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

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SUSPENSÕES
DE ALUMINA EM FLUIDOS NEWTONIANOS
DE ALTA VISCOSIDADE

GERALDA GILVÂNIA CAVALCANTE DE LIMA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
MAIO DE 1993

GERALDA GILVÂNIA CAVALCANTE DE LIMA

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE FLUIDOS
NEWTONIANOS DE ALTA VISCOSIDADE**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: **TECNOLOGIA DE MATERIAS NÃO
METÁLICOS**

PROFESSOR ORIENTADOR: **ODELSIA LEONOR SANCHEZ DE ALSINA**

**CAMPINA GRANDE
MAIO DE 1993**



L732p Lima, Geralda Gilvânia Cavalcante de.
Propriedades reológicas de suspensões de alumina em fluidos newtonianos de alta viscosidade / Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima. - Campina Grande, 1993.
51 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.
"Orientação: Profa. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, Prof. Rômulo Navarro Feitosa".
Referências.

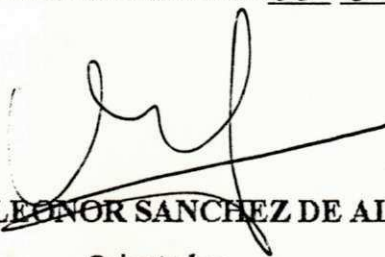
1. Alumina. 2. Suspensões de Alumina - Propriedades Reológicas. 3. Fluidos Newtonianos de Alta Viscosidade. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Alsina, Odelsia Leonor Sanchez de. II. Feitosa, Rômulo Navarro. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 666.762.11(043)

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE SUSPENSÕES DE ALUMINA
EM FLUIDOS NEWTONIANOS DE ALTA VISCOSIDADE**

GERALDA GILVÂNIA CAVALCANTE DE LIMA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/05/93



ODELSIA LEONOR SANCHEZ DE ALSINA

Orientador



ROMULO NAVARRO FEITOSA

Co-Orientador



KEPLER BORGES FRANÇA

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE

MAIO DE 1993

DEDICATÓRIA

UFMG

A minha família.

UFMG

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças para execução deste trabalho.

A ALCOA pela doação da alumina utilizada.



A Professora Odelsia L. S. de Alsina pela sua competente orientação.

Ao Professor Rômulo Feitosa Navarro pela sua co-orientação.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais pelo empréstimo do viscosímetro e do agitador.

RESUMO

No presente trabalho, foram estudadas as propriedades reológicas de várias suspensões de Multigear-Alumina, nas concentrações 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 gramas de alumina para 100 ml de fluido, variando as velocidades e os tempos de homogenização, em temperatura ambiente.

O efeito da concentração, bem como a velocidade e tempo de agitação sobre as propriedades reológicas, foi investigado principalmente através de parâmetros como: viscosidade aparente, índice de consistência e índice de potência.

Todas as concentrações estudadas apresentaram comportamento newtoniano para concentrações inferiores a 10g/100 ml, denominando esta concentração, de concentração crítica. Para concentrações superiores, apresentaram comportamento não-newtoniano independente do tempo.

Os resultados obtidos também demonstram que nas condições estudadas, a partir da concentração crítica, as suspensões assumem comportamento pseudoplástico, apresentando maior evidência, a medida que a concentração aumenta.

Após identificada a influência da concentração de alumina nas propriedades reológicas foram propostos modelos matemáticos, que ajustam dentro de uma boa faixa de segurança os dados experimentais.

ABSTRACT

Rheological properties of several suspensions of multigear-alumina have been studied in the present work, at the rate of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 grams for each 100 ml of fluid, varying the speeds and times of homogenization at ambient temperature.

The effect of the concentration, as well as the stirring speed and time over the rheological properties, were investigated mainly through parameters, like viscosity apparent, consistency index and power index.

All the analyzed suspensions showed newtonian behavior for concentrations less than 10g/100ml, being such concentration named critic concentration. Concentrations greater than this showed non-newtonian behavior.

The obtained results also show that at the studied conditions, above the critical concentration, the suspensions acquire pseudoplastic behavior, showing higher evidence as the concentration increases.

Mathematical models showing a good agreement with the experimental data.

SIMBOLOGIA

- η_{esp} → viscosidade específica
- η_s → viscosidade da suspensão
- Φ → fração volumétrica da fase sólida
- η_{ro} → viscosidade relativa para taxa de deformação zero
- Φ_m → fração volumétrica máxima
- K → constante da Equação 2.10
- K → índice de consistência (Pa . s)
- P → constante da Equação 2.5
- n → número de termos da Equação 2.6
- A → área
- α → espessura da camada
- d → diâmetro da partícula
- τ → tensão de cisalhamento
- τ_y → tensão residual
- μ_p → viscosidade plástica (Pa . s)
- γ → deformação
- $\dot{\gamma}$ → taxa de deformação (s^{-1})
- μ_c → viscosidade de Casson (Pa . s)
- K_0 → índice de consistência inicial
- B → constante da Equação 2.17, 2.18.
- A → variação do índice da potência com a concentração (g/100ml)
- C → concentração (g/100ml)
- C_c → concentração crítica
- β → coeficiente de anti-tixotropia (adimensional)
- T → torque (dina - cm)
- t → tempo
- T_e → valor do torque medido após 2 min numa dada taxa de deformação (dina - cm)
- τ → tensão de cisalhamento (Pa . s)

K_c	→	fator de taxa de deformação (s^{-1})
L_i	→	leitura do viscosímetro
K_t	→	fator de cisalhamento (Pa)
N	→	índice de potência
v	→	velocidade de teste (rpm)
μ_p	→	viscosidade aparente (Pa . s)
b	→	constante da Equação 3.11 e 3.12
N_0	→	constante da Equação 4.2
N_1	→	constante da Equação 4.3
A	→	constante da Equação 4.2
B	→	constante da Equação 4.3
B	→	constante da Equação 4.4

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	01
-----------------	----

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução.....	04
2.2 - Suspensões Diluídas de Partículas Esféricas.....	05
2.3 - Suspensões Diluídas de Partículas Não-Esféricas.....	07
2.4 - Suspensões Concentradas.....	09
2.5 - Suspensões Concentradas de Cargas Inertes.....	09
2.6 - Suspensões Concentradas de Cargas Ativas.....	11
2.7 - Efeito da Interação entre as Partículas.....	13
2.8 - Comportamento Não-Newtoniano.....	14
2.9 - Dependência com a Taxa de Deformação.....	15
2.10- Dependência com o Tempo.....	17

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais.....	19
3.2 - Equipamentos.....	20
3.3 - Procedimento Experimental.....	21
3.3.1 - Preparo das Suspensões.....	21
3.3.2 - Medição das Propriedades Reológicas.....	21
3.4 - Tratamento dos Dados Experimentais.....	22
3.4.1 - Tensão de Cisalhamento.....	22
3.4.2 - Índice de Potência.....	23

3.4.3 - Taxa de Deformação.....	23
3.4.4 - Viscosidade Aparente.....	23
3.4.5 - Índice de Consistência.....	24

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Introdução.....	25
4.2 - Influência do Tempo e Velocidade de Homogenização.....	25
4.3 - Influência da Concentração da Alumina.....	28
4.3.1 - Viscosidade Aparente das Suspensões.....	28
4.3.2 - Curvas de Fluxos.....	30
4.3.3 - Índice da Potência.....	33
4.3.4 - Índice de Consistência.....	38
4.4 - Dependência com o Tempo.....	42

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES.....	46
-----------------	----

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES.....	47
----------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
---------------------------------	----

APÊNDICE 1

APÊNDICE 2

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A reologia é o campo da ciência que se dedica ao estudo dos materiais quando submetidos a ação de uma força externa, BAYJAL, (1982). Segundo TAGER, (1978), as relações existentes entre tensão, deformação e taxa de deformação dá-se o nome de propriedades reológicas. Sendo o principal objetivo da reologia estabelecer estas relações através de equações, chamadas equações constitutivas, VINOGRADOV (1980), as quais são utilizadas para classificar os diversos materiais de acordo com seus comportamentos nos diversos estados de tensão, em sólidos e fluidos.

Os fluidos que estiverem de acordo com a hipótese de Newton, ou seja, a tensão aplicada será diretamente proporcional à taxa de deformação, com o coeficiente de proporcionalidade sendo chamado de viscosidade. Segundo NAVARRO (1989), a maioria dos fluidos reais apresenta alguma variação em seu comportamento que os afastam do modelo de Newton, a este tipo de fluido dá-se de fluido não-newtoniano.

Os fluidos não-newtonianos dividem-se em três tipos:

- 1 - Fluido independentes do tempo, fluidos que apresentam viscosidade dependente da taxa de deformação.
- 2 - Fluidos viscoelásticos, são os que possuem características ora de sólido ora de fluido.

3 - Fluidos dependentes do tempo, são os fluidos que apresentam uma relação tensão de cisalhamento - taxa de deformação dependente do tempo de aplicação do cisalhamento.

Segundo VINOGRADOV, (1980), os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, compreende dois tipos de fluidos que são:

1 - Fluidos de Potência - assim chamados por terem a tensão de cisalhamento proporcional a taxa de deformação elevada a um expoente n . Pertencentes a este grupo, tem-se os fluidos pseudoplásticos e dilatantes.

2 - Plásticos de Bingham - também conhecidos como corpos viscoplásticos, são materiais que não fluem até que um certo valor crítico de tensão de cisalhamento seja atingido, após este valor crítico ser atingido, o material se comporta como fluido newtoniano.

Segundo, BRYDSON (1970), pertencentes aos fluidos não-newtonianos dependentes do tempo, estão os fluidos cujas propriedades reológicas, como viscosidade aparente, variam com o tempo de cisalhamento, a uma taxa de deformação constante. Esta variação de viscosidade aparente com o tempo de cisalhamento ocorre geralmente em sistemas de duas fases, uma sendo formada por um líquido que atua como meio de dispersão e a outra constituída por partículas sólidas dispersas.

A reologia das suspensões é um dos ramos da reologia que mais tem se desenvolvido nos últimos tempos. Diversos estudos foram feitos no campo da reologia de suspensões, alguns destes são tratados com maiores detalhes no capítulo 2, porém devido as características específicas de cada sistema, somente as observações qualitativas podem ser extrapoladas de um sistema para outro, de modo que cada novo sistema deve ser estudado nos mínimos detalhes.

O objetivo final deste trabalho é obter equações constitutivas do sistema multigear-alumina, através da correlação dos dados experimentais e estudos dos efeitos que a concentração da alumina produz nas propriedades reológicas deste sistema.

A escolha deste sistema foi devido ao fato de que o fluido multigear, é um fluido newtoniano de alta viscosidade. E a alumina, fornecida pela Alcoa, por ser constituída em maior parte de partículas com tamanho uniforme. Porém, não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que estudasse o comportamento reológico deste sistema em particular.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

A presença de partículas sólidas de carga num meio líquido pode alterar de forma considerável o comportamento reológico do sistema obtido, em comparação com o comportamento do líquido puro, mesmo que não haja qualquer tipo de interação entre os dois constituintes. A alteração inicial ocorre com a viscosidade, pelo fato de que na faixa de temperatura onde as partículas se encontram sólidas, a viscosidade destas é muito maior que a viscosidade de qualquer líquido nas mesmas condições. NAVARRO, (1989).

Segundo ALVES et alii (1952), NAVARRO (1989), o comportamento reológico de uma suspensão depende de fatores tais como: tipo, tamanho, forma e concentração das partículas dispersas, podendo ser ou não-newtoniano, dependendo da combinação destes fatores. Geralmente a maioria das suspensões, em baixas concentrações é dita newtoniana, porém quando se supera uma concentração crítica para a fase dispersa, cujo valor dependerá do tamanho, da forma e do grau de dispersão das partículas, torna-se não-newtoniana.

As características de suspensões onde um líquido atua como matriz continua sobre a qual as partículas sólidas estarão dispersas podem ser simples como a suspensão infinitamente diluída de partículas esféricas e rígidas, mas também podem ser extremamente complicadas como suspensões concentradas de cargas não-esféricas e

deformáveis dispersas num meio não-newtoniano. A medida em que as suspensões se afastam do modelo newtoniano surgem os mais diversos fenômenos hidrodinâmicos cuja determinação torna-se mais complexa. NAVARRO, (1989).

Segundo, BATCHELOR (1970), para um meio dispersante newtoniano, existem diversos tipos de efeitos das propriedades e características das partículas no surgimento dos diferentes comportamentos não-newtonianos das suspensões:

1 - Forma da Partícula - Partículas não esféricas tendem a uma orientação particular e independente, mesmo sob forma bastante simples de deformação.

2 - Tamanho da Partícula - Para partículas muito pequenas, o movimento browniano torna-se insignificante, e a forma de orientação destas partículas será anisotrópica.

3 - Deformabilidade da Partícula - Partículas deformáveis poderão mudar de forma durante o escoamento segundo a taxa de deformação aplicada.

4 - Aspecto Superficial - A tensão superficial nas vizinhanças das partículas do fluido em conjunto com a elasticidade das partículas sólidas produzem efeitos que dependem do tempo.

2.2 - Suspensões Diluídas de Partículas Esféricas

O sistema de duas fases mais simples, composto de uma fase líquida, atuando como meio de dispersão e de outra sólida, como a fase dispersa, é considerada uma suspensão infinitamente diluída de partículas sólidas, esféricas e rígidas num fluido newtoniano, sem que existam interações de qualquer ordem entre as fases. NAVARRO, (1990).

Para este tipo de suspensão, as partículas da carga não vão interferir no comportamento reológico da fase líquida. Porém, como a viscosidade de um sólido é muito maior que a viscosidade de um líquido a introdução de partículas sólidas num meio de dispersão líquido irá fazer com que sua viscosidade seja aumentada. NAVARRO, (1990).

Segundo VINOGRADOV (1980), MILLS (1971), MOONEY (1951), a solução clássica para o problema da viscosidade de uma suspensão infinitamente diluída, de cargas esféricas rígidas, numa matriz líquida foi proposta por Einstein, por meio da seguinte equação:

$$\eta_{esp} = 2,5 \varphi \quad (2.1)$$

Onde:

$$\eta_{esp} = (\eta - \eta)_s / \eta_s \quad (2.2)$$

A Equação (2.1) precisa obedecer as seguintes condições:

1. Não deve haver interação entre as partículas (isto é possível se $\varphi \ll 1$)
2. Não deve haver interação físico-química entre as partículas e o meio dispersante.
3. As partículas devem ser esféricas e rígidas, não podendo ser submetidas a deformações durante o fluxo.
4. O escoamento deverá permanecer laminar.

Segundo VINOGRADOV (1980), a Equação (2.1) não inclui nenhum parâmetro que mencione o tamanho e forma das partículas na suspensão, isto é, se a suspensão é de partículas mono ou polidispersas, bastando que estas sejam rígidas e esféricas.

A equação de Einstein, se aplica a várias suspensões com concentrações moderadamente altas e cujas partículas não sejam totalmente esféricas, desde que o meio de dispersão mantenha seu caráter newtoniano nesta faixa de concentração. É o caso de

algumas suspensões de alumina hidratada, usando como meio de dispersão o polidimetilsiloxano, onde abaixo da concentração crítica, a introdução de alumina apenas aumenta moderadamente a viscosidade do sistema, NAVARRO e ALSINA (1991a).

2.3 - Suspensões Diluídas de Partículas Não Esféricas.

Segundo VINOGRADOV (1980), JEFREY et al (1976), o mais simples exemplo de partículas não esféricas são as elipsoidais. Jeffrey foi o primeiro reologista a tratar do assunto, porém os resultados obtidos foram generalizados por Goldsmith, Mason e Brenner. A principal diferença existente entre os modelos de suspensões com partículas esféricas e elipsoidais está na possibilidade do aparecimento de uma predominante orientação do eixo principal, sob escoamento, das partículas do segundo tipo, resultando no aparecimento de novos fenômenos mecânicos. Os fenômenos de maior importância para reologia de suspensões, são:

- 1 - Dependência da viscosidade aparente com a taxa de deformação.
- 2 - Desenvolvimento de tensões normais ao plano de escoamento.
- 3- Dependência da viscosidade aparente (como medida de resistência ao escoamento) com a geometria do escoamento, isto é, sob cisalhamento ou extensão.

O mecanismo geral destes fenômenos consiste da rotação das partículas durante o escoamento, sendo esta determinada pela superposição de dois fatores: VINOGRADOV e MALKIN (1980).

- 1 - Orientação sob a ação de forças mecânicas.
- 2 - Desorientação causada pelo movimento browniano.

NICODEMO e NICOLAIS (1974), propuseram para suspensões diluídas de fibras assimétricas, a seguinte equação:

$$\eta_{ro} = \exp (8,52 \varphi) \quad (2.3)$$

Para suspensões diluídas de agregados, FEDORS, propôs a equação:

$$\eta_r = [1 + 1,25\varphi / (\varphi_m - \varphi)]^2 \quad (2.4)$$

Podendo também esta equação ser utilizada para o sistema de NICODEMO e NICOLAIS e FEDORS (1975).

Brodnyan baseando-se na Teoria Semi-Empírica de ROBINSON e MOONEY para suspensões de partículas esféricas estendeu a análise para suspensões diluídas de partículas não-esféricas, obtendo a Equação, MILLS (1971).

$$\eta_r = \exp \left(\frac{2,5\varphi + 0,399\varphi (p - 1)^{1,48}}{1 - K \varphi} \right) \quad (2.5)$$

Válida para $\varphi < 0,01$.

Segundo GRAHAM et alii (1980), as suspensões diluídas de partículas não esféricas são de vital importância para processamentos tecnológicos avançados, principalmente na fabricação de novos materiais como compósitos poliméricos reforçados por fibras curtas, materiais cerâmicos de alta densidade para usos eletromagnéticos, justificando assim a existência de inúmeras correlações representando a dependência da viscosidade de suspensões com a concentração.

Segundo NICODEMO e NICOLAIS (1975), para suspensões diluídas, independente do tipo da carga, a viscosidade aumenta com a concentração da fase dispersa, enquanto que a viscosidade de suspensões de cargas não esféricas depende da taxa de deformação, diminuindo com o aumento desta, devido ao fato das partículas se

orientarem, sob deformação, numa determinada direção com a conseqüente distribuição de pares ou aglomerados de partículas, determinando assim uma nova distribuição geométrica em condições de mínima energia de dissipação, caracterizando um comportamento pseudoplástico.

2.4 - Suspensões Concentradas

Segundo NAVARRO (1990), a importância de se estudar as propriedades reológicas das suspensões concentradas, deve-se ao fato do seu amplo uso na produção de explosivos e de diversos artefatos a base de compósitos poliméricos particulados, necessitando assim de um prévio conhecimento sobre a dependência da viscosidade destas suspensões com diversos fatores, tais como: tempo, taxa de deformação, concentração, distribuição e tamanho de partículas.

2.5 - Suspensões Concentradas de Cargas Inertes

Segundo MOONEY (1951), desde a publicação da análise clássica de Einstein, para a viscosidade de suspensões diluídas de partículas esféricas rígidas, numerosas equações tem sido desenvolvidas no sentido de estender tal análise para suspensões de maior concentração, considerando além da forma e concentração, a possibilidade de haver interações entre as partículas e o meio dispersante.

Muitos trabalhos tem se limitado para suspensões de baixa concentração de sólidos, CHONG (1971). Porém, quando se aumenta a concentração de sólidos numa suspensão, aparecem novos efeitos hidrodinâmicos mesmo que não haja interação físico-química entre elas e o meio dispersante. Tais efeitos, são decorrentes do fato de que em suspensões concentradas, as partículas sólidas estarão envolvidas por uma vizinhança que altera seu movimento durante o escoamento, VINOGRADOV (1980).

Segundo, VINOGRADOV (1980), MOONEY (1951), o problema de se calcular a viscosidade de suspensões concentradas ou o comportamento destas sob cisalhamento, tem sido estudado por diversos autores, os resultados obtidos são vários, porém todos são extensões, de ordem mais alta, em termos da concentração das partículas, da equação de Einstein. Portanto, generalizando, a viscosidade específica pode ser representada pela seguinte série de potência,

$$\eta_{esp} = \sum_{n=1}^n A_n \varphi^n \quad (2.6)$$

Onde $A_1 = 2,5$, e os valores do coeficiente A_n (para $n > 1$) são dados escolhidos empiricamente, através do tratamento de dados experimentais.

Segundo MILLS (1971), os modelos propostos baseados na Equação (2.6), levam em consideração que a viscosidade específica seja uma função apenas da concentração de sólidos, dispersos, e na maioria dos casos já estudados, estes modelos apenas correlacionam com grande precisão, os dados experimentais, nem sempre podendo ser estendido para outros sistemas. Thomas propôs um modelo que pode ser utilizado para suspensões de cargas esféricas e rígidas com frações volumétricas de carga compreendidas entre 0 e 0,6, apresentado da seguinte forma:

$$\eta_{esp} = 2,5\varphi + 10,05 \varphi^2 + 0,00273 \exp(16,64\varphi) \quad (2.7)$$

O primeiro termo do lado direito da Equação (2.7) é dado por Einstein, o segundo por MANLEY e MASON e o terceiro é determinado empiricamente.

2.6 - Suspensões com Cargas Ativas

Segundo VINOGRADOV (1980), a atividade de carga reflete qualitativamente na possibilidade de serem formadas interações físico-químicas específicas entre a carga e o meio dispersante, um polímero.

Segundo NAVARRO (1990), esta atividade pode ser tratada como resultado da formação de uma superfície transiente entre o meio dispersante e a carga. Esta superfície está constituída por camadas adsorvidas nas partículas de carga, resultando num aumento em seus diâmetros, de uma quantidade 2α (onde α significa a espessura da camada) aumentando assim, o volume aparente do meio disperso. Conseqüentemente, há um aumento da influência do meio disperso na viscosidade do sistema. Sendo que a fase sólida oferece uma maior resistência ao escoamento, o fluxo das moléculas da fase líquida, que estarão atadas as partículas da carga, será impedido, provocando um aumento na viscosidade da suspensão superior ao aumento que se teria se as partículas da fase sólida fossem inertes.

VINOGRADOV e MALKIN (1980), levando em consideração que:

- 1 - A espessura α seja muito menor que o diâmetro das partículas.
- 2 - A concentração destas partículas seja mínima.
- 3 - As partículas sejam rígidas e esféricas.

Utilizou a equação de Einstein com algumas modificações, chegando ao seguinte resultado:

$$\eta_{exp} = 2,5 \left(1 + \frac{6\alpha}{d} \right) \varphi = K \varphi \quad (2.8)$$

Onde K é um coeficiente determinado experimentalmente que relaciona a influência da atividade da carga na variação da viscosidade da suspensão com a concentração da fase dispersa.

A espessura da camada pode ser medida baseada no valor de K , da seguinte maneira: VINOGRADOV e MALKIN, (1980)

$$\alpha = \frac{K - 2,5}{15} d \quad (2.9)$$

Esta equação pode também ser aplicada para regiões onde a suspensão possui moderada concentração, NAVARRO (1990).

Segundo VINOGRADOV (1980), os efeitos reológicos causados pela interação das partículas com o meio dispersante, não se restringem apenas à variação do coeficiente K da Equação (2.8). Podem surgir diversos e inesperados fenômenos, como por exemplo, a diminuição da viscosidade de algumas suspensões poliméricas, ao se introduzir pequenas quantidades de carga, causada pela formação de um volume livre adicional na interface polímero-carga. PUKANSKY et alii (1986), também verificaram que devido à atividade de carga, também poderão surgir efeitos dependentes do tempo.

O uso de cargas ativas em sistemas poliméricos é muito frequente, pois estas melhoram as propriedades do compósito, porém o seu uso também traz dificuldades adicionais ao processamento do material em relação ao polímero puro. A forma mais simples de resolver este problema consiste em se adicionar um plastificante as misturas diminuindo sua viscosidade, ou então, utiliza-se agentes de acoplamento, que são aditivos químicos, capazes de produzir uma ponte molecular entre a superfície inorgânica da carga e as macromoléculas orgânicas do polímero.

Segundo, HAN (1974), a introdução destes agentes além de diminuir sua viscosidade, melhora as propriedades mecânicas do compósito.

2.7 - Efeito da Interação entre as Partículas

Segundo LIN (1975), a medida em que a concentração de carga na fase dispersa é aumentada, aumenta a possibilidade de ocorrer interação entre as partículas desta fase, podendo causar surgimento de agregados ou aglomerados, estes por sua vez, poderão formar estruturas tridimensionais contínuas e isoladas no interior da suspensão.

MOONEY (1951), propôs um modelo semi-empírico que leva em consideração a possibilidade de aglomeração como o principal agente da dependência da viscosidade de suspensões concentradas com a concentração da fase dispersa, de forma que:

$$\eta_r = \eta_{esp} + 1 = \exp \left[\frac{2,5\varphi}{1 - K\varphi} \right] \quad (2.10)$$

Segundo, VINOGRADOV e MALKIN (1980), o modelo semi-empírico de MOONEY também tem suas falhas, pois ele não leva em consideração o conceito de máxima concentração possível das partículas dispersas numa suspensão, a qual poderá ser estimada da seguinte forma:

$$\varphi_m = \left[\frac{2,5 \varphi}{1 - \varphi/\varphi'} \right] \quad (2.11)$$

Para baixas concentrações, ou seja, $\varphi \rightarrow 0$, $\varphi_m = 2,5$, coincidindo com o mesmo valor da equação de Einstein, porém quando $\varphi \rightarrow \varphi'$, $\varphi_m \rightarrow \infty$ onde esta concentração máxima, seria uma concentração crítica.

Segundo VINOGRADOV e MALKIN (1980), MOONEY para sanar a deficiência do seu modelo, introduziu a concentração máxima na sua equação, da seguinte maneira:

$$\eta_r = \exp(1 + \varphi_m) \quad (2.12)$$

EILERS, também propôs um modelo que leva em consideração o conceito da concentração máxima, VINOGRADOV (1980).

$$\eta_r = \left[1 + \left(\frac{\varphi_m}{2} \right) \right]^2 \quad (2.13)$$

Tanto o modelo de MOONEY como o de EILERS, tendem para o modelo de Einstein quando a concentração da fase dispersa tende a zero.

2.8 - Comportamento Não-Newtoniano

Segundo ALESSANDRINI et alii (1983), as operações encontradas na preparação, transporte e emprego das suspensões, merecem um conhecimento prévio das suas propriedades reológicas. A variedade de comportamentos não-newtonianos é resultado do meio de dispersão utilizado, ou seja as propriedades físicas e a natureza química do meio afetam as condições de agregação da fase dispersa, alterando a estabilidade e o comportamento reológico da suspensão.

Segundo NAVARRO (1990), esta alteração da estabilidade e do comportamento reológico acontece, mesmo quando se trata de fluidos de mesma natureza, mas com viscosidades diferentes, formando suspensões com um mesmo tipo de carga. Dentre tais alterações, cita-se, concentrações críticas diferentes para a fase dispersa, com a concentração crítica sendo maior para o fluido menos viscoso.

Considerando o meio dispersante, sendo newtoniano, BATCHELOR (1970), resumiu os efeitos das propriedades e características das partículas no aparecimento dos diferentes comportamentos não-newtonianos, tais como: forma, tamanho e deformabilidade das partículas.

A interação entre as partículas da fase dispersa, também é responsável pelo surgimento de diversos comportamentos não-newtonianos numa suspensão concentrada cujo meio de dispersão seja newtoniano. Geralmente, este distanciamento do comportamento newtoniano é caracterizado pela dependência da viscosidade das suspensões com fatores, tais como, taxa de deformação. NAVARRO, (1989).

2.9 - Dependência com a Taxa de Deformação

Segundo, HAN (1978), METZNER (1961), ALVES et al (1952), KATAOKA et al (1978), CHONG et al (1971), DARBY e ROGERS (1980), CARMÍ (1981), ALESSANDRINI et alii (1983), JEFREY e ACRIVOS (1976), CHAN e POWEL (1984), NAVARRO (1989), a forma que melhor representa a dependência das propriedades reológicas de suspensões concentradas com a taxa de deformação e a diminuição da viscosidade aparente destas suspensões com o aumento da taxa de deformação, isto é, a maioria das suspensões concentradas são pseudoplásticas, porém, segundo METZNER e WHITHOCK (1990), algumas suspensões concentradas apresentam comportamento dilatante.

Segundo NAVARRO et alii (1990), comportamentos não-newtonianos independentes do tempo podem aparecer em suspensões diluídas, como é o caso da dilatação em suspensões diluídas do colágeno de marron..

Segundo NAVARRO (1990), o comportamento reológico em decorrência da dependência da viscosidade aparente com a taxa de deformação são causados pela formação ou destruição de estruturas espaciais existentes no interior da suspensão durante o escoamento, sob a influência da força cisalhante. Nos polímeros, o enorme comprimento de suas macromoléculas flexíveis, as interações intra e intermoleculares, favorecem a formação de núcleos macromoleculares, estes, se desenvolvem ou se destroem durante o cisalhamento, dependendo da ação das partículas de carga. VINOGRADOV e MALKIN (1980).

Segundo, METZNER (1961), partículas pequenas, tornam a suspensão pseudoplástica. Para suspensões que apresentam este comportamento, aplica-se os modelos da potência.

Em baixas taxas de deformação e em determinadas concentrações, certas suspensões apresentam valores residuais de tensão de cisalhamento, isto é, só fluem a partir de um determinado valor da tensão de cisalhamento, METZNER (1957). Para suspensões que apresentam este comportamento, aplicam-se os seguintes modelos:

1. Modelo de BINGHAN

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.14)$$

2. Modelo de HERSCHE - BULKLEY

$$\tau = K \dot{\gamma}^n + \tau_y \quad (2.15)$$

3. Modelo de CASSON

$$\tau = \dot{\gamma} \left[\tau_y^{1/2} + \mu_c^{1/2} \right] \quad (2.16)$$

Para suspensões em polidimetilsiloxano, utilizando o modelo de potência, tanto para suspensões newtonianas quanto para as pseudoplásticas, foi proposta a seguinte Equação, NAVARRO e ALSINA (1991 a).

$$[K_o \exp(B \cdot C)] \cdot \dot{\gamma} \quad \text{para } C \leq C_c \quad (2.17)$$

$$\tau = \begin{cases} [K_o \exp(B \cdot C)] \cdot \dot{\gamma}^{(n - A \cdot C)} & \text{para } C \geq C_c \end{cases} \quad (2.18)$$

Esta Equação leva em consideração o efeito da concentração da fase dispersa nos índices da potência e consistência, da lei de potência.

2.10 - Dependência com o Tempo

A dependência das propriedades reológicas com o tempo, segundo PUZANSKY et alii (1986), GADALA e ACRIVOS (1983), KOSINSKY e CARUTERS (1985), LIN (1975), entre outros, é proveniente do aumento da concentração e o consequente surgimento de interação entre as partículas.

Segundo KOSINSKY e CARUTERS (1985), esta dependência com o tempo é verificada quando as dimensões das partículas se aproximam das dimensões dos colóides.

A dependência com o tempo, segundo CARUTERS e ZIEGELBAUR (1985), geralmente ocorre associada a outros fenômenos não-newtonianos, como a dilatância e a pseudoplasticidade, podendo ocorrer antes, durante ou após estes comportamentos. NAVARRO & ALSINA (1991 b) verificaram que para suspensões de alumina em polidimetilsiloxano com concentração acima da concentração crítica são anti-tixotrópicas e, após estabilização com o tempo, pseudoplásticas. Isto ocorre porque o aumento na taxa de deformação acelera o processo de destruição estrutural fazendo com que o efeito do tempo seja menor.

Segundo LIN (1975), este comportamento provém da possibilidade de as interações serem fortes ou não para que haja formação de aglomerados por parte das partículas dispersas. Quando a interação resultar numa aglomeração inicial das partículas, será destruída durante o cisalhamento numa taxa de deformação constante com o tempo, resultando um comportamento tixotrópico, ou então, em alguns casos, são aumentadas causando um comportamento anti-tixotrópico.

NAVARRO & ALSINA (1991 b), verificaram que para suspensões de alumina com polidimetilsiloxano, a dependência com o tempo acontece após ser excedida a concentração crítica da fase dispersa, adicionalmente, propuseram o seguinte modelo para caracterizar o caráter anti-tixotrópico das suspensões.

$$\beta = \left[\frac{\log T}{\log t} \cdot \frac{T_e - T_2}{T_2} \right] \times 100 \quad (2.19)$$

Os resultados obtidos, mostram que as suspensões anti-tixotrópicas possuem um coeficiente β mais acentuado nas taxas de deformação menores e que o tempo de estabilização como também a viscosidade aparente destas suspensões diminuem com o aumento da taxa de deformação.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais:

- Alumina Hidratada Alcoa 710
- Fluido Multgear EP.

A Alumina Hidratada ou Alumina Trihidratada, é denominada quimicamente de hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, é um produto micronizado extremamente fino. É bastante utilizada para reforços de pigmentos e cargas para produtos de borracha, carga para polidores e ceras.

Segundo o fabricante, a Alcoa, as características típicas desta alumina estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características da Alumina Hidratada Alcoa 710.

COMPONENTE	QUANTIDADE
Al_2O_3	64,5 % em peso
SiO_2	0,020 % em peso
Fe_2O_3	0,018 % em peso
Na_2O	0,30 % em peso
Perda ao fogo de 300 a 1000°C	35,0 % em peso
+ 22 microns, %	0 - 1
+ 7,8 microns, %	32 - 45
+ 3,9 microns, %	62 - 70
+ 1,9 microns, %	95 - 97

O fluido Multgear EP, fabricado pela Texaco Brasil S.A., é um fluido marron de alta viscosidade, possui excelente estabilidade à oxidação, proteção contra desgaste, características antiferrugem e anticorrosiva.

Algumas propriedades deste fluido foram determinadas no laboratório e descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades Físicas do Fluido Multgear EP à 25°C

Densidade	:	1,11 g/cm ³
Viscosidade	:	334 cst

3.2 - Equipamentos:

Para o preparo das suspensões e obtenção das propriedades reológicas foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Agitador Fisaton de Bastão com velocidade controlada. Faixa 250 a 1600 rpm.
2. Balança de Precisão, modelo Sartorius 2462, fabricado por Sartorius GMBH, Alemanha. Precisão de 0,01g.
3. Viscosímetro Brookfield - RVT, com Spindle específico de nº. 1, fabricado por Brookfield Engineering Laboratories, Inc., E.U.A.

3.3 - Procedimento Experimental

3.3.1 - Preparo das Suspensões

Todas as suspensões foram preparadas em um becker de 600ml, tomando por base um volume de 400ml de fluido. A este volume de fluido juntou-se as quantidades necessárias, em gramas, de alumina, para se atingir as concentrações desejadas de 5, 10, 15 e 20 gramas de alumina para cada 100ml de fluido.

As suspensões seguintes, 25, 30, 35 e 40 gramas de alumina por 100ml de fluido foram preparadas a partir das suspensões de concentrações inferiores.

Após a introdução de alumina todas as amostras foram colocadas em repouso durante 24 horas.

Passado o repouso, as amostras foram submetidas a agitação no Agitador Fisaton, variando o tempo de agitação para cada velocidade, com o objetivo de dispersar por completo as partículas de alumina (não se usou defloculantes).

Todas as amostras apresentam completa estabilidade aproximadamente 24 horas contadas a partir do término da dispersão. Após este período todas as partículas de alumina decantaram dando origem a duas fases distintas.

3.3.2 - Medição das Propriedades Reológicas

Todos os testes foram realizados em temperatura e pressão ambientais de 25°C e 1atm respectivamente. As leituras foram feitas de acordo com os manuais "Operating Instructions" e "More Solutions To Sticky Problems", BROOKFIELD (1980).

As amostras homogenizadas foram submetidas à variação da velocidade de teste do equipamento, com Spindle 1, desde a menor velocidade (0,5 rpm) até a velocidade na qual a leitura excedesse a escala e vice-versa, parando o viscosímetro a cada mudança de velocidade, anotando-se a leitura após 2 minutos em cada velocidade.

O processo de homogenização foi feito em três velocidades de agitação diferentes, 300, 450 e 500 rpm, durante 5, 10 e 15 min para cada velocidade. Em seguida foi feita a leitura para cada velocidade com o seu respectivo tempo de agitação, de acordo com o método descrito anteriormente.

3.4 - Tratamento dos Dados Experimentais

Os dados experimentais presentes nas Tabelas do Apêndice 1 foram obtidos com auxílio de manipulações matemáticas das leituras geradas através do viscosímetro para cada velocidade de teste com seu respectivo tempo.

3.4.1 - Tensão de Cisalhamento

Segundo MITSCHKA (1982), a Tensão de Cisalhamento em Pascal, obtém-se multiplicando o valor da leitura por um fator correspondente ao spindle utilizado, da seguinte forma:

$$\tau_i = K_c \times L_i \quad (3.1)$$

Para o Spindle 1 especificamente $K_c = 0,035$ Pa, resultando:

$$\tau_i = 0,035 \times L_i \quad (3.2)$$

3.4.2 - Índice da Potência

Segundo MITSCHKA (1982), com os valores da velocidade de teste (V_i) e da leitura estabilizada (L_i) faz-se uma regressão linear do tipo $y = Ax + B$. Se o coeficiente de correlação, r , for próximo de 1, a relação $\log V$ versus $\log L$ é linear e o fluido será chamado de fluido da potência, enquanto que o coeficiente, A , da regressão será o índice da potência n . Se a relação acima não for linear, ao se plotar os valores de $\log L$ em função de $\log V$ traça-se uma curva suave interligando os pontos. Para cada ponto correspondente a cada velocidade de teste calcula-se a inclinação e o valor do índice da potência, denominado de Aparente, calculado da seguinte maneira:

$$n_i = d \log (L_i \times K_c) / d \log V_i \quad (3.3)$$

Utilizando o valor atribuído de 0,035 a K_c , a equação acima assume a forma:

$$n_i = d \log (0,035 L_i) / d \log V_i \quad (3.4)$$

3.4.3 - Taxa de Deformação

Para cada valor do índice da potência e cada spindle existe um fator correspondente K_f (ver Tabela 2.1). Segundo MITSCHKA (1982), o produto deste fator pela velocidade de teste aplicada resultará na taxa de deformação correspondente em s^{-1} .

$$\dot{\gamma} = K_f(n) \times V_i \quad (3.5)$$

3.4.4 - Viscosidade Aparente

A Viscosidade Aparente, em Pa.s, é obtida pelo resultado do quociente entre o valor da tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, do seguinte modo, NAVARRO (1989).

$$\mu_A = \tau / \gamma \quad (3.6)$$

3.4.5 - Índice de Consistência

O Índice de Consistência, K , em Pa.s, é obtido da seguinte forma:

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

$$\text{Log } L = b + n \text{Log } V \quad (3.7)$$

Pela Lei da Potência

$$\text{Log } \tau = \log K + n \log \gamma \quad (3.8)$$

Segundo MITSCHKA, as Equações 3.1 e 3.5 foram substituídas em 3.8, resultando em:

$$\log (L K_c) = \log K + n \log (K_t V) \quad (3.9)$$

Ou seja,

$$\log L = \log (K \times K_t^n / K_c) + n \log V \quad (3.10)$$

Fazendo uma comparação entre as Equações 3.10 e 3.7 obtém-se:

$$\log (K \times K_t^n / K_c) = b \quad (3.11)$$

Ou então,

$$K = 10^b \times K_c / K_t^n \quad (3.12)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Introdução

A apresentação e discussão dos resultados obtidos no presente trabalho serão feitas através da influência da concentração da alumina nos seguintes parâmetros: viscosidade aparente das suspensões, curvas de fluxo, índice da potência e índice da consistência.

Os resultados obtidos com as suspensões de multigear-alumina encontram-se nas Tabelas do apêndice 1.

4.2 - Influência do Tempo e Velocidade de Homogenização

Mediante uma análise das Tabelas de 1 a 24 do apêndice 1, pode-se verificar que para as velocidades de homogenização 300, 450 e 600 rpm e variação do tempo de homogenização de 5, 10 e 15 min, todas as suspensões assumem comportamento newtoniano para concentrações inferiores a 10g/100ml e assumem um comportamento não-newtoniano, para concentrações superiores a esta. Portanto, com base nestas tabelas, pode-se afirmar que nem a velocidade de agitação, nem o tempo de agitação exercem influência significativa nas propriedades reológicas, esta afirmação pode ser melhor esclarecida através das Figuras 4.1 e 4.2

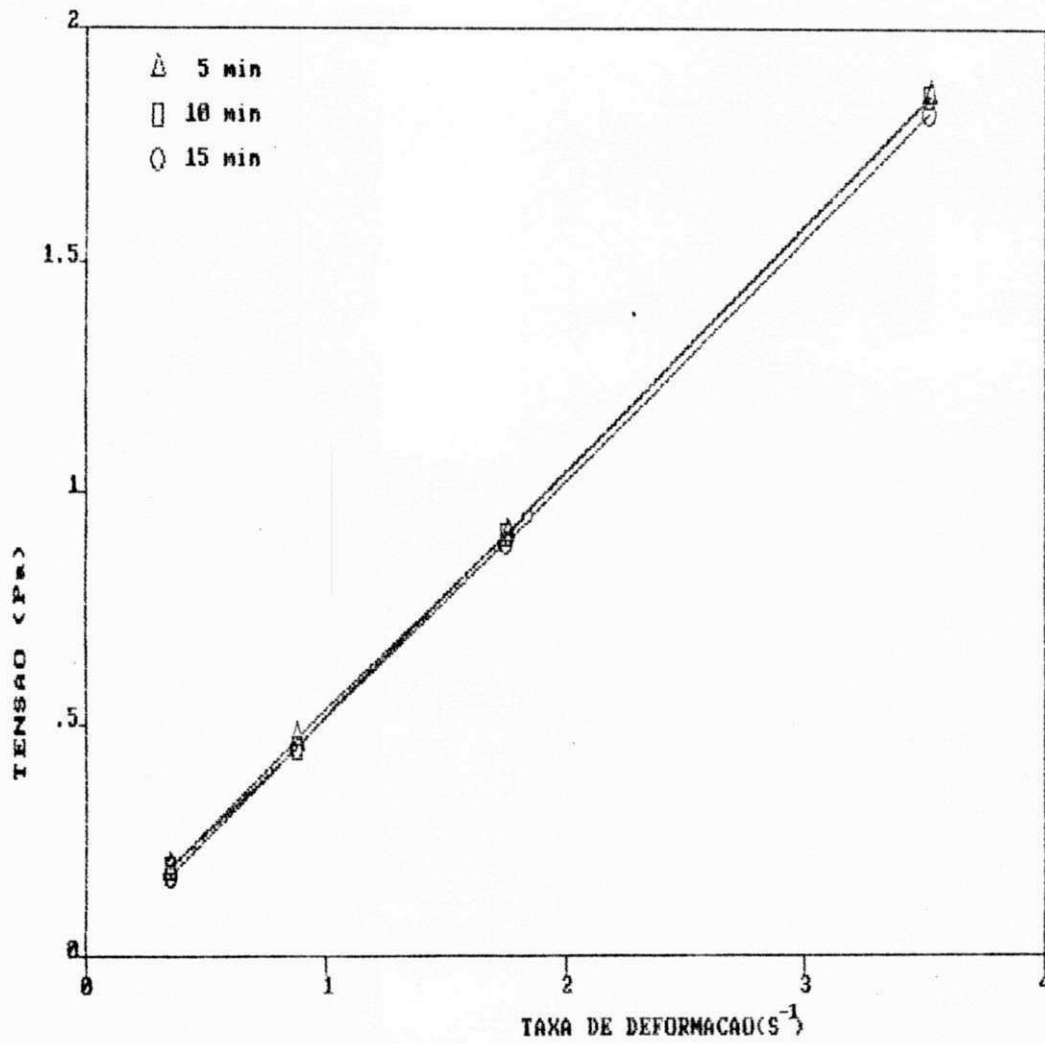


Figura 4.1: Influência do tempo de agitação na relação tensão - taxa de deformação

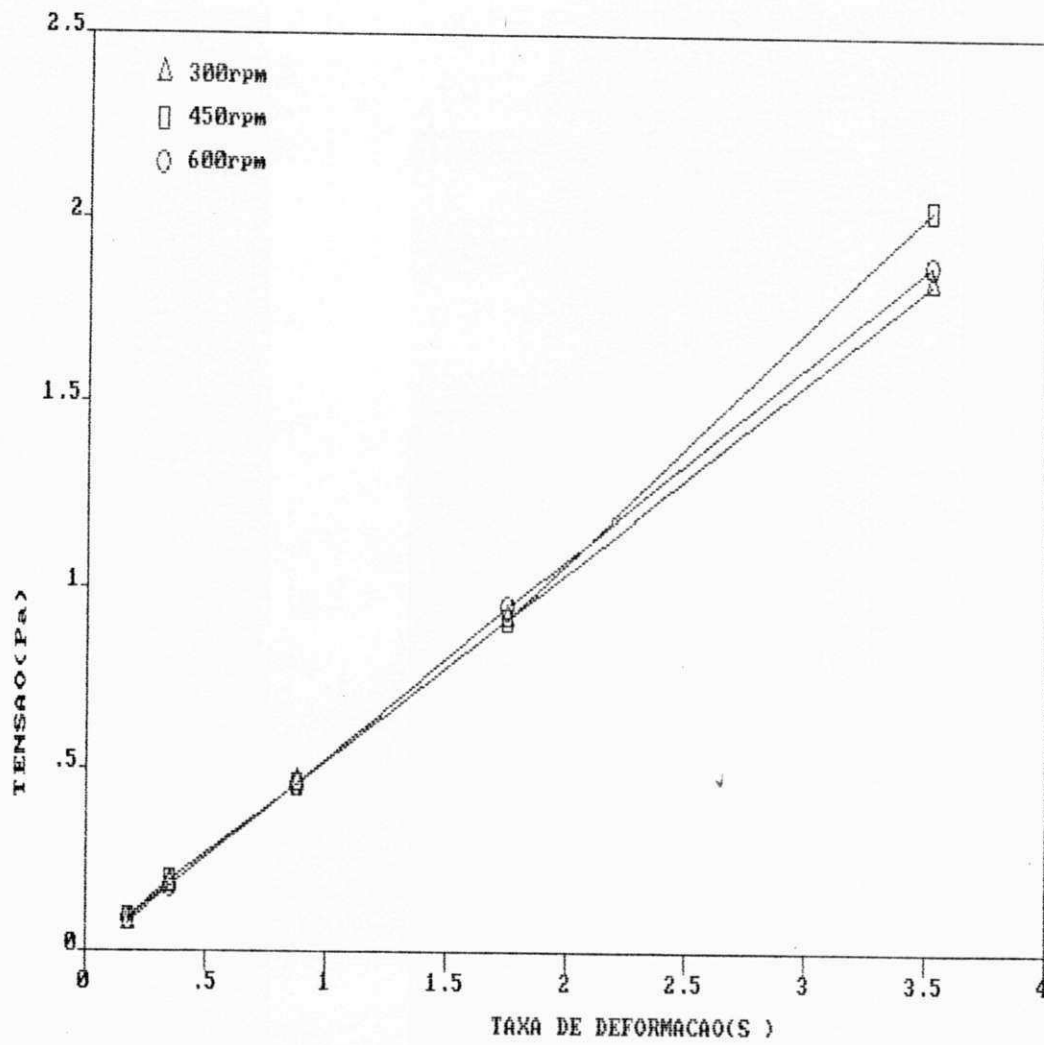


Figura 4.2: Influência da velocidade de agitação na relação tensão - taxa de deformação

4.3 - Influência da Concentração da Alumina

4.3.1 - Viscosidade Aparente das Suspensões

Para verificar a influência da concentração na viscosidade aparente das suspensões é necessário uma análise da Figura 4.3.

Nas condições de estudo, todas as suspensões, independente da velocidade e tempo de agitação, apresentam um leve aumento na viscosidade aparente, para concentrações na faixa de 5 a 10 g/100 ml. Entretanto, a partir de 10g/100 ml, especificamente para as velocidades de teste (rotações) de 0,5 a 1,0 rpm, foi verificado um aumento brusco na viscosidade aparente, denominando portanto, esta concentração de concentração crítica, C_c .

Segundo NAVARRO (1989), este comportamento deve-se as precárias condições de empacotamento das partículas a partir da concentração crítica, fazendo com que o atrito entre elas aumente bruscamente.

De forma geral, a viscosidade aparente de todas as suspensões estudadas aumenta com o aumento da concentração de alumina, sendo este um comportamento esperado, por se estar introduzindo partículas sólidas num meio líquido. Porém, a partir de 2,5 a 10,0 rpm este aumento é menos pronunciado, pois segundo NAVARRO (1989), na medida em que a taxa de deformação é aumentada, a viscosidade aparente das suspensões tendem a atingir um valor constante que independente da fase dispersa, é sempre maior que a do meio de dispersão nas mesma condições.

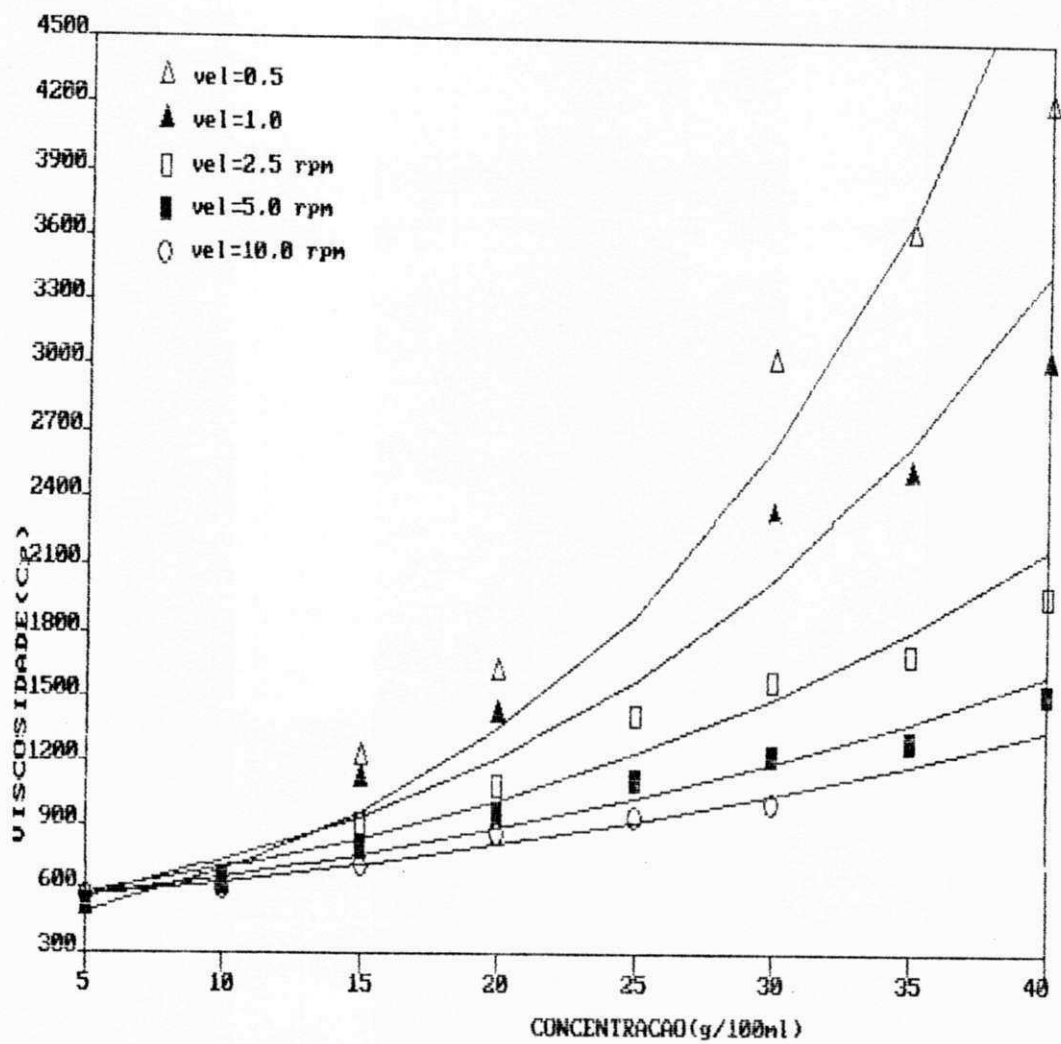


Figura 4.3: Influência da velocidade de teste na relação viscosidade aparente

4.3.2 - Curvas de Fluxos

A Figura 4.4 representa a tensão em função da taxa de deformação, para velocidade de homogenização de 300 rpm e 5min, como mostra a figura, a relação tensão deformação é linear e portanto todas as suspensões do fluido multigear, são newtonianas, para concentrações de alumina inferiores à concentração crítica, 10g/100ml. A partir desta C_c até 40g/100ml, todas as suspensões que são não-newtonianas, assumindo um comportamento pseudoplástico.

Através da Figura 4.5, esta mudança de comportamento pode ser melhor visualizada, ou seja, para concentração de alumina de 5g/100ml, a viscosidade aparente não varia com a taxa de deformação, iniciando uma leve variação a 10g/100ml.

Ao estudar suspensões de polidimetilsiloxano-alumina, NAVARRO (1989) obteve um comportamento semelhante, sendo newtoniano para concentrações inferiores a 15g/100ml. Esta diferença de concentração crítica pode ser atribuída ao fato de que por ser maior a alumina utilizada neste trabalho, ocorre maior diferença no estado de aglomeração das partículas.

A Figura 4.5 mostra que a partir de 15g/100ml, as suspensões tem suas viscosidades aparentes decrescendo com o aumento da taxa de deformação de 0 a $1,7 \text{ s}^{-1}$. Para deformações superiores a $1,7 \text{ s}^{-1}$ e concentrações inferiores a 35g/100ml, a variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação é quase inexistente. Para concentrações de alumina inferiores a C_c , todas as suspensões em qualquer taxa de deformação são newtonianas, porém, acima da concentração crítica e para taxas de deformação entre a faixa de 0 a $1,7 \text{ s}^{-1}$, apresentam-se como pseudoplásticas. A partir de $1,7 \text{ s}^{-1}$ até o valor máximo estudado, todas as suspensões com concentrações compreendidas entre 15 e 30g/100ml tornam-se newtonianas outra vez.

Isto pode ser explicado, pois segundo METZER (1961) e NAVARRO (1989), a partir de uma determinada taxa de deformação, a viscosidade aparente de uma suspensão

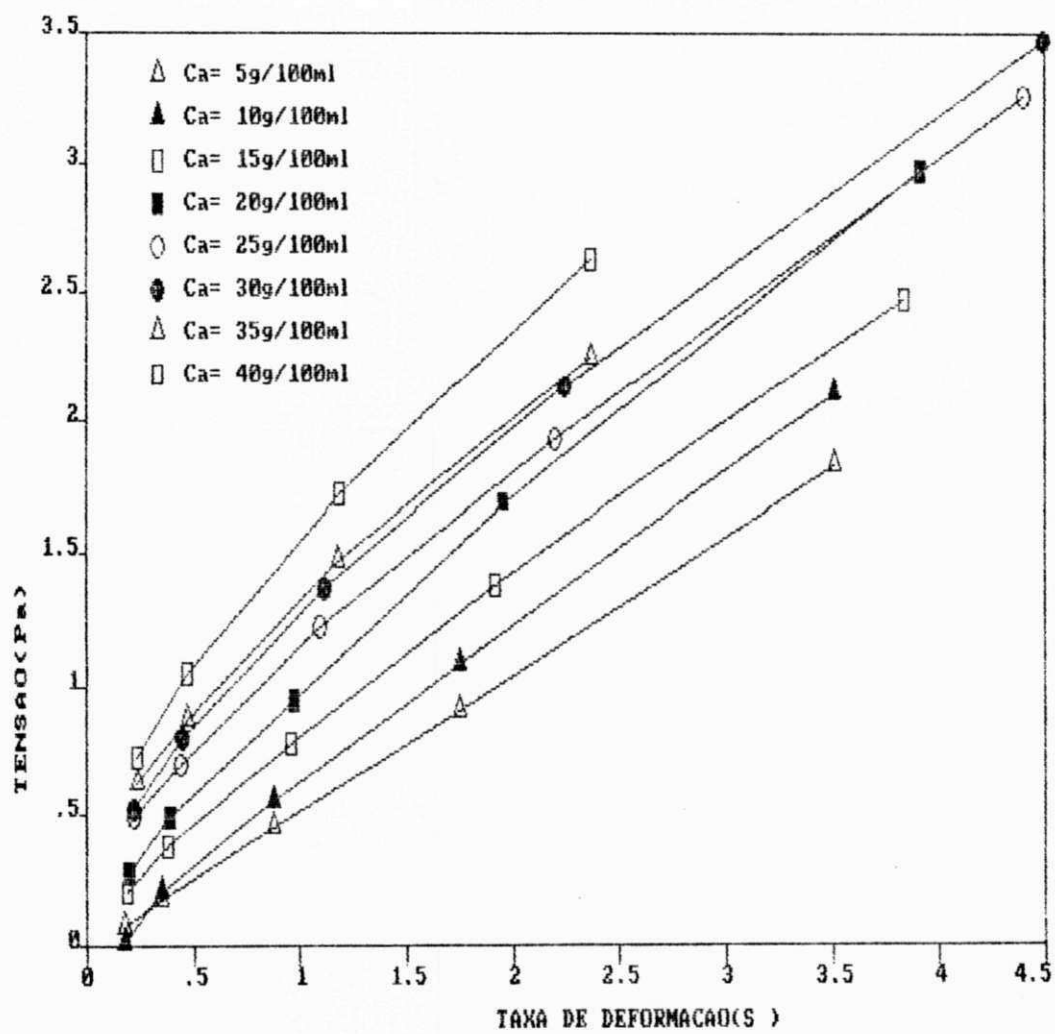


Figura 4.4: Influência da concentração da alumina nas curvas de fluxo

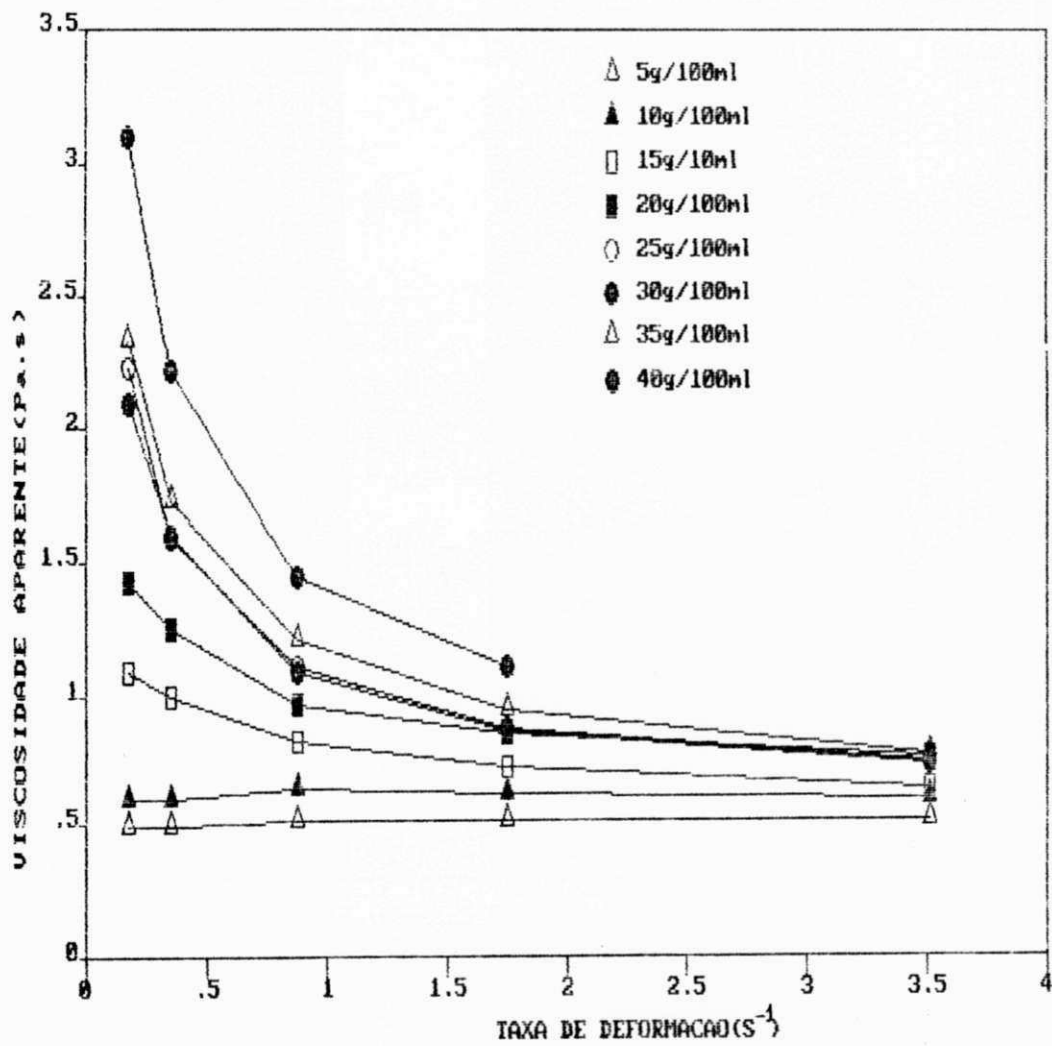


Figura 4.5: Influência da concentração na relação entre a viscosidade e taxa de deformação

torna-se constante e superior a do meio de dispersão. O caráter pseudoplástico das suspensões é um resultado da destruição dos aglomerados de partícula causada pela orientação desta partícula durante o escoamento.

Em altas taxas de deformação esta orientação torna-se completa e, conseqüentemente todos os aglomerados são destruídos. Não havendo mais aglomerados a serem destruídos, segundo BRYDSON (1971), a viscosidade aparente da suspensão torna-se estável e a suspensão newtoniana.

Para concentrações 35 e 40g/100ml, dentro da faixa de cisalhamento estudada, não se verificou estabilidade da viscosidade aparente com a taxa de deformação, observando que esta suspensão é altamente sensível à taxa de deformação.

Todas as suspensões estudadas não apresentaram valores residuais, por isso, segundo NAVARRO (1989), podem ser incluídas em dois modelos:

1 - Modelo de Newton - Para as suspensões que não apresentaram variação na viscosidade aparente com a taxa de deformação.

2 - Modelo de Potência de Ostwald - Para aquelas cuja viscosidade aparente variou em algum grau com a taxa de deformação.

4.3.3 - Índice da Potência

Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 estão representados os dados do índice de potência em função da concentração, para a faixa de velocidade de agitação estudada.

Para concentrações de alumina inferiores a C_c , o índice da potência das suspensões não varia com a concentração e é igual a 1,0 até que se exceda a concentração crítica.

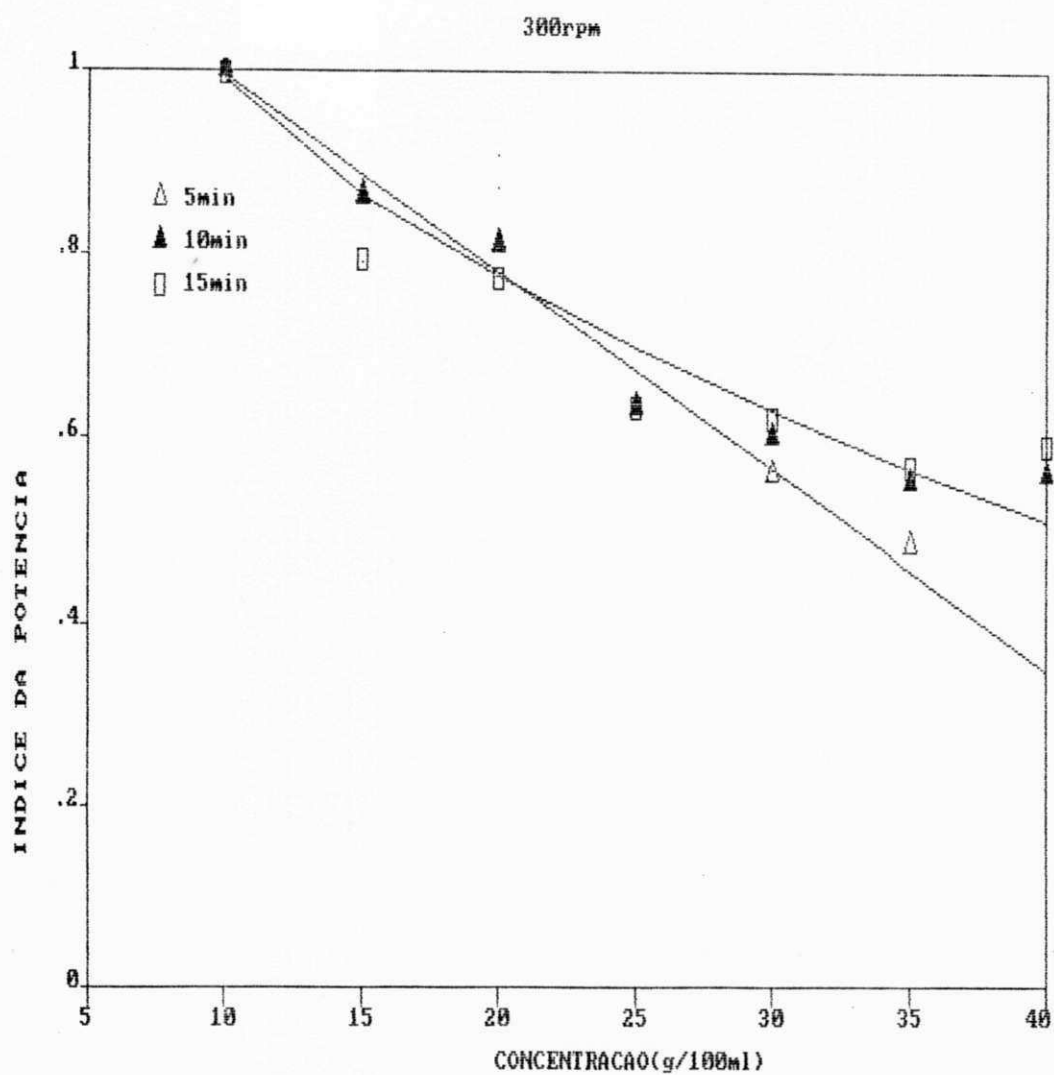


Figura 4.6: Influência da concentração de alumina no índice de potência para velocidade de agitação de 300 rpm

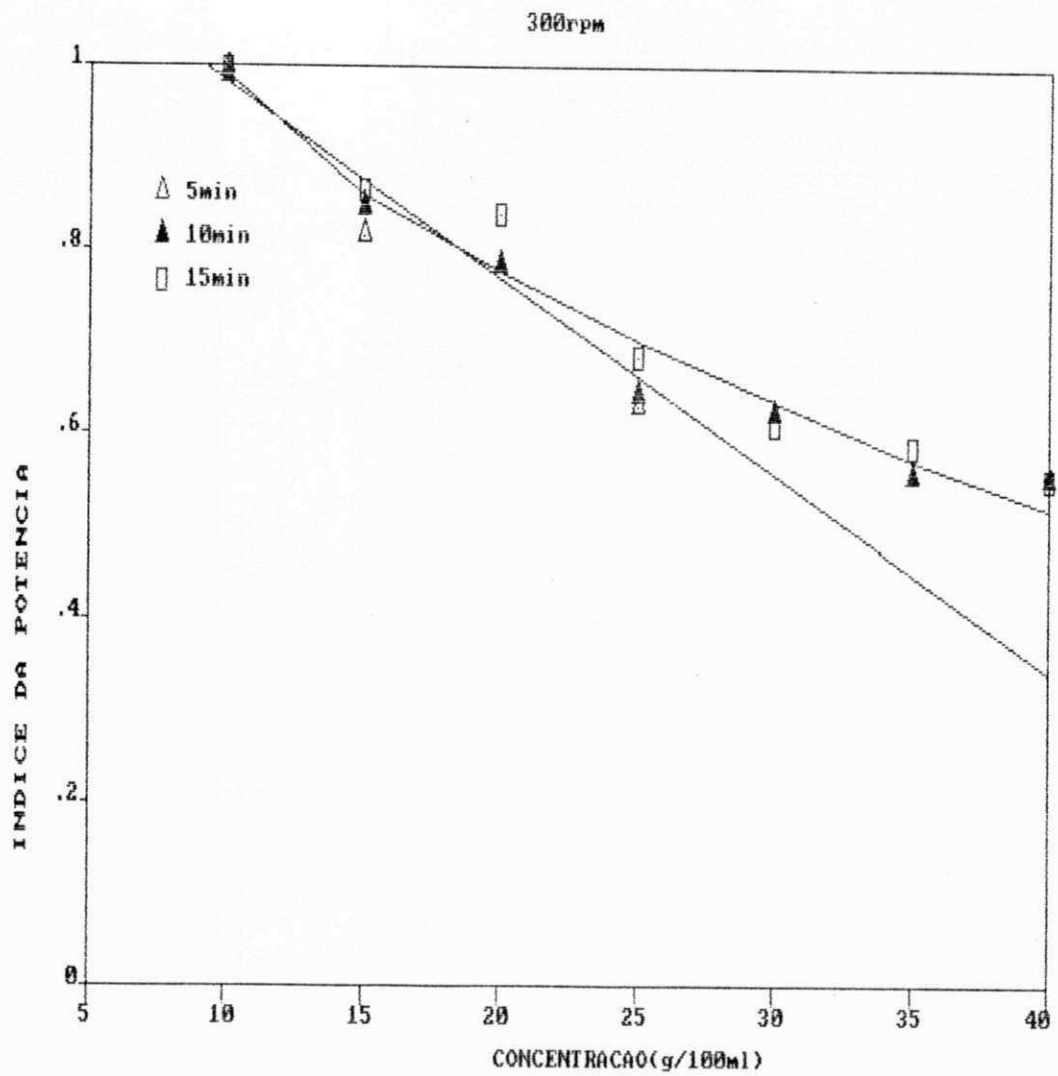


Figura 4.7: Influência da concentração de alumina no índice de potência para velocidade de agitação de 450 rpm

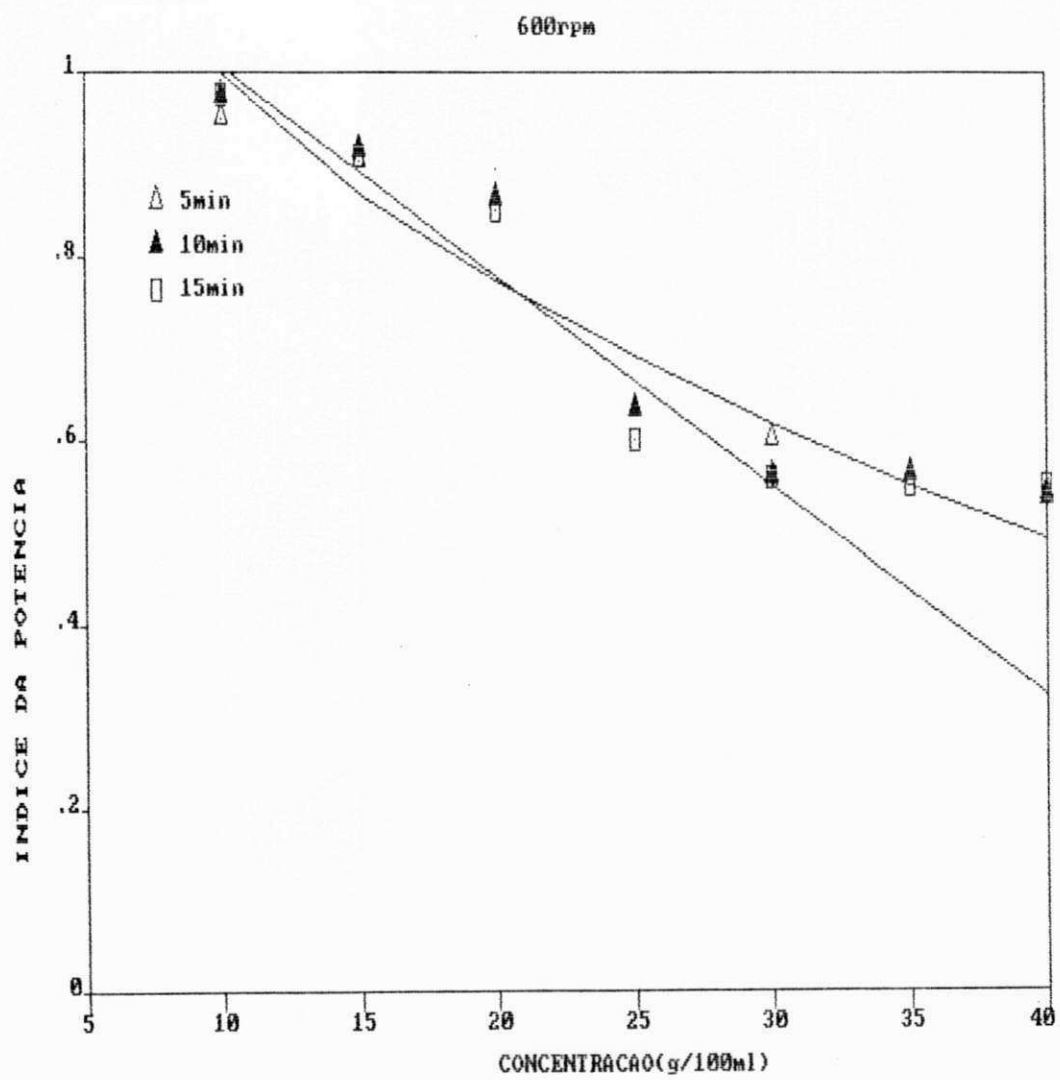


Figura 4.8: Influência da concentração de alumina no índice de potência para velocidade de agitação de 600 rpm

Para concentrações de alumina, superiores à concentração crítica, as suspensões estudadas apresentam índice de potência menor que 1,0, ou seja, identificando a partir desta concentração o comportamento pseudoplástico.

Os dados experimentais podem ser agrupados uma curva exponencial decrescente da seguinte forma:

$$N = 1 \quad \text{para} \quad C = C_c \quad (4.1)$$

$$N = N_0 \exp(AC) \quad C_c < C \leq 40 \text{ g/100ml} \quad (4.2)$$

Porém, para faixas de concentrações moderadas, ou seja, entre 10 e 25g/100ml, os dados experimentais podem perfeitamente ser ajustados através de uma reta decrescente, através do seguinte modelo:

$$N = N_i - BC \quad \text{para} \quad C_c < C \leq 25 \text{ g/100ml} \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.1, as constantes das Equações 4.1 e 4.2 estão representadas.

Tabela 4.1 - Valores empíricos para N_0 , A, N_i e B utilizados na Equação 4.2 e 4.3.

Velocidade de agitação (rpm)	N_0	A	Desvio Padrão Eq. 4.2	N_i	B	Desvio Padrão Eq. 4.3
300	1,163702	$-2,26039 \times 10^{-2}$	0,0051	1,086795	$-1,479238 \times 10^{-2}$	0,013
450	1,1883	$-2,121997 \times 10^{-2}$	0,00798	1,104784	$-1,547477 \times 10^{-2}$	0,011
600	1,221648	$-2,272032 \times 10^{-2}$	0,00505	1,124115	$-1,642765 \times 10^{-2}$	0,029

Mediante uma análise dos desvios da Tabela 4.1 observa-se que as Equações 4.2 e 4.3 possuem uma faixa de erro aceitável, inferior a 1%. Porém deve-se notar que a Equação 4.2, além de cobrir uma faixa de concentração maior, apresenta desvios menores. Com relação a influência da velocidade de agitação, confirma-se que nas condições estudadas não exerce efeito sobre o comportamento reológico das suspensões.

Em particular observa-se na Tabela 4.1 que os coeficientes que descrevem a variação do índice da potência com a concentração não apresenta diferenças significativas, sendo praticamente independentes da velocidade de agitação.

NAVARRO (1989), no seu estudo sobre suspensões de alumina em polidimetilsiloxano, encontrou uma dependência linear, para uma faixa de concentração de 0 a 25 g/100ml. Como foi visto o sistema aqui estudado apresentou um comportamento semelhante para esta faixa. O modelo exponencial decrescente parece-nos realístico, especialmente para concentrações mais elevadas. Nota-se que para $C \rightarrow 0$ o modelo proposto prever corretamente que $n \rightarrow 0$, ou seja, a suspensão tende a se tornar viscoplástico para concentrações elevadas.

4.3.4 - Índice da Consistência

Uma análise das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, observa-se que a influência da concentração da alumina no índice da consistência foi verificada em todas as velocidades estudadas. Da mesma forma que a viscosidade aparente, o índice de consistência aumenta com a concentração de alumina.

Este crescimento pode ser representado de forma exponencial. Para as concentrações superiores a concentração crítica, observa-se que este crescimento é mais acentuado.

Os dados experimentais podem ser agrupados, da seguinte maneira:

$$K = K_0 \exp(B \cdot C) \quad \text{Para } 5\text{g}/100\text{ml} \leq C \leq 40\text{g}/100\text{ml} \quad (4.4)$$

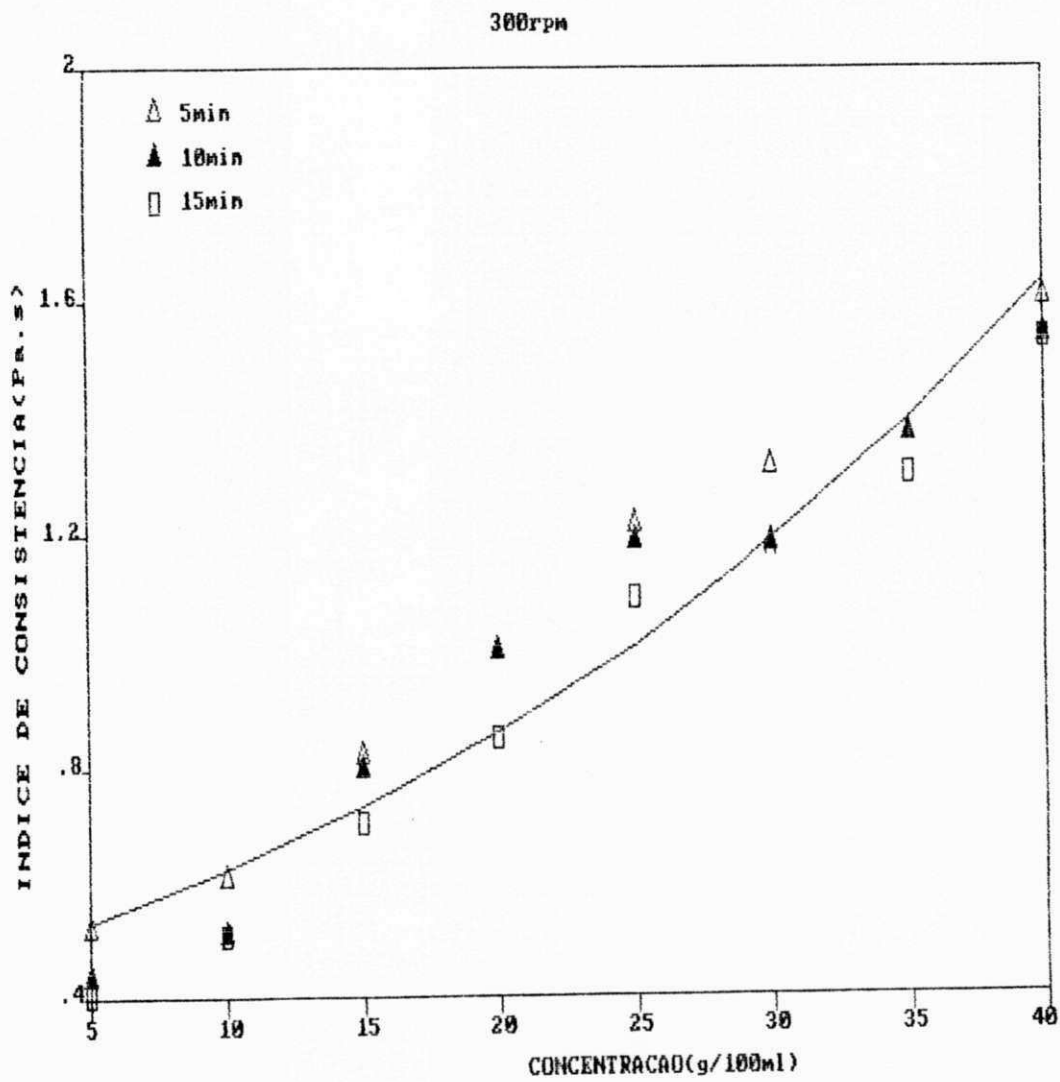


Figura 4.9: Influência da concentração da alumina no índice de consistência à 300 rpm

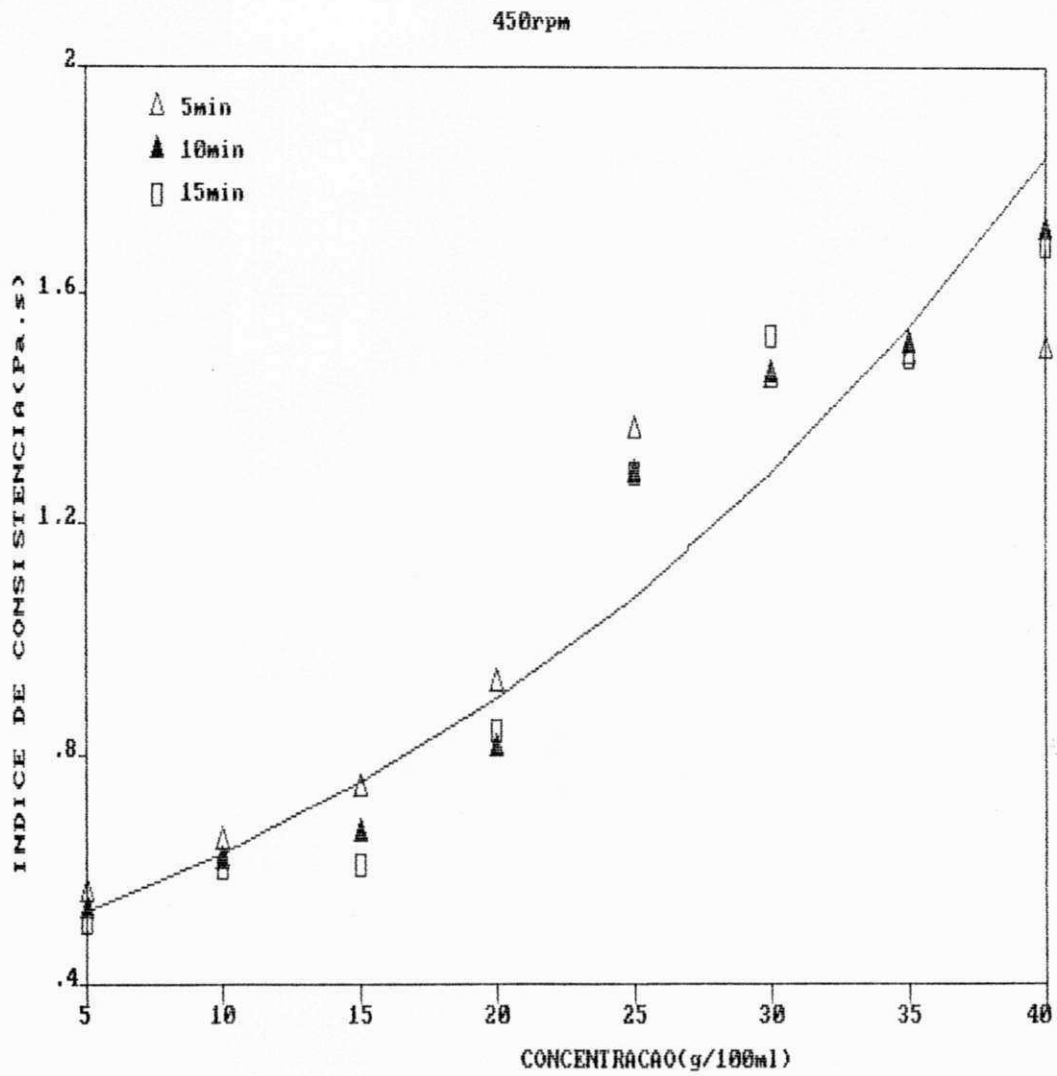


Figura 4.10: Influência da concentração da alumina no índice de consistência à 450 rpm

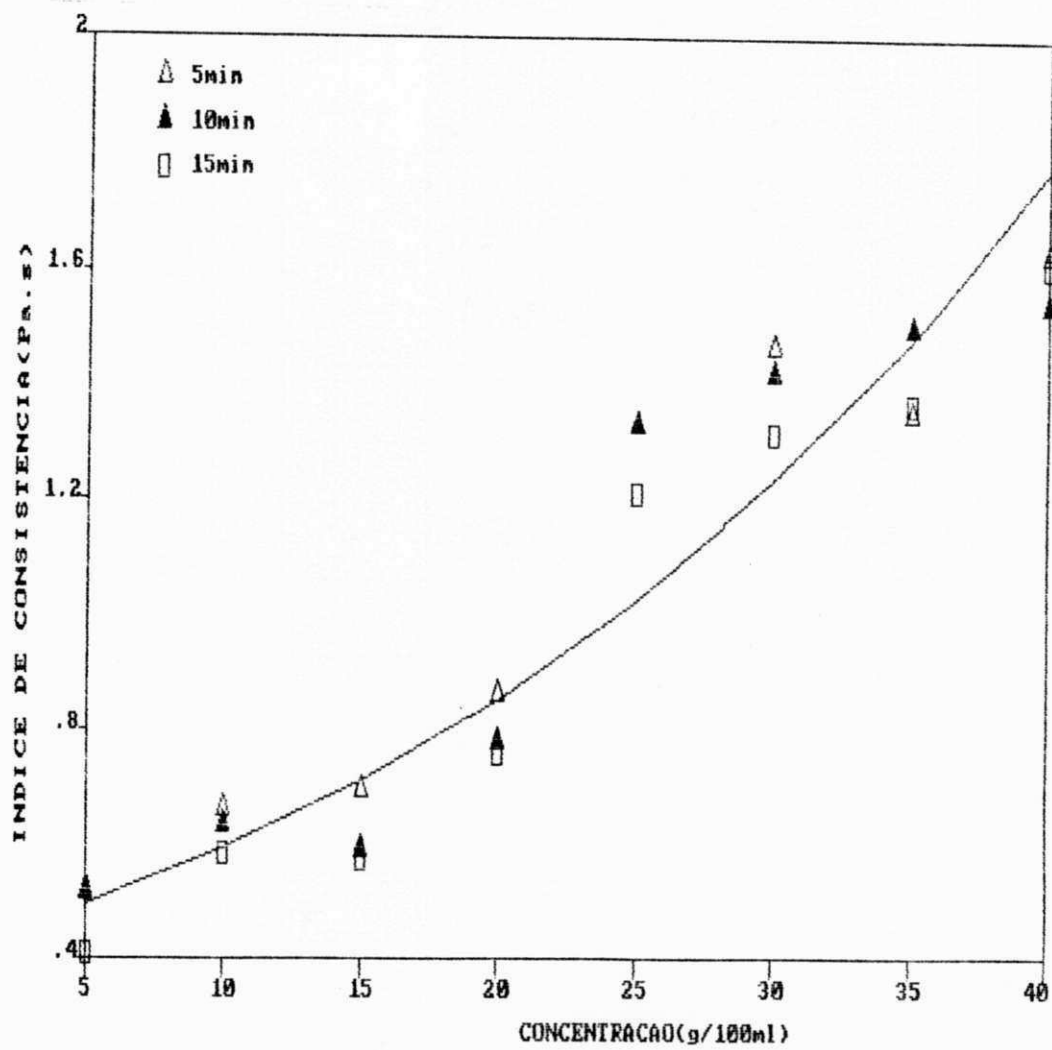


Figura 4.11: Influência da concentração da alumina no índice de consistência a 600 rpm

Na Tabela 4.2, encontram-se os valores de K_0 e B, para as velocidades de homogenização estudadas.

Tabela 4.2 - Valores empíricos para K_0 e B

Velocidade de agitação (rpm)	K_0 (Pa - s)	B (100g/100ml)	Desvio padrão
300	0,452	$3,21 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-3}$
450	0,439	$3,58 \times 10^{-2}$	7×10^{-3}
600	0,409	$3,67 \times 10^{-2}$	6×10^{-3}

Analisando os erros padrão da Tabela 4.2, pode-se verificar que os dados experimentais estão agrupados com boa margem de segurança na Equação 4.4

O índice de consistência do fluido puro calculado pela Equação 3.11, é $K \approx 0,40$, que comparando com os valores de K_0 para 300, 450 e 600 rpm, observa-se que há uma diferença insignificante.

Novamente, ao observar os valores de K_0 , para 300, 450 e 600 rpm, verifica-se que a velocidade de agitação não exerce influências significativas no índice da consistência.

NAVARRO (1989), ao estudar suspensões de polidimetilsiloxano em alumina, também encontrou dados experimentais que se enquadram muito bem de forma exponencial. Porém, devido ao fato do sistema estudado por NAVARRO ter uma alumina de granulometria diferente, como também os fluidos são diferentes, conseqüentemente os resultados encontrados para K_0 e b são também diferentes.

4.4 - Dependência com o Tempo

Ao verificar as Tabelas do apêndice 1, observa-se que todas as suspensões estudadas são independentes do tempo.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, estão representadas duas curvas de histerese das suspensões. Como pode se verificar as leituras para cada velocidade de teste (rotação) são as mesmas, tanto na ida como na volta, portanto baseado nestas observações, afirma-se que independente da concentração, da velocidade e tempo de agitação, todas as suspensões de fluido multigear-alumina são independentes do tempo.

Outra maneira de se analisar a dependência das propriedades reológicas seria através da relação torque-tempo para cada velocidade de teste e um único tempo de homogenização. Este método foi utilizado por NAVARRO (1989), para determinação da dependência do tempo, em suspensões de polidimetilsiloxano-alumina.

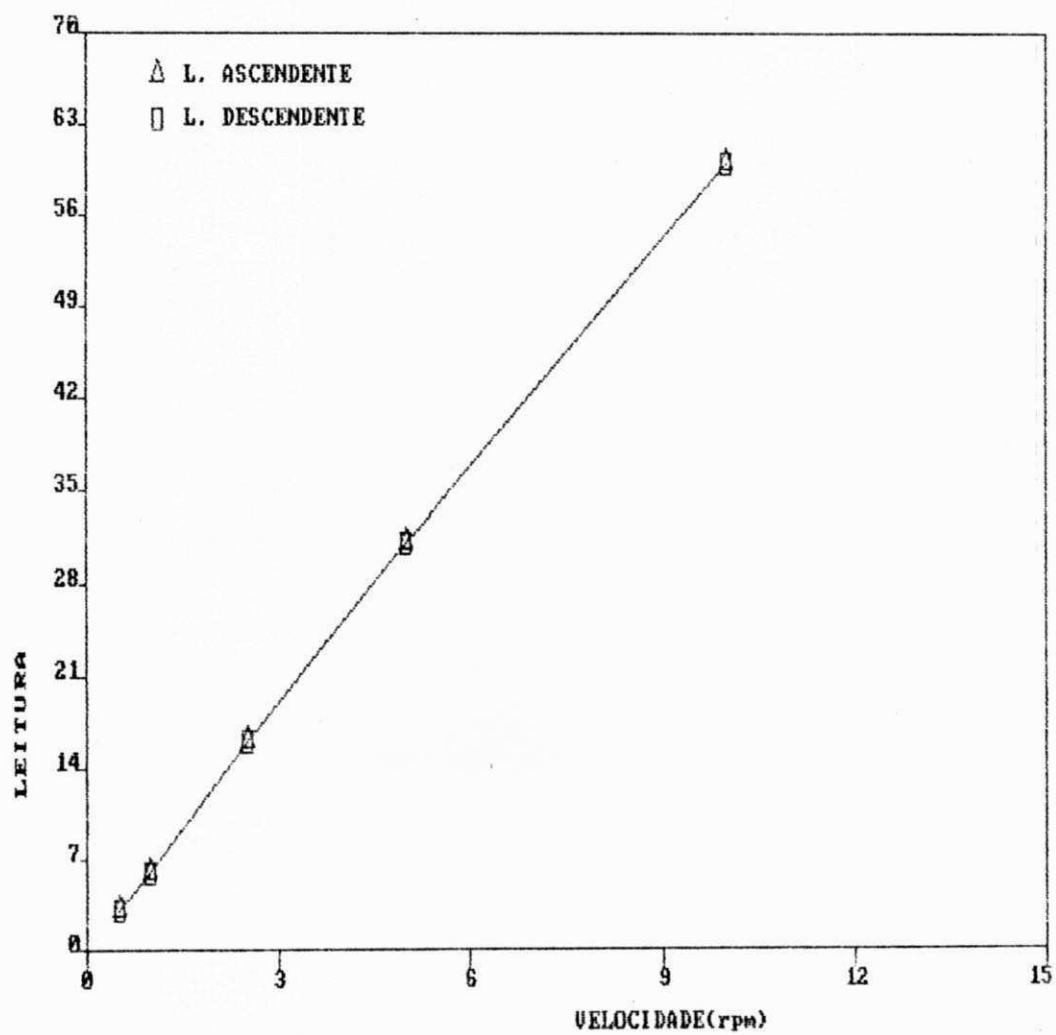


Figura 4.12: Curva de histerese à 300rpm e 5min, com concentração igual a 5g/10ml

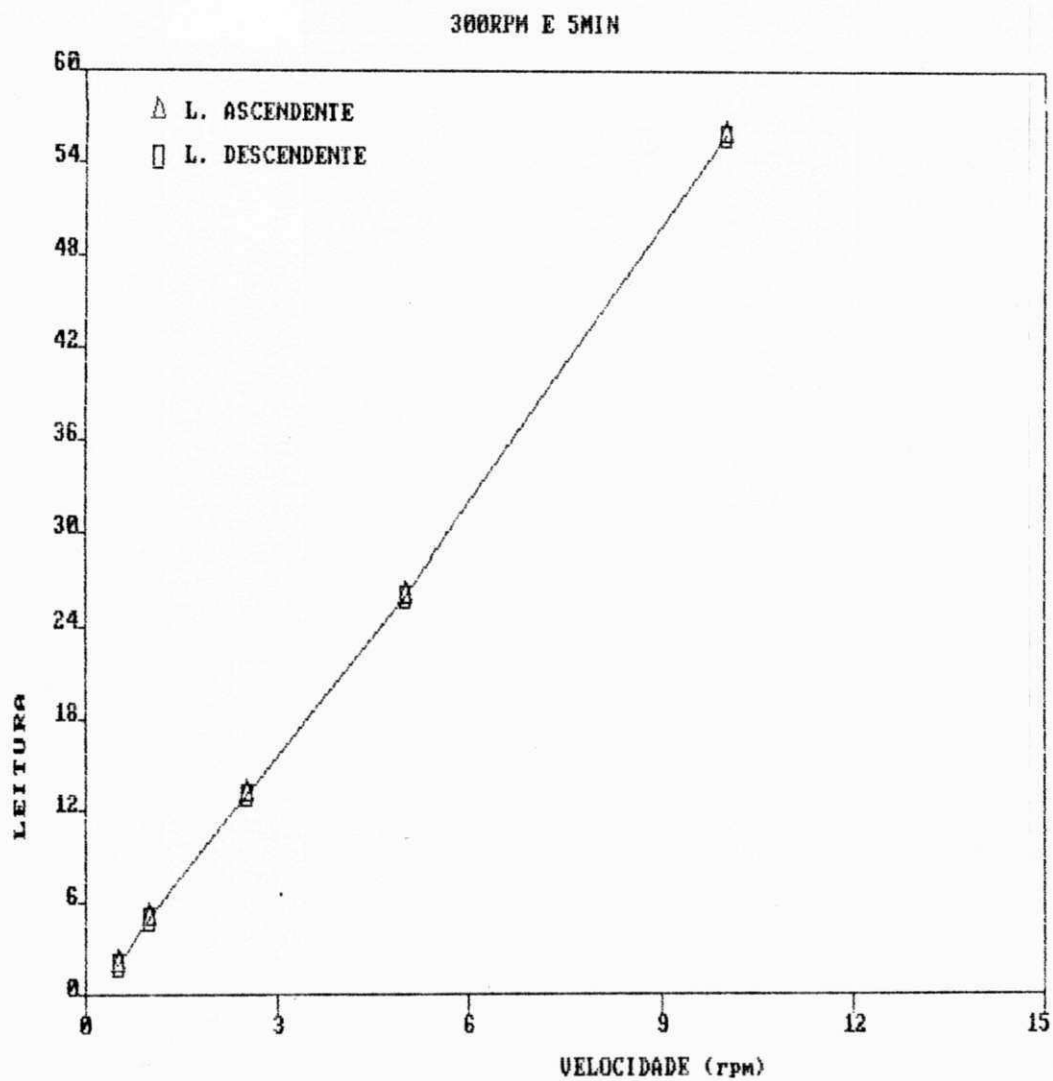


Figura 4.13: Curva de histerese à 300 rpm e 5 min, com concentração igual a 10g/100ml

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

- 1 - A viscosidade aparente de todas as suspensões, varia com a concentração da alumina. Para baixas concentrações, o aumento é moderado, crescendo bruscamente após a concentração crítica.
- 2 - Para concentrações abaixo da crítica, todas as suspensões são newtonianas.
- 3 - Para concentrações acima da concentração crítica, as suspensões são não-newtonianas, independentes do tempo e pseudoplásticas.
- 4 - Todas as suspensões estudadas não apresentaram estabilidade por mais de 24 horas. Após este período todas as partículas de alumina foram decantadas formando duas fases distintas: uma de alumina, outra do fluido multigear, utilizado como meio de dispersão. Isto indica que não há interação entre o meio de dispersão e a carga.
- 5 - O índice de potência decresce com o aumento da concentração de alumina, podendo ser agrupados através de 2 modelos, isto é, Equações 4.1, 4.3 e 4.4.
- 6 - O índice de consistência aumenta com o aumento da concentração de alumina, através de uma curva exponencial.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para dar continuidade a este trabalho, abaixo encontram-se relacionadas algumas sugestões:

- 1 - Estudar o mesmo sistema em temperaturas diferentes da ambiente.
- 2 - Repetir o mesmo sistema com aluminas de granulometria diferentes.
- 3 - Estudar o mesmo sistema com outros spindles.
- 4 - Introduzir defloculantes nas suspensões estudadas e verificar os seus efeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ALESSANDRINI, A. et alii, "*Rheology of coal Suspensions*", *Rheol. Acta.* 22: 500-504, 1983.
02. ALVES, G. E. et alii, "*Pipe-line Design for Non-Newtonian Solutions and Suspensions*", *Chem. Eng. Prog.* 8: 385-393, 1952.
03. BALIAL, M. D. (editor), "*Plastics Polymer Science and Tecnology*", J Willey and Sons, New York, 1982.
04. BATCHELOR, G. K., "*Suspensions Mechanics*", Proc. of the 1970 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University Press, Montrey, 1970.
05. BRYDSON, J. A., "*Flow Properties of Polymer Mehs*", I Liffe Books, London, 1970.
06. BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES INC, "*More Solutions to Sticky Problems*", Stoughton, 1980.
07. BROOKFIELD DIAL READING VISCOMETER, "*Operating Instructions*", Stoughton, 1980.
08. CHONG, J. S. et alii, "*Rheology of Concentrated Suspensions*", *J Appl. Polym. Sci.*, 15 : 2007-2021, 1971.
09. FEDORS, R. F., "*Viscosity of Newtonian Suspension*", *Polymer*, 16 : 305-306, 1975.

10. GADALA, M. F. & ACRIVOS, A., "*Shear-Induced Structures in a Concentrated Suspensions of Solid Spheres*", J. Rheol., 24 : 799-805, 1983.
11. GRAHAM, A. L., "*On The Viscosity of Suspensions of Solid Spheres*", Appl. Sci. Res., 37 : 275-280, 1980.
12. HAN, C. D., "*Rheological Properties of Calcium Carbonate-filled Polypropylene Melts*", J. Appl. Polym. Sci., 18: 821-829, 1974.
13. HAN, C. D. et alii, "*Effects of Titanate Coupling on the Rheological and Mechanical Properties of Filled Polyolefins*", Polym Eng. and Sci., 11: 849-854, 1978.
14. JEFREY, P. J. & ACRIVOS, A., "*The Rheological Properties of Suspensions of Rigid Particles*", AIChE J., 24: 217-220, 1976..
15. KATAOKA, T. et alii, "*Viscosity of Particle Filled Polymer Melts*", Rheol. Acta., 17: 149-155, 1978.
16. KOSINSKI, L. E. & CARUTHERS, J. M., "*Rheological Properties of PDMS Filled with Fumed Silica II*", J. of Non-Newtonian Fluid Mech., 17: 69-89, 1985.
17. LIN, O. C. C., "*Thixotropic Behavior of Gel-Like Systems*", J. Appl. Polym. Sci., 19: 199-214, 1975.
18. METZNER, A. B., "*Non-Newtonian Fluid Flow*", Ind. and Eng. Chem., 9: 1429-1432, 1957.
19. METZNER, A. B. & WHITLOCK, M., "*Flow Behavior of Concentrated (dilatant) Suspensions*", Trans Soc. Rheol., 2: 239-254, 1958.

20. METZNER, A. B., "*Laminar Flow Properties of Flocculated Suspensions*", AICHE J., 7: 431-437, 1961.
21. MILLS, N. J., "*The Rheology of Filled Polymers*", J. Appl. Polym. Sci., 15: 2791-2805, 1971.
22. MITSCHKA, P., "*Simple Conversion of Brookfield R. V. T. Readings Into Viscosity Functions*", Rheol. Acta, 21: 207-209, 1982.
23. MOONEY, M., "*The Viscosity of a Concentrated Suspensions of Spherical Particles*", J. of Coll. Sci., 6: 162-170, 1951.
24. NAVARRO, R. F., "*Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Polidimetilsiloxano*", Tese de Mestrado, UFPb, 1989.
25. NAVARRO, R. F., *Apostila de Reologia*, 1990.
26. NAVARRO, R. F., "*Análise Qualitativa do Efeito das Partículas da Carga na Reologia de Suspensões*", Congresso Brasileiro de Polímeros, 1992.
27. NAVARRO, R.F. & ALSINA, O. L. S., "*Influência da Concentração da Alumina em Polidimetilsiloxano*". Parte I: Pseudoplasticidade, RBE, Vol. 8 / Nº 1, 1991.
28. NAVARRO, R. F. & ALSINA, O. L. S., "*Influência da Concentração da Alumina nas Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina em Polidimetilsiloxano*". Parte II: Análise Experimental da Anti-Tixotropia, RBE Vol. 8 / Nº 1, 1991.
29. NICODEMO, L. & NICOLAIS, L., "*Viscosity of Suspensions*", J. Appl Polym. Sci., 18: 2808-2813, 1974.

30. NICODEMO, L. & NICOLAIS, L., "*Elongational Viscosity of Microbead Suspensions*", Polym. Eng. and Sci., 15: 679-683, 1975.
31. PUKANSKY, B. et alii, "*The Effect of Filler on the Rheological and Mechanical Properties of Polypropylene Composites*", Polymer Composites, Walter Gruyter and Co., Berlin, 1986.
32. TAGER, A., "*Physical Chemistry of Polymer*", Mir Publishers, Moscow, 1978.
33. VINOGRADOV, G. V. & Malkin A. Ya., "*Rheology of Polymers*", Mir Publishers, Moscow, 1980.
34. ZIEGELBAUR, R. S. & CARUTHERS, J. M., "*Rheological Properties of PDMS Filled with Fumed Silica I*", J. of Non-Newtonian Fluid Mech., 17: 45-68, 1985.

APÊNDICE 1

Tabela 1: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 5g/100 ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	2,0	2,0	0,07	0,1755	0,4986
	1,0	5,0	5,0	0,175	0,351	0,5185
	2,5	13,0	13,0	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	26,0	26,0	0,910	1,7550	0,5185
	10,0	56,0	56,0	1,820	3,510	0,5185
10	0,5	2,0	2,0	0,035	0,1755	5,014
	1,0	4,0	4,0	0,140	0,351	0,3989
	2,5	11,0	11,0	0,385	0,8775	0,4387
	5,0	23,0	23,0	0,805	1,755	0,4587
	10,0	46,0	46,0	1,610	3,510	0,4586
	20,0	91,0	91,0	3,1850	7,02	0,4537
15	0,5	2,0	2,0	0,035	0,1755	0,3988
	10,0	4,0	4,0	0,14	0,351	0,3988
	2,5	10,0	11,0	0,35	0,8775	0,4188
	5,0	21,0	21,0	0,735	1,755	0,4188
	10,0	42,0	42,00	1,47	3,51	0,4188
	20,0	84,0	84,0	2,94	7,02	0,4188

Tabela 2: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 5g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	2,5	2,5	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	5,5	5,5	0,1925	0,352	0,5469
	2,5	13,5	13,5	0,455	0,880	0,5369
	5,0	26,0	26,5	0,91	1,760	0,5170
	10,0	53,0	53,0	1,855	3,52	0,5269
10	0,5	2,5	3,0	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	5,5	5,5	0,1925	0,351	0,5484
	2,5	13,0	13,5	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	26,0	26,0	0,91	1,7550	0,5185
	10,0	53,0	53,0	1,855	3,51	0,5285
15	0,5	2,5	3,0	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	5,0	5,5	0,175	0,351	0,4986
	2,5	13,0	13,0	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	25,5	25,5	0,8925	1,7550	0,5085
	10,0	52,0	51,0	1,82	3,51	0,5185

Tabela 3: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 5g/100 ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	2,5	2,5	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	5,0	5,5	0,175	0,351	0,4986
	2,5	13,0	13,5	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	27,0	27,5	0,945	1,755	0,5385
	10,0	53,5	53,5	1,8725	3,51	0,5335
10	0,5	2,5	2,5	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	5,0	5,5	0,175	0,351	0,4986
	2,5	13,0	13,5	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	27,0	27,0	0,945	1,755	0,5385
	10,0	53,5	53,5	1,8725	3,51	0,5335
15	0,5	2,0	2,5	0,0875	0,1755	0,4985
	1,0	4,0	4,5	0,14	0,351	0,3988
	2,5	10,5	10,5	0,3675	0,8775	0,4188
	5,0	21,0	21,0	0,735	1,755	0,4188
	10,0	42,0	42,0	1,47	3,51	0,4188
	20,0	82,5	82,5	2,8875	7,02	0,4113

Tabela 4: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 10g/100 ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	3,0	3,0	0,105	0,1755	0,5983
	1,0	6,0	6,0	0,21	0,351	0,5983
	2,5	16,0	16,0	0,56	0,8775	0,6382
	5,0	31,0	31,0	1,085	1,755	0,6182
	10,0	60,0	60,0	2,1	3,51	0,5983
10	0,5	2,0	2,5	0,07	0,1755	0,3988
	1,0	5,0	5,5	0,175	0,351	0,4986
	2,5	13,0	13,0	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	25,0	25,0	0,875	1,755	0,4986
	10,0	53,0	53,0	1,855	3,51	0,5285
	20,0	94,0	94,0	3,290	7,02	
15	0,5	2,0	3,0	0,07	0,1755	0,3988
	1,0	5,0	6,0	0,175	0,351	0,4986
	2,5	13,0	14,0	0,455	0,8775	0,5185
	5,0	26,0	26,0	0,91	1,755	0,5185
	10,0	52,0	52,0	1,82	3,51	0,5170
	20,0	--	--	--	--	--

Tabela 5: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 10g/100 ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISCALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE A PARENTE (Pa . s)
5	0,5	3,0	3,0	0,105	0,1755	0,5983
	1,0	6,0	7,0	0,21	0,351	0,5983
	2,5	17,0	18,0	0,595	0,8775	0,6781
	5,0	34,0	34,0	1,190	1,755	0,6781
	10,0	66,0	66,0	2,31	3,51	0,6581
10	0,5	3,0	3,0	0,105	0,1755	0,5983
	1,0	6,0	6,0	0,21	0,351	0,5983
	2,5	16,0	16,0	0,56	0,8775	0,6382
	5,0	31,0	31,0	1,085	1,755	0,6182
	10,0	60,0	60,0	2,1	3,51	0,5983
15	0,5	3,0	3,0	0,105	0,1755	0,5983
	1,0	6,0	6,0	0,21	0,351	0,5983
	2,5	15,0	15,0	0,525	0,8775	0,5983
	5,0	30,0	30,0	1,05	1,755	0,5983
	10,0	58,0	58,0	2,03	3,51	0,5783

Tabela 6: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 10g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISCALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	3,0	3,0	0,105	0,1785	0,5882
	1,0	7,0	7,0	0,245	0,357	0,6863
	2,5	17,0	17,0	0,595	0,8925	0,6667
	5,0	33,0	33,0	1,155	1,785	0,6470
	10,0	62,0	62,0	2,17	3,57	0,6078
10	0,5	3,0	4,0	0,105	0,1765	0,5949
	1,0	6,5	7,0	0,2275	0,353	0,5445
	2,5	16,0	16,5	0,56	0,8825	0,6346
	5,0	31,5	31,5	1,1025	1,765	0,6246
	10,0	61,0	61,0	2,135	3,53	0,6048
15	0,5	3,0	4,0	0,105	0,176	0,5966
	1,0	6,0	5,0	0,21	0,352	0,5966
	2,5	15,0	14,0	0,525	0,880	0,5966
	5,0	28,0	28,0	0,980	1,760	0,5568
	10,0	58,0	58,0	2,03	3,52	0,5767

Tabela 7: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 15g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	6,0	7,5	0,21	0,192	1,094
	1,0	11,0	10,0	0,385	0,384	1,002
	2,5	22,5	21,0	0,7875	0,96	0,8203
	5,0	39,5	38,0	1,3825	1,92	0,7200
	10,0	70,5	70,0	2,4675	3,84	0,6426
10	0,5	5,5	6,0	0,1925	0,1885	1,021
	1,0	10,0	10,0	0,35	0,377	0,9284
	2,5	21,5	21,0	0,7525	0,9425	0,7984
	5,0	38,5	37,5	1,3475	1,885	0,7148
	10,0	69,5	69,0	2,4325	3,77	0,6452
15	0,5	5,0	5,0	0,14	0,186	0,7527
	1,0	8,0	8,0	0,28	0,372	0,7527
	2,5	18,5	18,5	0,6475	0,93	0,6962
	5,0	34,5	34,0	1,2075	1,86	0,6492
	10,0	64,5	64,5	2,2575	3,72	0,6068

Tabela 8: Valores obtidos, com spindle n° 1, para suspensão com 15g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	5,0	5,0	0,175	0,187	0,9358
	1,0	9,0	8,0	0,315	0,374	0,8422
	2,5	19,0	19,0	0,665	0,935	0,7112
	5,0	36,0	35,0	1,26	1,87	0,6737
	10,0	66,0	66,0	2,31	3,74	0,6176
10	0,5	4,0	4,0	0,14	0,187	-
	1,0	8,0	8,0	0,28	0,374	0,7487
	2,5	18,0	18,0	0,63	0,935	0,6738
	5,0	32,0	32,0	1,12	1,87	0,5989
	10,0	59,0	59,0	2,065	3,74	0,5521
15	0,5	5,0	5,0	0,175	0,1955	0,8951
	1,0	8,0	7,0	0,28	0,391	0,7161
	2,5	16,0	15,0	0,56	0,9775	0,5729
	5,0	30,0	29,0	1,05	1,955	0,5371
	10,0	51,0	50,0	1,785	3,91	0,4565

Tabela 9: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 15g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	3,5	3,5	0,1225	0,1825	0,6712
	1,0	8,0	8,0	0,28	0,365	0,7671
	2,5	18,0	17,5	0,63	0,9125	0,6904
	5,0	34,0	33,5	1,19	1,825	0,6520
	10,0	64,0	63,5	2,24	3,650	0,6137
10	0,5	3,0	3,0	0,105	0,182	0,5769
	1,0	7,0	7,0	0,245	0,364	0,6731
	2,5	15,0	15,0	0,525	0,91	0,5769
	5,0	28,0	28,0	0,98	1,82	0,5385
	10,0	59,0	59,0	2,06	3,64	0,5659
15	0,5	3,0	3,0	0,105	0,182	0,5769
	1,0	7,0	7,0	0,245	0,364	0,6731
	2,5	14,0	14,5	0,490	0,91	0,5385
	5,0	27,0	27,0	0,945	1,82	0,5192
	10,0	58,0	57,5	2,03	3,64	0,5577

Tabela 10: Valores obtidos, com spindle n° 1, para suspensão com 20g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	8,0	9,0	0,28	0,1955	1,4322
	1,0	14,0	14,0	0,49	0,391	1,2532
	2,5	27,0	27,5	0,945	0,9775	0,9667
	5,0	48,0	48,0	1,68	1,955	0,8593
	10,0	85,0	84,0	2,965	3,91	0,7583
10	0,5	8,0	9,5	0,28	0,1955	1,4322
	1,0	14,0	14,0	0,49	0,391	1,2532
	2,5	27,0	27,0	0,945	0,9775	0,9667
	5,0	48,0	48,0	1,68	1,955	0,8593
	10,0	85,0	86,0	2,965	3,91	0,7583
15	0,5	6,0	7,0	0,21	0,1895	1,1082
	1,0	11,0	11,0	0,385	0,379	1,0160
	2,5	23,0	22,5	0,805	0,9475	0,8496
	5,0	41,5	41,0	1,4525	1,895	0,7665
	10,0	74,5	74,5	2,6075	3,79	0,6880

Tabela 11: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 20g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISCALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	5,0	7,0	0,175	0,184	0,9511
	1,0	12,0	12,0	0,420	0,364	1,1538
	2,5	25,0	25,0	0,875	0,910	0,9615
	5,0	45,0	44,0	1,575	1,820	0,8654
	10,0	82,0	81,0	2,87	3,64	0,7885
10	0,5	6,0	6,0	0,210	0,1925	1,091
	1,0	11,0	11,0	0,385	0,385	1,0
	2,5	22,0	21,0	0,770	0,9625	0,8
	5,0	39,0	38,0	1,365	1,925	0,7091
	10,0	70,0	70,0	2,450	3,85	0,6364
15	0,5	5,0	5,0	0,175	0,1745	1,003
	1,0	10,0	9,0	0,35	0,349	1,003
	2,5	22,0	21,0	0,77	0,8725	0,8825
	5,0	39,0	38,0	1,365	1,745	0,7822
	10,0	70,0	69,0	2,450	3,49	0,7020

Tabela 12: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 20g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	5,0	7,0	0,175	0,184	0,9511
	1,0	11,0	11,0	0,385	0,368	1,046
	2,5	23,5	23,0	0,8225	0,920	0,8940
	5,0	42,0	41,0	1,47	1,84	0,7989
	10,0	76,5	76,0	2,6775	3,68	0,7276
10	0,5	5,0	6,5	0,175	0,1870	0,9358
	1,0	10,0	10,0	0,350	0,374	0,9358
	2,5	22,0	22,0	0,770	0,935	0,8235
	5,0	37,0	36,5	1,295	1,87	0,6925
	10,0	68,0	66,5	2,38	3,74	0,6364
15	0,5	5,0	6,5	0,175	0,188	0,9308
	1,0	10,0	11,0	0,35	0,376	0,9308
	2,5	21,0	21,5	0,735	0,94	0,7819
	5,0	36,0	38,0	1,26	1,88	0,6702
	10,0	67,0	69,5	2,345	3,76	0,6237

Tabela 13: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 25g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	14,0	13,0	0,49	0,22	2,2273
	1,0	20,0	19,0	0,70	0,44	1,5990
	2,5	35,0	33,0	1,225	1,10	1,1136
	5,0	55,0	54,0	1,925	2,20	0,875
	10,0	93,0	92,0	3,255	4,40	0,7398
10	0,5	13,0	13,0	0,455	0,2175	2,092
	1,0	20,0	18,0	0,70	0,435	1,609
	2,5	34,0	33,0	1,19	1,087	1,095
	5,0	54,0	53,0	1,89	2,175	0,8689
	10,0	91,0	89,0	3,185	4,35	0,7322
15	0,5	11,0	11,0	0,385	0,209	1,8425
	1,0	17,0	16,0	0,595	0,418	1,4234
	2,5	30,0	30,0	1,050	1,045	1,005
	5,0	54,0	50,0	1,89	2,09	0,9043
	10,0	83,0	82,0	3,185	4,18	0,7619

Tabela 14: Valores obtidos, com spindle n° 1, para suspensão com 25g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	15,0	13,0	0,525	0,2195	2,3918
	1,0	23,0	21,0	0,805	0,439	1,8337
	2,5	40,0	39,0	1,40	1,097	1,2762
	5,0	65,0	65,0	2,275	2,195	1,0364
10	0,5	15,0	15,0	0,525	0,2195	2,3918
	1,0	23,0	22,0	0,805	0,439	1,8337
	2,5	40,0	39,0	1,40	1,097	1,2762
	5,0	65,0	64,0	2,275	2,195	1,0364
15	0,5	14,0	13,0	0,49	0,219	2,2374
	1,0	22,0	21,0	0,77	0,438	2,2374
	2,5	38,0	37,0	1,33	1,095	1,2146
	5,0	61,0	60,0	2,135	2,19	0,9749

Tabela 15: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 25g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	16,0	14,0	0,56	0,2245	2,4944
	1,0	23,0	21,0	0,805	0,449	1,7929
	2,5	39,0	37,0	1,365	1,1225	1,2160
	5,0	63,0	62,0	2,205	2,245	0,9822
10	0,5	16,0	15,0	0,56	0,2245	2,4949
	1,0	23,0	21,0	0,805	0,449	1,7928
	2,5	39,0	37,0	1,365	1,1225	1,2160
	5,0	62,0	61,0	2,17	2,245	0,9666
15	0,5	15,0	13,0	0,525	0,2245	2,3385
	1,0	21,0	19,0	0,735	0,449	1,6370
	2,5	35,0	33,0	1,225	1,225	1,0913
	5,0	55,0	53,0	1,925	2,245	0,8575
	10,0	90,0	89,0	3,325	4,49	0,7405

Tabela 16: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 30g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	15,0	15,0	0,525	0,2245	2,3385
	1,0	23,0	22,0	0,805	0,449	1,7929
	2,5	39,0	38,0	1,365	1,1225	1,2160
	5,0	61,0	60,0	2,135	2,245	0,9510
	10,0	99,0	98,0	3,465	4,49	0,7717
10	0,5	14,0	13,0	0,49	0,2245	2,1826
	1,0	20,0	19,0	0,70	0,449	1,5590
	2,5	34,0	33,0	1,19	1,1225	1,0601
	5,0	55,0	54,0	1,925	2,245	0,8574
	10,0	92,0	91,0	3,22	4,49	0,7171
15	0,5	14,0	12,0	0,49	0,2245	2,1826
	1,0	20,0	18,0	0,70	0,449	1,5590
	2,5	34,0	32,0	1,19	1,1225	1,0601
	5,0	53,0	52,0	1,855	2,245	0,8263
	10,0	88,0	88,0	3,08	4,49	0,6860

Tabela 17: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 30g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	18,0	17,0	0,63	0,232	2,7155
	1,0	26,0	24,0	0,91	0,464	1,9612
	2,5	43,0	42,0	1,505	1,160	1,2974
	5,0	68,0	67,0	2,38	2,320	1,0259
10	0,5	17,0	15,0	0,595	0,2245	2,6503
	1,0	26,0	24,0	0,910	0,449	2,0267
	2,5	43,0	42,0	1,505	1,1225	1,3407
	5,0	68,0	67,0	2,38	2,245	1,0601
15	0,5	17,0	16,0	0,595	0,2215	2,6862
	1,0	27,0	25,0	0,945	0,443	2,1332
	2,5	45,0	43,0	1,5750	1,1075	1,4239
	5,0	72,0	71,0	2,520	2,15	1,1721

Tabela 18: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 30g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	19,0	19,0	0,665	0,235	2,8298
	1,0	27,0	24,0	0,945	0,470	2,0106
	2,5	44,0	42,0	1,540	1,1175	1,3781
	5,0	69,0	68,0	2,415	2,350	1,0276
10	0,5	19,0	17,0	0,665	0,2350	2,8298
	1,0	26,0	24,0	0,91	0,470	1,9362
	2,5	44,0	42,0	1,54	1,175	1,3106
	5,0	69,0	67,0	2,415	2,35	1,0276
15	0,5	17,0	17,0	0,595	0,235	2,5319
	1,0	24,0	21,0	0,840	0,470	1,7872
	2,5	40,0	37,0	1,40	1,175	1,1915
	5,0	61,0	59,0	2,135	2,350	0,9085

Tabela 19: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 35g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	18,0	17,0	0,630	0,2365	2,6638
	1,0	25,0	24,0	0,875	0,473	1,8499
	2,5	42,0	40,0	1,47	1,1885	1,2368
	5,0	64,0	63,5	2,24	2,365	0,9471
10	0,5	18,0	17,0	0,630	0,2365	2,6638
	1,0	25,0	24,0	0,875	0,473	1,8499
	2,5	42,0	40,0	1,47	1,1885	1,2368
	5,0	64,0	63,5	2,24	2,365	0,9471
15	0,5	16,0	15,0	0,56	0,229	2,4454
	1,0	23,0	22,0	0,805	0,458	1,7576
	2,5	39,0	37,0	1,365	1,145	1,1921
	5,0	62,0	60,0	2,135	2,29	0,9323

Tabela 20: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 35g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	24,0	22,0	0,84	0,2576	3,2608
	1,0	28,0	26,0	0,98	0,5152	1,9022
	2,5	46,0	45,0	1,61	1,288	1,2500
	5,0	71,0	71,0	2,485	2,576	0,9647
10	0,5	20,0	18,0	0,70	0,2375	2,9474
	1,0	28,0	26,0	0,98	0,475	2,0631
	2,5	46,0	44,0	1,61	1,1875	1,3558
	5,0	71,0	70,0	2,485	2,375	1,0463
15	0,5	19,0	19,0	0,665	0,235	2,8298
	1,0	28,0	26,0	0,980	0,47	2,0851
	2,5	45,0	45,0	1,575	1,175	1,3404
	5,0	70,0	70,0	2,450	2,35	1,0425

Tabela 21: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 35g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	20,0	18,0	0,70	0,24	2,9166
	1,0	28,0	26,0	0,98	0,48	2,0416
	2,5	46,0	45,0	1,610	1,20	1,3417
	5,0	70,0	70,0	2,450	2,40	1,0208
10	0,5	19,0	17,0	0,665	0,235	2,8297
	1,0	28,0	26,0	0,98	0,47	2,0851
	2,5	46,0	44,0	1,61	1,175	1,3702
	5,0	70,0	70,0	2,45	2,35	1,0425
15	0,5	18,0	17,0	0,61	0,2375	2,5684
	1,0	26,0	24,0	0,91	0,475	1,9158
	2,5	41,0	40,0	1,435	1,1875	1,2084
	5,0	63,0	62,0	2,205	2,375	0,9284

Tabela 22: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 40g/100ml, após homogenização à 300 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s ⁻¹)	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	21,0	21,0	0,735	0,237	3,1012
	1,0	30,0	29,0	1,050	0,474	2,2152
	2,5	49,0	48,0	1,715	1,185	1,4472
	5,0	75,0	75,0	2,625	2,37	1,1076
10	0,5	20,0	20,0	0,70	0,237	2,9536
	1,0	29,0	28,0	1,015	0,474	2,1413
	2,5	47,0	46,0	1,645	1,185	1,3882
	5,0	71,0	71,0	2,485	2,37	1,0485
15	0,5	20,0	20,0	0,70	0,237	2,9536
	1,0	29,0	28,0	1,015	0,474	2,1413
	2,5	47,0	47,0	1,645	1,185	1,3882
	5,0	70,0	71,0	2,45	2,37	1,0337

Tabela 23: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 40g/100ml, após homogenização à 450 rpm

TEMPO DE HOMOGENIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	23,0	23,0	0,805	0,235	3,4255
	1,0	35,0	35,0	1,225	0,470	2,6064
	2,5	57,0	57,0	1,995	1,175	1,6978
	5,0	86,0	86,0	3,01	2,35	1,2808
10	0,5	22,0	22,0	0,77	0,235	3,2766
	1,0	31,5	31,5	1,1025	0,470	2,3457
	2,5	52,0	52,0	1,82	1,175	1,5489
	5,0	81,0	81,0	2,835	2,35	1,2064
15	0,5	20,0	22,0	0,70	0,228	3,0702
	1,0	31,0	30,5	1,085	0,456	2,3794
	2,5	50,0	51,0	1,75	1,14	1,5351
	5,0	80,0	79,5	2,80	2,28	1,2281

Tabela 24: Valores obtidos, com spindle nº 1, para suspensão com 40g/100ml, após homogenização à 600 rpm

TEMPO DE HOMOGENEIZAÇÃO (min)	VELOCIDADE (rpm)	LEITURA ASCENDENTE	LEITURA DESCENDENTE	TENSÃO DE CISALHAMENTO (Pa)	TAXA DE DEFORMAÇÃO (s^{-1})	VISCOSIDADE APARENTE (Pa . s)
5	0,5	22,0	21,0	0,77	0,24	3,2083
	1,0	31,0	29,0	1,085	0,48	2,2604
	2,5	50,0	49,0	1,75	1,20	1,4583
	5,0	76,0	75,0	2,66	2,40	1,1083
10	0,5	21,0	20,5	0,735	0,24	3,0625
	1,0	29,0	33,0	1,015	0,48	2,1146
	2,5	47,5	46,5	1,6625	1,20	1,3854
	5,0	72,0	71,0	2,52	2,40	1,05
15	0,5	21,0	21,0	0,735	0,2375	3,0947
	1,0	30,5	29,0	1,0675	0,475	2,2474
	2,5	49,5	49,0	1,7325	1,1875	1,4589
	5,0	75,0	74,5	2,625	2,35	1,1170

Tabela 25: Dados experimentais do índice da potência (n) e do índice de consistência (k) para velocidade de homogenização de 300 rpm

Concentração (g/100ml)	Tempo de Homogenização = 5 min		Tempo de Homogenização = 10 min		Tempo de Homogenização = 15 min	
	N	K (Pa . s)	N	K(Pa . s)	N	K(Pa . s)
5	1,0	0,517	1,0	0,431	1,0	0,406
10	0,949	0,605	0,9732	0,510	0,977	0,510
15	0,9038	0,820	0,91	0,797	0,91	0,705
20	0,8936	1,0	0,86	1,0	0,8509	0,850
25	0,60	1,208	0,60	1,183	0,60	1,090
30	0,56	1,310	0,56	1,177	0,56	1,164
35	0,54	1,363	0,5631	1,363	0,55	1,30
40	0,5361	1,6	0,5356	1,532	0,5496	1,533

Tabela 26: Dados experimentais do índice da potência (n) e do índice de consistência (k) para velocidade de homogenização de 450 rpm

Concentração (g/100ml)	Tempo de Homogenização = 5 min		Tempo de Homogenização = 10 min		Tempo de Homogenização = 15 min	
	N	K (Pa . s)	N	K(Pa . s)	N	K(Pa . s)
5	1,0	0,556	1,0	0,526	1,0	0,507
10	0,999	0,647	0,99	0,614	0,99	0,602
15	0,8606	0,741	0,8646	0,659	0,79	0,606
20	0,8092	0,923	0,8122	0,810	0,7736	0,842
25	0,6323	1,357	0,6323	1,281	0,6334	1,284
30	0,56	1,447	0,6	1,453	0,62	1,525
35	0,48	1,486	0,55	1,506	0,56	1,486
40	0,56	1,495	0,56	1,707	0,59	1,684

Tabela 27: Dados experimentais do índice da potência (n) e do índice de consistência (k) para velocidade de homogenização de 600 rpm

Concentração (g/100ml)	Tempo de Homogenização = 5 min		Tempo de Homogenização = 10 min		Tempo de Homogenização = 15 min	
	N	K (Pa . s)	N	K(Pa . s)	N	K(Pa . s)
5	1,0	0,518	1,0	0,513	1,0	0,411
10	0,949	0,657	0,9732	0,630	0,977	0,583
15	0,9038	0,692	0,91	0,590	0,91	0,575
20	0,8936	0,861	0,86	0,778	0,8509	0,760
25	0,60	1,329	0,60	1,326	0,60	1,210
30	0,56	1,462	0,56	1,417	0,56	1,311
35	0,54	1,348	0,5631	1,497	0,55	1,364
40	0,5361	1,628	0,5356	1,541	0,5496	1,609

APÊNDICE 2

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

Nº do Spindle	K_c (Pa)	Índice da Potência	$K_t(n)$ 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
		0,6	0,449
		0,7	0,414
		0,8	0,387
		0,9	0,367
		1,0	0,351