

**Edgar Hernán Cando Narváez**

**Escoamento Permanente De Um Fluido Tixotrópico  
Através de Expansões–Contrações Abruptas  
Axissimétricas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro  
Março de 2012

**Edgar Hernán Cando Narváez**

**Escoamento Permanente De Um Fluido Tixotrópico  
Através de Expansões–Contrações Abruptas  
Axissimétricas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Monica Feijo Naccache**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Roney Leon Thompson**

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal  
Fluminense

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro  
5 de Março de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Edgar Hernán Cando Narváez**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Escuela Politécnica Nacional - EPN (Quito, Equador) em 2009.

#### Ficha Catalográfica

Narváez, Edgar Hernán Cando

Escoamento permanente de um fluido tixotrópico através de expansões–contrações abruptas Axissimétricas / Edgar Hernán Cando Narváez; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. – 2012.

131 v. : il.; 30 cm

1. Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Incluí bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Tixotropia. 3. Expansão–contração. 4. Tensão limite de escoamento. 5. Visualização de escoamentos com laser. I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

*Dedico este trabalho aos meus pais.*

*"Quando uma pessoa deseja muito alguma coisa, o universo conspira a seu favor. Basta interpretar uma linguagem que está além das palavras e revela aquilo que os olhos não podem ver"*

*Paulo Coelho.*

## Agradecimentos

A Deus pela sua companhia e a graça de ter me permitido concluir este trabalho.

A minha família, minha mãe Marcia Noemi Narváez Duran pelo amor, apoio, compreensão e ensinamentos entregados ao longo de toda minha vida, onde nunca faltou em nenhum momento seja grande ou pequeno. Meu pai Hernán Rodrigo Cando Pacheco por ser meu melhor amigo e suporte em todo momento. Meus irmãos Eduardo e Efren por ser minha constante motivação; e todos meus tios e primos que estiveram preocupados por mim ao longo deste tempo. A minha amada Lorena por sempre estar ao meu lado com seu amor único nela, compreensão e sonhos de vida.

Ao meu orientador, professor Paulo Roberto de Souza Mendes, pelos ensinamentos, dedicação, apoio e confiança em mim prestada.

Ao Grupo de Reologia da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro em especial a Priscilla Vargas pela constante ajuda, paciência e apoio entregue em todo momento durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

Agradecimentos em particular para os órgãos de fomento à pesquisa CNPq, CAPES e principalmente FAPERJ, pelo apoio financeiro fornecido, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Aos membros da banca examinadora, que aceitaram revisar o trabalho e contribuíram com valiosas observações.

## Resumo

Narváez, Edgar Hernán Cando; Souza Mendes, Paulo. **Escoamento Permanente De Um Fluido Tixotrópico Através de Expansões–Contrações Abruptas Axissimétricas**. Rio de Janeiro, 2012. 131p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho estuda-se experimentalmente o comportamento dos fluidos tixotrópicos. Conseguiu-se imagens de fluidos tixotrópicos escoando através de uma expansão seguida de uma contração, ambas abruptas e axissimétricas. A existência de uma “superfície de cedência” produto da fronteira entre o fluido que escoava e o que não escoava, que estende-se da entrada da expansão até a saída da contração, é o principal fenômeno a ser estudado. O número de  $Re$ , o tempo para vazão mássica constante e as dimensões da geometria são as variáveis do experimento. Para o desenvolvimento do experimento utilizou-se uma dispersão de laponita RD, que é um fluido transparente com boas características tixotrópicas. Este fluido foi caracterizado reologicamente através da obtenção da *flow curve* e de testes oscilatórios *Strain sweep* e *frequency sweep*. A caracterização reológica apresentou alguns problemas com respeito ao envelhecimento, tipo de geometria e reômetro utilizado, além da falta de repetitividade para baixas taxas de deformação devido ao não pré-cisalhamento da amostra. Todos os problemas foram analisados para dar solução. Os resultados mostraram que a laponita RD é um fluido tixotrópico com característica elástica na região viscoelástica linear. O escoamento do fluido através de uma expansão seguida de uma contração axissimétrica apresentou três tipos de forma que dependem da relação  $L/D$ ,  $D/d$  e o número de Reynolds: escoamento de regime tubular, escoamento de regime tubular expandido e escoamento de regime descontínuo.

## Palavras-chave

Tixotropia; expansão-contração; tensão limite de escoamento; visualização de escoamentos com laser.

## Abstract

Narváez, Edgar Hernán Cando; Souza Mendes, Paulo (Advisor). **Flow of thixotropic fluid through axisymmetric expansions-contractions**. Rio de Janeiro, 2012. 131p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The behavior of thixotropic fluids through axisymmetric expansions-contractions is studied in this research. The main objective is to visualize the “shear banding” in the flow of a thixotropic fluid, which is the interface between a flowing fluid and a non-flowing fluid. This research uses an experimental procedure to visualize the “shear banding” within the fluid. The variables used in the experimental procedure were: steady flow rate time, flow rate and geometric characteristics. A dispersion of laponite RD was utilized as the experimental fluid due to its thixotropic and transparent properties. The flow curve, strain sweep and frequency sweep of the fluid were used to obtain the rheology characterization. The rheology characterization showed lack of repeatability due to several factors, such as: aging, type of rheometers, geometry used in the rheometers and lack of pre shearing of the sample. All of these issues have been analyzed to give solutions. Finally, the results showed that laponite RD is a thixotropic fluid and elastic in the viscoelastic region. Also that the flow of the fluid through the axisymmetric expansion-contraction device has three types of behaviors: constant flow area, variable flow area with an expansion in the middle zone and variable flow area with layers of different velocities.

## Keywords

Thixotropy; expansions-contractions; Yield stress; visualization of flow with laser.



## Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Motivação	20
1.2.	Revisão Bibliográfica	21
1.3.	Objetivos	30
1.4.	Escopo	31
2	Aparato Experimental	32
2.1.	Suportes	32
2.1.1.	Sistema Hidráulico	33
2.1.2.	Mecanismo de Visualização	34
2.2.	Componentes do Aparato Experimental	36
2.2.1.	Reservatório de armazenagem do fluido de trabalho	36
2.2.2.	Bomba	38
2.2.3.	Seção de expansão-contração	39
2.2.4.	Reservatório da seção de teste	41
2.2.5.	Laser	42
2.2.6.	Espelho e suporte	43
2.2.7.	Câmera fotográfica	44
2.2.8.	Partículas para visualização	44
2.2.9.	Balança	45
2.3.	Montagem da Bancada	45
2.4.	Procedimento Experimental	47
2.4.1.	Preenchido do fluido de trabalho na bancada	49
2.4.2.	Calibração do sistema laser	50
3	Reologia do fluido	52
3.1.	O Fluido	52
3.1.1.	Envelhecimento da laponita em regime permanente	54
3.1.2.	Influência dos parâmetros de formação de suspensões de laponita	55
3.1.3.	Resumo dos parâmetros do fluido de trabalho, laponita RD, para o estudo	58

3.1.4. Protocolo de preparação da laponita RD	58
3.2. Procedimento de caracterização do comportamento tixotrópico	59
3.3. Desenvolvimento dos testes de caracterização reológica	61
3.3.1. Testes oscilatórios	61
3.3.2. Testes em condições de regime permanente	62
4 Resultados e discussão	65
4.1. Caracterização Reológica	65
4.1.1. Testes Oscilatórios	65
4.1.2. Testes em condições de regime permanente	67
4.1.3. Comparação dos resultados dos testes oscilatórios e testes em condições de regime permanente	76
4.2. Experimentos de visualização	78
4.2.1. Cálculo do número de Reynolds do escoamento na entrada da secção de expansão-contração	78
4.2.2. Parâmetro $t_{eq}$ (tempo característicos de mudanças de um nível estrutural para outro)	79
4.2.3. Influência do número de Reynolds	80
4.2.3.1. Análise do escoamento para números de Reynolds baixos sem efeitos de inércia em função da geometria	80
4.2.3.2. Análise do escoamento com números de Reynolds altos com efeitos de inércia	90
4.2.4. Tipos de escoamento dentro da superfícies de cedência através das seções de expansão-contração em função do número de Reynolds,	93
4.2.5. Análise de mudanças do escoamento do fluido	96
4.2.6. Tempo que o fluido está escoando a vazão constante imposta pela bomba	98
4.2.7. Influência da relação da geometria L/D	99
4.2.8. Comparação do escoamento de dois fluidos viscoplásticos com diferentes níveis de tixotropia através da seção de expansão-contração.	100
5 Conclusões e recomendações	103
5.1. Conclusões e Sugestões	103
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	104

Referencia Bibliográfica	106
A.Anexo A	112
A.1. Informação adicional sobre a caracterização Reológica	112
A.1.1. Seleção da geometria para teste no reômetro	112
A.1.2. Influência da evaporação	114
A.1.3. Influência da temperatura nos testes	115
A.1.4. Influência do pré-cisalhamento e dificuldade de obtenção de dados a baixas taxas de deformação	116
A.1.5. Diferença na utilização do reômetro de taxa de deformação controlada e o reômetro com tensão de cisalhamento controlada	119
A.1.6. Influência do tempo de repouso após a preparação de dispersão	121
B.Anexo B	127
B.1. Análise de Incerteza	127
B.1.1. Cálculo da incerteza na medição de vazão mássica	128
B.1.2. Cálculo da incerteza da função viscosidade	129
B.1.3. Cálculo da incerteza do número de Reynolds	130

## Lista de Figuras

Figura 1-1: Demonstração da resposta da taxa de deformação pouco sensível ao início de uma aplicação de uma tensão constante em fluidos com alto nível de tixotropia , testadas suspensões de Bentonita imediatamente após de um pré-cisalhamento de 26 Pa durante 60 s[15].	24
Figura 1-2: Para tensões altas de cisalhamento algumas suspensões atingem um equilíbrio próprio da tixotropia, mas para baixos valores não. Testando suspensões de Bentonita com pré-cisalhamento de 27 Pa por 60 s com um repouso seguinte de 20 s [15].	25
Figura 1-3: Esquema da expansão-contração abrupta.	29
Figura 1-4: Fenômeno da superfície de cedência para três vazões distintas [46].	30
Figura 2-1: Bancada experimental.	33
Figura 2-2: Plano do laser para visualização.	35
Figura 2-3: Esquema do experimento.	36
Figura 2-4: Reservatório com tampa e termômetro.	37
Figura 2-5: Bomba de deslocamento positivo (Cole Parmer EW-07553-70).	38
Figura 2-6: Controlador da vazão da bomba.	39
Figura 2-7: Pulse dampener.	39
Figura 2-8: Expansão e contração.	40
Figura 2-9: Vista da montagem da expansão-contração.	41
Figura 2-10: Expansão-contração e aquário montados.	42
Figura 2-11: Laser utilizado.	43
Figura 2-12: Fontes do laser.	43
Figura 2-13: O espelho e os acessórios de seu suporte.	44
Figura 2-14: Balança Gehaka utilizada para medir a vazão.	45
Figura 2-15: Posicionamento e alinhamento do laser.	46
Figura 2-16: Alinhamento do sistema de suporte do espelho.	47
Figura 2-17: Calibração da posição do laser.	51
Figura 3-1: Estrutura ‘‘casa de cartas’’ do gel de laponita.	56
Figura 3-2: Procedimento de caracterização do comportamento tixotrópico [10].	60

Figura 3-3: Reômetro Ares G2 (TA <i>instruments</i> ) do laboratório de reologia da PUC-RIO.	61
Figura 3-4: Reometro Physica MCR 501 do laboratório de Reologia da PUC-RIO.	62
Figura 4-1: Teste <i>Strain sweep</i> da dispersão de 2 % de laponita RD.	66
Figura 4-2: Teste <i>frequency sweep</i> da dispersão de 2 % de laponita RD.	66
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.	68
Figura 4-4: Teste <i>step change</i> de 100 a 1000 (1/s) e <i>step change</i> de 1500 a 1000 (1/s) para a suspensão aquosa de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.	69
Figura 4-5: Teste <i>step change</i> de 1000 a 500 (1/s) e <i>step change</i> 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.	69
Figura 4-6: Teste <i>step change</i> de 1000 a 100 (1/s) e <i>step change</i> 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.	70
Figura 4-7: Teste <i>step change</i> de 100 a 1 (1/s) e <i>step change</i> 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.	70
Figura 4-8: Testes tixotrópicos de 1500 e 1000 (1/s) de suspensões de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.	71
Figura 4-9: Teste tixotrópicos de 500 e 100 (1/s) de suspensões de 2% de laponita RD do protocolo de preparação.	71
Figura 4-10: Teste <i>Step change</i> 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.	73
Figura 4-11: Reologia em regime permanente da laponita RD preparada.	74
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 tixotropicas e elásticas.	77

- Figura 4-13: Analogia mecânica do modelo proposto por Souza Mendes [47]. 80
- Figura 4-14: Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$  e  $L/D=0.5/1$  para diferentes vazões mássicas: (a)  $m= 0.223$  g/s ,  $Re= 0.006$ , (b)  $m= 1.244$  g/s,  $Re= 0.150$ , (c)  $m= 1.999$  g/s,  $Re= 0.346$ , (d)  $m= 3.147$  g/s,  $Re= 0.749$ . 82
- Figura 4-15: Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1/1$ , para diferentes vazões mássicas: (a)  $m= 0.801$  g/s,  $Re= 0.067$ , (b)  $m= 1.010$  g/s,  $Re= 0.103$ , (c)  $m= 1.689$  g/s,  $Re= 0.258$  (d)  $m= 1.940$  g/s,  $Re= 0.495$ . 83
- Figura 4-16: Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 0.610$  g/s,  $Re= 0.04$ . 84
- Figura 4-17: Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 1.016$  g/s,  $Re= 0.104$ . 84
- Figura 4-18: Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 1.223$  g/s,  $Re= 0.145$ . 85
- Figura 4-19: Imagem do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-3-1$ , e  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 1.649$  g/s,  $Re= 0.240$ . 85
- Figura 4-20: 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  $L/D=0.5/1$ , para diferentes vazões mássicas: (a)  $m= 0.614$  g/s,  $Re= 0.041$ , (b)  $m= 1.173$  g/s,  $Re= 0.135$ , (c)  $m= 1.583$  g/s,  $Re= 0.230$ , (d)  $m= 1.960$  g/s,  $Re= 0.500$ . 86
- Figura 4-21: 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 diferentes vazões mássicas:

(a)  $m= 0.300$  g/s,  $Re= 0.010$ , (b)  $m= 0.699$  g/s,  $Re= 0.052$ , (c)  $m= 0.896$  g/s,  $Re= 0.083$ , (d)  $m= 1.235$  g/s,  $Re= 0.148$ . 87

Figura 4-22: Imagem 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  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 0.520$  g/s,  $Re= 0.030$ . 88

Figura 4-23: Imagem 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  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 0.672$  g/s,  $Re= 0.048$ . 89

Figura 4-24: Imagem 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  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 0.987$  g/s,  $Re= 0.098$ . 89

Figura 4-25: Imagem 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  $L/D=1.5/1$ , para  $m= 1.943$  g/s,  $Re= 0.330$ . 89

Figura 4-26: Imagens do escoamento da dispersão de 2 % de laponita RD através de uma seção de expansão-contracção ambas abruptas com a relação de dimensões  $d-D-d=1-5-1$ . (a)  $L/D=0.5/1$ ,  $m= 4.410$  g/s,  $Re= 1.307$ , (b)  $L/D=1/1$ ,  $m= 3.690$  g/s,  $Re= 0.976$ , (c)  $L/D=1.5/1$ ,  $m= 8.080$  g/s,  $Re= 3.410$ . 91

Figura 4-27: 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  $L/D=0.5/1$ , para vazão mássicas de  $m= 4.410$  g/s,  $Re= 1.307$ . (a) tempo de escoamento  $t=0$ , (b) tempo de escoamento  $t=300$  s. 92

Figura 4-28: 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  $L/D=0.5/1$ , para diferentes vazões mássicas com  $Re$  altos. (a)  $m= 4.410$  g/s,  $Re= 1.307$ , (b)  $m= 5,600$  g/s,  $Re= 1.920$ . 92

Figura 4-29: Mapa dos tipos de escoamento do fluido tixotrópico, dispersão de 2% de laponita RD, através de uma expansão- contracção abrupta e assimétrica. 95

Figura 4-30: Comparação 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  $L/D=1/1$ , quando o primeiro escoamento é muito mais alto que o segundo. Primeiro (a)  $m= 3.690$  g/s,  $Re= 0.970$ ,  
 (b)  $m= 0.860$  g/s,  $Re= 0.08$ . 97
- Figura 4-31: 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  $L/D=1.5/1$ , quando o primeiro escoamento é muito mais alto que o segundo. Primeiro (a)  $m= 3.431$  g/s,  $Re= 0.865$ ,  
 (b)  $m= 0.260$  g/s,  $Re= 0.008$ . 98
- Figura 4-32: 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 vazão mássica de  $m= 0.699$  g/s,  $Re= 0.052$  com uma vazão anterior inferior. (a) tempo de escoamento  $t < 100$  segundos, (b) tempo de escoamento  $t > 100$  segundos. 99
- 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)  $L/D=0.5$ ,  $m= 0.614$  g/s,  $Re= 0.041$ , (b)  $L/D=1$ ,  $m= 0.300$  g/s,  $Re= 0.010$ , (c)  $L/D = 1.5$ ,  $m= 0.520$  g/s,  $Re= 0.030$ . 100
- 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% ,  $\gamma= 16.65$  (1/s)  $n=0.8752$  (Pa.s), (b) Carbopol 0.11%,  $\gamma= 20.17$ (1/s)  $n=1.450$  (Pa.s) [46], (c) Laponita Rd 2% ,  $\gamma= 102.01$  (1/s)  $n=0.2732$  (Pa.s), (d) Carbopol 0.11%,  $\gamma= 124.80$  (1/s)  $n=0.4161$  (Pa.s) [46]. 102
- Figura A-1: Teste *flow curve* de 1000 a 100 (1/s) utilizando a geometria cone-placa 113
- Figura A-2: Teste *flow curve* de 1000 a 100 (1/s) utilizando a geometria Couette. 113
- 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. 115
- Figura A-4: Testes tixotrópicos a 500 1/s com um pré-cisalhamento de 250 s, a 25 °C e 20 °C. 116



Figura A-5: Dificuldade de toma de dados para baixas taxas de deformação e falta de repetitividade.	117
Figura A-6: (a) Testes de <i>step change</i> de 1500 a 1 (1/s), (b) ampliação da região com taxa de deformação 1 (1/s).	118
Figura A-7: Diferença nas <i>flow curve</i> utilizando o reômetro ARES G2 (taxa de deformação controlada) e o PAAR Physica MCR 501 (tensão de cisalhamento controlada).	119
Figura A-8: Teste <i>step change</i> de 100 a 500 (1/s) e 500 a 100 (1/s) , cinco dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD.	121
Figura A-9: Teste <i>step change</i> de 100 a 500 (1/s) e 500 a 100 (1/s) , seis dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD.	122
Figura A-10: Teste <i>step change</i> de 100 a 500 (1/s), sete após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD	122
Figura A-11: Teste <i>step change</i> de 100 a 500 (1/s), oito dias após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD	123
Figura A-12: Comparação dos testes <i>step-change</i> de 100 a 500 (1/s), do sétimo e oitavo dia após a preparação da suspensão de 2% de laponita RD	124
Figura A-13: Dispersão de laponita, aquecida por 2 dias após a preparação	125
Figura A-14: Teste <i>step change</i> de 500 a 100 (1/s), aquecida 2 dias após a preparação da dispersão de laponita e ao testada ao quarto e quinto dia.	126
Figura B-1: Incerteza na medição de vazão mássica	129

## Lista de tabelas

Tabela 2-1: Dimensões dos tubos de acrílico da seção de expansão-contração.	40
Tabela 4-1: Características da suspensão de 2% de laponita RD preparada.	75
Tabela 4-2:Tabela dos tipos de perfis de escoamento através das seções de expansão– contração.	96