

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SUSPENSÕES COM  
ALTO TEOR DE PARTÍCULAS SÓLIDAS DISPERSAS NUM  
MEIO NEWTONIANO ESTÁVEL**

**SAYONARA LIRA PÔRTO**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**AGOSTO - 1995**

**SAYONARA LIRA PÔRTO**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SUSPENSÕES COM  
ALTO TEOR DE PARTÍCULAS SÓLIDAS DISPERSAS NUM  
MEIO NEWTONIANO ESTÁVEL**

Dissertação apresentada ao  
Curso de Mestrado em Engenharia  
Química da Universidade Federal  
da Paraíba, em cumprimento às  
exigências para obtenção do Grau  
de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais Não Metálicos

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Laura Hecker de Carvalho - DEMa/CCT/UFPB

Co-Orientador: Prof. MSc. Rômulo Feitosa Navarro - DEMa/CCT/UFPB

Campina Grande - PB

Agosto - 1995



P853c Pôrto, Sayonara Lira.  
Comportamento reológico de suspensões com alto teor de partículas sólidas dispersas num meio newtoniano estável / Sayonara Lira Pôrto. - Campina Grande, 1995.  
88 f.

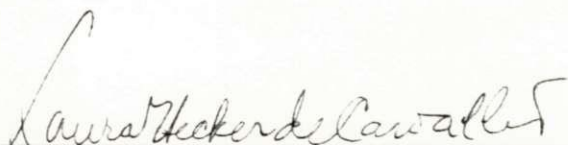
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1995.

Referências.  
"Orientação : Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laura Hecker de Carvalho, Prof. M.Sc. Rômulo Feitosa Navarro".

1. Comportamento Reológico. 2. Partículas Sólidas. 3. Meio Newtoniano. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Carvalho, Laura Hecker de. II. Navarro, Rômulo Feitosa. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 532.135(043)

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31 / 08 /1995



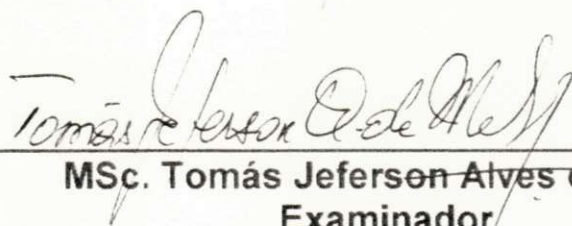
---

**Drª Laura Hecker de Carvalho**  
**Orientador**



---

**MSc. Rômulo Feitosa Navarro**  
**Co-Orientador**



---

**MSc. Tomás Jeferson Alves de Melo**  
**Examinador**



---

**Dr. Kepler Borges França**  
**Examinador**

**Campina Grande - PB**  
**Agosto - 1995**



## DEDICATÓRIA

**A Deus que sempre me deu a mão.**

**A Eg Pôrto Bezerra, meu marido, pelo  
companheirismo e cumplicidade.**

**A Éric Lira Pôrto, meu filho, por toda alegria  
concebida.**

**A Antônio José Filho e Maria Isabel Lira da  
Silva, meus pais, pela dedicação e força.**

**Aos meus irmãos.**

**A Laura H. de Carvalho e Rômulo F. Navarro  
por todo apoio e confiança.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Kepler Borges França, Coodenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Ao Prof. MSc. Tomás Jeferson Alves Mélo.

À secretária Maria José B. Cavalcanti da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química.

À secretária Maricé P. da Silva da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais- UFPB, aos colegas e funcionários.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq, projeto RHAÉ.

Aos meus amigos.

A todos que de alguma forma me incentivaram e ajudaram a transpor as barreiras da vida.

## RESUMO

Neste trabalho, foram investigadas as propriedades reológicas de suspensões de alumina/poliéster, em concentrações de alumina de 5, 10, 15, 20 e 25 g/100ml. Os estudos reológicos foram realizadas num viscosímetro Brookfield, na temperatura ambiente de 25°C e pressão atmosférica, com velocidades variando de 0.5 a 5 rpm, o que implica em taxas de deformação permitidas variando de 0.176 a 1.755 s<sup>-1</sup>. Estas taxas são consideradas baixas.

Através da análise da resposta do sistema submetido a várias taxas de deformação, construiu-se as curvas de fluxo e, determinou-se a viscosidade aparente, o índice de potência, e o índice de consistência foram determinados. Os resultados mostraram que o comportamento reológico do sistema é newtoniano e estável para todas as concentrações de alumina investigadas nas taxas de deformação empregadas.

Um modelo matemático que descreve o comportamento reológico de suspensões de alumina/poliéster foi proposto.

## ABSTRACT

In this work the rheological properties of polyester/alumina suspensions with alumina concentrations of 5, 10, 15, 20 and 25 g/100ml were investigated. Rheological studies were performed on a Brookfield viscometer at ambient temperature and atmospheric pressure at speeds varying from 0.5 to 5 rpm, which means that allowable shear rate varied from 0.176 to 1.755 s<sup>-1</sup>, which is considered low.

By analysing the systems response to varying shear rate flow curves were constructed and the apparent viscosity, power index and consistency index determined. The results showed the suspensions rheological behavior to be newtonian and stable for all alumine concentratiois investigated at the shear rates employed.

A mathematical model that successfully describes the rheological behavior of polyester/alumina suspensions was proposed.

## SIMBOLOGIA

$\dot{\gamma}$  - Taxa de Deformação.

$K$  - Índice de Consistência.

$K_0$  - Índice de Consistência Inicial.

$\kappa$  - Constante que Representa a Influência da Atividade da Carga na Variação da Viscosidade da Suspensão com a Concentração da Fase Dispersa ( Equações 2.11 e 2.13 ).

$n$  - Índice da Potência.

$n_0$  - Índice da Potência Inicial.

$n_i$  - Constante da Equação ( 2.21 ).

$\tau$  - Tensão de Cisalhamento.

$\mu_a$  - Viscosidade Aparente.

$\mu$  - Viscosidade Newtoniana.

$\mu_0$  - Viscosidade Aparente do Meio de Dispersão.

$\mu_{as}$  - Viscosidade Aparente da Suspensão.

$K_t$  - Fator de Cisalhamento.

$K_c$  - Fator da Taxa de Deformação.

$V_i$  - Velocidade de Teste.

$L_i$  - Leitura do Viscosímetro.

$C$  - Concentração da Fase Sólida.

$C_c$  - Concentração Crítica.

$\alpha$  - Espessura da Camada.

$d$  - Diâmetro da Partícula.

$p$  - Constante da Equação ( 2.11 ).

$\phi$  - Fração Volumétrica.

$\phi_m$  - Fração Volumétrica Máxima.

$\phi^*$  - Constante da Equação ( 2.24 ).

$B$  - Constante das Equações ( 2.17 ) e ( 2.22 ).

$b$  - Termo Independente.

$a$  - Constante de Acentuação do Efeito da Concentração.

$A$  - Taxa de Decaimento do Índice da Potência com o Aumento da Concentração.

$\eta$  - Viscosidade da Suspensão.

$\eta_s$  - Viscosidade do Meio de Dispersão.

$\eta_0$  - Viscosidade do Meio de Dispersão em Taxa de Deformação Zero.

$\eta_r$  - Viscosidade Relativa.

$\eta_{esp}$  - Viscosidade Específica.

$\eta_{r0}$  - Viscosidade Relativa para a Taxa de Deformação Zero.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01:</b> Curva de Leitura Ascendente e Leitura Descendente do Poliéster Puro.....	57
<b>Figura 02:</b> Curva de Leitura Ascendente e Leitura Descendente da Suspensão de Poliéster com 5g de Alumina/100ml de Poliéster.....	57
<b>Figura 03:</b> Curva de Leitura Ascendente e Leitura Descendente da Suspensão de Poliéster com 10g de Alumina/100ml de Poliéster.....	57
<b>Figura 04:</b> Curva de Leitura Ascendente e Leitura Descendente da Suspensão de Poliéster com 15g de Alumina/100ml de poliéster.....	57
<b>Figura 05:</b> Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 20g de alumina/100ml de poliéster.....	57
<b>Figura 06:</b> Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de Poliéster com 25g de Alumina/100ml de Poliéster.....	57
<b>Figura 07:</b> Influência da Concentração de Alumina na Viscosidade Aparente da Suspensão de Alumina/Poliéster.....	63
<b>Figura 08:</b> Variação da Viscosidade Aparente com a Velocidade de Teste da Suspensão de Alumina/Poliéster.....	63
<b>Figura 09:</b> Influência da Concentração de Alumina no Índice da Potência da Suspensão de Alumina/Poliéster.....	63
<b>Figura 10:</b> Variação do Índice de Consistência com a Concentração de Alumina da Suspensão de Alumina/Poliéster.....	63
<b>Figura 11:</b> Curvas de Fluxo da Suspensão de Alumina/Poliéster.....	63

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Fatores de conversão para o spindle 1 ( MITSCHKA, 1982 ).....	84
<b>Tabela 2:</b> Leitura ascendente e leitura descendente das suspensões de alumina/poliéster, após a homogeneização de 5 min a 300 rpm.....	85
<b>Tabela 3:</b> Valores do Logaritmo e da Regressão Linear para a Obtenção do Índice da Potência das Suspensões de alumina/poliéster em Todas as Concentrações Estudadas...	86
<b>Tabela 4:</b> Valores Obtidos com os Dados Experimentais para a Tensão de Cisalhamento, Taxa de Deformação e Viscosidade Aparente da Suspensão Alumina/Poliéster.....	87
<b>Tabela 5:</b> Variação do Índice de Consistência com a Concentração de Alumina.....	88
<b>Tabela 6:</b> Valores da Tensão de Cisalhamento Calculada com o Modelo Proposto.....	88

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

1. - INTRODUÇÃO.....	15
----------------------	----

## CAPÍTULO 2

2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL .....	18
2.1 - INTRODUÇÃO .....	18
2.2 - CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA .....	19
2.2.1 - Independentes do Tempo.....	21
2.2.2 - Dependentes do Tempo .....	23
2.2.3 - Viscoelásticos.....	24
2.3 - COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS SUSPENSÕES .....	24
2.4 - SUSPENSÕES DILUÍDAS DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS .....	25
2.5 - SUSPENSÕES DILUÍDAS DE PARTÍCULAS NÃO-ESFÉRICAS .....	27
2.6 - SUSPENSÕES CONCENTRADAS.....	29
2.6.1 - Suspensões Concentradas com Cargas Inertes .....	30
2.6.2 - Suspensões Concentradas com Cargas Ativas .....	30
2.6.3 - Efeito das Interações entre as Partículas.....	35

## CAPÍTULO 3

3. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA.....	38
--	----

## CAPÍTULO 4

4. - MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 - INTRODUÇÃO .....	44
4.2 - MATERIAIS .....	44
4.2.1 - Poliéster.....	44
4.2.2 - Alumina.....	47
4.3 - EQUIPAMENTOS .....	48
4.4 - MÉTODOS .....	49
4.4.1 - Preparação da Suspensão .....	49
4.4.2 - Medição das Propriedades Reológicas .....	49
a) Dependência com o Tempo .....	50
b) Tensão de Cisalhamento ( $\tau$ ) .....	50
c) Índice da Potência ( $n$ ) .....	51
d) Taxa de Deformação ( $\dot{\gamma}$ ).....	51
e) Viscosidade Aparente ( $\mu_a$ ) .....	52
f) Índice de Consistência ( $K$ ).....	52

## CAPÍTULO 5

5. - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
5.1 - INTRODUÇÃO .....	55
5.2.- DEPENDÊNCIA COM O TEMPO.....	55
5.3.- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA .....	58
5.4.- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE COM A TAXA DE DEFORMAÇÃO.....	59
5.5.- VARIAÇÃO DO ÍNDICE DA POTÊNCIA COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA.....	60
5.6.- VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA .....	60
5.7.- VARIAÇÃO DA CURVA DE FLUXO COM A CONCENTRAÇÃO .....	62
5.8.- DESENVOLVIMENTO DO MODELO REOLÓGICO .....	62

## **CAPÍTULO 6**

6. - CONCLUSÃO .....	66
----------------------	----

## **CAPÍTULO 7**

7. - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	68
8. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## **ANEXO**

FIGURAS .....	76
TABELAS .....	83



# **CAPÍTULO**

# **1**



## 1. - INTRODUÇÃO

Atualmente há um grande interesse no campo da pesquisa científica que se concentra nos estudos de novos materiais com propriedades específicas adequadas à determinadas aplicações. A pesquisa por materiais desconhecidos, requer um certo tempo e investimento até a sua aplicação industrial. Nos últimos anos, a tendência destes estudos é o desenvolvimento de materiais híbridos obtidos pela mistura de dois ou mais materiais com propriedades conhecidas, formando um novo material, cujas características diferem do original ( SOUSA, 1989; MÉLO, 1995 ).

Os materiais poliméricos puros ou reforçados encontram grandes aplicações industriais, devido a sua grande versatilidade e excelente relação entre resistência e peso.

Entre as formas obtidas dos materiais poliméricos modificados, as suspensões têm um importante papel nos estabelecimentos industriais; suas aplicações vão desde as mais simples, como processamento de minerais e manufatura de papéis, até as mais complexas, na manufatura de combustível impulsor para foguetes e na recuperação e exploração de óleos ( ILC & PHAN-THIEN, 1994 ).

O presente trabalho apresenta um estudo do comportamento reológico de suspensões de alumina/poliéster, com o objetivo de dar continuidade a uma linha de pesquisa desenvolvida no Departamento de Engenharia de Materiais da UFPB - Campus II, onde NAVARRO ( 1989 ) estudou o comportamento reológico de suspensões de alumina em polidimetilsiloxano e LIMA ( 1993 ) estudou o comportamento reológico de suspensões de alumina em fluidos newtonianos de alta viscosidade.

Para tanto, avaliou-se o efeito da adição de carga em concentrações de 5, 10, 15, 20 e 25 g/100ml em suspensões de alumina/poliéster, monitorando-se suas

## 2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Os polímeros podem ser definidos como um amplo grupo de materiais sólidos, compostos eminentemente orgânicos, usualmente tendo como base resinas sintéticas ou polímeros naturais modificados e que possuem, em geral, apreciável resistência mecânica e elevada massa molecular ( BRYDSON, 1970 ).

Os polímeros se dividem em dois grupos principais: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos são polímeros lineares ou ramificados que amolecem sob a influência do calor, e endurecem quando esfriados. Os termofixos adquirem estruturas tridimensionais após a cura ( reticulação das cadeias moleculares ), tornando-se infusíveis e insolúveis ( BILLMEYER, 1978 ).

Tanto os termoplásticos quanto os termofixos podem sofrer modificações em suas propriedades pela adição de cargas, fibras, ou mesmo pelas variáveis de processo dos materiais. Entre as várias ciências que estudam os polímeros e suas modificações se encontra a reologia, a qual se dedica ao estudo das deformações dos materiais quando submetido à ação de uma força externa ( BAIJAL, 1982 ).

Às relações existentes entre a tensão de cisalhamento, a taxa de deformação e a deformação resultante, dá-se o nome de propriedades reológicas. O estudo dessas relações fornecem informações valiosas sobre as propriedades, estruturas, e transições estruturais dos polímeros de variadas massas moleculares, e sistemas poliméricos de diversas composições ( TAGER, 1978;DEALY, 1982 ).

Os materiais poliméricos podem ser estudados em sistemas puros e/ou em sistemas que possuem mais de um componente. Os sistemas multifásicos são: espumas poliméricas ( composta por um polímero e uma carga gasosa ), blendas poliméricas ( materiais originários da mistura física de dois ou mais polímeros ) e polímeros carregados ( com uma carga sólida de várias formas geométricas ) ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

O enchimento, geralmente conhecido como carga, pode conferir ao sistema melhoria ou diminuição nos valores das propriedades, dependendo da forma e do tamanho das partículas e do grau de afinidade entre carga e polímero.

Um dos sistemas em que é possível estudar o comportamento de um polímero carregado são as suspensões .Neste tipo de sistema bifásico tem-se um fluido atuando como meio contínuo e uma fase sólida nele dispersa. As suspensões podem ser simples como a suspensão infinitamente diluída de partículas esféricas ou mais complexas como as suspensões concentradas de partículas não esféricas ( cilíndricas, elipsoidais ). O comportamento reológico dessas suspensões determinará suas aplicações ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

Visando melhor embasar o leitor, a seguir estão apresentados alguns conceitos e definições fundamentais à análise reológica dos materiais.

## **2.2 - CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA**

Os materiais podem ser classificados reologicamente em duas classes: sólidos e fluidos.

A classificação baseia-se na relação existente entre tensão e deformação, especialmente no tipo de deformação sofrida. Podem ser considerados sólidos os materiais

que exibem deformação elástica e/ou plástica, enquanto os fluidos exibem deformação viscosa ( NAVARRO, 1989; FOX, 1988 ).

Os sistemas poliméricos por sua vez exibem propriedades intermediárias às dos sólidos elásticos e fluidos viscosos, permitindo deformação contínua, porém , manifestando traços característicos de sólidos elásticos; ou seja, a recuperação parcial elástica após a remoção do esforço de cisalhamento aplicado. Entende-se por sólidos elásticos os materiais onde a tensão aplicada é diretamente proporcional à deformação sofrida, com o coeficiente de proporcionalidade chamado de módulo de elasticidade quando o material está sob tração e módulo de rigidez, quando sob cisalhamento. Por fluidos viscosos entende-se os materiais onde a tensão aplicada é diretamente proporcional à taxa de deformação ; sendo o coeficiente de proporcionalidade chamado de viscosidade ( NAVARRO,1989; MELO, 1995 ).

Os fluidos podem apresentar comportamento newtoniano ou não newtoniano.

Um fluido newtoniano, quando submetido ao cisalhamento, apresenta uma relação simples entre a tensão aplicada e a taxa de deformação. A taxa de deformação é diretamente proporcional à tensão imposta, sendo o coeficiente de proporcionalidade (  $\mu$  ) chamado de viscosidade; o qual independente do tempo e da velocidade de aplicação da força. Este coeficiente representa a resistência que o fluido oferecerá ao escoamento.

A lei de Newton expressa essa relação ( NAVARRO,1989 ):

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Onde:

\*  $\tau$  é a tensão de cisalhamento.

\*  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação.



\*  $\mu$  é a viscosidade.

Quando a viscosidade depende não apenas da pressão e temperatura, mas também da taxa de deformação, tempo e condições de fluxo, diz-se que este fluido é não newtoniano ( NAVARRO, 1989 ). As emulsões, suspensões de sólidos, polímeros em solução, e polímeros fundidos, geralmente apresentam comportamento não newtoniano, devido à complexidade das estruturas moleculares dos fluidos e da presença de partículas ( DEALY, 1982; MELO, 1995 ).

O comportamento reológico dos fluidos não newtoniano pode ser:

\* independente do tempo;

\* dependente do tempo e

\* viscoelástico.

### 2.2.1 - Independentes do Tempo

Os fluidos não newtonianos independentes do tempo, apresentam sua viscosidade dependente da taxa de deformação, a qual é função apenas da tensão de cisalhamento. Neste caso, a viscosidade deixa de ser uma constante e passa a ser uma função do material, sendo, então, denominada de viscosidade aparente ( $\mu_a$ ). Como apresentado nas equações abaixo.

$$\mu_a = \mu_a(\dot{\gamma}), \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma} = f(\tau). \quad (2.3)$$

Dentre aqueles que pertencem a esta categoria se destaca o fluido da potência de Ostwald-de-Waele, cuja equação reológica é a seguinte:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

Onde  $n$  representa o índice da potência, que é uma medida do grau de afastamento do fluido do comportamento newtoniano e  $K$  é o fator de proporcionalidade denominado índice de consistência.

Para esta classe de fluido o fator de proporcionalidade  $K$  atua de modo semelhante a viscosidade newtoniana, significando uma medida da resistência que o fluido oferecerá ao escoamento. Frequentemente, faz-se uso da viscosidade aparente ( relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação ) para diferenciar os fluidos não newtonianos dos newtonianos ( NAVARRO, 1989 ). Os fluidos newtonianos apresentam o seguinte modelo:

$$\mu_a = \mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Para os fluidos da Potência,

$$\mu_a = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.6)$$

Onde:

\*  $\mu_a$  é a viscosidade aparente.

Analisando o comportamento do fluido com base na Equação ( 2.6 ), pode-se concluir que:



Se  $n = 1$ , o fluido é newtoniano.

Se  $n < 1$ , o fluido é pseudoplástico e seu comportamento é caracterizado pela redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação.

Se  $n > 1$ , o fluido é dilatante e seu comportamento é caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação.

### **2.2.2 - Dependentes do Tempo**

Os fluidos não newtonianos dependentes do tempo, apresentam sua viscosidade aparente variando com o tempo de cisalhamento a uma taxa de deformação constante ( BRYDSON, 1970 ).

Os fluidos não newtonianos dependentes do tempo, podem ser:

\* tixotrópicos;

\* anti-tixotrópicos;

Os fluidos tixotrópicos apresentam uma viscosidade aparente que diminui com o tempo de aplicação, a uma taxa de deformação constante; e se deixados em repouso, após um determinado tempo recuperam suas propriedades reológicas iniciais ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

Os fluidos anti-tixotrópicos são aqueles que apresentam um aumento na viscosidade aparente, com o tempo de exposição a uma taxa de deformação constante ( NAVARRO, 1989 ).

### 2.2.3 - Viscoelásticos

Os materiais viscoelásticos apresentam propriedades intermediárias entre os líquidos e os sólidos. Esses materiais quando submetidos à ação de uma força externa não apresentam deformação instantânea, porém apresentam deformação parcialmente reversível ( BERLIN, 1986 ).

## 2.3 - COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS SUSPENSÕES

Existem uma ampla variedade de composições onde o polímero forma uma matriz contínua e as partículas sólidas encontram-se dispersas ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

A fase sólida da suspensão é de fundamental importância na determinação das propriedades reológicas. À medida que a concentração de fase sólida aumenta, aumenta também a probabilidade do surgimento de efeitos hidrodinâmicos que resultam na mudança do comportamento da suspensão, principalmente quando a concentração crítica é atingida ( ALVES, 1952 ).

A concentração crítica é definida como a concentração onde a suspensão muda de comportamento reológico ( NAVARRO & ALSINA, 1991 ).

A concentração de cargas não é o único fator responsável pelo surgimento dos efeitos hidrodinâmicos. As partículas sólidas, segundo BATCHELOR ( 1970 ), também influenciam nos efeitos hidrodinâmicos, dependendo:

\* da forma da partícula - partículas não esféricas tendem a uma orientação particular e independente, mesmo sob forma bastante simples de deformação.

\* do tamanho da partícula - para partículas muito pequenas, o movimento browniano torna-se insignificante e a orientação das partículas será anisotrópica.

\* da deformabilidade da partícula - partículas deformáveis poderão mudar de forma durante o escoamento, segundo a taxa de deformação aplicada.

\* do característica superficial - a tensão superficial nas vizinhanças das partículas do fluido, em conjunto com a elasticidade das partículas sólidas, produzem efeitos que dependem do tempo.

A incorporação de cargas particuladas provoca modificações nas propriedades reológicas dos fluidos, mesmo quando não há interação entre o meio de dispersão e as partículas sólidas ( NAVARRO, 1989 ).

Segundo Einstein, citado por NAVARRO e ALSINA ( 1991 ), quando a concentração de carga é bastante pequena, ao ponto de se evitar contato entre elas, o comportamento reológico será determinado pelo meio líquido, proporcionando um leve aumento na viscosidade do sistema, que será proporcional ao conteúdo volumétrico de cada carga existente na suspensão.

O estudo das suspensões envolve modelos matemáticos que são desenvolvidos para suspensões infinitamente diluídas e concentradas.

## **2.4 - SUSPENSÕES DILUÍDAS DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS**

Esse é o sistema mais simples que exhibe a influência da concentração de partículas sólidas em uma matriz polimérica, e é caracterizado pela ausência de interação entre as partículas e o meio de dispersão.

A solução clássica do problema da viscosidade, para suspensões infinitamente diluídas, foi proposta por Einstein em 1906 (VINOGRADOV & MALKIN, 1980; MOONEY, 1951; MILLS, 1971), na forma:

$$\eta_{\text{esp}} = 2,5 \cdot \phi \quad (2.7)$$

Sendo que:

$$\eta_{\text{esp}} = \frac{(\eta - \eta_s)}{\eta_s} \quad (2.8)$$

Onde:

$\eta_s$  é a viscosidade do meio de dispersão.

$\phi$  é a fração volumétrica da fase sólida.

$\eta_{\text{esp}}$  é a viscosidade específica.

$\eta$  é a viscosidade da suspensão.

A Equação (2.7), é aplicável quando o sistema em escoamento laminar satisfizer as seguintes condições:

1.- Inexistência de interação entre as partículas ( $\phi \ll 1$ ), e entre estas e o meio de dispersão.

2.- Formato esférico para as partículas que devem ser rígidas, o bastante para não serem deformadas durante o escoamento.



A aproximação estatística desenvolvida por Einstein em 1906, serviu de base para tratamentos teóricos de problemas análogos ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

## **2.5 - SUSPENSÕES DILUÍDAS DE PARTÍCULAS NÃO-ESFÉRICAS**

A análise teórica do comportamento de suspensões de partículas não-esféricas foi primeiro descrito por JEFREY ( 1976 ), e os resultados obtidos foram generalizados por Goldsmith and Mason ( 1981 ). O modelo mais simples de partículas não esféricas são as elipsoidais. A diferença principal existente entre os modelos de suspensões com partículas esféricas e elipsoidais, está na possibilidade do aparecimento de uma orientação preferencial do eixo principal sob escoamento das partículas elipsoidais. Como resultado surgem novos fenômenos hidrodinâmicos que são de grande importância na reologia de polímeros ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ). São eles:

- 1.- dependência da viscosidade aparente com a taxa de deformação;
- 2.- desenvolvimento de tensões normais ao plano de escoamento;
- 3.- dependência da viscosidade aparente com a geometria do escoamento, isto é, sob cisalhamento ou extensão.

O mecanismo geral de todos esses fenômenos consiste da rotação das partículas durante o escoamento, que são determinadas pela superposição de dois fatores ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ):

- 1.- orientação sob ação das forças mecânicas; e,
- 2.- a desorientação causada pelo movimento browniano.

Vários modelos foram propostos para determinar a viscosidade, abrangendo diversas formas de partículas.

Assim, conforme descrito por NAVARRO ( 1989 ), tem-se:

1.- para suspensões diluídas de fibras assimétricas ( NICODEMO & NICOLAIS, 1974 ) propuseram que:

$$\eta_{r0} = \exp( 8,52.\phi) \quad ( 2.9 )$$

Onde:

$\eta_{r0}$  = viscosidade relativa para a taxa de deformação zero.

2.- para suspensões diluídas de agregados, FEDORS ( 1975 ) propôs o seguinte modelo:

$$\eta_r = 1 + 1,25.\phi / (\phi_m - \phi)^2 \quad ( 2.10 )$$

Onde:

$\eta_r$  = viscosidade relativa.

$\phi$  é a fração volumétrica e,

$\phi_m$  é a fração volumétrica máxima.

3.- para suspensões diluídas de partículas não-esféricas ( do tipo elipsoidais e cilíndricas ), MILLS ( 1971 ) propôs a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \eta_r &= \eta_{esp} + 1 = \\ &= \exp \{ [ 2,5.\phi + 0,399.\phi.(p-1)^{1,48} ] / (1 - k.\phi) \} \end{aligned} \quad ( 2.11 )$$



para  $\phi < 0,01$ .

Onde:

**p** é uma constante.

**k** é uma constante que representa a influência da atividade da carga na variação da viscosidade da suspensão com a concentração da fase dispersa.

O conhecimento do comportamento reológico de suspensões diluídas de partículas não esféricas é de vital importância para processos tecnológicos avançados, principalmente na fabricação de novos materiais como compósitos poliméricos ( GRAHAM, A. L., 1980; NAVARRO, 1989 ).

## **2.6 - SUSPENSÕES CONCENTRADAS**

A passagem de um sistema de suspensão diluída para concentrada é acompanhada de modificações em seu comportamento reológico. Quando a quantidade de partículas sólidas dispersas é aumentada, surgem novos efeitos hidrodinâmicos, mesmo que não haja interação entre as partículas e o meio de dispersão. Isto pode estar relacionado ao fato das condições de fluxo de uma partícula, depender das condições das demais, pois a vizinhança das partículas alteram suas propriedades reológicas ( LIN, 1975 ).

## 2.6.1 - Suspensões Concentradas com Cargas Inertes

Numa suspensão polimérica, as cargas adicionadas ao sistema podem interagir diferentemente com o meio de dispersão. Caso não haja nenhuma interação físico-química entre as cargas e o meio de dispersão, as cargas são denominadas de cargas inertes.

A dificuldade de se medir a viscosidade de suspensões concentradas ou o comportamento destas sob cisalhamento, tem levado à produção de diversos modelos que, como regra geral, são extensões da equação de Einstein ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980; NAVARRO, 1989; MOONEY, 1951 ).

A expressão abaixo foi desenvolvida para as suspensões concentradas com cargas inertes; ela representa uma generalização da equação de Einstein.

$$\eta_{\text{esp}} = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \phi^n, \quad (2.12)$$

onde, para  $n = 1$  implica em  $A_1 = 2,5$ ; e a expressão acima se reduz à proposta por Einstein para suspensões diluídas de partículas esféricas, conforme visto anteriormente ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ). Os valores de  $A_n$  ( para  $n > 1$  ) são dados obtidos empiricamente, através da análise dos dados experimentais.

## 2.6.2 - Suspensões Concentradas com Cargas Ativas

Quando um sistema polimérico apresenta uma interação físico-química entre a carga e o meio de dispersão, a carga é denominada de carga ativa. Essa interação é responsável pela formação de uma superfície transiente entre a carga e o meio de dispersão. Esta superfície se encontra adsorvida nas partículas de carga, resultando num

aumento significativo do diâmetro efetivo da partícula, ( $2\alpha$ , onde  $\alpha$  é a espessura da camada) ( NAVARRO, 1989 ).

Com base na equação de Einstein, um modelo foi proposto para a determinação de sua viscosidade em Suspensões Concentradas com Cargas Ativas, ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

$$\eta = 2,5.[(1 + (6.\alpha/d)].\phi = k.\phi \quad (2.13)$$

Onde:

$\alpha$  é a espessura da camada;

d é o diâmetro da partícula; e

k é o coeficiente determinado experimentalmente e que relaciona a influência da atividade da carga, na variação da viscosidade da suspensão com a concentração da fase dispersa ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ). Logo:

$$\alpha = [(k - 2,5)/15].d \quad (2.14)$$

Este aumento no diâmetro da partícula acarretará num aumento do volume aparente do meio disperso. Como consequência, tem-se um aumento da influência do meio disperso na viscosidade do sistema; ou seja, à medida em que existe interação molecular do meio de dispersão com as partículas da carga o escoamento de um destes componentes passa a ser dependentes do escoamento do outro ( NAVARRO, 1989 ).

Como há forte interação entre as moléculas da fase sólida e as do meio de dispersão, o escoamento da fase líquida será impedido pelas partículas sólidas que apresentam maior resistência ao escoamento, possibilitando assim, um aumento na



viscosidade da suspensão, mais do que aumentaria se as partículas da fase sólida fossem inertes ( NAVARRO, 1989 ).

A atividade da carga não influencia apenas a viscosidade da suspensão. Diversos e inesperados fenômenos podem surgir em decorrência da atividade da carga, como por exemplo, a diminuição da viscosidade devido a formação de volume livre adicional na interface polímero/carga. Pode também ocorrer o surgimento de efeitos dependentes do tempo, decorrentes da formação de estruturas que não venham a resistir à ação de uma taxa de deformação constante, durante um certo tempo; ou mesmo que, com o cisalhamento, esta atividade se acentue, fazendo com que mais moléculas do solvente venham a se agregar às partículas da carga, aumentando, assim, a viscosidade da suspensão com o tempo, a uma taxa de cisalhamento constante ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ).

NAVARRO ( 1989 ) estudou o comportamento reológico da suspensão de alumina em polidimetilsiloxano, na taxa de deformação (  $1,0175 \leq \dot{\gamma} \leq 18,015 \text{ s}^{-1}$  ) à temperatura ambiente de 25°C e pressão atmosférica. As suspensões apresentaram comportamento newtoniano abaixo da concentração crítica e não newtoniano acima dela. Com base nos resultados obtidos, o autor propôs os seguintes modelos, que relacionam:

1.- A influência da concentração de alumina no índice da potência.

$$n = 1, \text{ para } C \leq C_c, \text{ e}$$

$$n = n_0 - A.C, \text{ para } C > C_c \quad ( 2.15 )$$

Onde:

$n_0$  é o índice de potência inicial, ou seja, é o valor de  $n$  para quando  $C = 0$ .

$C$  é a concentração de alumina em g/100ml.

$C_c$  é a concentração crítica em g/100ml.

A constante A é a inclinação da curva e representa a taxa de decaimento do índice da potência com o aumento da concentração, ou seja,

$$A = -dn / dC \quad (2.16)$$

2.- a influência da concentração de alumina no índice de consistência.

$$K = K_0 \exp ( B.C ), \quad (2.17)$$

onde:

$$K_0 = K, \text{ para } C = 0$$

B é a constante da equação que representa a sensibilidade de K ao aumento da concentração.

O autor propôs um modelo matemático para a tensão de cisalhamento considerando o efeito da concentração nos índices da potência e consistência. O modelo matemático proposto é uma extensão do modelo da potência proposto por Ostwald. Sendo então ( NAVARRO, 1989 ):

$$\tau = K_0 \cdot \exp(B.C) \cdot \gamma, \text{ para } C \leq C_c \quad (2.18)$$

$$\tau = K_0 \cdot \exp(B.C) \cdot \gamma^{(n_0-AC)}, \text{ para } C > C_c, \quad (2.19)$$

onde:

$K_0$  e  $n_0$  são os índices de consistência e da potência iniciais.



A e B são constantes de correlação característica do sistema.

LIMA ( 1993 ) estudou o comportamento de suspensão de alumina em um fluido Multigear EP, nas concentrações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 g de alumina / 100ml, na taxa de deformação entre (  $1,0175 \leq \dot{\gamma} \leq 3,72 \text{ s}^{-1}$  ) à temperatura ambiente de 25°C e pressão atmosférica.

As suspensões apresentaram comportamento newtoniano abaixo da concentração crítica e não-newtonianas, independentes do tempo e pseudoplásticas acima da concentração crítica.

LIMA ( 1993 ) propôs os seguintes modelos que relacionam:

1.- A influência da concentração de alumina no índice da potência.

$n = 1$ , para  $C = C_c$

$$n = n_0 \exp ( A.C ), \text{ para } C_c < C \leq 40\text{g} / 100\text{ml} \quad ( 2.20 )$$

$$n = n_i - B.C, \text{ para } C_c < C \leq 25\text{g} / 100\text{ml} \quad ( 2.21 )$$

Onde:

$n_0$  é o índice da potência inicial;

C é a concentração da fase sólida em g/100ml;

A, B,  $n_i$  são as constantes das equações ( 2.20 ) e ( 2.21 ).

2.- A influência da concentração de alumina no índice de consistência.

$$K = K_0 \exp ( B.C ), \text{ para } 5\text{g} / 100\text{ml} \leq C \leq 40\text{g} / 100\text{ml} \quad ( 2.22 )$$

Onde:

$K_0$  é o índice de consistência inicial.

A alumina utilizada por NAVARRO ( 1989 ) diferencia da utilizada por LIMA ( 1993 ) apenas em sua granulometria.

A Alumina utilizada por LIMA ( 1993 ) é a mesma utilizada neste trabalho; a análise granulométrica encontra-se descrita na seção Materiais e Métodos. A Alumina utilizada por NAVARRO ( 1989 ) apresenta a seguinte análise granulométrica:

Granulometria	Quantidade
0,044 mm	99%

### 2.6.3 - Efeito das Interações entre as Partículas

À medida que a concentração da fase sólida aumenta, aumenta a possibilidade de haver interações entre as partículas desta fase, podendo surgir agregados ou aglomerados os quais formam estruturas tridimensionais contínuas e isoladas no interior das suspensões ( LIN, 1975 ).

MOONEY ( 1950 ) estudou a viscosidade de suspensões concentradas de partículas esféricas e propôs um modelo, que considera a possibilidade de aglomeração como o principal agente da dependência da viscosidade de suspensões concentradas da fase dispersa, da forma:

$$\eta_r = \exp[2,5.\phi/(1 - k.\phi)] \quad (2.23)$$

Embora esta equação seja utilizada em alguns sistemas, ela não pode ser generalizada. Visando melhorar o modelo, MOONEY ( 1950 ) introduziu o conceito de máxima concentração possível das partículas dispersas numa suspensão sem que se formem aglomerados, ou seja, uma concentração crítica ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980; NAVARRO, 1989 ).

A concentração máxima é obtida de seguinte forma:

$$\phi_m = 2,5 \cdot \phi / [1 - (\phi / \phi^*)] \quad ( 2.24 )$$

onde  $\phi^*$  é uma constante.

Portanto, a fórmula de MOONEY ( 1950 ) adquire o seguinte modelo:

$$\begin{aligned} \eta_r &= \exp(1 + \phi_m) = \\ &= \exp\{1 + [2,5 \cdot \phi / (1 - \phi / \phi^*)]\} \end{aligned} \quad ( 2.25 )$$

Um exemplo típico de uma fórmula que considera a concentração máxima é a equação de Eilers em 1941 ( VINOGRADOV & MALKIN, 1980 ), que pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \eta_r &= [1 + (\phi_m / 2)]^2 = \\ &= \{1 + [1,25 \cdot \phi / (1 - \phi / \phi^*)]\}^2 \end{aligned} \quad ( 2.26 )$$

onde  $\eta_r$  é a viscosidade relativa.

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s} \quad ( 2.27 )$$

# **CAPÍTULO**

## **3**



### 3. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ESPECÍFICA

O estudo do comportamento reológico de sistemas simples e compostos é de grande interesse técnico e prático pois permite que se preveja determinados comportamentos e que, em função disto, regule-se equipamentos ou altere-se formulações de modo a adequar o desempenho destes produtos em condições de uso. O comportamento reológico de suspensões é particularmente interessante para as indústrias de tintas, venizes e fluidos para prospecção de petróleo. Assim, vários trabalhos vêm sendo realizados nesta área. Visando ilustrar as atividades desenvolvidas nesta área, a seguir alguns trabalhos serão sumarizados:

ERCOLI & BIBBÓ ( 1993 ) estudaram o comportamento de suspensões de poliisobutileno ( 8 e 10% em peso ) em querosene e, de fibras curtas de poliácridamida ( 1,7% em peso ) dispersas em água. As suspensões foram analisadas onde verificou-se a influência do comportamento da matriz sobre as propriedades da suspensão variando a fração volumétrica da fibra ( $\phi = 0,0143$ ;  $\phi = 0,0214$  e  $\phi = 0,0356$ ) e a taxa de deformação ( $0,1 < \dot{\gamma} < 2s^{-1}$ ). Com os valores obtidos para a viscosidade, concluíram que a reologia da suspensão é influenciada pela própria reologia do fluido não newtoniano, e que as propriedades das suspensões mostraram uma dependência com a taxa de deformação e concentração da carga.

CHIU & DON ( 1989 ) estudaram o efeito da granulometria da carga em suspensões de HTPB ( Polibutadieno com grupos terminais hidroxila ) e cloreto de sódio a uma concentração 60% em peso de NaCl. Foram investigadas três suspensões: uma com carga passante em malha #70, outra em malha #325 e uma outra com mistura ( 50/50 ) de



ambos os tamanhos de partículas ( #70 e #325 ). As medições reológicas foram analisadas num reômetro de cilindros concêntricos, a 35°C. A partir da análise dos parâmetros obtidos ( viscosidade, taxa de deformação e tempo de aglomeração ), concluiu-se que: o tempo característico de aglomeração é aproximadamente proporcional ao inverso da área superficial da partícula, e que, as suspensões analisadas ( com tamanhos de partículas de NaCl único e duplo ) apresentaram um comportamento pseudoplástico.

PAL, YAN & MASLIYAH ( 1991 ) estudaram o comportamento reológico de emulsões e suspensões. As suspensões estudadas eram formadas por óleo mineral ( Bayol-35 ) de comportamento newtoniano, e argila caulinita para três diferentes tamanhos de partículas. As medições reológicas foram efetuadas num viscosímetro de cilindro coaxial, onde, a partir dos dados obtidos, verificou-se que: para as três suspensões, o comportamento apresentado foi similar, isto é, para baixos valores de concentração de argilas as suspensões eram newtonianas, enquanto que para altos valores de concentração elas eram pseudoplásticas; para a concentração específica de 11,5% em volume, a suspensão com menor tamanho de partículas apresentou maior viscosidade que as demais. Esta diferença no comportamento reológico, segundo os pesquisadores, deve-se provavelmente à diferença no tamanho e distribuição das partículas.

LIN , LIU & CHU ( 1991 ) estudaram as propriedades reológicas de uma suspensão magnética Co-adsorvida de  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com poliuretano ( PU ), como agente aglutinador, e metil-etil-cetona ( MEK ) ou ciclohexanona ( CH ) como solventes. Um viscosímetro Haake RV 20 foi usado para medir a viscosidade da suspensão a partir da variação da concentração e temperatura. Baseado na análise dos valores medidos para a viscosidade, propôs-se um modelo que descreve adequadamente as propriedades reológicas da suspensão magnética estudado o qual é uma combinação dos modelos propostos por Casson e Bingham.

CHONG & BAER ( 1971 ) estudaram a dependência da viscosidade de suspensões altamente concentradas de contas de vidro de tamanho uniforme, e Poliisobutileno em função de a distribuição do tamanho das partículas usando um viscosímetro comum e outro de orifício. A partir da análise dos dados, propuseram uma equação empírica, a qual correlaciona a viscosidade relativa das suspensões como função de concentrações sólidas e distribuição do tamanho das partículas. Para partículas esféricas de tamanho uniforme, a equação proposta se reduz à equação de Einstein para concentrações de suspensões diluídas. Observaram também que a viscosidade relativa de sistemas monodispersos são independentes do tamanho da partícula, e da temperatura, sendo função apenas da concentração das partículas.

HAN & LEN ( 1983 ) estudaram o efeito do tamanho e tratamento superficial do carbonato de cálcio no comportamento reológico da resina de poliéster insaturado. O comportamento da suspensão foi analisado para baixas tensões e baixas taxas de deformação (  $100\text{s}^{-1}$  ). Neste trabalho, concluiu-se que as suspensões que tinham partículas menores apresentaram viscosidade superior às que continham partículas maiores. E ainda, que a resina contendo partículas de carbonato de cálcio tratada apresenta viscosidade maior que a contendo carbonato de cálcio sem tratamento, para baixas tensões de cisalhamento.

NAVARRO & ALSINA ( 1991 ) estudaram o comportamento reológico de suspensões de polidimetilsiloxano e alumina. As medições reológicas foram efetuadas num viscosímetro Brookfield, com concentrações de alumina variando de 0 a 20 g/100ml. Com os parâmetros analisados: o índice da potência, o índice de consistência, viscosidade aparente e a curva de fluxo, pôde-se concluir que as suspensões apresentaram um comportamento newtoniano até uma concentração, denominada de concentração crítica, onde, acima dela, o fluido tem comportamento pseudoplástico.



NAVARRO & ALSINA ( 1991 ) estudaram a dependência com o tempo das propriedades reológicas das suspensões de alumina e polidimetilsiloxano. Neste trabalho foram analisados os efeitos da concentração de alumina na relação torque-tempo, e a influência da taxa de deformação no tempo de estabilização. As suspensões apresentaram comportamento anti-tixotrópico possuindo um coeficiente  $\beta$  ( que quantifica o caráter anti-tixotrópico na suspensão ) mais acentuado nas baixas taxas de deformação. O tempo de estabilização e viscosidade aparente apresentaram uma diminuição com o aumento da taxa de deformação.

LIMA et al. ( 1993 ) estudaram o comportamento reológico de suspensões de fluido MULTIGEAR-alumina em concentrações que vão de 5 a 40 g/100ml. As medições reológicas foram efetuadas num viscosímetro Brookfield. As suspensões estudadas apresentaram uma mudança de comportamento evidenciada ao atingir a concentração crítica, onde, abaixo dela, a suspensão apresenta um comportamento newtoniano e, acima, pseudoplástico na faixa de cisalhamento aplicada. Observou-se ainda que o índice da potência permanece igual a 1 até atingir a concentração crítica, onde, acima dela, o índice decresce exponencialmente com o aumento da concentração. Com base nos dados experimentais foi proposto um modelo que expressa o comportamento da variação do índice da potência e o índice de consistência com a concentração.

ILC, V. & PHAN-THIEN, N. ( 1994 ) estudaram o efeito da forma e tamanho das partículas em suspensões de poliestireno/polidimetilsiloxano. Os dados foram analisados com base nos experimentos radiográficos e pelo método de indutância. Os resultados obtidos a partir dos métodos utilizados mostraram significativa melhora frente aos resultados obtidos com os diversos métodos já existentes. Com isso, pôde-se perceber que o método da indutância apresenta-se como alternativa viável frente à técnica radiográfica.

CHENG, D. C. H. & RICHMOND, R. A. ( 1978 ) estudaram o comportamento reológico de suspensões densas saturadas e insaturadas, onde a concentração das

partículas sólidas excede os 60%. As suspensões são formadas por partículas completamente porosas dispersas numa fase líquida. As amostras são formadas por concentrações minerais, carvão e pasta de óleo. Foram analisadas a viscosidade, o tamanho das partículas e o efeito da concentração de carga na suspensão; rendendo conhecimentos novos acerca do comportamento das suspensões granulo-viscosas.

COUSSOT, P. & PIAU, J. M. ( 1994 ) estudaram o comportamento reológico de suspensões formadas por lama constituída por argila/água. Foram estudados a influência do método de preparação no comportamento da suspensão, o efeito da distribuição e do tamanho das argila. O estudo feito frente aos parâmetros - temperatura, pH, concentração eletrolítica, concentração sólida e tipo de argila, mostrou que a lama apresenta uma sensibilidade muito significativa frente a esses parâmetros. Foi sugerido uma explanação física do modelo de Herschel-Buttley para as observações das mudanças do comportamento quando da variação de alguns dos parâmetros. O estudo reológico dessas suspensões são de grande interesse industrial e da engenharia civil, devido a sua grande aplicação.

# **CAPÍTULO**

# **4**



## 4. - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentados os materiais empregados, suas características e os métodos utilizados descritos em detalhes.

### 4.2 - MATERIAIS

Para a obtenção das suspensões foram utilizados o poliéster como o meio de dispersão e a alumina como a fase dispersa.

#### 4.2.1 - Poliéster

Os poliésteres são resinas que possuem grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares. Resultando da reação de condensação de um diálcool com um diácido, podendo ser saturado produzindo poliésteres termoplásticos, ou insaturados produzindo poliésteres termofixos ( BLASS, 1988 ).

Os poliésteres saturados tem moléculas longas e lineares, não são sujeitas a reação de reticulação, podendo ser encontradas em formas de fibras e de filmes. As fibras são conhecidas comercialmente como *TERYLENE* ( ICI ) e *DACRON* ( Du Pont ), e apresentam extraordinária resistência mecânica e ao amassamento, enquanto que os filmes

conhecidos comercialmente por MYLAR, são uma das películas mais resistentes que se conhece ( BLASS, 1988 ).

Também se encontram nessa classificação as resinas alquídicas, que são usadas para revestimento e compostos de moldagem. As resinas são obtidas a partir do ácido ortoftálico, podendo apresentar-se como termoplásticos ou termofixos. Estes poliésteres encontram grande aplicação nas indústrias de tintas e vernizes.

Os poliésteres insaturados obtidos a partir de ácidos insaturados ( ácido cismaleico e fumárico ), são distribuídos como resinas líquidas ( pré-polímeros ) que em reações posteriores polimerizam e geralmente levam à polímeros termofixos.

Os poliésteres insaturados obtidos a partir de álcoois insaturados ( álcool alílico ), são termofixos não cristalinos e transparentes, resistente à abrasão, apresentando pouca contração após a cura.

A resina de poliéster utilizada neste trabalho, identificada por Alpolit LP 8121, foi fornecida pela Hoechst do Nordeste. É uma resina ortoftálica, insaturada, dissolvida em estireno e pertencente aos tipos semi-reativos rígidos-elásticos, que apresenta as seguintes propriedades à 20°C:

\* densidade = 1,12 - 1,14 g/ml;

\* viscosidade = 500 - 700 mPa.s.

Esta resina encontra grande aplicação na fabricação de peças reforçadas com fibra de vidro, pelo processo de injeção, e quando curada sem reforço apresenta as seguintes propriedades:

### a) Propriedades Mecânicas

	Método de Ensaio	Valor
Resistência ao Impacto (KJ/m <sup>2</sup> )	DIN 53453	5,0
Alongamento de Ruptura (%)	DIN 53455	2,5
Resistência à Tração (N/mm <sup>2</sup> )	DIN 53455	50,0
Módulo de Elasticidade na flexão (N/mm <sup>2</sup> )	DIN 53457	3600,0
Resistência à Flexão (N/mm <sup>2</sup> )	DIN 53452	85,0

### b) Propriedades Térmicas

	Método de Ensaio	Valor
Contração na Cura (%)	DIN 16946	Ca.7
Coef. de Dilatação Linear, 0-70 C (K <sup>-1</sup> )	VDE 0304	110.10 <sup>-6</sup>
Condutividade Térmica (W/mK)	DIN 52612	0,17
Temperatura de transição Vítreia (C)	DIN 53445	90,0
Distorção Térmica Segundo ISO/R75	DIN 53461	70,0

### c) Propriedades Elétricas

	Método de Ensaio	Valor
Resistência Específica (0hm.cm)	DIN 53482	$10^{15}$
Resistência Superficial (0hm)	DIN 53482	$10^{13}$
Fator de Perda Dielétrica a $10^6$ Hz	DIN 53483	0,045
Constante Dielétrica Relativa a $10^6$ Hz	DIN 53483	3,15

### 4.2.2 - Alumina

A alumina hidratada, conhecida quimicamente como hidróxido de alumínio  $Al(OH)_3$ , é um produto micronizado e extremamente fino. Encontra grande aplicação como carga reforçante, sendo bastante utilizada em pigmentos, ceras e borrachas.

A alumina utilizada foi fornecida pela Alcoa e identificada por alumina-710, cuja análise química está sumarizada abaixo:

Componente	Quantidade
$Al_2O_3$	64,5 % em peso
$SiO_2$	0,02% em peso
$Fe_2O_3$	0,018% em peso
$Na_2O$	0,30% em peso
Perda ao Fogo de 300 a 1000 C	35% em peso



Segundo o fornecedor, a alumina apresenta a seguinte análise granulométrica.

<b>Granulometria</b>	<b>Quantidade</b>
+22 microns	0 - 1 %
+7,8 microns	32 - 45 %
+3,9 microns	62 - 70 %
+ 1,9 microns	45 - 97 %

### **4.3 - EQUIPAMENTOS**

Todo o procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Engenharia de Materiais da UFPB com os seguintes equipamentos:

1. Balança de Precisão 0,01g, máx 200g, modelo Sartorius 2462.
2. Agitador mecânico Fitason 711, com velocidade controlada na faixa de 250 a 1600 rpm.
3. Viscosímetro Brookfield - RVT, fabricado por Brookfield Engineering Laboratorius, Inc., E.U.A.

## 4.4 - MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho foi a mesma descrita por NAVARRO ( 1989 ). O método consiste em duas etapas: preparação da suspensão e medição das propriedades.

### 4.4.1 - Preparação da Suspensão

As suspensões foram preparadas em um becker de 600ml. Nele foram adicionados 400ml da resina de poliéster e alumina, em concentrações que variaram de 5 a 25g de alumina / 100ml de poliéster. As suspensões foram agitadas com um bastão e deixadas em repouso por 24 horas. Após o período de repouso, as suspensões foram agitadas com agitador mecânico numa velocidade de 300 rpm por 5 minutos, e as medições reológicas, imediatamente realizadas no viscosímetro Brookfield.

As demais suspensões, de concentrações mais elevadas, foram preparadas por adição de carga à suspensão original ( 5g de alumina / 100 ml de poliéster ) seguida de agitação, repouso, agitação e medição de propriedades, conforme descrito acima.

### 4.4.2 - Medição das Propriedades Reológicas

As leituras foram efetuadas no viscosímetro Brookfield, seguindo os manuais "*Operating Instructions*" e "*More Solutions To Stick Problems*" ( BROOKFIELD, 1980 ), fornecidos pelo fabricante. As medições foram realizadas à temperatura ambiente e pressão atmosférica.

### a) Dependência com o Tempo

Nesta etapa, analisou-se a resposta viscosa da suspensão com a variação da velocidade de teste. As leituras foram efetuadas com a velocidade variando de 0,5 rpm até uma velocidade máxima, onde foi possível efetuar a leitura com a escala empregada, com intervalos de 2 minutos entre as leituras, sem o desligamento do viscosímetro. Quando a velocidade máxima de 5 rpm foi atingida a leitura foi efetuada. Assim também, de forma inversa até atingir novamente a velocidade inicial de 0,5 rpm.

### b) Tensão de Cisalhamento ( $\tau$ )

A tensão de cisalhamento em Pascal é obtida multiplicando o valor da leitura ( $L_i$ ) pelo fator correspondente ao spindle ( $K_C$ ) utilizado (MITISCHKA, 1982).

$$\tau_i = K_C \cdot L_i \quad (4.1)$$

Onde:

$K_C$  é o fator da taxa de deformação ( $s^{-1}$ ) e

$L_i$  é a leitura do viscosímetro.

Para o spindle 1,  $K_C = 0,035$  Pa (Conforme Tabela 1). Sendo assim, temos:

$$\tau_i = 0,035 L_i \quad (4.2)$$

### c) Índice da Potência ( n )

O índice da potência é determinado com os valores das leituras (  $L_i$  ) e das velocidades (  $V_i$  ). Para isso, foi feita uma regressão linear do tipo  $y = a.x + b$ , com as coordenadas acima mencionadas, da forma (  $\log L_i$  ,  $\log V_i$  ). Se for uma reta, o índice da potência é o coeficiente **a** da regressão linear. Se a correlação  $r$  for próximo de 1, a relação "log V versus log L" é linear e o coeficiente **a** de regressão linear será o índice da potência. Se a relação não for linear, o valor de  $n$  obtido por:

$$n_i = d \log(0,035L_i) / d \log V_i \quad (4.3)$$

Onde  $V_i$  é a velocidade de teste ( rpm ).

### d) Taxa de Deformação ( $\gamma$ )

O valor da taxa de deformação (  $\gamma$  ) é determinado multiplicando o fator  $K_t$  (  $n$  ) ( Tabela 1, em anexo ) pela velocidade de teste aplicada (  $V_i$  ) ( MITSCHKA, 1982 ).

$$\gamma = K_t ( n ). V_i \quad (4.4)$$

Onde  $K_t$  é o fator de cisalhamento ( Pa )

Para cada valor do par (  $n, K_c$  ), existe um valor correspondente para para  $K_t$  (  $n$  ), como mostra a tabela 1.



### e) Viscosidade Aparente ( $\mu_a$ )

A viscosidade Aparente, em Pa.s, é determinada pelo quociente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.5)$$

### f) Índice de Consistência ( K )

O índice de consistência ( K ) está relacionado com a viscosidade, quanto mais alto o valor de K, mais viscoso é o fluido. O índice de consistência é determinado por ( NAVARRO, 1989 ):

Da regressão linear para obtenção do índice da potência ( n ), tem-se:

$$\log L = b + n \cdot \log V \quad (4.6)$$

Onde b é o termo independente da regressão linear.

Pela lei da potência, temos:

$$\log \tau = \log K + n \cdot \log \dot{\gamma} \quad (4.7)$$

Segundo MITSCHKA, as Equações ( 4.1 ) e ( 4.4 ) foram substituídas em ( 4.7 ), resultando em:

$$\log(L.K_c) = \log K + n.\log(K_t.V) \quad (4.8)$$

ou seja,

$$\log L = \log(K.K_t^n/K_c) + n.\log V \quad (4.9)$$

Fazendo uma comparação entre as Equações ( 4.9 ) e ( 4.6 ), obtem-se:

$$\log(K.K_t^n/K_c) = b \quad (4.10)$$

ou então,

$$K = 10^b . K_c / K_t^n \quad (4.11)$$

onde: **b** é o valor independente da regressão linear obtido na determinação do índice da potência .

# **CAPÍTULO**

# **5**

## **5. - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 - INTRODUÇÃO**

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho onde as propriedades reológicas de suspensões de alumina e poliéster, foram investigadas tomando por base os seguintes parâmetros: dependência da tensão de cisalhamento e da viscosidade com o tempo; variação da viscosidade aparente; índice da potência e índice de consistência das suspensões com a concentração de alumina; e, finalmente, análise das curvas de fluxo.

Os dados experimentais obtidos encontram-se nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 em anexo.

### **5.2.- DEPENDÊNCIA COM O TEMPO**

Quando se trata de suspensões cujo meio de dispersão é newtoniano, deve ser feito um estudo para averiguar a existência ou não de comportamentos dependentes do tempo. Este estudo tem por objetivo confirmar se a agitação feita antes dos testes reológicos foi satisfatória, ou seja, se houve uma perfeita dispersão das partículas sólidas no meio de dispersão.



Nas Figuras de 01 a 06 (apresentadas a seguir e em Anexo), encontram-se mostrados os dados experimentais para as curvas de leituras ascendentes e descendentes realizadas para todos os sistemas estudados: poliéster puro e as suspensões de alumina com 5, 10, 15, 20 e 25g / 100ml. Como pode ser verificado nestas figuras, todos os sistemas estudados apresentam-se independentes do tempo dentro da faixa de cisalhamento utilizada. Este mesmo comportamento foi verificado por LIMA (1993) em suspensões de alumina em fluido multigear. Esta independência é caracterizada pela igualdade de formato e de valores das curvas ascendentes e descendentes de cada composição estudada, indicando que a adição de alumina não provocou o surgimento de comportamentos dependentes do tempo como tixotropia ou anti-tixotropia, os quais são caracterizados por uma separação bastante visível entre as curvas acendentes e descendentes, gerando uma curva de histerese.

Comportamentos independentes do tempo em baixas taxas de deformação e em elevadas concentrações de carga como nos casos de 20 e 25g / 100ml, embora não muito frequentes, indicam que a agitação prévia à 300 rpm durante 5 minutos foi suficiente para dispersar bem as partículas, evitando ou destruindo possíveis aglomerações de partículas, as quais são as principais causadoras de comportamentos dependentes do tempo. Além da eficiência da agitação prévia, é possível que diferentemente do comportamento verificado para partículas de alumina suspensas em polidimetilsiloxano estudada por NAVARRO (1989), as partículas de alumina não apresentem tendência à aglomeração quando dispersa em poliéster.

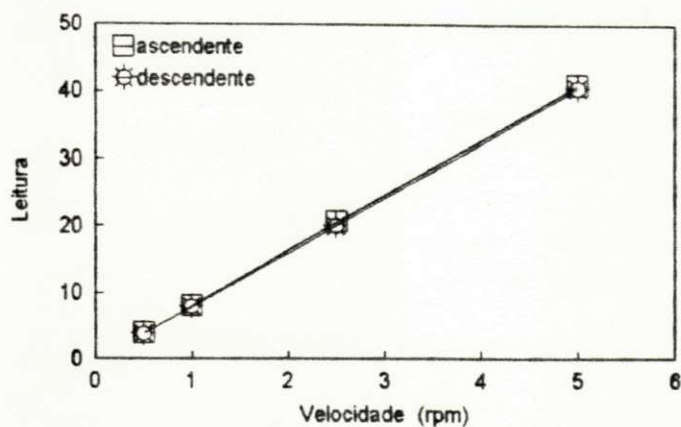


Figura 01: Curva de leitura ascendente e leitura descendente do poliéster puro em função da velocidade

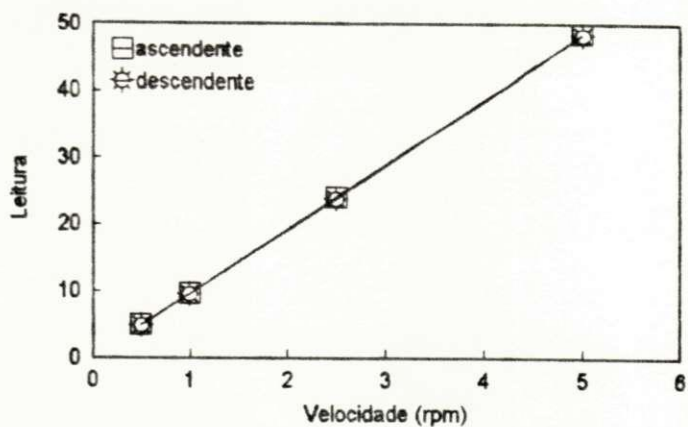


Figura 02 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 5g de alumina /100ml de poliéster

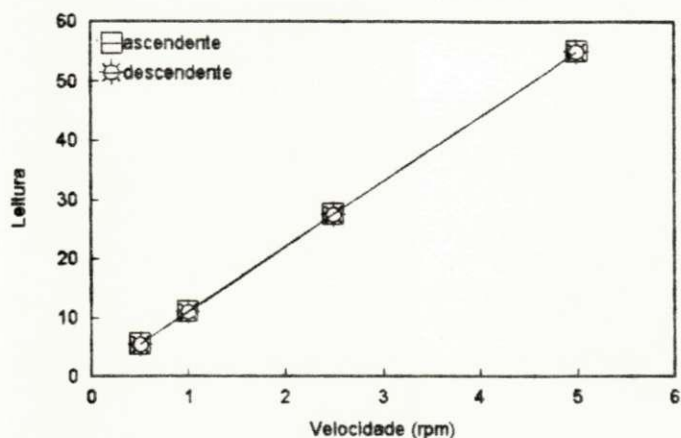


Figura 03 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 10g de alumina/100ml de poliéster

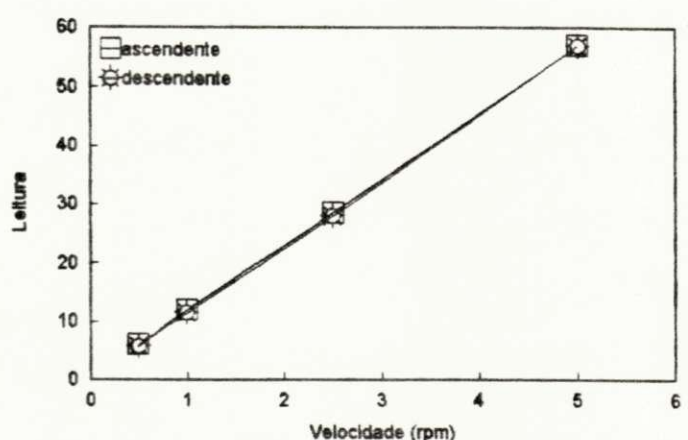


Figura 04 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 15g de alumina/100ml de poliéster

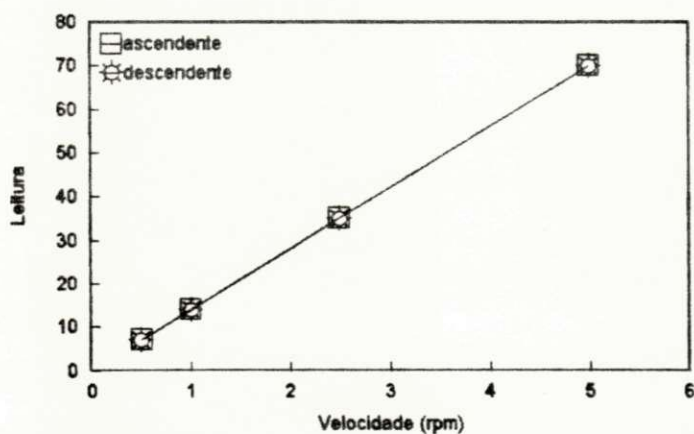


Figura 05 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 20g de alumina /100ml de poliéster

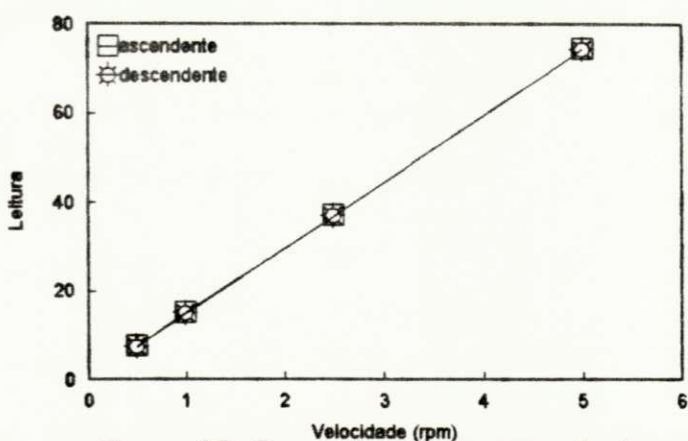


Figura 06: Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 25g de alumina/100ml de poliéster



### 5.3.- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA

Como pode ser observado na Figura 07 ( página 63 ), a dependência da viscosidade aparente,  $\mu_a$ , com a concentração de alumina,  $C$ , é caracterizada por um aumento gradativo da viscosidade aparente com o aumento do teor de alumina para concentrações na faixa de 0 a 25g / 100ml. Não foi verificada, para nenhuma das taxas de deformação utilizadas neste estudo, a ocorrência de uma descontinuidade ou aumento brusco da viscosidade aparente com a concentração a partir de uma dada taxa de deformação. Dessa forma e sob o aspecto da reologia de suspensões, não se atingiu a concentração crítica neste sistema, ou seja, todas as suspensões analisadas podem ser caracterizadas como diluídas ou semi-concentradas.

Não obstante a dependência da viscosidade aparente das suspensões com a concentração de alumina, verificadas em trabalhos anteriores, por NAVARRO ( 1989 ) e LIMA ( 1993 ), tenha sido caracterizada pelo formato exponencial, principalmente em baixas taxas de deformação, neste trabalho, o formato geral da dependência da viscosidade aparente com a concentração de alumina é linear.

Sendo assim, é provável que nos demais sistemas anteriormente estudados por NAVARRO ( 1989 ) e LIMA ( 1993 ), a curva de dependência da viscosidade aparente com a concentração  $\mu_a ( C )$  seja composta de dois segmentos: um linear ou aproximadamente linear até a concentração crítica e outro exponencial após este valor, o que reforçaria o caráter perturbador dos aglomerados de partículas que surgem a partir da concentração crítica.

Para o presente caso onde a variação da viscosidade aparente com a concentração  $\mu_a ( C )$  é aproximadamente linear é lícito propor um modelo no formato da Equação ( 5.1 ) para descrever este comportamento.

$$\mu_{as} ( C ) = \mu_0 + a C \quad ( 5.1 )$$

onde:

$\mu_{as}$  é a viscosidade aparente da suspensão ( Pa.s ).

$\mu_0$  é a viscosidade aparente do meio de dispersão ( Pa.s ).

$a$  é a constante de acentuação do efeito da concentração ( Pa.s.100ml/g )

Aplicando-se a regressão linear sobre as curvas da dependência da viscosidade aparente com a concentração  $\mu_a ( C )$ , chega-se aos seguintes valores para  $\mu_0$  e  $a$ .

$$\mu_0 = 0,814 ( Pa.s )$$

$$a = 0,0274 ( Pa.s.100ml/g )$$

$$\text{Portanto, } \mu_{as} = 0,814 + 0,0274.C \quad ( 5.2 )$$

#### 5.4.- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE APARENTE COM A TAXA DE DEFORMAÇÃO

É interessante notar na Figura 07, que além de apresentarem a mesma dependência para viscosidade aparente da suspensão com a concentração  $\mu_a ( C )$ , as suspensões analisadas produziram essencialmente o mesmo valor para o par (  $\mu_a, C$  ) em cada taxa de deformação,  $\dot{\gamma}$ , utilizada, indicando que a taxa de deformação não influi na variação da viscosidade aparente com a concentração.

O comportamento acima mencionado pode ser melhor visualizado na Figura 08, que representa a variação da viscosidade aparente das suspensões estudadas com as



taxas de deformação utilizadas. Neste diagrama o caráter newtoniano tanto do meio de dispersão quanto das suspensões é evidenciado pela não variação da viscosidade aparente das suspensões com o aumento na taxa de deformação, ou seja,

$$\mu_{as} \neq \mu_{as}(\dot{\gamma})$$

### 5.5.- VARIAÇÃO DO ÍNDICE DA POTÊNCIA COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA

Os comportamentos mostrados nas Figuras 07 e 08 são confirmados pelo que é mostrado na Figura 09. Neste diagrama vê-se claramente que o índice da potência,  $n$ , permanece constante e igual a 1,0 ao longo da faixa de concentração utilizada neste estudo, ou seja, além do poliéster, todas as suspensões, na faixa de cisalhamento utilizadas, são newtonianas.

### 5.6.- VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA COM A CONCENTRAÇÃO DE ALUMINA

Analisando a Figura 10, observa-se que o índice de consistência e a viscosidade aparente aumentam com o aumento da concentração de alumina em todas as concentrações estudadas. Isto é o esperado, pois:

$$\mu_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (5.3)$$

e, pelo modelo da potência, tem-se:

$$K = \tau / \dot{\gamma}^n \quad (5.4)$$

Então,  $K = \mu_a \cdot \dot{\gamma}^{1-n}$ ; quando  $n = 1 \Rightarrow K = \mu_a = \mu$ ; onde  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade proposto por Newton.

Como o comportamento da curva do índice de consistência com a concentração de alumina é aproximadamente linear, é possível propor um modelo do formato da equação abaixo.

$$K = K_0 + a.C \quad (5.5)$$

onde  $K_0$  é o índice de consistência do meio de dispersão (Pa.s); e  $a$  é a constante de acentuação do efeito da concentração (Pa.s 100ml/l).

Aplicando-se a regressão linear sobre as curvas da dependência do índice de consistência com a concentração, chega-se aos seguintes valores para  $K_0$  e  $a$ .

$$K_0 = 0,81 \text{ (Pa.s)}$$

$$a = 0,028 \text{ (Pa.s.100ml/l)}$$

Portanto, a equação reológica da suspensão estudada da variação do índice com a concentração, tem a seguinte forma:

$$K = 0,81 + 0,028.C \quad (5.6)$$

a qual comprova a hipótese de que  $K = \mu_a = \mu = 0,81$  (Pa.s) para o meio de dispersão (ver equação 5.2).

## 5.7.- VARIAÇÃO DA CURVA DE FLUXO COM A CONCENTRAÇÃO

Como pode ser observado na Figura 11, as curvas de fluxo com os valores calculados apresentam comportamento linear; ou seja, a relação existente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear. Portanto, o poliéster puro e as suspensões de poliéster-alumina apresentam comportamento newtoniano em todas as concentrações estudadas de 5 a 25 g/100ml. Estas curvas de fluxo confirmam o que já foi observado na Figura 09, em que o índice da potência permanece constante e igual a 1 para quase todas as concentrações estudadas

## 5.8.- DESENVOLVIMENTO DO MODELO REOLÓGICO

Os sistemas formados pelas dispersões de alumina em poliéster não obedecem aos modelos reológicos propostos em trabalhos anteriores, por NAVARRO ( 1989 ) e LIMA ( 1993 ), onde a alumina é usada como fase dispersa. Isto se deve a um comportamento peculiar caracterizado por uma dependência exclusiva da viscosidade aparente com a concentração e, provavelmente pressão e temperatura.

Desta forma, para se prever o comportamento dos sistemas usados neste trabalho, em regimes de diferentes tensão de cisalhamento e taxa de deformação dos utilizados no presente trabalho, torna-se necessário o desenvolvimento de um modelo reológico (equação constitutiva) adequada.

De acordo com a Equação ( 5.1 ), reapresentada abaixo,

$$\mu_{as} = \mu_o + a.C$$



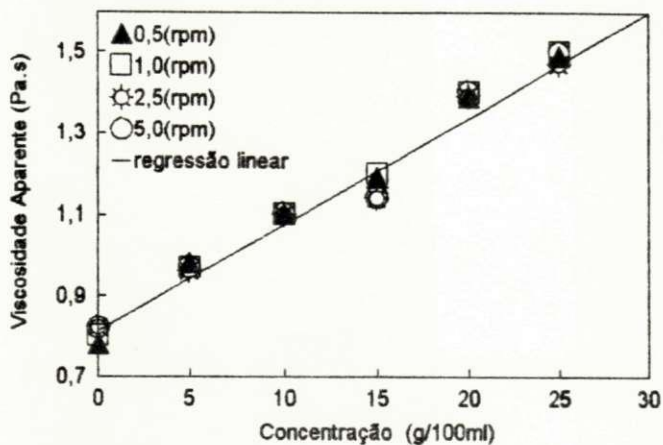


Figura 07: Influência da concentração de alumina na viscosidade aparente da suspensão de poliéster - alumina

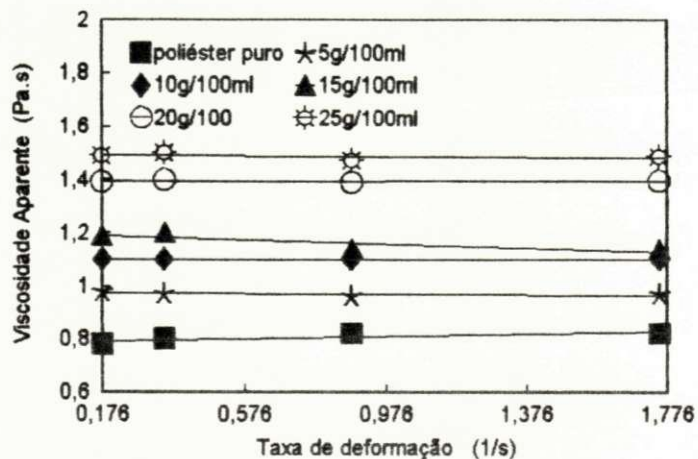


Figura 08: Variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação da suspensão de alumina-poliéster

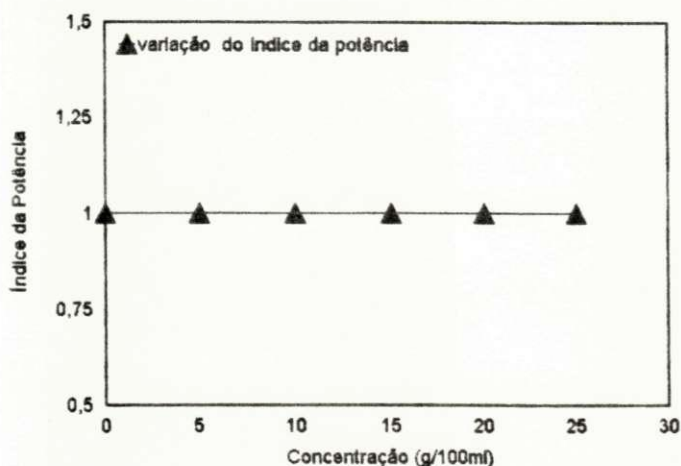


Figura 09: Influência da concentração de alumina no índice da potência da suspensão de poliéster - alumina

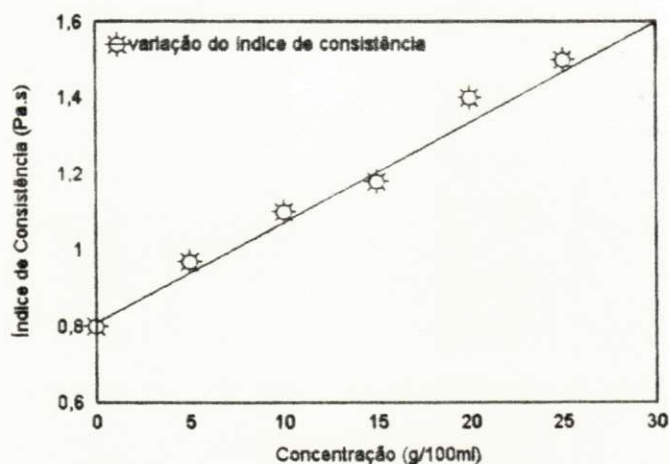


Figura 10: Variação do índice de consistência com a concentração de alumina da suspensão de poliéster - alumina

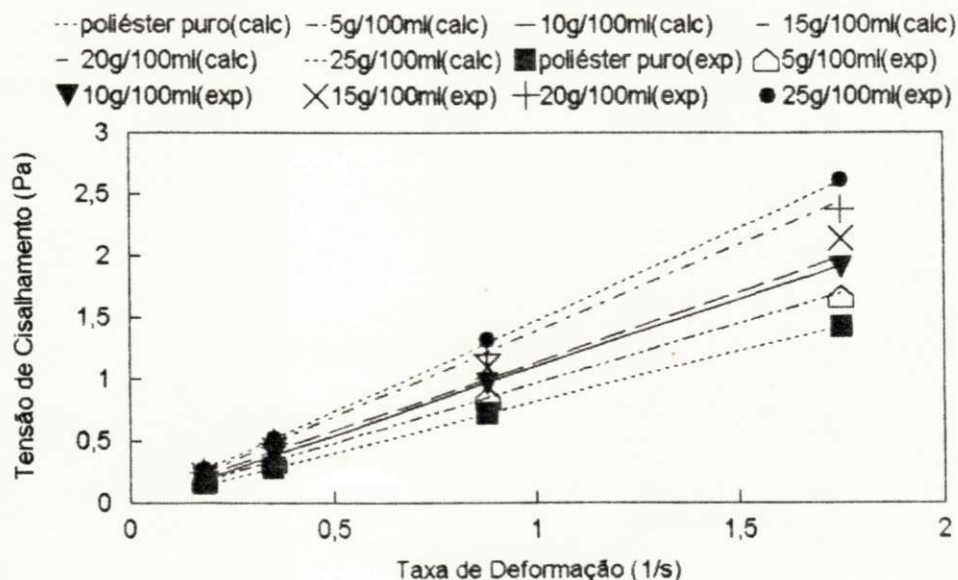


Figura 11: Curvas de fluxo da suspensão de poliéster - alumina



e, como para sistemas newtonianos

$$\mu_{as} = \mu = \tau / \dot{\gamma},$$

o modelo reológico mais provável e adequado para descrever o comportamento reológico do sistema em pauta seria o seguinte:

$$\tau = (\mu_0 + a.C).\dot{\gamma} \quad (5.7)$$

Como:

$$\mu_0 = 0,814 \text{ Pa.s}$$

$$a = 0,0274 \text{ Pa.s.100ml/l,}$$

a equação reológica para o sistema estudado passa a ser a seguinte:

$$\tau = (0,814 + 0,0274.C).\dot{\gamma} \quad (5.8)$$

Na Figura 11 é possível observar os pontos experimentais para a curva de fluxo dos sistemas utilizados, associados às respectivas curvas calculadas teoricamente obtidas a partir da equação acima. Como pode ser visto, a equação utilizada se ajusta com boa precisão aos dados experimentais, mantendo a característica básica das curvas de fluxo das suspensões.

A separação entre as curvas é produto da diferença de viscosidade de cada suspensão com diferente concentração de alumina.

# **CAPÍTULO**

# **6**

## 6. - CONCLUSÃO

1. - O poliéster puro e as suspensões de alumina/poliéster de 5, 10, 15, 20 e 25 g/100ml não apresentam propriedades de fluxo ( escoamento ) dependentes do tempo.

2. - A relação existente entre a viscosidade aparente e a concentração de alumina é linear, o qual é atribuído ao fato de a suspensão não ter atingido a concentração crítica, mesmo em altas concentrações de alumina.

3. - A taxa de deformação não influi na variação da viscosidade aparente com a concentração.

4. - As curvas de fluxo do poliéster puro e das suspensões nas concentrações estudadas são lineares, caracterizando um comportamento newtoniano.

5. - O modelo matemático proposto correlaciona bem os dados experimentais.

6. -No presente trabalho, mesmo o meio de dispersão sendo muito mais viscoso do que os utilizados anteriormente por NAVARRO ( 1989 ) e LIMA ( 1993 ), numa faixa de 0 a 25 g/100ml, não se verificou a ocorrência de aglomeração de partículas e, por conseguinte, de concentração crítica. Desta forma, o fator viscosidade do meio de dispersão deve ser definitivamente afastado daqueles que poderiam contribuir para o surgimento da concentração crítica da fase dispersa.

# **CAPÍTULO**

# **7**



## 7. - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. - Estudar o mesmo sistema de suspensão poliéster/alumina em temperaturas diferentes.
2. - Estudar o comportamento reológico do sistema poliéster/alumina após diferentes tempos de homogeneização.
3. - Estudar a influência do tempo de envelhecimento da resina de poliéster nas suspensões poliéster/alumina, analisando suas propriedades reológicas.
4. - Estudar o comportamento reológico do sistema poliéster/alumina, com a alumina tratada por diferentes agentes de acoplamento.
5. - Estudar o sistema em concentrações elevadas, a partir de 30 g/100ml.

## 8. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. E., **Pipe-Line Design for Non-Newtonian Solutions and Suspensions**, Chem. Eng. Prog., n. 8, p. 385-393, 1952.

BAIJAL, M. D. ( editor ), **Plastics Polymer Science and Technology**, J. Willey and Sons, New York, 1982.

BATCHELOR, G. K., **Suspensions Mechanics, Proc. of the 1970. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute**, Stanfor University Press, Montrey, 1970.

BERLIN, A. A., **Principles of Polymer Composites**, Spring Verlag, East Berlin, 1986.

BILLMEYER, F. W., **Ciência de los Polímeros**, 2ª Edición, Editora Reverté, S. A., España, 1978.

BLASS, A., **Processamento de Polímeros**, 2ª Edição, Editora da UFSC, Santa Catarina , Brasil, 1988.

BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES INC., **More Solutions to Sticky Problems**, Stoughton, 1980.

BROOKFIELD DIAL READING VISCOMETER, **Operating Instruction**, Stoughton, 1980.

- BRYDON, J. A., **Flow Properties of Polymer Melts**, Iliffe Books, London, 1970.
- BUDTOVA, T. V.; BUDTOV, V. P.; NAVARD, P.; FRENKEL, S. Ya., **Rheological Properties of Highly Swollen Hydrogel Suspensions**, Journal of Applied Polymer Science, v.52, p.721-726, 1994.
- CARVALHO, A. J. F.; CURVELO, A. A. S., **Viscosimetric Behavior of Sulfonated Polystyrene Solutions With Different Sulfonation Degree**, I Congresso Brasileiro de Polímeros, p. 561-562, 1991.
- CHENG, O. C. H.; RICHMOND, R. A., **Some Observations on the Rheological Behaviour of Dense Suspensions**, Rheol. Acta, v. 17, p. 446-453, 1978.
- CHIU, W. Y. ; DON, T. M., **A Study on Viscosity of Suspensions**, Journal of Applied Polymer Science, 37, 2973-2986, 1989.
- CHONG, J. S.; CHRISTIANSEN, E. B.; BAER, A. D., **Rheology of Concentrated Suspensions**, J. Willey & Sons, p. 2007-2021, 1971.
- COUSSOT, P.; PIAU, J. M., **On the Behavior of Fine Mud Suspensions**, Rheol. Acta, v. 33, p. 175-189, 1994.
- DEALY, J. M., **Rheometers for Molten Plastics**, Van Nostrand Reinhold Ltd., New York, 1982.
- D'HAENE, P.; MEWIS J., **Rheological Characterization of Bimodal Colloidal Dispersions**, Rheol. Acta, v. 33, p. 165-174, 1994.

- ERCOLI, D. R., BIBBÓ, M. A., **Propiedades de Estado Transitório e Estacionário de Suspensões de Fibras em Fluidos No-Newtonianos**, 2º Congresso Brasileiro de Polímeros, p. 756-762, 1993.
- FEDORS, R. **Viscosity of Newtonian Suspensions**, *Polymer*, 16, 305-306, 1975.
- FIGINI, M. M.; GONZALEZ, F. R., **Shear Rate Dependence of the Viscosity of Cellulose Nitrate Solutions in the Dilute Concentration Regime Revisited**, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 38, p. 219-226, 1989.
- FOX, R. W., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1988.
- GRAHAM, A. L., **On the Viscosity of Suspensions of Solid Spheres**, *Journal of Applied Science*, 37, 275-280, 1980.
- HAN, C. D., **Rheological Properties of Calcium Carbonate - Filled Polypropylene Melts**, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 18, p. 821-829, 1974.
- HAN, C. D.; LEM, K. W.; **Rheology of Unsaturated Polyester Resins: I. Effects of Filled and Low-Profile Additive on the Rheological Behavior of Unsaturated Polyester Resins**, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 28, 1983.
- HAN, C. D.; LEM, K. W.; **Rheology of Unsaturated Polyester Resins: II. Thickening Behavior of Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins**, *Journal of Applied Polymer Science*, v. 28, p. 763-778, 1983.



- HOU, C.; ZHAO, B.; YANG, J.; YU, Z.; WU, Q., **A Study on Rheologic Behavior of Polyphenylene Sulfide**, Journal of Applied Polymer Science, v. 56, p. 580-590, 1995.
- ILIC, V.; PHAN-THIEN, N.; **Viscosity of Concentrated Suspensions of Shefes**, Rheol. Acta, v. 33, p. 283-291, 1994.
- JEFREY, P. J.; ACRIVOS, A., **The Rheological Properties of Suspensions of Rigide Particules**, J. Aiche, v. 24, p. 217-220. 1976.
- LEM, K. W.; HAN, C. D.; **Rheology of Unsaturated Polyester Resins: III. Effects of Filled and Low-Profile Additive on the Thickining Behavior of Unsaturated Polyester Resins**, Journal of Applied Polymer Science, v. 28, p. 778-793, 1983.
- LIMA, G. G. C. **Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Fluidos Newtonianos de Alta Viscosidade**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Eng. Química, UFPB, 1993.
- LIN, O. C. C., **Thisotropic Behavior of Gel-Like Systems**, Journal of Applied Polymer Science, v. 19, p. 199-214, 1975.
- LIN, Y. S.; LIU, T. J.; CHUI, N. J., **A Rheological Model for Iron Oxide Suspensions**, Journal of Applied Polymer Science, v. 42, p. 1767-1772, 1991.
- MELO, T. J., **Caracterização Reológica do Compósito Polipropileno-Atapulgita por Reometria Capilar**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, UFPB, 1995.

MILLS, N. J., **The Rheology of Filled Polymers**, J. Appl. Polym. Sci. , 15: 2791-2805, 1971.

MITSCHKA, P., **Simple Conversion of Brookfield R.V.T. Readings into Viscosity Functions**, Rheol. Acta, 21, 207-209, 1982.

MOONEY, M., **The Viscosity of a Concentrated Suspensions of Spherical Particles**, Journal of Coll. Sci., 6, 162-170, 1951.

NAVARRO, R. F. ; ALSINA, O. L. S., **Influência da Concentração de Alumina nas Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Polidimetilsiloxano. Parte I: Pseudoplasticidade**, Revista Brasileira de Engenharia, 8, 1, 63-77, 1991.

NAVARRO, R. F. **Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Polidimetilsiloxano**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Eng. Química, UFPB, 1989.

NAVARRO, R. F. ; ALSINA, L. S., **Influência da Concentração de Alumina nas Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Polidimetilsiloxano. Parte II: Análise Experimental da Anti-Tixotropia**, Revista Brasileira de Engenharia, 8, 1, 79-91, 1991.

NAVARRO, R. F. ; ALSINA, O. L. S., **Influência de la Concentracion de soluto en los Índices de Potência y Consistencia de Suspensiones Polimericas Seudoplasticas**, Simpósio Iberoamericano de Polímeros, 493, 1992.

- NAVARRO, R. F., **Análise Qualitativa do Efeito das Partículas da Carga na Reologia de Suspensões**, Congresso de Pós-Graduação em Ciência e Eng. de Materiais, 62-65, 1992.
- NICODEMO, L. ; NICOLAIS, L., **Viscosity of Suspensions**, Journal of Applied Polymer Science, 18, 2808-2813, 1974.
- PAL, R.; YAN, Y; MASLIYAH, J., **Rheology of Clay-In-Oil Suspensions with Added Water Droplets**, Chem. Eng. Science, v. 47, p. 967-970, 1992.
- SOUZA, P. S. B., **Propriedades Reológicas de Termoplásticos Carregados**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar, 1989.
- TAGER, A., **Physical Chemistry of Polymer**, Chapter 10, Mir Publishers, Britain, 1978.
- VINOGRADOV, G. V. ; MALVIN, A. Ya., **Rheology of Polymers**, Charter 6, Mir Publishers, Moscow, URSS, 1980.

**ANEXO**



# FIGURAS

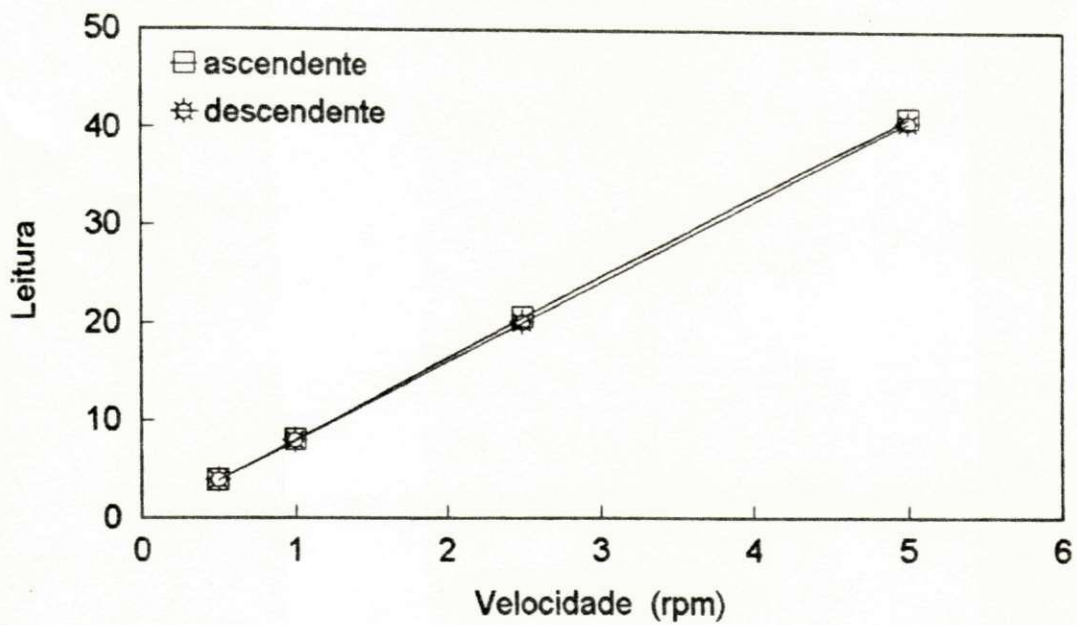


Figura 01: Curva de leitura ascendente e leitura descendente do poliéster puro

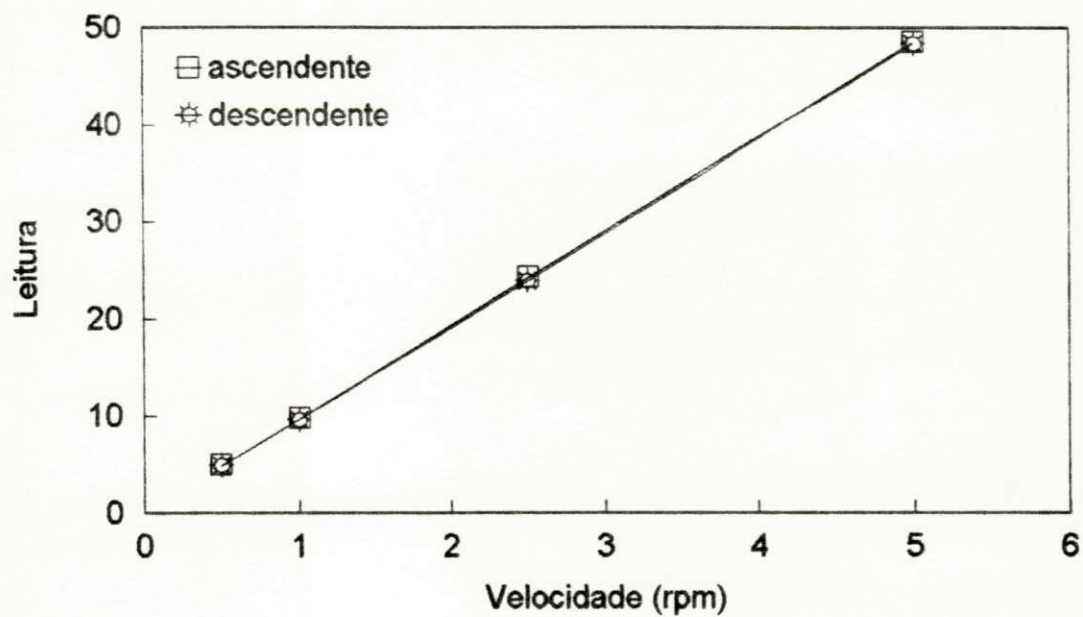


Figura 02 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 5g de alumina / 100ml de poliéster

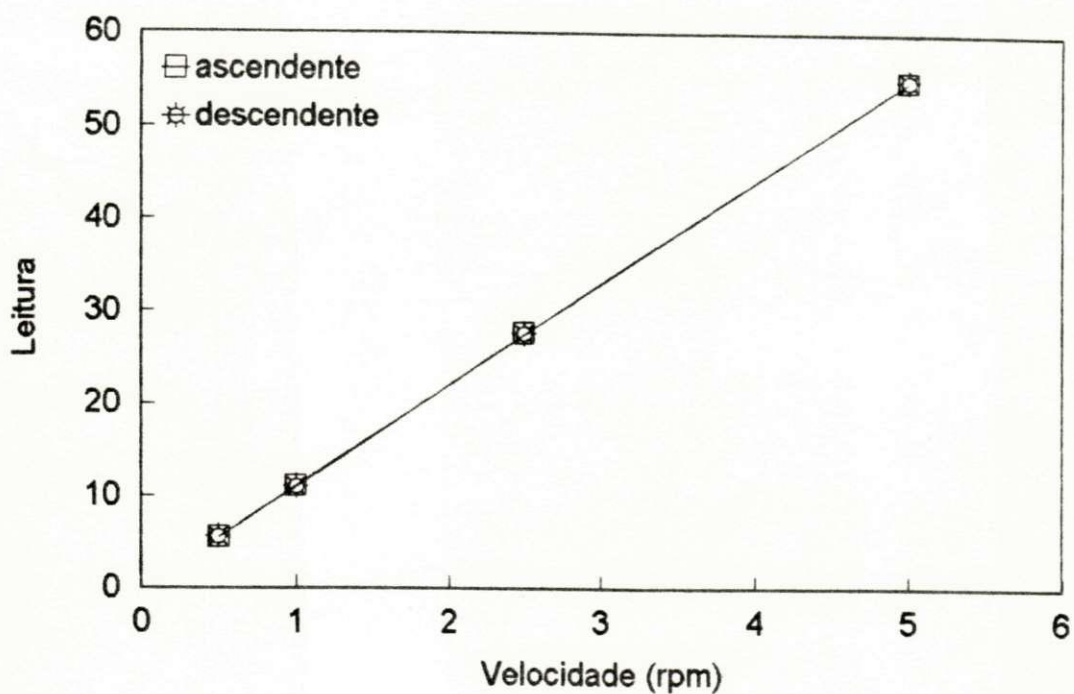


Figura 03 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 10g de alumina/100ml de poliéster

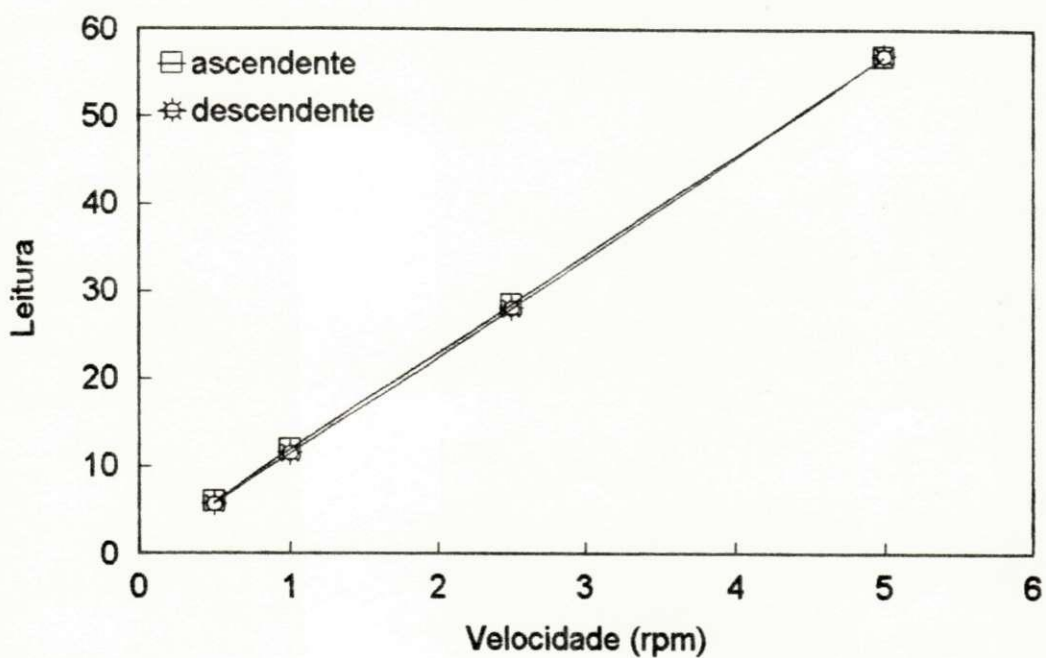


Figura 04 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 15g de alumina/100ml de poliéster

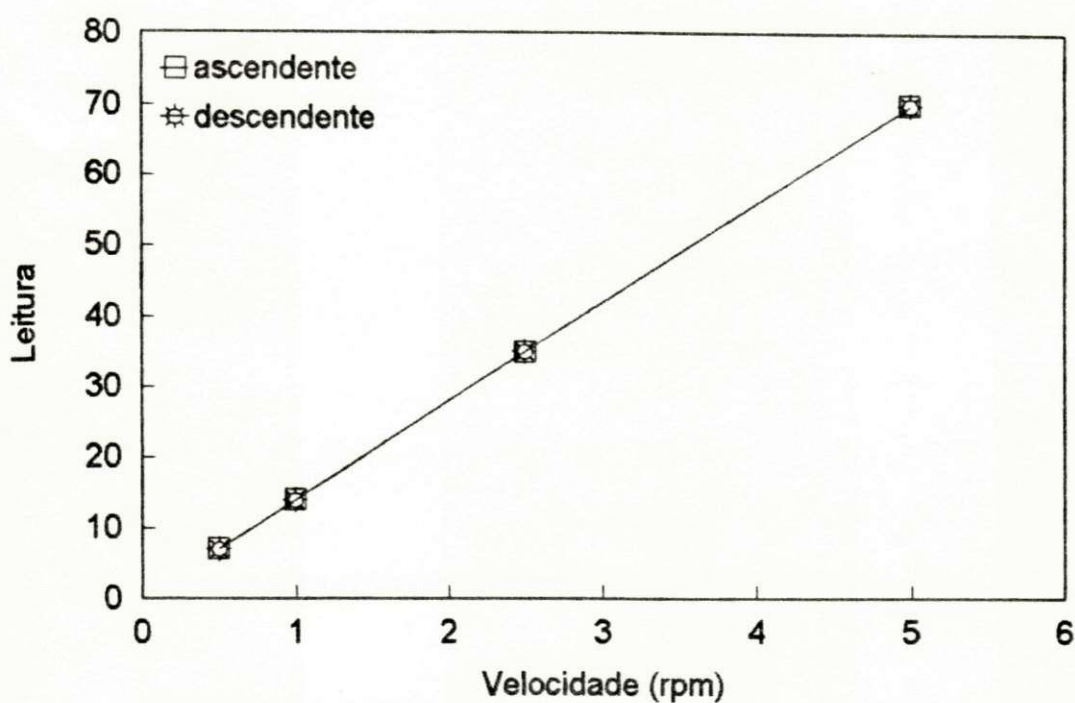


Figura 05 - Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 20g de alumina /100ml de poliéster

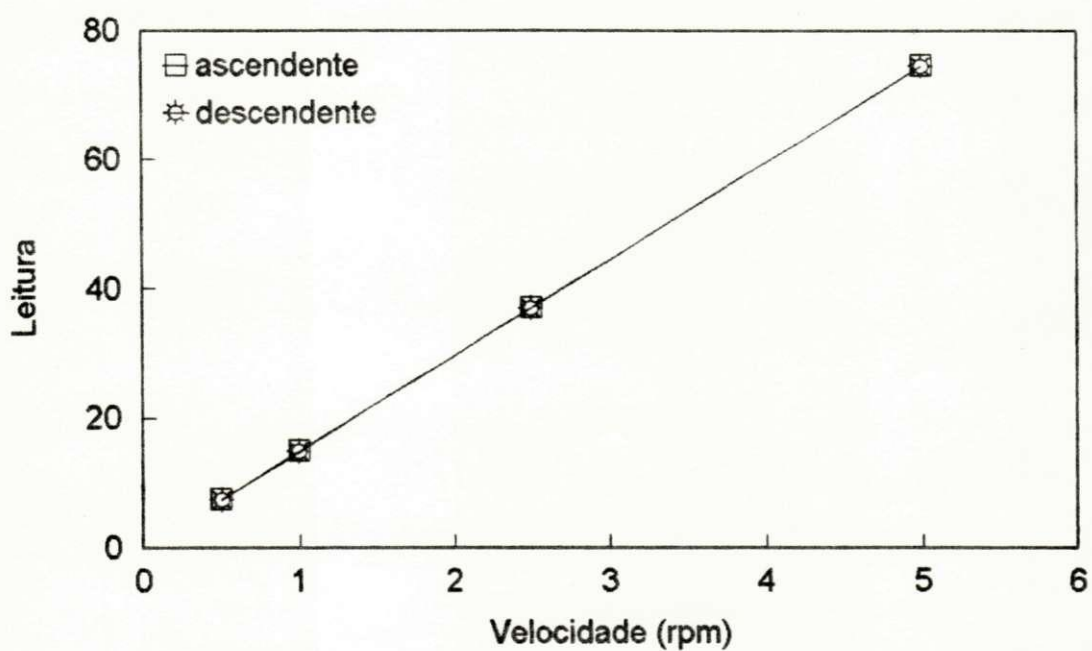


Figura 06: Curva de leitura ascendente e leitura descendente da suspensão de poliéster com 25g de alumina/100ml de poliéster



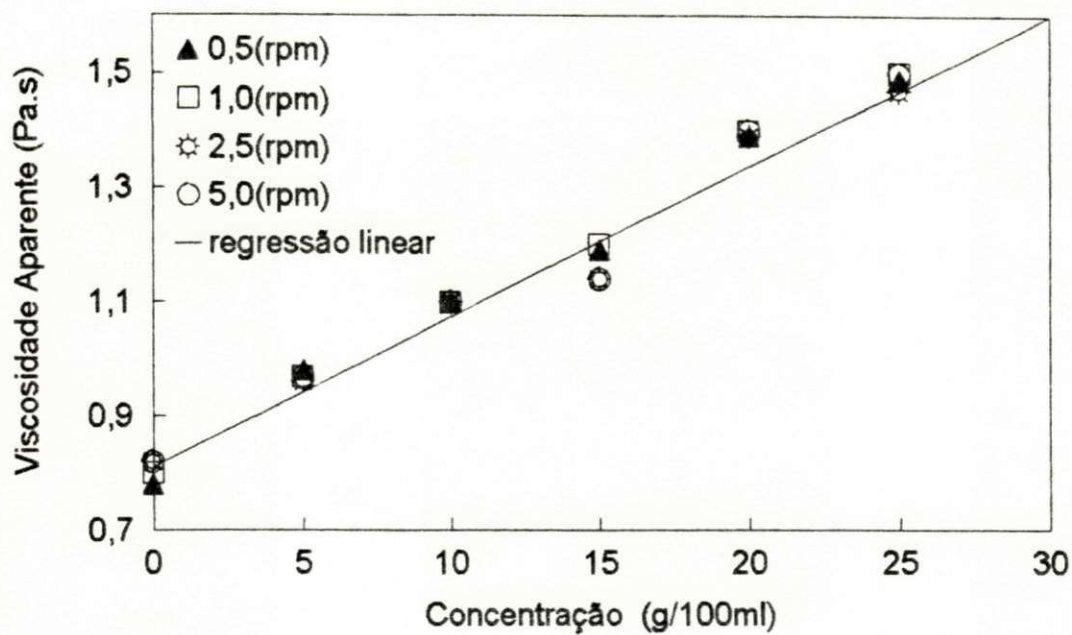


Figura 07: Influência da concentração de alumina na viscosidade aparente da suspensão de poliéster - alumina

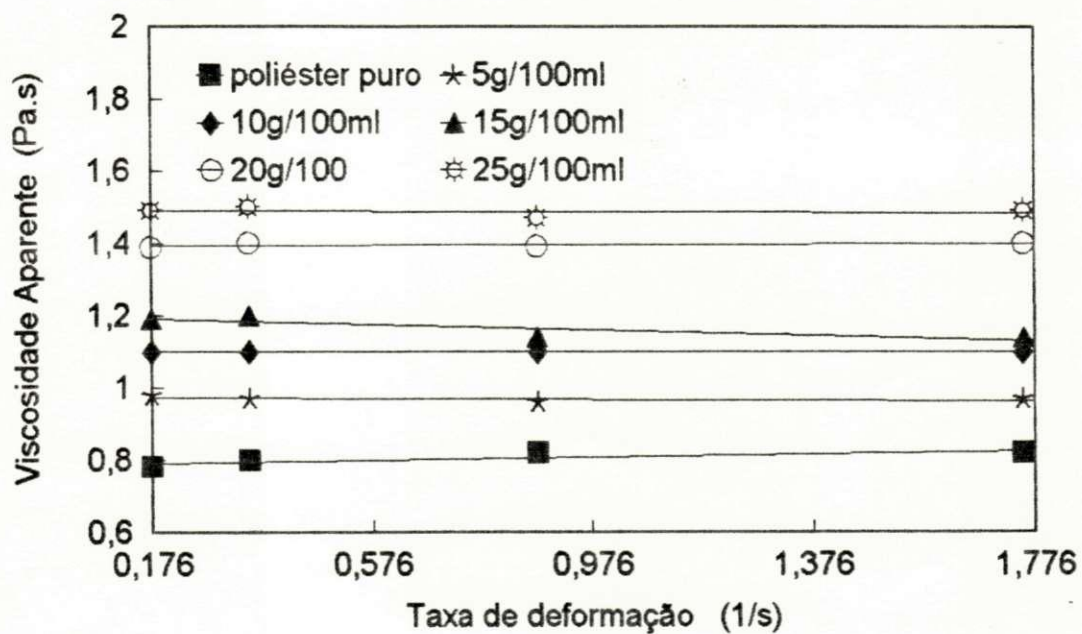


Figura 08: Variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação da suspensão de alumina-poliéster

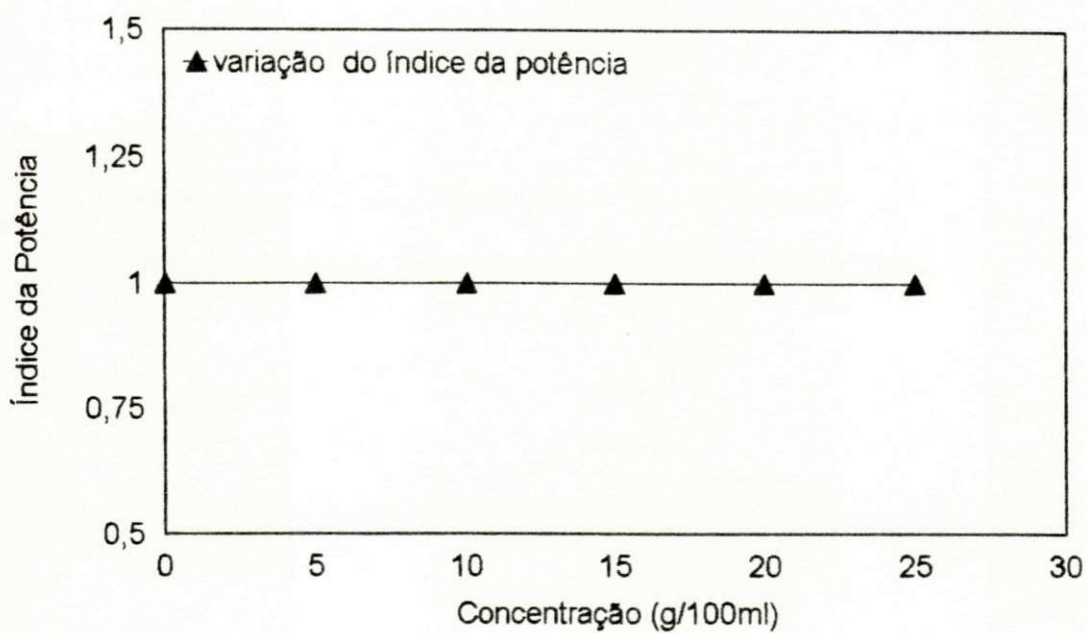


Figura 09: Influência da concentração de alumina no índice da potência da suspensão de poliéster - alumina

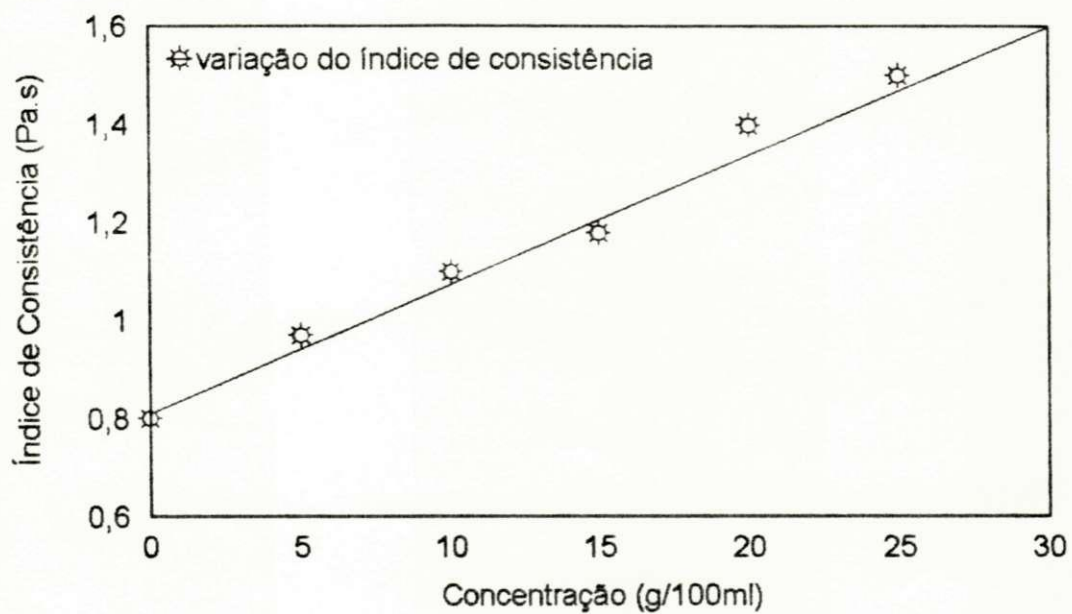


Figura 10: Variação do índice de consistência com a concentração de alumina da suspensão de poliéster - alumina

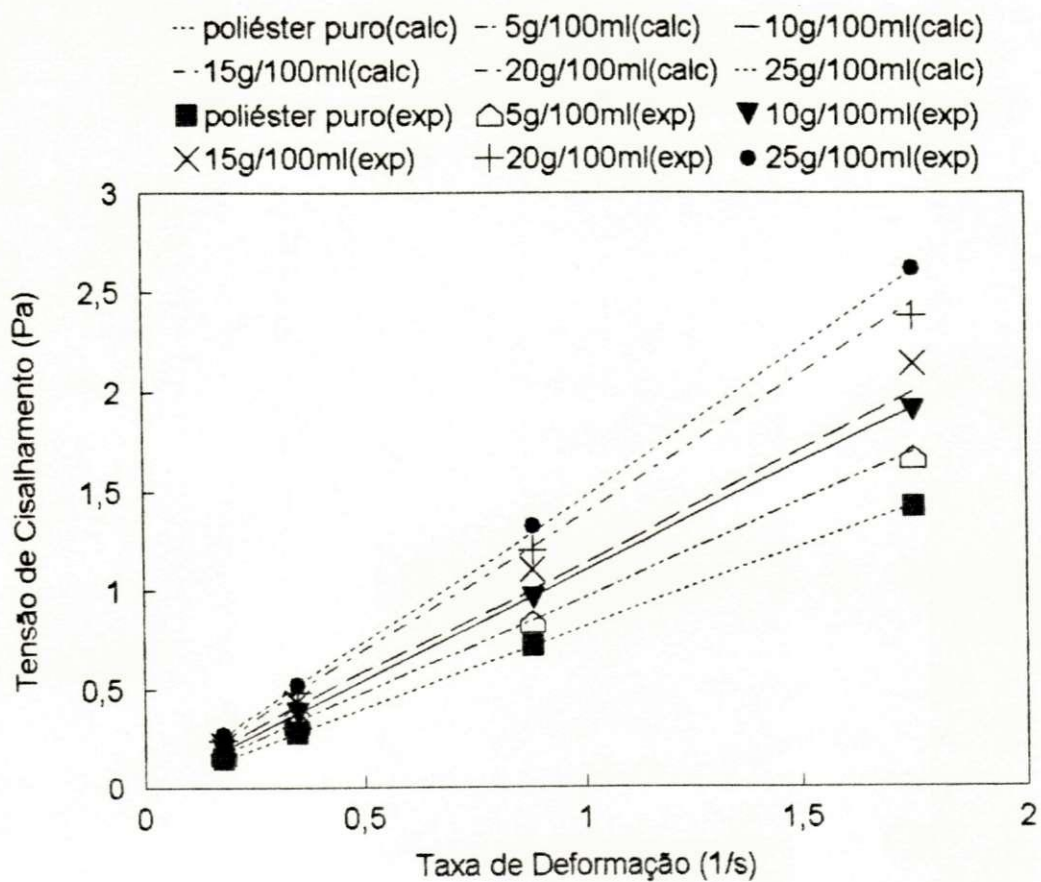


Figura 11: Curvas de fluxo da suspensão de poliéster - alumina

# TABELAS



**Tabela 1:** Fatores de conversão para o spindle 1 ( MITSCHKA, 1982 ).

Número de spindle	Kc (Pa)	Índice da Potência ( n )	$K_t ( n ) ( s^{-1} )$
1	0,035	0,1	1,728
		0,2	0,976
		0,3	0,705
		0,4	0,576
		0,5	0,499
		0,1	0,449
		0,7	0,414
		0,8	0,387
		0,9	0,367
		1,0	0,351

**Tabela 2:** Leitura ascendente e leitura descendente das suspensões de poliéster/alumina, após a homogeneização de 5 min a 300 rpm.

Concentração de Alumina ( g/100ml )	Velocidade ( rpm )	Leitura Ascendente	Leitura Descendente
<b>Poliéster Puro</b>	0,5	3,9	3,9
	1,0	8,0	7,9
	2,5	20,5	20,0
	5,0	41,0	40,6
<b>5</b>	0,5	4,9	4,9
	1,0	9,7	9,6
	2,5	24,2	23,9
	5,0	48,5	48,4
<b>10</b>	0,5	5,5	5,5
	1,0	11,0	10,9
	2,5	27,5	27,5
	5,0	55,0	55,0
<b>15</b>	0,5	6,0	5,8
	1,0	12,0	11,5
	2,5	28,5	28,0
	5,0	57,0	57,0
<b>20</b>	0,5	7,0	7,0
	1,0	14,0	13,9
	2,5	35,0	35,0
	5,0	70,0	70,0
<b>25</b>	0,5	7,5	7,4
	1,0	15,0	14,9
	2,5	37,0	37,0
	5,0	74,5	74,5

**Tabela 3:** Valores do Logaritmo e da Regressão Linear para a Obtenção do Índice da Potência das Suspensões de Poliéster/Alumina em Todas as Concentrações Estudadas.

Concentração de Alumina (g/100ml)	log Vi	log Li	Equação da Reta $y = ax + b$	n
Poliéster Puro	-0,301	0,591	$y = 1,022x + 0,901$	1,0
	0,000	0,903		
	0,398	1,312		
	0,699	1,613		
5	-0,301	0,690	$y = 0,996x + 0,988$	1,0
	0,000	0,987		
	0,398	1,384		
	0,699	1,686		
10	-0,301	0,740	$y = 1,000x + 1,041$	1,0
	0,000	1,041		
	0,398	1,439		
	0,699	1,740		
15	-0,301	0,778	$y = 0,973x + 1,073$	1,0
	0,000	1,079		
	0,398	1,455		
	0,699	1,756		
20	-0,301	0,845	$y = 1,000x + 1,146$	1,0
	0,000	1,146		
	0,398	1,544		
	0,699	1,845		
25	-0,301	0,875	$y = 0,995x + 1,174$	1,0
	0,000	1,176		
	0,398	1,568		
	0,699	1,872		



**Tabela 4:** Valores Obtidos com os Dados Experimentais para a Tensão de Cisalhamento, Taxa de Deformação e Viscosidade Aparente da Suspensão Alumina/Poliéster.

Concentração de Alumina ( g/100ml )	Velocidade ( rpm )	$\tau$ ( Pa )	$\dot{\gamma}$ ( s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ ( Pa.s <sup>-1</sup> )
Poliéster Puro	0,5	0,137	0,176	0,778
	1,0	0,280	0,351	0,798
	2,5	0,718	0,878	0,818
	5,0	1,435	1,755	0,818
5	0,5	0,172	0,176	0,977
	1,0	0,340	0,351	0,969
	2,5	0,847	0,878	0,965
	5,0	1,698	1,755	0,968
10	0,5	0,193	0,176	1,097
	1,0	0,385	0,351	1,097
	2,5	0,963	0,878	1,097
	5,0	1,925	1,755	1,097
15	0,5	0,210	0,176	1,193
	1,0	0,420	0,351	1,197
	2,5	0,998	0,878	1,137
	5,0	1,995	1,755	1,137
20	0,5	0,245	0,176	1,392
	1,0	0,490	0,351	1,396
	2,5	1,225	0,878	1,395
	5,0	2,450	1,755	1,396
25	0,5	0,263	0,176	1,494
	1,0	0,525	0,351	1,496
	2,5	1,295	0,878	1,475
	5,0	2,608	1,755	1,486



**Tabela 5:** Variação do Índice de Consistência com a Concentração de Alumina.

Concentração de Alumina ( g/100ml )	Índice de Consistência K ( Pa.s-1 )
Poliéster Puro	0,796
5	0,973
10	1,099
15	1,183
20	1,400
25	1,496

**Tabela 6:** Valores da Tensão de Cisalhamento Calculada com o Modelo Proposto.

Concentração de Alumina ( g/100ml )	Velocidade ( rpm )	$\tau$ ( Pa )
Poliéster Puro	0,5	0,147
	1,0	0,285
	2,5	0,716
	5,0	1,425
5	0,5	0,171
	1,0	0,333
	2,5	0,837
	5,0	1,664
10	0,5	0,196
	1,0	0,381
	2,5	0,957
	5,0	1,904
15	0,5	0,221
	1,0	0,429
	2,5	1,078
	5,0	2,144
20	0,5	0,245
	1,0	0,477
	2,5	1,199
	5,0	2,384
25	0,5	0,270
	1,0	0,525
	2,5	1,319
	5,0	2,623