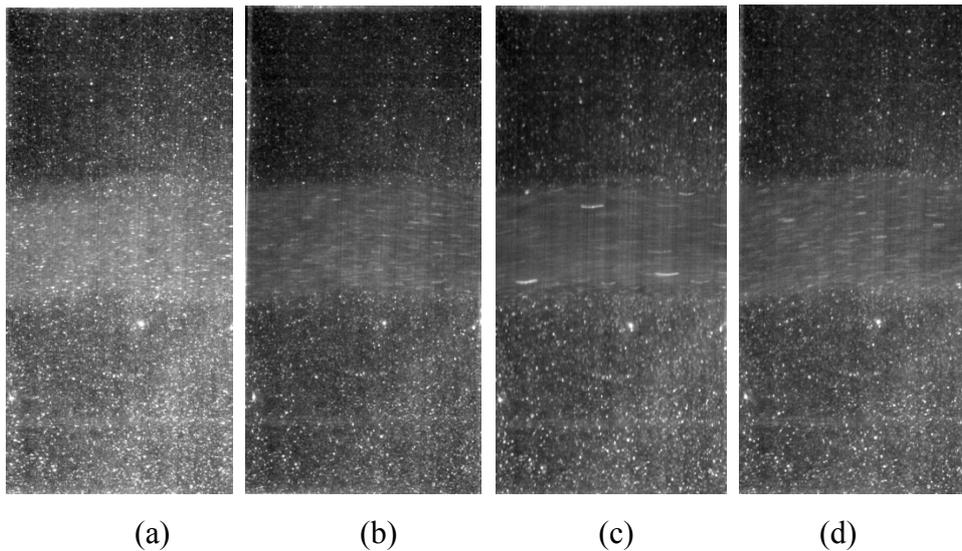
**Figura 4-18:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 1.223$  g/s,  $Re= 0.145$ .



**Figura 4-19:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 1.649$  g/s,  $Re= 0.240$ .

#### $d-D-d = 1-5-1$

Incrementando a relação de expansão, na geometria  $d-D-d= 1-5-1$ ,  $L/D= 0,5/1$ , a forma da “superfície de cedência” não muda com a vazão mássica imposta, mas a superfície de cedência não é igual ao diâmetro do tubo da entrada. A superfície de cedência tem um ligeiro desvio que apresenta novamente a existência de um caminho preferencial de viscosidades baixa. Está ondulação na forma da superfície de cedência não muda com o tempo ou a vazão mássica imposta.



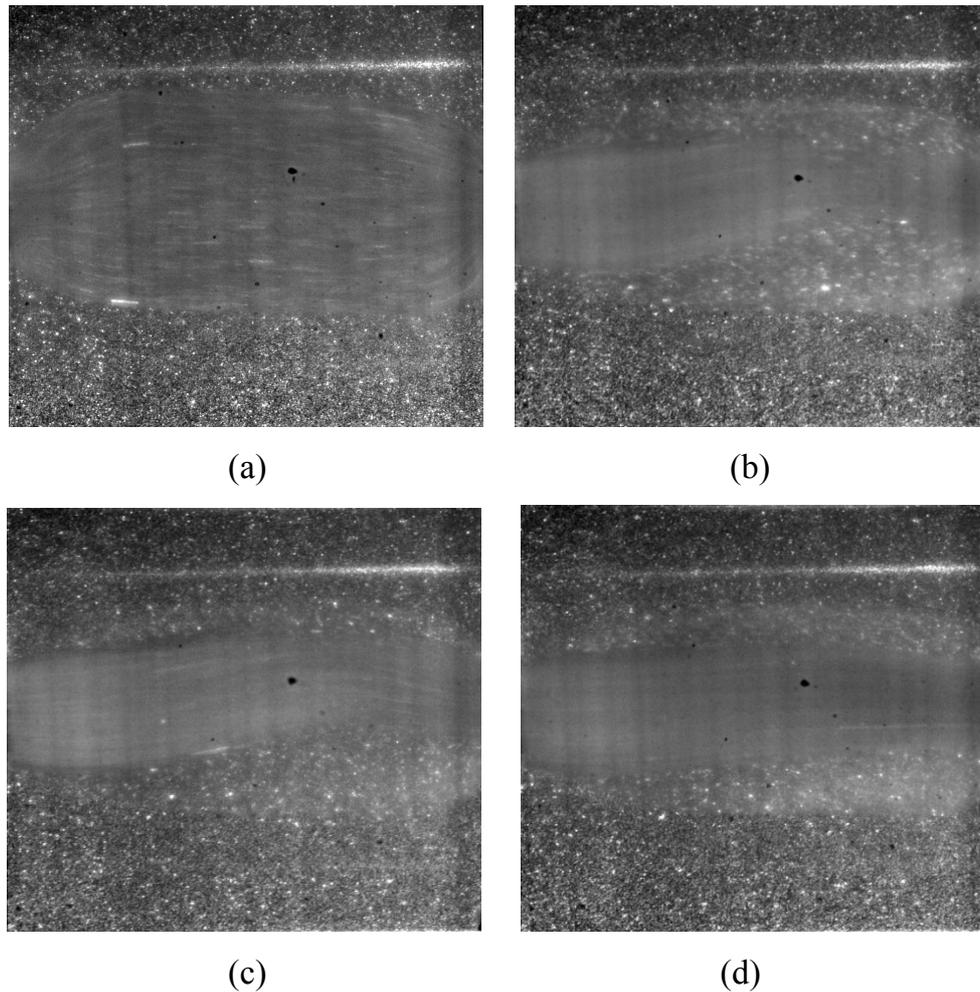
**Figura 4-20:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=0.5/1$ , para diferentes vazões mássicas: (a)  $\dot{m}=0.614$  g/s,  $Re=0.041$ , (b)  $\dot{m}=1.173$  g/s,  $Re=0.135$ , (c)  $\dot{m}=1.583$  g/s,  $Re=0.230$ , (d)  $\dot{m}=1.960$  g/s,  $Re=0.500$ .

Na Figura 4-21 está o comportamento do fluido tixotrópico escoando pela geometria  $d-D-d=1-5-1$ ,  $L/D=1/1$ .

Para  $Re = 0.010$ , Figura 4-21 (a); A superfície de cedência atinge uma forma ampliada do diâmetro do escoamento na entrada. Esta forma atingida é independente no tempo, além todo o fluido que escoar tem a mesma velocidade.

Para  $Re$  superiores, mas sem efeitos de inércia, como são os casos das Figura 4-21 (b),(c),(d). O comportamento do fluido escoando dentro da superfície de cedência muda com o tempo. Este escoamento divide-se em zonas de diferente velocidade e, portanto diferentes viscosidades. Isto acontece aproximadamente 10 segundos após a aplicação de uma nova vazão mássica. A zona do fluido que escoar com maior rapidez está no meio e tem uma forma que depende de um caminho preferencial de baixa viscosidade.

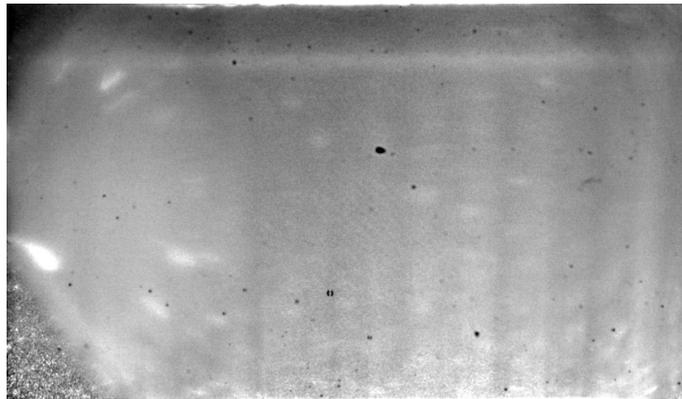
Portanto para número de  $Re$  muito baixos o fluido que escoar tem a mesma velocidade, mas após um determinado número de  $Re$  o fluido escoando apresenta zonas de escoamento com diferentes velocidades.



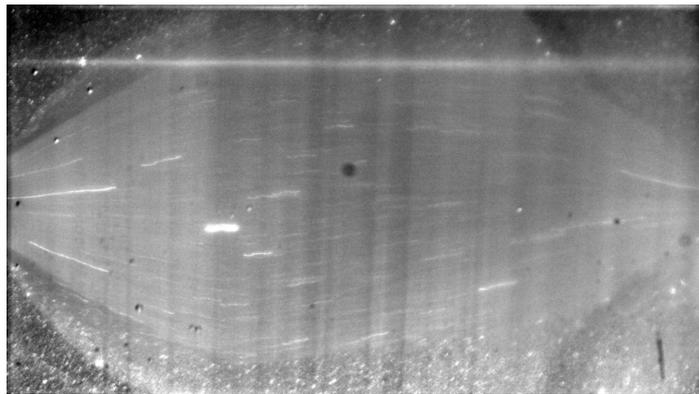
**Figura 4-21:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1/1$ , para diferentes vazões mássicas: (a)  $\dot{m}=0.300$  g/s,  $Re=0.010$ , (b)  $\dot{m}=0.699$  g/s,  $Re=0.052$ , (c)  $\dot{m}=0.896$  g/s,  $Re=0.083$ , (d)  $\dot{m}=1.235$  g/s,  $Re=0.148$ .

Na geometria  $d-D-d=1-5-1$ ,  $L/D=1,5/1$ . A superfície de cedência formado pelo escoamento para  $Re=0.030$  não é igual ao diâmetro do escoamento na entrada, este perfil é ampliado e é constante no tempo. A superfície de cedência amplia-se até as bordas da geometria de expansão contração como pode-se observar na Figura 4-22.

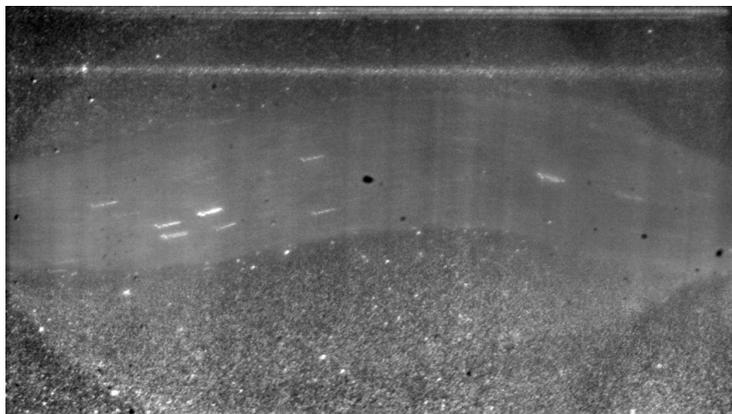
Como pode-se observar nas Figuras 4-23, 4-24, 4-25, à medida que o número de Reynolds aumenta, o fluido escoando dentro da superfície de cedência vai formando zonas de escoamento com viscosidade diferentes, o que permite a formação de um caminho preferencial por onde o fluido escoar com maior rapidez. À medida que o  $Re$  incrementa-se, o diâmetro da superfície de cedência do fluido que escoar mais rápido vai diminuindo. Ao contorno da superfície de cedência formado pelo escoamento do fluido menos viscoso, formam-se as zonas com maior viscosidades. Estas zonas com maior viscosidade escoam cada vez mais devagar enquanto estão mais distante do caminho preferencial. A zona que escoar com maior rapidez como resultado de um caminho preferencial muda com o tempo, apresentando uma instabilidade na forma da superfície de cedência do fluido que escoar mais rápido, e esta instabilidade depende do tempo.



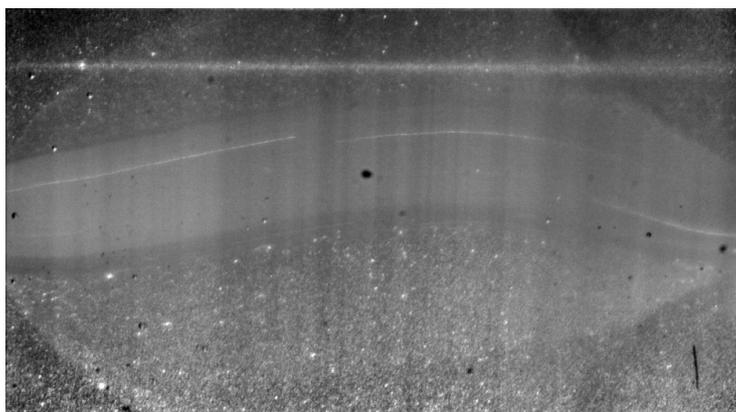
**Figura 4-22:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 0.520$  g/s,  $Re= 0.030$ .



**Figura 4-23:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 0.672$  g/s,  $Re= 0.048$ .



**Figura 4-24:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 0.987$  g/s,  $Re= 0.098$ .



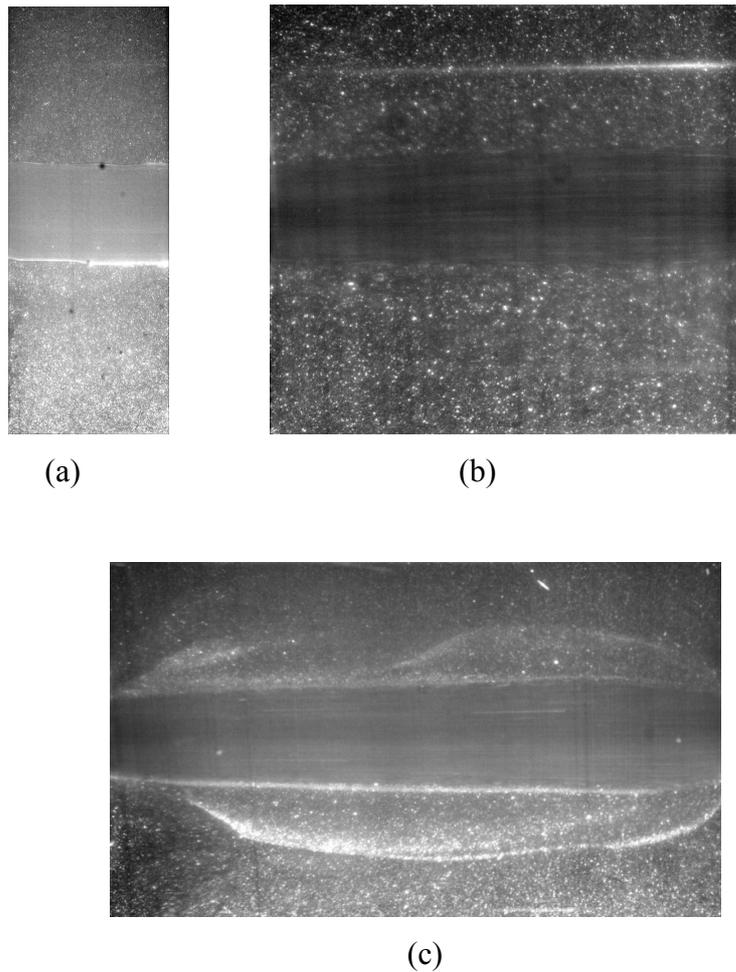
**Figura 4-25:** Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $\dot{m}= 1.943$  g/s,  $Re= 0.330$ .

#### **4.2.3.2.**

### **Análise do escoamento com números de Reynolds altos com efeitos de inércia**

Para evitar interpretações erradas dos resultados fez-se um análise do escoamento para número de Reynolds altos, com o objetivo de diferenciar os efeitos da inércia nos resultados. Desta análise obteve-se algumas observações importantes que são mencionados a seguir. Não foi possível determinar para que número de Reynolds, o limite inferior para o qual os efeitos da inércia influem no escoamento através da seção de expansão-contracção, por isso para esta análise utilizou-se  $Re$  muito altos para ter a certeza da influência da inércia no escoamento através da geometria.

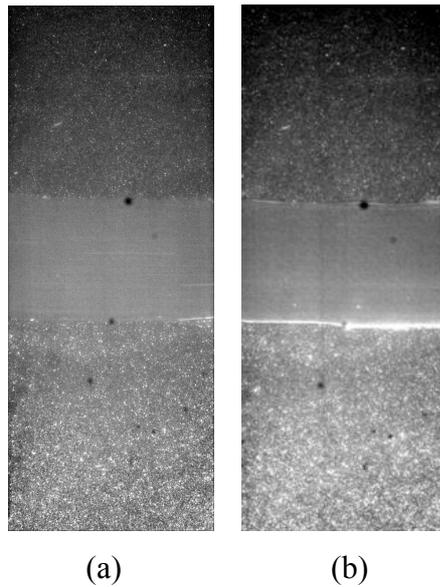
Quando o fluido escoar através da geometria de expansão-contracção com número de Reynolds altos são claramente visíveis os efeitos da inércia, como apresenta a Figura 4-26. Na figura é possível ver que o fluido atravessa a geometria de expansão-contracção sem mudar a forma do tubo na entrada da expansão até sair novamente pela contracção, o qual acontece para todas as geometrias. Ou seja, a forma da superfície de cedência tem o mesmo diâmetro do tubo de entrada, sem mudar até a saída.



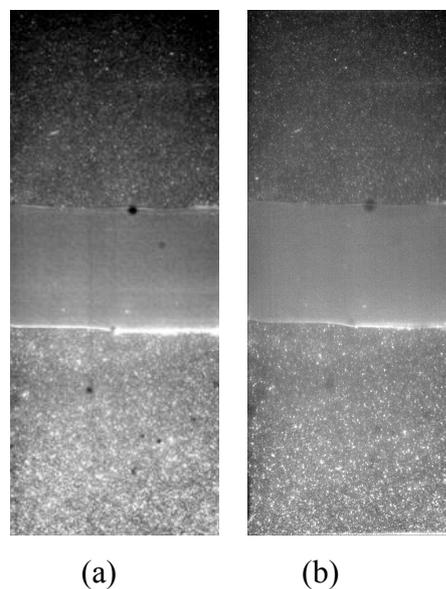
**Figura 4-26:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ . (a)  $L/D=0.5/1$ ,  $\dot{m}= 4.410$  g/s,  $Re= 1.307$ , (b)  $L/D=1/1$ ,  $\dot{m}= 3.690$  g/s,  $Re= 0.976$ , (c)  $L/D=1.5/1$ ,  $\dot{m}= 8.080$  g/s,  $Re= 3.410$ .

Na Figura 4-26 é possível ver uma deposição de partículas, o qual significa que apesar do fluido dentro da superfície de cedência escoar com o efeito de inércia, ao início há um escoamento em zonas de diferente velocidade e depois de um tempo a viscosidade aumenta até que algumas zonas não escoam, deixando uma só zona de escoamento produto da inércia. O parâmetro  $t_{eq}$  de igual maneira ajuda a entender este fenômeno, já que a dispersão apresenta um tempo necessário para atingir um novo nível de estruturação.

O perfil do fluido escoando com um Reynolds alto através da seção de expansão- contração não muda com o tempo, como apresenta a Figura 4-27.



**Figura 4-27:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=0.5/1$ , para vazão mássicas de  $\dot{m}=4.410$  g/s,  $Re=1.307$ . (a) tempo de escoamento  $t=0$ , (b) tempo de escoamento  $t=300$  s.



**Figura 4-28:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=0.5/1$ , para diferentes vazões mássicas com  $Re$  altos. (a)  $\dot{m}=4.410$  g/s,  $Re=1.307$ , (b)  $\dot{m}=5.600$  g/s,  $Re=1.920$ .

Para qualquer escoamento com número de Reynolds alto, que tem efeito de inércia, a forma da superfície de cedência é independente da vazão mássica imposta, como apresenta-se na Figura 4-28.

#### 4.2.4.

#### **Tipos de escoamento dentro da superfícies de cedência através das seções de expansão-contração em função do número de Reynolds,**

Observou-se durante os testes com números de Re baixos e altos, que a forma da superfície de cedência mais ampliada é observado só ao começo do escoamento. A forma da superfície de cedência não incrementa-se depois do início do escoamento, independentemente da vazão mássica imposta, ou seja a superfície de cedência produto do escoamentos com numero de Re inferior ou superior após o fluido inicial atravessar a geometria de expansão-contração nunca é maior.

Dos testes apresentados anteriormente pode-se observar que existem três tipos de escoamentos dentro da superfície de cedência que são função do  $L/D$ ,  $D/d$  e o número de Reynolds:

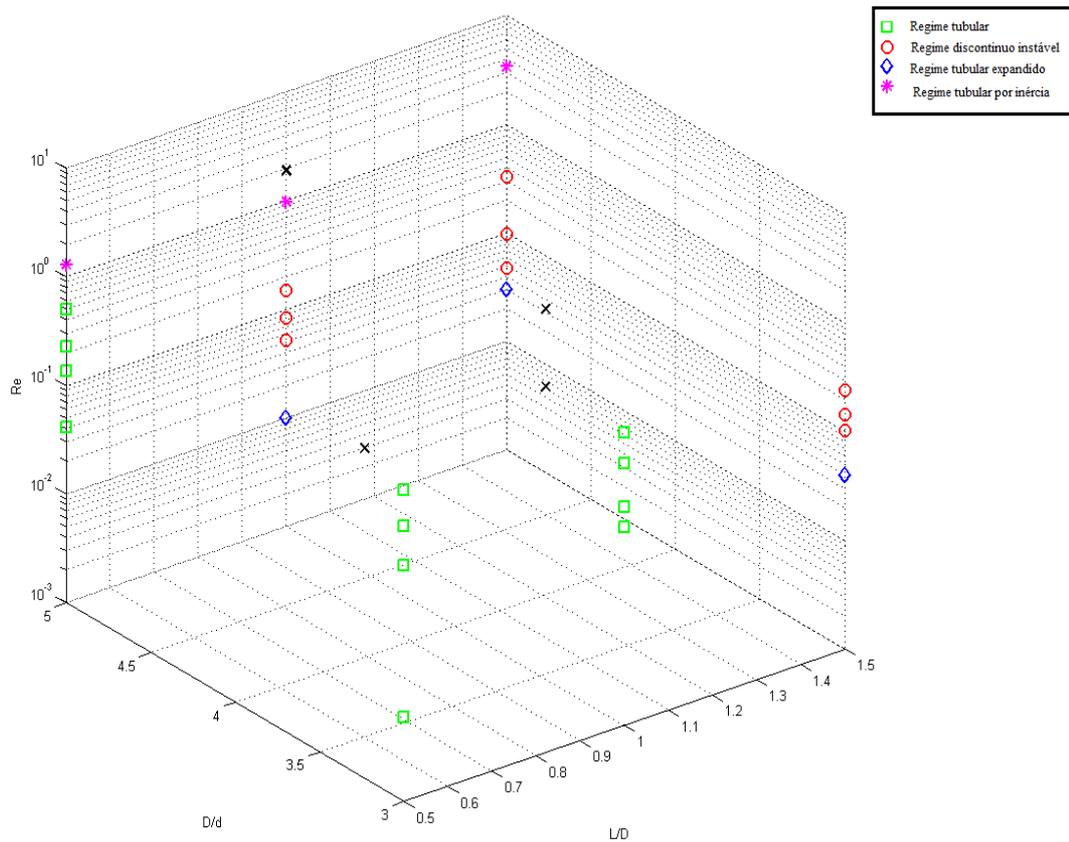
- Regime tubular: a superfície de cedência não muda sua forma na entrada até sair da expansão e é independente do tempo, além todo o fluido escoar à mesma velocidade: Figura 4-12 (a), (b), (c), (d), 4-13 (a), (b), (c), 4-18, (a), (b), (c), (d).
- Regime tubular expandido: a forma da superfície de cedência atinge uma forma ampliada do diâmetro do escoamento na entrada e todo o fluido que escoar dentro tem uma só velocidade e é constante no tempo : Figura 4-14, Figura 4-21 (a), Figura 4-21.
- Regime descontínuo: A forma da superfície de cedência atinge uma forma ampliada do diâmetro do escoamento na entrada, mas o fluido que escoar dentro tem várias zonas de diferentes velocidades e é dependente do tempo: Figura 4-16, 4-17, 4-18, 4-20 (b),(c),(d), 4-22, 4-23, 4-24.

O fluido que escoar em varias zonas com diferentes viscosidades, regime descontínuo, pode ser o resultado combinado da heterogeneidade da estrutura da amostra na seção de teste, da inércia e a tixotropia. Os efeitos claramente

apresentaram a existência de um caminho preferencial de forma irregular por onde escoo o fluido a velocidade mais rápida, que inclusive muda sua forma e tamanho ao longo da geometria de expansão-contração.

A superfície de cedência cujo escoamento não muda da forma da entrada até a saída, regime tubular, para número de Reynolds baixos são claramente efeitos da tixotropia. Isto é o resultado do fenômeno de tixotropia porque o fluido escoo produto de um cisalhamento nas paredes do tubo antes da seção de teste; como o fluido tixotrópico é dependente do tempo demora uma quantidade de tempo para diminuir sua viscosidade, o que produz um deslocamento do fluido como um sólido através da geometria de teste, e como o fluido tixotrópico também depende de seu histórico de cisalhamento, uma vez que o fluido escoo por um caminho preferencial, precisa de muito tempo para voltar ao nível de estruturação que tinha em repouso, portanto o tempo de estruturação e desestruturação não são iguais. Embora para número de Reynolds altos este perfil é produto da inércia.

As zonas escoando a diferente velocidade pode-ser devido a que o tempo de reconstrução para atingir um patamar de regime permanente é muito maior que o tempo de desestruturação. Portanto quando aplica-se um cisalhamento maior ao estado anterior, produz um caminho preferencial e o fluido que está no contorno deste caminho precisa de um tempo para atingir um novo nível estrutural produzindo um escoamento em diferentes velocidades, devido a que o fluido no caminho preferencial está sendo desestruturado e o fluido que está no contorno do mesmo está estruturando-se. Deste análise é possível ver que este tipo de escoamento é dependente do tempo até atingir um equilíbrio estrutural; O parâmetro  $t_{eq}$  (tempo característicos de mudanças de um nível estrutural  $\lambda$  para outro) de igual maneira ajuda explicar este fenômeno, já que a medida que maior seja o parâmetro  $t_{eq}$ , o fluido demora em mudar sua estrutura produzindo que o escoamento tenha diferente velocidade a medida que passa o tempo e sua posição ao contorno do caminho preferencial de escoamento. Este parâmetro é utilizado no modelo de Souza Mendes [47].



**Figura 4-29:** Mapa dos tipos de escoamento do fluido tixotrópico, dispersão de 2% de laponita RD, através de uma expansão- contração abrupta e assimétrica.

Na Figura 4-29 apresenta-se um mapa dos três tipos de escoamentos existentes na geometria de expansão- contração. Para  $Re > 1$ , o escoamento sempre vai ser de Regime tubular. Mas para  $Re < 1$ , o escoamento pode ser dos três tipos dependendo do  $L/D$  e  $D/d$ , o escoamento de Regime tubular acontece para  $L/D < 1$  e qualquer  $D/d$ , o escoamento tubular expandido acontece para  $L/D > 1$  e qualquer  $D/d$ . Na Tabela 4-2 apresenta-se um resumo dos tipos de escoamento em função dos parâmetros  $Re$ ,  $L/D$  e  $D/d$ .

**Tabela 4-2:** Tabela dos tipos de escoamento através das seções de expansão– contração.

L/D	D/d	Re	Tipo de escoamento
Re>1			
0.5	5	1.307	Regime tubular por inércia
1	5	0.976	
1.5	5	3.41	
Re<1			
0.5	3	0.15	Regime tubular
0.5	3	0.346	
0.5	3	0.749	
1	3	0.067	
1	3	0.103	
1	3	0.258	
1	3	0.495	
0.5	3	0.006	
0.5	5	0.041	
0.5	5	0.135	
0.5	5	0.23	
0.5	5	0.5	
1.5	3	0.104	
1.5	3	0.145	
1.5	3	0.24	
1	5	0.052	
1	5	0.083	
1	5	0.148	
1.5	5	0.048	
1.5	5	0.098	
1.5	5	0.33	
1	5	0.01	Regime tubular expandido
1.5	3	0.04	
1.5	5	0.03	

#### 4.2.5.

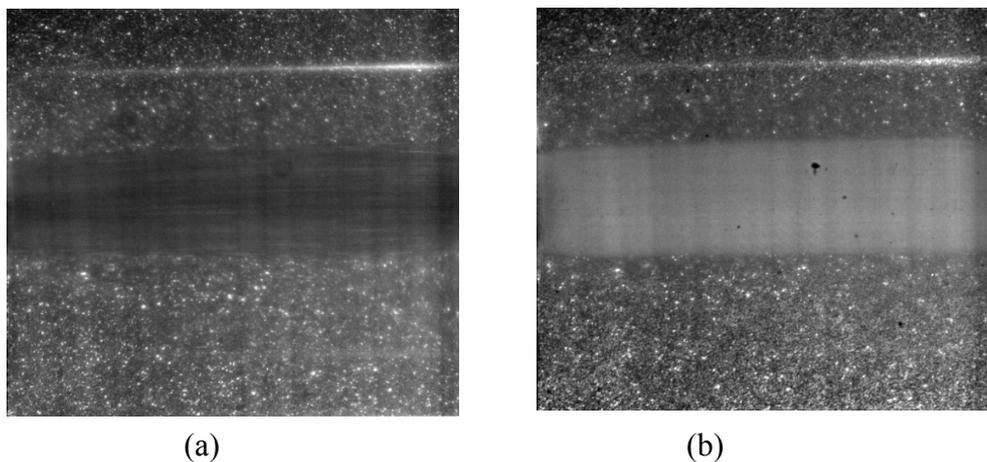
#### Análise de mudanças do escoamento do fluido

Uma vez que o fluido escoava com um número de Re alto através da seção de expansão-contração, como mencionou-se anteriormente forma um tipo de escoamento com diâmetro igual à entrada e é mantido até sair, regime tubular, mas se depois aplica-se uma mudança para uma vazão mássica com número de Reynolds baixos( sem efeito de inércia), a forma do escoamento do fluido tem

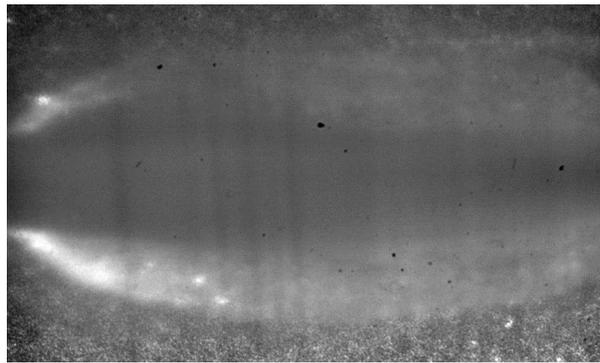
duas alternativas. Primeiro o escoamento do fluido é mantido semelhante àquele de Reynolds altos, ou seja como regime tubular, como apresenta-se na Figura 4-30. O segundo caso é que o fluido escoe como regime tubular expandido, isto acontece quando a vazão mássica imposta faz um cisalhamento que produz uma viscosidade igual às zonas que estão ao contorno do escoamento anterior, portanto produz um escoamento do fluido de toda a região que tem a mesma viscosidade, como apresenta a Figura 4-31. A diferença da forma dos tipos de escoamento depois de um escoamento com efeitos de inércia depende da viscosidade do fluido na entrada e as viscosidades do fluido na seção expansão-contração.

No caso da Figura 4-30, o escoamento do fluido quebrou a estrutura do fluido formando um caminho preferencial e o fluido parado comporta-se como sólido

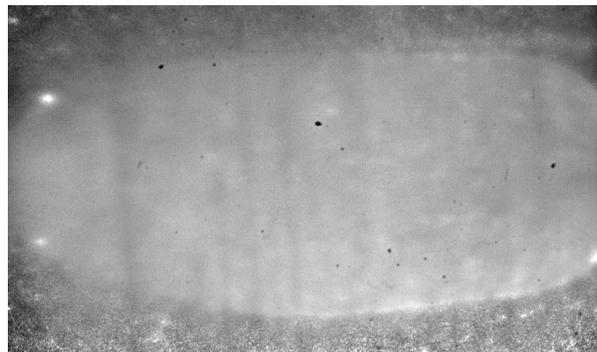
No caso da Figura 4-31, o fluido está escoando em zonas de velocidade diferente, mas o escoamento da região central tem uma velocidade muito superior ao escoamento na periferia, como apresenta-se na Figura 4-31 (a) e ao aplicar uma mudança de vazão para um valor muito menor, apresentou o escoamento da Figura 4-31 (b), com isto pode-se observar que o caminho preferencial depende das diferenças de viscosidade entre o fluido com cisalhamento na entrada e o fluido na seção de expansão-contração.



**Figura 4-30:** Comparação do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1/1$ , quando o primeiro escoamento é muito mais alto que o segundo. Primeiro (a)  $\dot{m}= 3.690$  g/s,  $Re= 0.970$ , (b)  $\dot{m}= 0.860$  g/s,  $Re= 0.08$ .



(a)



(b)

**Figura 4-31:** Comparação do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contratação ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , quando o primeiro escoamento é muito mais alto que o segundo. Primeiro (a)  $\dot{m}= 3.431$  g/s,  $Re= 0.865$ , (b)  $\dot{m}= 0.260$  g/s,  $Re= 0.008$ .

Uma informação muito importante é que nenhum escoamento, seja de  $Re$  maior ou menor ao escoamento inicial que movimento por primeira vez a dispersão, apresentou uma superfície de cedência de regime tubular expandido maior ao produzido pelo escoamento inicial.

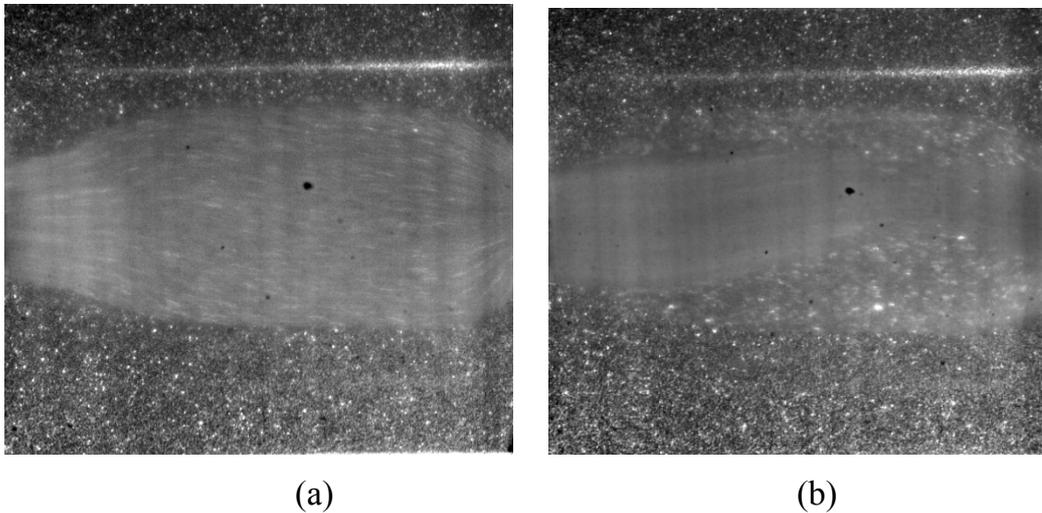
#### 4.2.6.

#### **Tempo que o fluido está escoando a vazão constante imposta pela bomba**

Quando o fluido escoar como regime tubular e como regime tubular expandido, a forma da superfície de cedência não muda com o tempo. Mas

quando o fluido escoar como regime descontínuo divide-se em zonas de diferentes viscosidades e é um escoamento que depende do tempo. Quando aplica-se um cisalhamento maior ao estado anterior, produz um caminho preferencial e o fluido que está no contorno deste caminho precisa de um tempo para atingir um novo nível estrutural produzindo um escoamento em diferentes velocidades, devido a que o fluido no caminho preferencial está sendo desestruturado e o fluido que está no contorno do mesmo está estruturando-se. Deste análise é possível ver que este tipo de escoamento é dependente do tempo até atingir um equilíbrio estrutural.

Na Figura 4-32 está a mudança do escoamento no tempo. Como o fluido escoando é tixotrópico e depende do histórico de cisalhamento é preciso destacar que a vazão mássica antes imposta foi menor.

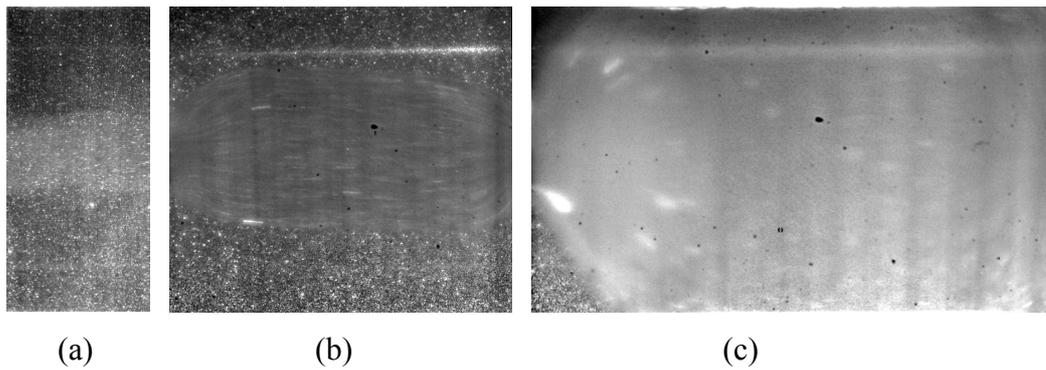


**Figura 4-32:** Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ , e  $L/D=1/1$  para vazão mássica de  $\dot{m}= 0.699$  g/s,  $Re= 0.052$  com uma vazão anterior inferior. (a) tempo de escoamento  $t < 100$  segundos, (b) tempo de escoamento  $t > 100$  segundos.

#### 4.2.7.

#### Influência da relação da geometria $L/D$

Através da análise da Figura 4-33 é possível observar que à medida que aumenta a relação  $L/D$ , a forma da superfície de cedência amplia-se.



**Figura 4-33:** Comparação do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contração ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$  variando  $L/D$ . (a)  $L/D=0.5$ ,  $\dot{m}= 0.614$  g/s,  $Re= 0.041$ , (b)  $L/D=1$ ,  $\dot{m}= 0.300$  g/s,  $Re= 0.010$ , (c)  $L/D = 1.5$ ,  $\dot{m}= 0.520$  g/s,  $Re= 0.030$ .

No caso das geometrias com comprimento suficiente para que o fluido da entrada movimente fluido na geometria sem sair dela, produz um cisalhamento interno e não forma inicialmente um caminho preferencial até a saída na seção de teste, o qual diminui a viscosidade de outras regiões incrementando a quantidade do fluido escoando. Enquanto mais devagar seja o deslocamento na entrada ou maior seja a relação  $L/D$  consegue-se deslocar mais quantidade de fluido e ampliar a superfície de cedência, como apresenta-se na Figura 4-33 , já que tem algumas zonas com maior tempo de cisalhamento. Esta afirmação é baseada na foto da superfície de cedência inicial formado pelo primeiro escoamento que entrou na seção expansão-contração e é o maior. Nenhum número de Reynolds seja maior ou inferior, apresentou um incremento do perfil inicial.

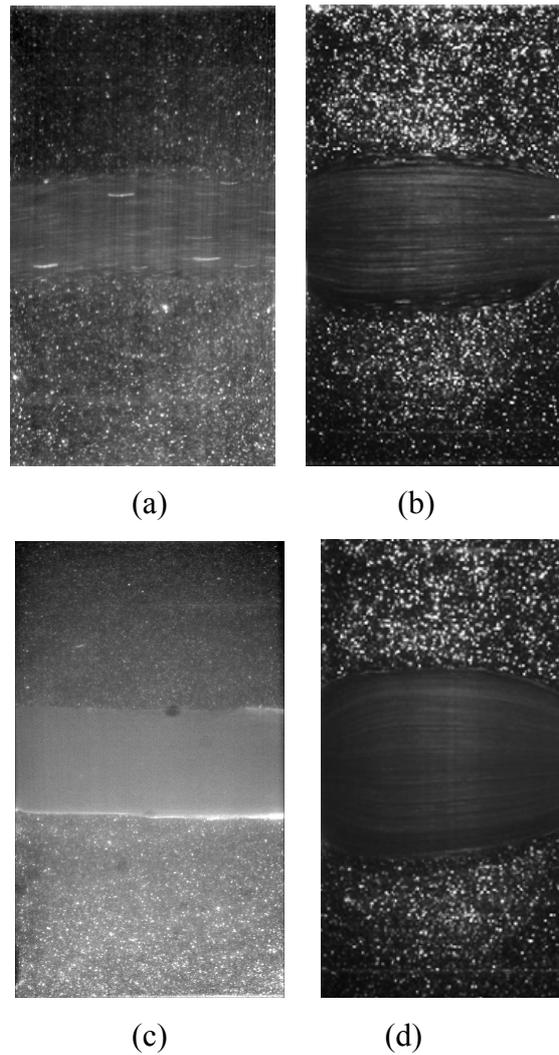
#### 4.2.8.

#### **Comparação do escoamento de dois fluidos viscoplásticos com diferentes níveis de tixotropia através da seção de expansão- contração.**

Este análise é só qualitativo e com objetivo de dar uma comparação não muito precisa, mas que permita entender ligeiramente a influencia que tem a tixotropia em dois diferentes fluidos viscoplasticos. Os dois fluidos utilizados para estudar são a laponita RD preparada neste trabalho e o carbopool 0,09 %

utilizado no trabalho de Souza Mendes, Naccache, Varges [46]. A laponita RD 2% tem uma tensão limite de cisalhamento extrapolado de 10.17 Pa e o carbopool de 0.09 % de 9.80 Pa. Não é possível comparar imagens do escoamento dos dois fluidos à uma mesma taxa de deformação devido à dificuldade de controlar a vazão mássica imposta no escoamento da laponita RD, mas a comparação são com valores de taxa de deformação muito semelhantes. Nesta comparação foi impossível fixar mais variáveis para estudar diretamente a influencia da tixotropia.

Através da Figura 4-34, onde tem uma comparação do escoamento de dois fluidos viscoplásticos com diferentes níveis de tixotropia, pode-se ver que à medida que um fluido é mais tixotrópico, como é o caso da laponita RD, a forma da superfície de cedência é menos ampliada na seção de expansão- contração . De igual maneira no caso da dispersão de 2% de laponita, à medida que incrementa-se a taxa de deformação os efeitos combinado de inércia, tixotropia e elasticidade fazem que superfície de cedência diminua, ao contrário ao observado com carbopool 0.09 %, onde a forma da superfície de cedência amplia-se do diâmetro da entrada dependendo diretamente proporcional à taxa de deformação. Embora é importante mencionar que a viscosidade do carbopool 0.09 % é menor para cada caso de comparação. Resumindo a quantidade de fluido escoando com a dispersão de 2% de laponita RD diminui com a vazão. Enquanto no trabalho [46] onde utilizou-se Carbopol 0.09 %, que de igual maneira é um fluido viscoplástico, o fluido escoando dentro da superfície de cedência aumenta à medida que aumenta a vazão mássica, como é visível na Figura 4-34.



**Figura 4-34:** Comparação do escoamento de dois fluidos viscoplásticos, na geometria  $d-D-d = 1-5-1$ ,  $L/D = 1/0.5$ , com diferente nível de tixotropia. (a) Laponita Rd 2% ,  $\dot{\gamma} = 16.65$  (1/s)  $n = 0.8752$  (Pa.s), (b) Carbopol 0.11%,  $\dot{\gamma} = 20.17$  (1/s)  $n = 1.450$  (Pa.s) [46], (c) Laponita Rd 2% ,  $\dot{\gamma} = 102.01$  (1/s)  $n = 0.2732$  (Pa.s), (d) Carbopol 0.11%,  $\dot{\gamma} = 124.80$  (1/s)  $n = 0.4161$  (Pa.s) [46].