

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

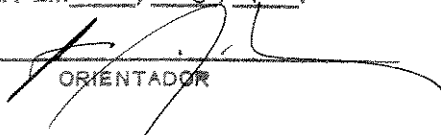
# Caracterização das Propriedades Mecânicas e Reológicas de Fluidos Eletro-Reológicos (FER)

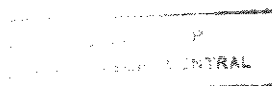
Autor : Sheila Lopes Vieira

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda

08/96

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Sheila Lopes  
Vieira E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 26/08/96.

  
ORIENTADOR



|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| UNIDADE      | 8C                                  |
| N.º CHAMADA: |                                     |
|              | T/UNICAMP                           |
|              | V673c                               |
| V.º          | 28.979                              |
| P.º          | 667/96                              |
| C            | <input type="checkbox"/>            |
| D            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| X            | <input type="checkbox"/>            |
| P.º D.       | R\$ 11,00                           |
| DATA         | 02/11/96                            |
| N.º CPO      |                                     |

CM.00094476-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V673c

Vieira, Sheila Lopes

Caracterização das propriedades mecânicas e reológicas de fluidos eletro-reológicos (FER) / Sheila Lopes Vieira. - Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. \*Eletro-reologia. 2. Reologia. 3. Propriedades mecânicas. I. Arruda, Antonio Celso Fonseca de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

# **Caracterização das Propriedades Mecânicas e Reológicas de Fluidos Eletro-Reológicos**

Autor : Sheila Lopes Vieira

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Tese de Doutorado

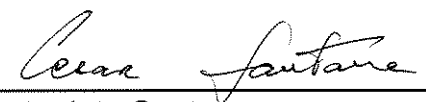
**Caracterização das Propriedades Mecânicas e  
Reológicas de Fluidos Eletro-Reológicos (FER)**

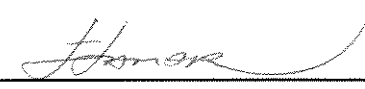
Autor : Sheila Lopes Vieira


Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, Presidente  
UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Oswaldo Baptista Duarte Filho  
UFSCar

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana  
UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Itamar Ferreira  
UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rezende G. dos Santos  
UNICAMP

Campinas, 26 de agosto de 1996

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a meus pais.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser concluído sem a colaboração e apoio de diversas pessoas e instituições às quais presto minha homenagem:

A Deus, pela vida;

Aos meus pais e minhas irmãs pela amizade, amor e incentivo que sempre me proporcionaram;

Ao Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda pela sugestão do tema de tese, pela orientação e ajuda constante no decorrer deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira, pelas sugestões e discussões feitas acerca dos ensaios de fadiga;

Ao Prof. Dr. João Mauricio Rosário pelas sugestões e colaboração nos testes com a embreagem;

Ao Mauricio, amigo e grande companheiro, pelo que vivemos juntos e pelo incentivo profissional, sem o qual esta tese não seria concluída;

Ao Fer e à Lore, grandes amigos, presentes nas horas difíceis;

Ao Pompeo pelas longas horas de discussão acerca da tese e pela amizade;

Ao Paulo Eduardo Bonafé, pela colaboração na realização dos ensaios mecânicos e aos técnicos Marco Antonio dos Santos Carvalho, Cláudio Gomes, Eli Paulino de Souza, Rosangelo Wilterson Aparecido Ferreira, José Luis Lisboa, Antonio Laerte Struziato, Tiago Antonio Berton e Rodnei José de Aro Cintra pelas peças confeccionadas para os ensaios mecânicos e colaboração na montagem da embreagem;

À empresa Bosch por ceder equipamentos para a finalização de alguns ensaios em, em especial, a seus funcionários Leonardo Taborda Sandor e Mário Aparecido Giraldi por terem ajudado e apoiado a realização desses ensaios;

Ao Prof. Dr. Oswaldo Duarte e à Mônica pela colaboração na análise granulométrica das partículas;

Aos amigos de departamento e de laboratório pelos momentos agradáveis, em especial à Sylvia, à Rô, ao Carlos e ao Nelson;

À FAPESP, à CAPES, à FINEP e ao PADCT pelos recursos destinados à realização deste trabalho.

*Não tenha medo da perfeição;  
você nunca vai atingi-la.*

*Salvador Dali*



## Sumário

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 1     | Introdução   | 1   |
| 1.1   | Breve Histórico  | 1   |
| 1.2   | Justificativa  | 2   |
| 1.3   | Objetivos  | 3   |
| 2     | Revisão Bibliográfica  | 5   |
| 2.1   | A Engenharia e a Eletro-reologia                                     | 5   |
| 2.1.1 | A Pesquisa e o Desenvolvimento da Eletro-Reologia em Diversos Países | 13  |
| 2.2   | Fluidos Eletro-Reológicos  | 21  |
| 2.2.1 | Materiais Usados em Eletro-Reologia                                  | 22  |
| 2.2.2 | Estrutura do Fluido Eletro-Reológico                                 | 26  |
| 2.2.3 | Mecanismos para o Efeito Eletro-Reológico                            | 32  |
| 2.3   | Características Reológicas de Fluidos ER                             | 41  |
| 2.3.1 | Reologia de Fluidos ER em Testes Rotacionais                         | 43  |
| 2.3.2 | Reologia de Fluidos ER em Testes Oscilatórios                        | 55  |
| 2.4   | Características elétricas de fluidos ER                              | 71  |
| 2.5   | Dispositivos ER  | 90  |
| 2.5.1 | Embreagem  | 90  |
| 2.5.2 | Amortecedor  | 92  |
| 2.5.3 | Suporte para Máquinas  | 95  |
| 3     | Materiais e Métodos  | 98  |
| 3.1   | Escolha e Preparo dos Materiais ER                                   | 98  |
| 3.2   | Abordagens Possíveis para Materiais ER                               | 103 |
| 3.2.1 | Líquidos Viscosos  | 104 |
| 3.2.2 | Sólidos  | 104 |
| 3.3   | Embreagem ER   | 117 |
| 4     | Discussão dos Resultados   | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1 Líquidos Viscosos: Testes Rotacionais | 121 |
| 4.1.1 Fluidos ER à base de Amido          | 121 |
| 4.1.2 Fluidos ER à base de CMC            | 134 |
| 4.2 Sólidos: Ensaio Mecânicos             | 145 |
| 4.2.1 Ensaio de Tração                    | 146 |
| 4.2.2 Ensaio de Fadiga                    | 161 |
| 4.2.3 Ensaio de Compressão                | 173 |
| 4.2.4 Ensaio de Cisalhamento              | 180 |
| 4.3 Embreagem ER                          | 185 |
| 5 Conclusões                              | 187 |
| 6 Sugestões para Próximos Trabalhos       | 193 |
| Bibliografia                              |     |
| Apêndices                                 |     |

## Resumo

VIEIRA, Sheila Lopes, *Caracterização Mecânica e Reológica de Fluidos Eletro-Reológicos (FER)*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 195 p. Tese (Doutorado)

Em 1947, Willis Winslow relatou que certas suspensões, com sílica gel em óleo mineral, apresentavam um aumento na resistência ao cisalhamento quando submetidas à ação de campos elétricos da ordem de 4 kV/mm. Na época, várias empresas reconheceram a valor científico da descoberta, vislumbrando rapidamente sua utilização em transmissores de torque e em sistemas de amortecimento. Entretanto, devido à natureza abrasiva dos fluidos eletro-reológicos (ER) existentes, esses esforços foram quase que totalmente frustrados, diminuindo o interesse pelo assunto. Somente a partir de 1967 é que o tópico ressurgiu na Grã-Bretanha, voltando a ser tema de pesquisas. Em toda a literatura os fluidos ER têm sido caracterizados como se fossem líquidos muito viscosos; porém, neste trabalho eles serão analisados como sólidos. Para isso foram estudados dois tipos de fluidos eletro-reológicos (FER): um à base de amido em fluido de silicone e outro com CMC em fluido de silicone. Foram determinadas suas propriedades mecânicas por meio de ensaios mecânicos (tração, compressão, fadiga e cisalhamento) e suas propriedades reológicas através de testes rotacionais. As amostras analisadas tinham concentrações de 10 a 40% em peso, as viscosidades do fluido-suporte foram de 100, 500 e 1000 cSt; variou-se o campo elétrico de 0 a 4 kV/mm, e a temperatura para os ensaios mecânicos foi a ambiente, enquanto que para os testes rotacionais variou de 10 a 50°C. Por meio dos resultados obtidos concluiu-se que fluidos à base de CMC apresentam um melhor desempenho eletro-reológico que fluidos com amido e que os materiais ER são mais resistentes à compressão, depois à tração e por último ao cisalhamento. Mais precisamente, fluidos ER à base de CMC apresentaram módulo de elasticidade da mesma ordem de grandeza que o da borracha, limite de resistência à tração de 600 a  $10^4$  vezes menor

que o do polietileno, tensão mínima de escoamento estática da ordem de  $10^4$  vezes menor que a do ABS e vida em fadiga da mesma ordem de grandeza que a de alguns polímeros como polietileno e polipropileno. Além disso, como ilustração de um aplicativo mecânico, foi construída uma embreagem ER e determinado seu torque total.

#### *Palavras- Chave*

- Eletro-reologia, Fluidos ER, Materiais eletro-reológicos, fluidos eletro-reológicos

## Abstract

VIEIRA, Sheila Lopes, *Characterization of the Mechanical and Rheological Properties of Electro-Rheological Fluids (ERF)*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 195 p. Tese (Doutorado)

In 1947, Willis Winslow studied some suspensions made of silica gel in mineral oil. He observed that they had an enhancement in shear when submitted to an electric field of about 4 kV/mm. Many companies recognized the scientific value of the discovery with an application in torque transmission and damping systems in mind. However, because of the abrasive nature of the existing ER fluids, the efforts were frustrated and these studies were postponed. Only in 1967 the topic resurged in Great-Britain. Since then, electro-rheological fluids (ERF) have been studied as if they were extremely viscous liquids. In this work, however, they were characterized as solids and two different electrorheological fluids were studied: one of them was made of starch in silicone fluid and the other one was composed of carboxymethylcellulose (CMC) in silicone fluid. Their mechanical properties were determined by mechanical testing (tensile, compression, fatigue and shear) and their rheological properties were obtained by steady shear tests in a couette rheometer. The concentration of the samples ranged from 10 to 40 w%; the silicone fluid viscosities were 100, 500 and 1000 cSt and the electric field varied from 0 to 4 kV/mm. The mechanical testings were carried out at room temperature and steady shear tests temperature ranged from 10 to 50°C. Given the results it can be concluded that fluids made of CMC have a better performance than those made of starch, and also that ER materials are more resistant to compression, tensile and shear, in this order. More precisely, fluids made of CMC had elasticity modulus in the same order of that of rubber, they had tensile strength 600 to  $10^4$  times as lesser as that of polyethylene, static yield stress  $10^4$  times as lesser as that of ABS and fatigue life of the same order of some

polymers like polyethylene and polypropilene. Also, just for an illustration of a mechanical device, an ER clutch was built and its torque was determined.

*Key Words*

- Electrorheology, ER Fluids, Electrorheological Materials, Electrorheological Fluids

## Lista de Figuras

- 2.1 Desenvolvimento da estrutura fibrosa com o aumento do campo elétrico – [conr-87]. 27
- 2.2 a) Parâmetros estereológicos usados para caracterizar a estrutura de fluidos ER; b) Efeitos do campo elétrico; c) Efeitos da fração de área das contas nestes parâmetros (sendo (1) =  $\lambda_c$  (||), (2) =  $X_c$  ( $\perp$ ) e (3) =  $\lambda_c$  ( $\perp$ ) – [conr-91]. 28
- 2.3 Esquema de uma célula de cisalhamento – [conr-87]. 31
- 2.4 Perfil de velocidades e estrutura associada dos fluidos ER sob cisalhamento com  $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$  (microscopia óptica) – [conr-87]. 31
- 2.5 Distorção da camada dupla seguida por atração de Coulomb – [bloc-88] [jord-89]. 35
- 2.6 Teoria da adesão do líquido – “Pontes” de água: (a) situação normal; (b) sob tensão [stan-83]. 36
- 2.7 Polarização das partículas no fluido ER para: (a)  $E = 0$ ; (b)  $E > 0$  – [ducl-88]. 38
- 2.8 (a) Condutância global; (b) condutância na superfície; (c) distorção da dupla camada elétrica – [bloc-87]. 39
- 2.9 Mecanismo de fibrilação e alinhamento de partículas dielétricas – [bonne-92]. 40
- 2.10 Partícula de um fluido ER sob condição de escoamento – [stan-83]. 40
- 2.11 Curvas reológicas de fluidos independentes do tempo. 42
- 2.12 Tixotropia de fluidos. 43
- 2.13 (a) Dados obtidos por Conrad [conr-87] para partículas de sílica (1,64% em peso) em fluido de silicone à temperatura ambiente; (b) gráfico simplificado do item (a). 44

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.14 | Ilustração da tensão de cisalhamento em função da deformação para materiais ER típicos ( $E_3 > E_2 > E_1$ ) – [fili-93].   | 45 |
| 2.15 | Comportamento de $\eta_A$ , $\eta_0$ , $\eta_R$ e $\eta_e$ em função de $\dot{\gamma}$ para dispersões de sílica (a 20% em volume e 38°C) sob um campo elétrico ac de 60 Hz com espaçamento entre eletrodos de 0,01 in – [klas-67].                                 | 46 |
| 2.16 | Efeito do campo elétrico (60 Hz) em $\eta_A$ de dispersões de sílica a diferentes valores de $\dot{\gamma}$ – [klas-67].  | 47 |
| 2.17 | Efeito da frequência em $\eta_A$ de suspensões de sílica – [klas-67].   | 48 |
| 2.18 | Concentração ótima para o efeito de Winslow – [ueji-72].  | 49 |
| 2.19 | Efeito da temperatura na tensão mínima de escoamento – [conr-91].   | 51 |
| 2.20 | Variação de $\tau$ com o inverso da temperatura para suspensões de 1,64% em peso de sílica imersa em óleo de silicone com $\dot{\gamma} = 8.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ – [conr-87].   | 53 |
| 2.21 | Efeito da taxa de cisalhamento na eletroviscosidade de dispersões de sílica (20% em volume e 45°C) a diferentes espaçamentos entre os eletrodos (D) – [klas-67].  | 54 |
| 2.22 | (a) Resposta da tensão a uma amplitude de deformação para vários campos elétricos ( $E_0 = 0$ , $E_1 = 1 \text{ kV/mm}$ , $E_2 = 2,5 \text{ kV/mm}$ ), (b) histerese de fluidos ER para diferentes campos elétricos e uma dada amplitude de deformação – [fili-93]. | 56 |
| 2.23 | Resposta da viscoelasticidade a degraus na intensidade do campo elétrico cc ( $\gamma = 0.6 \text{ (rms)}$ , $E = 0,914 \text{ kV/mm}$ ) – [thur-91].   | 59 |
| 2.24 | Efeito de $t_E$ sobre $\tau_y$ para: (1) $E = 1,5 \text{ kV/mm}$ e (2) $E = 0$ – [koro-89].   | 60 |
| 2.25 | Variação da viscosidade efetiva com o tempo logo após a suspensão do campo elétrico ( $\tau = 2,24 \text{ Pa}$ , $C = 40\%$ em peso, $t_E = 300 \text{ s}$ ) – [koro-89].   | 61 |
| 2.26 | Módulos de elasticidade e de perda em função da intensidade do campo elétrico para diferentes concentrações de diatomito – [koro-89].   | 61 |
| 2.27 | Tangente do ângulo de fase em função do campo elétrico e da frequência – [gamot-91].  | 63 |
| 2.28 | Viscoelasticidade de partículas de amido de milho (5% em peso) em óleo mineral – [thur-91].   | 64 |
| 2.29 | Módulos de elasticidade e de perda em função da amplitude de deformação periódica de um fluido ER a 20% e 60% em peso ( $E = 1 \text{ kV/mm}$ ) – [koro-89].  | 65 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.30 | Componentes viscosas e elásticas da tensão de cisalhamento em função da deformação de cisalhamento (valores em rms) – [thur-91].   | 66 |
| 2.31 | Tensão elástica em função da deformação (o nível de tensão em que existe uma mudança brusca na habilidade da estrutura do fluido em armazenar energia elástica, $\tau_{E_{max}}$ , está assinalado) – [thur-91].   | 67 |
| 2.32 | Viscoelasticidade em função de E para várias concentrações de amido de milho em óleo mineral ( $f = 2 \text{ Hz}$ , $\gamma = 0,01 \text{ (rms)}$ ) – [thur-91].   | 68 |
| 2.33 | Viscosidade dinâmica ( $\eta^*$ ) em função da concentração de diatomito – [koro-89].  | 69 |
| 2.34 | Comparação de efeitos de campos ac e cc sobre a viscoelasticidade para suspensões a 10% em peso de amido de milho em óleo mineral. Os campos ac estão a uma frequência de 1 kHz. A viscoelasticidade é medida a uma deformação de 0,01 (rms) a 2 Hz – [thur-91]. | 70 |
| 2.35 | Escoamento cisalhante de um fluido ER – [fili-93].   | 71 |
| 2.36 | Efeito da taxa de cisalhamento na resistência específica (46% em volume de sílica, $T = 49,5^\circ\text{C}$ , $D = 1,27 \text{ mm}$ ) – [klass-67].  | 73 |
| 2.37 | Efeito da célula-carga (resistência) na potência de saída a diferentes taxas de cisalhamento ( $D = 0,25 \text{ mm}$ , $T = 49,5^\circ\text{C}$ , $C = 46\%$ em volume de partículas de sílica) – [klass-67].  | 74 |
| 2.38 | $j$ em função de $\gamma$ em função do campo elétrico para suspensões de partículas de sílica (1,64% em peso) imersas em fluido de silicone ( $T = 273 \text{ K}$ , $\dot{\gamma} = 8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) – [conr-87].                            | 75 |
| 2.39 | $j$ em função de E em função da temperatura para suspensões de partículas de sílica (1,64% em peso) imersas em fluido de silicone ( $\gamma = 2,5$ , $\dot{\gamma} = 8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) – [conr-87].   | 75 |
| 2.40 | Eletroviscosidade e corrente em função da voltagem cc aplicada ( $T = 40^\circ\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 6152 \text{ s}^{-1}$ , $C = 44\%$ em peso de partículas de sílica e $D = 0,25 \text{ mm}$ ) – [klass-67].  | 76 |
| 2.41 | Constante dielétrica do fluido ER ( $k'$ ) em função da fração em volume da fase dispersa ( $T = 25^\circ\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 0$ , $f = 5 \text{ Mhz}$ ) – [klass-67].  | 78 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.42 | Efeito da frequência em $k'$ e em $k''$ para dispersões com partículas de sílica a 46% em volume e $f < 500$ Hz ( $\dot{\gamma} = 0$ , $T = 20,4^\circ\text{C}$ e $D = 0,76$ mm) – [klass-67].  | 79  |
| 2.43 | Permissividade relativa ( $k'$ ) e perda dielétrica ( $k''$ ) de partículas de polimetacrilato de lítio dispersas em parafina clorada em função de $f$ com interferência do efeito de condutância de volume – [bloc-87].                | 80  |
| 2.44 | Efeitos da frequência em (a) viscosidade aparente; (b) constante dielétrica; (c) perda dielétrica – resultados obtidos para suspensões de sílica a 38% em volume, $E = 0,8$ kV/mm e espaçamento entre eletrodos de 0,25 mm [klass-67].  | 81  |
| 2.45 | Efeito da % em volume de sílica em (a) $\eta_A$ ; (b) $k'$ ; (c) $k''$ . Efeito do campo elétrico em: (d) $k'$ ; (e) $k''$ ( $T = 65^\circ\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 23,6$ s <sup>-1</sup> , $f = 60$ Hz, $D = 0,25$ mm) – [klass-67]. | 84  |
| 2.46 | Estrutura geral de poli(aceno quinonas) – na Tab.2.4 estão os radicais R.   | 85  |
| 2.47 | Tensão mínima de escoamento em função da condutividade para partículas de poli(aceno quinonas) (35% em volume) dispersas em parafina clorada – [bloc-87].   | 87  |
| 2.48 | Efeito do tipo de campo elétrico (cc ou ac) na tensão $\tau_{EG}$ e na densidade de corrente (espessura da camada não-condutora: 0,2 $\mu\text{m}$ ) – [inou-89].   | 89  |
| 2.49 | Modelo de uma embreagem eletro-reológica  | 91  |
| 2.50 | Embreagens de (a) cilindros concêntricos e de (b) discos paralelos – [hart-91].   | 92  |
| 2.51 | Amortecedores com (a) eletrodos deslizantes e com (b) eletrodos fixos de cilindros concêntricos – [hart-91].  | 93  |
| 2.52 | Exemplos de amortecedores monotubos que utilizam fluidos ER – [duclo-88].   | 94  |
| 2.53 | Suporte de máquinas que utiliza fluido ER – [duclo-88].   | 95  |
| 2.54 | Suporte para máquinas – [hart-91].  | 96  |
| 3.1  | Reômetro RV-20 da Haake usado para os testes com fluidos eletro-reológicos.   | 99  |
| 3.2  | Gráfico de $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ para alguns dos fluidos testados.   | 100 |
| 3.3  | Distribuição granulométrica das partículas usadas na formulação de fluidos ER obtida: (a) por peneiramento e (b) através do sistema de análise de tamanho de partículas Galai CIS-1.  | 101 |
| 3.4  | Comparação entre as tensões mínimas de escoamento de fluidos ER e metais – [conr-91] [juvi-91].   | 105 |
| 3.5  | Ensaio de tração em uma barra metálica.   | 106 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.6  | Acondicionamento do fluido ER para os ensaios de tração.  | 107 |
| 3.7  | Montagem para os ensaios de tração na MTS.  | 107 |
| 3.8  | Gráfico tensão-deformação para metais ou liga metálica [souz-82].   | 108 |
| 3.9  | Gráfico tensão-deformação para um material ER.  | 109 |
| 3.10 | Ciclos regulares de tensões: (a) tensão reversa; (b) tensão repetida (campo de tração); (c) tensão repetida (campo de tração e compressão).   | 110 |
| 3.11 | Vida em fadiga de alguns polímeros ensaiados com uma frequência de 30 Hz (PTFE = politetrafluoretileno, PE = polietileno, PP = polipropileno, PMMA = polimetilmetacrilato, PPO = poli(óxido de 2,6-dimetil 1,4-fenileno), PET = polietileno tereftalato) – [kinl-83]. | 111 |
| 3.12 | Acondicionamento do fluido ER para os ensaios de compressão.  | 113 |
| 3.13 | (a) Montagem para os ensaios de compressão na MTS; (b) detalhe da montagem.   | 113 |
| 3.14 | Gráfico tensão-deformação de um material ER submetido a um ensaio de compressão.  | 114 |
| 3.15 | Cisalhamento em sólidos.  | 115 |
| 3.16 | Dispositivo para ensaios de cisalhamento em materiais ER.   | 116 |
| 3.17 | Dispositivo montado no laboratório para os ensaios de cisalhamento em materiais ER.   | 116 |
| 3.18 | Esquema de montagem da embreagem.   | 117 |
| 3.19 | Esquema da embreagem em detalhe.  | 117 |
| 3.20 | Embreagem montada no laboratório para demonstração de uma das aplicações de fluidos ER.   | 118 |
| 4.1  | $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ para fluidos com 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).  | 122 |
| 4.2  | Comportamento de $\eta_A$ e $\eta_0$ em função de $\dot{\gamma}$ para suspensões de 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).  | 123 |
| 4.3  | $\eta_A$ em função de E para fluidos com 25% em peso de amido de milho em fluido de silicone (980,7 cSt).   | 123 |
| 4.4  | $\tau_y$ em função de E para suspensões a 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt) a várias temperaturas.  | 124 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.5  | Influência da viscosidade do fluido-suporte no efeito ER de suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).  | 125 |
| 4.6  | Concentração ótima para o efeito de Winslow para partículas de amido de milho suspensas em fluido de silicone (980,7 cSt).  | 126 |
| 4.7  | Influência da temperatura em suspensões de 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).   | 127 |
| 4.8  | Influência da temperatura nas curvas de $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ para fluidos ER com 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).   | 128 |
| 4.9  | Variação de $\tau_y$ com o inverso da temperatura para fluidos com 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).   | 128 |
| 4.10 | Análise transiente de $\tau$ para suspensões de 20% em peso de amido de milho (19,3% de água) em fluido de silicone ( $E = 3 \text{ kV/mm}$ , $T = 30^{\circ}\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).                       | 129 |
| 4.11 | Análise transiente de $\tau$ para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).   | 130 |
| 4.12 | Análise transiente de $\tau$ para suspensões de amido a várias concentrações de partículas (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ , $E = 3 \text{ kV/mm}$ ). | 131 |
| 4.13 | Análise transiente de $\tau$ para suspensões de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ , $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).  | 131 |
| 4.14 | Análise transiente de $\tau$ para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de várias viscosidades.  | 133 |
| 4.15 | Variação da corrente elétrica com $\dot{\gamma}$ para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).   | 134 |
| 4.16 | Variação da corrente $i_0$ ( $i$ para $\dot{\gamma} = 0$ ) com o campo elétrico para suspensões de amido (22% de água) em fluido de silicone ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).  | 135 |
| 4.17 | $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ para fluidos com 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt).   | 136 |
| 4.18 | Histerese em fluidos ER para 20% em peso de CMC e várias viscosidades de fluido-suporte.  | 137 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.19 | Influência do cisalhamento e do campo elétrico na viscosidade aparente de fluidos ER com 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt).   | 138 |
| 4.20 | $\tau_y$ em função de E para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) a várias temperaturas.  | 139 |
| 4.21 | Efeito do campo elétrico e da concentração sobre a curva de $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ para suspensões de CMC em fluido de silicone (500 cSt).   | 140 |
| 4.22 | Histerese de fluidos ER para diferentes intensidades de campo elétrico e concentrações de CMC em fluido de silicone (500 cSt).   | 140 |
| 4.23 | Concentração em função da viscosidade relativa para fluidos à base de CMC em fluido de silicone (500 cSt).   | 141 |
| 4.24 | Variação de $\tau$ em função de $\dot{\gamma}$ com a temperatura para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) e $E = 2$ kV/mm.   | 142 |
| 4.25 | Comportamento da corrente elétrica com o campo para várias concentrações de CMC e diferentes viscosidades de fluido-suporte ( $T = 25^\circ\text{C}$ ).  | 143 |
| 4.26 | Comportamento da corrente elétrica com a tensão de cisalhamento para fluidos à base de CMC (20% em peso) em fluido de silicone (500 cSt).  | 143 |
| 4.27 | Configuração do fluido ER nos eletrodos inferior e superior após o término do ensaio de tração para amostras: (a) concentradas e/ou submetidas a altos campos elétricos; (b) amostras menos concentradas e/ou sob baixos campos elétricos. | 148 |
| 4.28 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de amido (22,8% de água) em fluido de silicone (500 cSt) para vários campos elétricos e temperatura ambiente.  | 149 |
| 4.29 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de amido (22,8% de água) em fluido de silicone de várias viscosidades ( $T = T_{\text{AMB}}$ e $E_0 = 3$ kV/mm).   | 150 |
| 4.30 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a várias concentrações de amido (22,8% de água) em fluido de silicone (500 cSt), temperatura ambiente e $E_0 = 3$ kV/mm.   | 151 |
| 4.31 | Limites de resistência e de proporcionalidade em função da concentração de amido (FS-500, $E_0 = 3$ kV/mm).  | 152 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.32 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de amido (22,8% de água) em fluido de silicone na temperatura ambiente – verificação do poder de adesão do fluido ER na ausência de campo elétrico. | 154 |
| 4.33 | Gráfico da corrente elétrica em função da concentração de partículas de CMC em fluido de silicone (500 cSt) para $T = T_{AMB}$ e $E_0 = 3$ kV/mm.   | 155 |
| 4.34 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) e temperatura ambiente.  | 156 |
| 4.35 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone de várias viscosidades à temperatura ambiente e $E_0 = 3$ kV/mm.   | 156 |
| 4.36 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de CMC em fluido de silicone (500 cSt) para $T = T_{AMB}$ e $E_0 = 3$ kV/mm.  | 157 |
| 4.37 | Limites de resistência e de proporcionalidade em função da concentração de CMC (FS-500 e $E_0 = 3$ kV/mm).  | 158 |
| 4.38 | Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de CMC em fluido de silicone na temperatura ambiente – verificação do poder de adesão do fluido ER na ausência de campo elétrico.                   | 161 |
| 4.39 | Gráfico da corrente em função da concentração e do campo elétrico imediatamente antes do início dos ensaios de tração ( $T = T_{AMB}$ e fluido-suporte de 500 cSt).   | 162 |
| 4.40 | Curva de Wöhler para fluidos ER com 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente e $E = 2$ kV/mm.  | 164 |
| 4.41 | Variação da corrente elétrica da amostra 20 (Tab.4.5) durante o ensaio de fadiga em função do número de ciclos.   | 167 |
| 4.42 | Função densidade de probabilidade de Weibull para materiais ER com 20% de amido em fluido de silicone (500 cSt) sob campo elétrico de 2 kV/mm e à temperatura ambiente.                                       | 168 |
| 4.43 | Carga ou tensão em função do tempo e do número de ciclos obtidos em ensaios de fadiga para diferentes materiais ER ( $f = 5$ Hz).   | 170 |
| 4.44 | Tensão em função da deformação para amostras com 20% em peso de amido (21,5% de água) em fluido de silicone (500 cSt).  | 174 |
| 4.45 | Detalhe da montagem da Fig.3.13 e da formação de fibras durante um ensaio de compressão em fluido ER à base de amido.   | 174 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.46 | $\sigma_r$ em função da concentração de amido (FS-500) para diferentes campos elétricos.  | 177 |
| 4.47 | $\sigma_r$ em função da concentração para fluidos à base de CMC (FS-500).   | 179 |
| 4.48 | Gráfico de tensão mínima de escoamento em função da concentração de amido (22% de água) em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente.   | 182 |
| 4.49 | Gráfico de tensão mínima de escoamento em função da concentração de CMC em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente.   | 184 |
|      |   |     |
| A.1  | Representações diagramáticas do comportamento ideal reológico: (a) Modelo de Hooke (mola); (b) Modelo de Newton (amortecedor); e modelos mais simples de viscoelasticidade linear, (c) Modelo de Kelvin/Voigt; (d) Modelo de Maxwell. |     |
| A.2  | Modelo de Hooke (elástico ideal).   |     |
| A.3  | Modelo de Newton (puramente viscoso).   |     |
| A.4  | Modelo de Maxwell sob condições dinâmicas.  |     |
| A.5  | Modelos de (a) Hooke e (b) Newton sob condições dinâmicas.  |     |
| A.6  | Modelos de instrumentos para medida de viscoelasticidade.   |     |
| B.1  | Comparação entre sistemas com fluidos ER e células elétricas.   |     |
| C.1  | Variação da corrente e da impedância de uma célula elétrica com a frequência.   |     |
| C.2  | Constantes dielétricas como funções da frequência – [reit-82].  |     |

## Lista de Tabelas

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Soluções eletro-reológicas convencionais – [bloc-87].   | 24  |
| 2.2 | Soluções eletro-reológicas anidras.   | 25  |
| 2.3 | Comparação entre fluidos convencionais e anidros – [inou-89].   | 33  |
| 2.4 | Estrutura dos radicais e condutividade de poli(aceno quinonas) – [bloc-87].   | 86  |
| 2.5 | Resultados analíticos de absorvedores de choque – [hart-91].  | 93  |
| 2.6 | Resultados analíticos de um suporte para máquinas – [hart-91].  | 96  |
| 3.1 | Testes preliminares para verificar a possível atividade eletro-reológica de alguns fluidos (o fluido-suporte utilizado em todos os casos foi o fluido de silicone (FS) de 500 cSt).   | 99  |
| 3.2 | Fornecedores das matérias-primas dos fluidos ER estudados neste trabalho  | 101 |
| 3.3 | Verificação visual da sedimentação de partículas nos fluidos ER estudados   | 102 |
| 4.1 | Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido em fluido de silicone obtidas através de ensaios de tração.  | 153 |
| 4.2 | Resultados dos ensaios de tração para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.   | 152 |
| 4.3 | Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC em fluido de silicone obtidas através de ensaios de tração.  | 159 |
| 4.4 | Resultados dos ensaios de tração para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.   | 160 |
| 4.5 | Dados obtidos através da distribuição de Weibull para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga para materiais ER com 20% de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $Q_t = 1,107$ kgf, $f = 5$ Hz, $E_0 = 2$ kV/mm). | 166 |
| 4.6 | Vida de materiais ER à base de amido em ensaios de fadiga ( $f = 5$ Hz).  | 169 |
| 4.7 | Início da "trinca" e ruptura de materiais ER à base de amido.   | 172 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.8 Resistência à fadiga de materiais ER à base de CMC.  | 173 |
| 4.9 Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido em fluido de silicone (ensaios de compressão).      | 175 |
| 4.10 Resultados dos ensaios de compressão para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.             | 177 |
| 4.11 Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC em fluido de silicone (ensaios de compressão).       | 178 |
| 4.12 Resultados dos ensaios de compressão para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.               | 179 |
| 4.13 Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido obtidas em ensaios de cisalhamento.                | 180 |
| 4.14 Resultados dos ensaios de cisalhamento para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.           | 182 |
| 4.15 Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC obtidas em ensaios de cisalhamento.                  | 183 |
| 4.16 Resultados dos ensaios de cisalhamento para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.             | 185 |
| 4.17 Torque estático da embreagem da Fig.3.18 para FER com 15% de partículas em fluido de silicone de 100 cSt. | 186 |

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

|          |   |                           |
|----------|---|---------------------------|
| $A_A$    | – fração de área das partículas   | –                         |
| $C$      | – porcentagem em peso de partículas   | %                         |
| $d$      | – diâmetro da partícula   | $\mu\text{m}$             |
| $D$      | – espaçamento entre os eletrodos  | mm                        |
| $E$      | – campo elétrico  | kV/mm                     |
| $E_0$    | – campo elétrico antes do início dos ensaios de tração, fadiga e compressão | kV/mm                     |
| $E_c$    | – campo elétrico crítico  | kV/mm                     |
| $E_{c1}$ | – campo elétrico crítico (FER passa a ser sólido)                           | kV/mm                     |
| $E_{c2}$ | – campo elétrico crítico (FER deixa de ser líquido)                         | kV/mm                     |
| $E_y$    | – módulo de Young   | kgf/mm <sup>2</sup>       |
| $f$      | – frequência  | Hz                        |
| $F$      | – fração de amostras que falham com N ciclos                                | –                         |
| $G$      | – módulo de rigidez   | kgf/mm <sup>2</sup>       |
| $G^*$    | – módulo complexo   | Pa                        |
| $G'$     | – módulo de elasticidade  | Pa                        |
| $G''$    | – módulo de perda   | Pa                        |
| $i$      | – corrente elétrica   | mA                        |
| $j$      | – densidade de corrente   | $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ |
| $k_0$    | – constante dielétrica para campo elétrico cc                               | –                         |
| $k'$     | – constante dielétrica para campo elétrico ac                               | –                         |
| $k''$    | – perda dielétrica para campo elétrico ac                                   | (F/m)                     |

|              |   |                    |
|--------------|---|--------------------|
| $L_0$        | – comprimento inicial do corpo de prova                         | mm                 |
| $N$          | – número de ciclos ou vida do material                          | –                  |
| $N_{50\%}$   | – número de ciclos no qual a falha ocorre para 50% das amostras | –                  |
| $Q$          | – carga aplicada sobre o corpo de prova                         | kfg                |
| $Q_r$        | – carga no limite de resistência à compressão                   | kfg                |
| $Q_t$        | – carga no limite de resistência à tração                       | kfg                |
| $r$          | – resistência elétrica  | $\Omega$           |
| $S_0$        | – área transversal inicial do corpo de prova                    | $m^2$              |
| $S_{max}$    | – tensão máxima no teste de fadiga                              | $kgf/mm^2$         |
| $S_{min}$    | – tensão mínima no teste de fadiga                              | $kgf/mm^2$         |
| $S_m$        | – tensão média no teste de fadiga                               | $kgf/mm^2$         |
| $S_r$        | – diferença entre as tensões máxima e mínima no teste de fadiga | $kgf/mm^2$         |
| $S_e$        | – limite de fadiga  | $kgf/mm^2$         |
| $t_M$        | – tempo característico  | s                  |
| $t_R$        | – tempo de relaxação  | s                  |
| $T$          | – temperatura   | $^{\circ}C$ ou $K$ |
| $T_E$        | – torque estático   | N.m                |
| $T_D$        | – torque dinâmico   | N.m                |
| $T_T$        | – torque total  | N.m                |
| $U_R$        | – resiliência   | $kgf.mm/mm^3$      |
| $V$          | – voltagem aplicada   | kV                 |
| $V_0$        | – voltagem inicial aplicada                                     | kV                 |
| $x_c$        | – impedância do circuito elétrico                               | $\Omega$           |
| $X_c(\perp)$ | – espessura das correntes                                       | $\mu m$            |
| $Z$          | – impedância do capacitor                                       | $\Omega$           |

### *Letras Gregas*

|                 |  |   |
|-----------------|--|---|
| $\varepsilon$   | – deformação média linear do corpo de prova        | – |
| $\varepsilon_f$ | – deformação no limite de resistência à compressão | – |
| $\varepsilon_t$ | – deformação no limite de resistência à tração     | – |
| $\varepsilon_p$ | – deformação no limite de proporcionalidade        | – |

|                        |   |   |               |
|------------------------|---|---|---------------|
| $\phi$                 | - | fração em volume de partículas                                  | -             |
| $\gamma$               | - | deformação em testes de cisalhamento                            | - ou rms      |
| $\gamma_c$             | - | deformação crítica a partir da qual o FER escoar                | -             |
| $\gamma_0$             | - | amplitude de deformação   | -             |
| $\dot{\gamma}_0$       | - | amplitude da taxa de deformação                                 | $s^{-1}$      |
| $\dot{\gamma}$         | - | taxa de cisalhamento  | $s^{-1}$      |
| $\delta$               | - | ângulo de fase  | $^\circ$      |
| $\delta_1$             | - | ângulo de fase  | $^\circ$      |
| $\delta^+$             | - | carga positiva induzida na partícula                            | -             |
| $\delta^-$             | - | carga negativa induzida na partícula                            | -             |
| $\Delta L$             | - | variação do comprimento do corpo de prova                       | mm            |
| $\eta$                 | - | viscosidade aparente  | Pa.s ou poise |
| $\eta^*$               | - | coeficiente de viscosidade complexa                             | Pa.s ou poise |
| $\eta'$                | - | viscosidade dinâmica  | Pa.s ou poise |
| $\eta''$               | - | elasticidade  | Pa.s ou poise |
| $\eta_0$               | - | viscosidade aparente quando $E = 0$                             | Pa.s          |
| $\eta^0$               | - | viscosidade aparente quando $\dot{\gamma}_0 \rightarrow 0$      | Pa.s          |
| $\eta_A$               | - | viscosidade aparente quando $E > 0$                             | Pa.s          |
| $\eta_R$               | - | viscosidade relativa ( $\eta_A/\eta_0$ )                        | -             |
| $\eta_E$               | - | eletroviscosidade ( $\eta_A - \eta_0$ )                         | Pa.s          |
| $\lambda_c(\perp)$     | - | espaço entre duas correntes                                     | $\mu m$       |
| $\lambda_c(\parallel)$ | - | espaço livre médio entre a intersecção das cadeias              | $\mu m$       |
| $\mu$                  | - | viscosidade newtoniana  | Pa.s ou poise |
| $\mu_A$                | - | viscosidade aparente  | Pa.s ou poise |
| $\tau$                 | - | tensão de cisalhamento  | Pa            |
| $\tau^*$               | - | tensão de cisalhamento complexa                                 | Pa            |
| $\tau_0$               | - | amplitude da tensão de cisalhamento                             | Pa            |
| $\tau_E$               | - | tensão de cisalhamento elástica                                 | Pa.s          |
| $\tau_e$               | - | tensão mínima de escoamento estática em ensaios de cisalhamento | $kgf/mm^2$    |
| $\tau_V$               | - | tensão de cisalhamento viscosa                                  | Pa.s          |
| $\tau_y$               | - | tensão mínima de escoamento                                     | Pa            |

|                      |   |                     |
|----------------------|---|---------------------|
| $\tau_{EG}$          | – $\tau_{(E \neq 0)} - \tau_{(E = 0)}$                            | Pa                  |
| $\theta$             | – número de ciclos no qual a falha ocorre para 63.2% das amostras | –                   |
| $\sigma$             | – condutividade da partícula (capítulo 2)                         | S/cm                |
| $\sigma$             | – tensão de tração ou compressão (capítulos 3 a 6)                | kgf/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_{el}$        | – limite elástico   | kgf/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_p$           | – limite de proporcionalidade                                     | kgf/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_r$           | – limite de resistência à compressão                              | kgf/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_t$           | – limite de resistência à tração                                  | kgf/mm <sup>2</sup> |
| $\omega$             | – frequência  | rad/s               |
| $\omega_1, \omega_2$ | – velocidades angulares   | rpm                 |
| $\Omega_{12}$        | – grau de orientação das partículas                               | –                   |

### *Abreviações*

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| <b>FS</b>  | – fluido de silicone      |
| <b>FER</b> | – fluido eletro-reológico |
| <b>ER</b>  | – eletro-reológico        |
| <b>CMC</b> | – carboximetilcelulose    |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Breve Histórico

O efeito eletro-viscoso que, segundo Weiss, indica a mudança reversível na viscosidade aparente de um fluido sujeito a um campo elétrico, foi primeiramente observado por Duff em 1896 quando estudava o escoamento de glicerina, óleo de rícino e parafina pesada [weis-94] [wils-93]. Investigações subseqüentes deste fenômeno mostraram que o efeito eletro-viscoso se originava em fluidos condutivos que continham impurezas iônicas ou dipolos permanentes. Entretanto, o efeito em si não gerou muito interesse industrial, uma vez que os estudos realizados focalizavam somente o mecanismo do efeito propriamente dito [fili-92] [mori-93] [mori-94] e também devido à sua fraca natureza em líquidos isotrópicos [weis-94].

Em 1947, Willis Winslow relatou que certas suspensões, como sílica gel em óleo mineral, apresentavam um aumento na resistência ao cisalhamento quando submetidos à ação de campos elétricos da ordem de 4 kV/mm [stan-83][wins-49] [dima-92]. Na época, várias empresas reconheceram o valor científico da descoberta, vislumbrando rapidamente sua utilização em transmissores de torque e em amortecedores que funcionariam com fluidos à base de sílica gel (o mais ativo dos materiais descobertos por Winslow). Entretanto, devido à natureza abrasiva dos fluidos com sílica gel, esses esforços foram quase que totalmente

frustrados, diminuindo, assim, o interesse pelo assunto. Somente a partir de 1967 é que o tópico ressurgiu na Grã-Bretanha, voltando a ser tema de pesquisas [stan-83].

O descobridor desses fluidos supôs que, com a aplicação de um campo elétrico, houvesse somente um aumento da viscosidade dos mesmos. Sendo assim, achou apropriado chamá-los de "fluidos eletro-viscosos" [win-49] [klas-67]. Entretanto, estudos posteriores revelaram que o campo elétrico modificava não somente a viscosidade dos fluidos (que em alguns casos permanecia constante), mas sua curva reológica. Por isso, atualmente referem-se a eles como "fluidos eletro-reológicos" (FER) [stan-83] [ducl-88] [carl-88]. Jordam e Shaw [jord-89] lamentam que os termos eletro-viscosidade e eletro-reologia sejam usados por alguns autores como se fossem sinônimos. Segundo eles, o efeito eletro-viscoso descreve a influência de partículas coloidais carregadas sobre a reologia de qualquer suspensão coloidal sem campos elétricos externos (conceito diferente do de Weiss [weis-94]), enquanto que o efeito eletro-reológico (ER) se refere ao comportamento de certas suspensões não-aquosas na presença de um campo elétrico externo. Há ainda na literatura alguns autores [koro-89] que tentam ser mais abrangentes. Para eles, além das propriedades reológicas, os fluidos ER têm suas propriedades ópticas, termofísicas, elétricas e acústicas alteradas quando submetidos à ação de um campo elétrico. Sob este ponto de vista, este efeito seria melhor denominado "eletro-estrutural" ao invés de "eletro-reológico". Neste trabalho, deu-se preferência à nomenclatura mais comumente aceita pelos autores, a qual define um fluido eletro-reológico como sendo aquele que apresenta suas características reológicas alteradas quando submetido a um campo elétrico, sendo que o termo "efeito ER" diz respeito ao comportamento desses fluidos sob ação do campo elétrico.

## 1.2 Justificativa

Segundo a literatura, os fluidos ER têm aplicações em sistemas de amortecimento e transmissão de torque. Muita energia é gasta devido à vibração, sendo que grande parte deste desperdício pode ser eliminado através da tecnologia de fluidos ER. Uma aplicação que hoje é

considerada utópica devido à sua inviabilidade econômica e tecnológica, é o uso de fluidos eletro-reológicos para o amortecimento do movimento de edifícios e outras construções (como pontes) durante terremotos e ventanias [krieg-93]. Caso se conseguisse que fluidos ER pudessem ser usados em situações como estas, isto causaria maiores implicações na produção de energia, através da proteção de plantas de energia atômica contra os danos provocados por um terremoto. Neste caso, seria necessário ter-se em mãos propriedades dos fluidos ER, tais como limite de resistência à tração e compressão, fadiga do material, etc. (assim como se tem propriedades dos materiais de construção). Somado a isso, existem dispositivos que usam mais o modo de escoamento compressivo do que o modo de cisalhamento [spro-94], de maneira que também se torna necessário conhecer as propriedades do fluido ER relacionadas à compressão.

### 1.3 Objetivos

Em vista do exposto acima, este trabalho tem três objetivos, sendo que estão dispostos na ordem de maior para menor importância:

- **obter as propriedades mecânicas de fluidos ER:** em toda a literatura revisada, os fluidos ER são sempre considerados como sendo fluidos extremamente viscosos. Neste trabalho, dá-se uma abordagem diferente aos materiais eletro-reológicos – estes são tratados como sólidos. Para tanto, realizaram-se ensaios de tração, compressão, fadiga e cisalhamento em dois tipos de fluidos ER: o primeiro composto por partículas de amido hidratado dispersas em fluido de silicone (FS) e o segundo formado por partículas de carboximetilcelulose (CMC) em fluido de silicone. As amostras possuíam concentração de partículas entre 10 e 40% em peso, FS com viscosidade de 100, 500 e 1000 cSt e foram ensaiadas sob diferentes intensidades de campo elétrico cc;

- **obter as propriedades reológicas de fluidos ER à base de amido e de CMC** (descritos acima) através de testes rotacionais em um reômetro de cilindros concêntricos.



Nestes testes, variaram-se a concentração de partículas, a viscosidade do fluido-suporte, a temperatura e a intensidade do campo elétrico cc;

- **ser uma referência bibliográfica** na área de eletro-reologia (já que este tema é muito pouco explorado no Brasil) de modo a dar uma visão geral sobre o assunto e reportar algumas das áreas de pesquisa que estão sendo desenvolvidas atualmente.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 A Engenharia e a Eletro-Reologia

Após a retomada da pesquisa sobre eletro-reologia em 1967 na Grã-Bretanha, muitos pesquisadores começaram a estudar e a aperfeiçoar os fluidos ER com o intuito de utilizá-los comercialmente em dispositivos mecânicos.

Equipamentos que utilizam esses fluidos têm vantagens sobre os eletromecânicos no que diz respeito à rapidez de resposta uma vez que não há limitações causadas pela inércia sobre as partes mecânicas, pois o fluido ER pode ser controlado diretamente pelo computador. A maioria dos autores afirma que o tempo de resposta dos fluidos ER é da ordem de milissegundos [duclo-88] [hill-91] [otsu-91], enquanto que Block diz que ela está por volta dos 20 segundos [bloc-88] e Korobko, na faixa de  $10^{-4}$  a  $10^2$  s [koro-94]. A sua potencialidade em fornecer uma resposta rápida entre as interfaces de um controle eletrônico e de dispositivos mecânicos, o que lhe confere uma característica ímpar, permite o desenvolvimento de diversos sistemas mecânicos. Dentre eles, destacam-se os amortecedores ativos para controle de vibração, as válvulas para controle de pressão e de vazão sem partes móveis, as embreagens, os freios, etc [carl-88, marg-89]. No caso de amortecedores, para se ter um bom controle da força de amortecimento de um carro, o tempo de resposta de um amortecedor ER precisa estar dentro de uns poucos milissegundos, pois se o carro estiver a 100 km/h, um atraso de 10

milissegundos é equivalente a uma distância percorrida pelo carro de 28 cm. Entretanto um grande tempo de atraso implica em uma viagem ruim, com amortecimento precário [wong-93]. A rápida resposta e relaxação são algumas das vantagens de fluidos ER sobre fluidos magneto-reológicos (MR)<sup>1</sup>, que relaxam muito devagar devido à magnetização residual. Além das vantagens citadas acima, equipamentos que utilizam fluidos ER apresentam baixo consumo de potência, suavidade de operação e simplicidade mecânica [carl-89].

É universalmente sabido que um determinado tipo de fluido ER não pode atender aos requisitos de todos os dispositivos ER; cada aplicação faz demandas diferentes sobre os fluidos eletro-reológicos. Hartsock, Novak e Chaundy [hart-91], Chenguan [chen-89], Otsubo [otsu-91] e Weiss [weis-94] apresentaram uma lista de pré-requisitos mínimos para que o uso de fluidos ER seja comercialmente viável em equipamentos automotivos. Segundo eles, os fluidos eletro-reológicos devem:

- ter rapidez de resposta;
- ser não-tóxicos;
- ter estabilidade química;
- ter baixa volatilidade;
- ser duráveis;
- ter diâmetro de partícula por volta de 10  $\mu\text{m}$ ;
- apresentar homogeneidade da suspensão (não deve ocorrer sedimentação e nem agregação de partículas);
- ter densidade de corrente menor que 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  para  $E = 4 \text{ kV}/\text{mm}$  (cc);
- requerer baixa potência;
- ter condutividade elétrica muito baixa;
- apresentar uma alta tensão de ruptura do dielétrico (maior que 5  $\text{kV}/\text{mm}$ );
- ter uma faixa de temperatura de trabalho entre -40 e 200°C;
- ter compatibilidade com materiais usados para vedação;

---

<sup>1</sup> Fluidos Magneto-reológicos (FMR) são fluidos cujas propriedades reológicas variam quando submetidos a um campo magnético. Esses materiais apresentam algumas vantagens sobre os fluidos ER, tais como a inexistência dos fenômenos de condução e de quebra do dielétrico, a não importância da pureza de seus componentes e a não exclusão de fluidos condutivos (como a água) como fluidos-suporte. Entretanto, os fluidos ER são superiores aos FMR em alguns aspectos: têm alta velocidade de resposta e relaxação, o peso total do equipamento a ser usado em aplicações que requeiram fluidos com propriedades que variem é geralmente menor e têm resposta reológica reversível (enquanto que fluidos MR relaxam muito lentamente devido à magnetização residual) [jord-89] [wins-49].

- ser não-abrasivos;
- ser não-corrosivos;
- ser não-inflamáveis;
- ser baratos;
- ser fáceis de serem produzidos;
- ter baixa viscosidade quando não submetidos à ação de um campo elétrico (0,1 a 0,3 Pa.s);
- apresentar bons efeitos ER a campos elétricos relativamente baixos [gold-90] (tensão mínima de escoamento a 4 kV/mm maior que 3 kPa [weis-94]).

Além disso, Hartsock, Novak e Chaundy [hart-91] comentaram que para se determinar a exequibilidade ou não de um dispositivo que utilize fluidos ER, é necessário considerar três propriedades-chaves do fluido em toda a faixa de temperatura de operação: qual é a sua viscosidade máxima quando  $E = 0$ , qual é a sua tensão mínima de escoamento na voltagem máxima e qual é a sua densidade de corrente máxima. Uma vez que alguns fluidos podem apresentar um desempenho melhor com corrente alternada, esses dados também devem ser gerados em função da frequência. Antes que o projeto final esteja completo, os parâmetros viscosidade, densidade de corrente e tensão mínima de escoamento precisam ser gerados em função da temperatura e da intensidade do campo elétrico. Os autores deste artigo também analisaram a exequibilidade de amortecedores e embreagens utilizando os fluidos ER já existentes, fluidos que deverão estar disponíveis no mercado em 3 ou 4 anos e fluidos que, provavelmente, estarão disponíveis somente dentro de 10 a 20 anos.

No projeto de dispositivos de engenharia que utilizam fluidos ER existe um compromisso, como em qualquer projeto, entre custo e desempenho. De acordo com Stangroom [stan-83], a presença de água em fluidos ER traz consigo a vantagem de uma rápida resposta e a redução da diferença entre os limites de escoamento estático e dinâmico. Entretanto, além de dificultar a reprodutibilidade dos fluidos ER, a água traz consigo dois inconvenientes ligados ao aumento da temperatura: a mudança da resposta ER (devido à evaporação da água) e o aumento da corrente elétrica (para um determinado campo elétrico, a densidade de corrente dobra a cada  $6^{\circ}\text{C}$ ; ou seja, se  $j = 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  a  $30^{\circ}\text{C}$ , para  $80^{\circ}\text{C}$  ela será de  $3,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ). Além disso, grandes quantidades de água fazem com que a condutividade do

fluido ER aumente provocando, também, um aumento na corrente que passa através do mesmo [carl-88]. Desta maneira, a potência requerida aumenta, o que é indesejável, pois eleva os custos. Wong e Shaw [wong-89] analisaram o papel da água em fluidos ER. Segundo eles, a água é um componente essencial e determinante no efeito ER. O papel da fase dispersa seria o de servir como um suporte físico para as espécies ativadas e o de ter uma interação com elas. De acordo com Block e Kelly [bloc-87], a água limita o uso de fluidos eletro-reológicos a temperaturas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $70^{\circ}\text{C}$ , pois para temperaturas mais altas a água (ou ativador) começa a se evaporar; e a temperaturas mais baixas o efeito ER desaparece devido ao congelamento da mobilidade do ativador [maka-89]. A companhia Lord desenvolveu alguns fluidos ER (como o ERF/6184-86B, ERF/6184-72A e ERF 6091-92-2) que podem operar a temperaturas de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$  sem nenhum prejuízo de seu desempenho a  $25^{\circ}\text{C}$  [weis-94]. Além disso, a Lord também desenvolveu fluidos (ERF/6533-01A) que operam com uma tensão mínima de escoamento dinâmica relativamente constante e com uma variação menor que 25% na densidade de corrente para  $-25 \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$  [weis-94].

Segundo Bares e Carlson [bare-89], o uso racional de fluidos eletro-reológicos em dispositivos mecânicos depende da capacidade de se descrever o desempenho do equipamento em termos das propriedades do fluido. Assim, para se atingir um melhor controle mecânico em um equipamento que utilize fluido ER, um dos parâmetros a ser controlado é o volume de fluido eletro-reológico no mesmo. A redução deste volume pode ser feita simplesmente com o aumento da concentração de partículas, ou com a diminuição da viscosidade do fluido-suporte, ou ainda através da manipulação das propriedades dielétricas do fluido-suporte e das partículas. De acordo com o artigo, o ideal em termos de controle mecânico é trabalhar com fluidos ER contendo o máximo de fração de partículas possível e usar fluidos-suporte com a menor viscosidade permitida.

Outro parâmetro a ser controlado é o consumo de potência, que é diretamente proporcional ao produto do campo elétrico pelo volume de FER e pela densidade de corrente. Diminuindo-se o volume de fluido e a condutividade das partículas, o consumo de potência também diminui. Entretanto, existe um valor de condutividade ótima para as partículas, a qual depende de um compromisso entre altos valores de limite de escoamento e baixo consumo de energia [bare-89]. Para os fluidos convencionais, o nível de condutividade desejado é obtido

ajustando-se a quantidade de água nas partículas, enquanto que para fluidos anidros, este controle é feito através de variações na composição das partículas – como fizeram Block e Kelly [bloc-87]. De acordo com Bares e Carlson [bare-89], a condutividade de um fluido eletro-reológico sob influência de um campo elétrico, pode ser aproximada pelo produto da condutividade das partículas por sua fração volumétrica.

Outro aspecto importante a ser considerado em um projeto de dispositivos ER é a ocorrência, ou não, de sedimentação das partículas [bare-89]. A sedimentação pode ser minimizada da seguinte maneira:

- diminuindo-se o tamanho das partículas até ao ponto de o movimento browniano ser de pequena importância (apesar de que isso afeta as propriedades ER tais como tensão mínima de escoamento e tempo de resposta) – segundo Kraynik [kray-93] existe um tamanho ótimo de partículas para equilibrar a resposta ER e a sedimentação;
- diminuindo-se a diferença de densidades entre a partícula e o fluido-suporte – se bem que o ajuste das densidades é exato somente para uma determinada temperatura;
- aumentando-se a viscosidade do fluido-suporte até ao máximo permitido – segundo Winslow [wins-49] o fluido-suporte deve ter viscosidade entre 2 e 20 cp a 25°C para assegurar uma viscosidade mínima para  $E=0$ ;
- adicionando-se surfactantes ao fluido ER [wils-93], sabendo, porém, que isso aumenta a condutividade do fluido.

Estas são alternativas que diminuem a taxa com que ocorre a sedimentação, porém nem todas impedem que ela aconteça. Esta só pode ser eliminada se uma força, oposta à força gravitacional, for introduzida no sistema. Isto é possível floculando-se a suspensão através da adição de um surfactante adequado. Em um sistema floculado (onde as partículas ficam suspensas no fluido-suporte), o volume do sedimento é grande e pode preencher toda a suspensão, causando, assim, a formação de um gel que se opõe à tendência que as partículas têm de sedimentar. No caso de fluidos ER, deseja-se que a suspensão seja fracamente floculada para que, quando submetida a uma força cisalhante, ela prontamente retorne ao estado fluido; em outras palavras, o aumento da tensão mínima de escoamento quando  $E = 0$  é

indesejável. Os surfactantes podem ter várias funções nos fluidos ER. Enquanto são benéficos como estabilizantes na ausência de um campo elétrico, em sua presença podem ser prejudiciais, promovendo uma transferência de cargas entre as partículas ou uma coagulação irreversível. Existem indicações de que eles também podem ser usados como ativadores. De modo geral, os surfactantes mais usados são não-iônicos e ligeiramente solúveis no fluido-suporte, como por exemplo ácidos graxos e seus éteres com álcoois (glicerina, estearatos, etc.) [koro-94]. A quantidade de surfactantes deve variar de 1 a 3 moléculas por  $2 \mu\text{m}^2$  de área de partículas [koro-94].

Um outro aspecto da sedimentação está relacionado com o estado de equilíbrio atingido pela suspensão. Partículas isoladas experimentam uma atração devido às forças de van der Waals, o que resulta na agregação das mesmas. Segundo Bares e Carlson [bare-89], dadas a intensidade e a faixa de atração de van der Waals, uma suspensão só pode ser estável se as partículas se repelirem umas às outras com força suficiente e num raio de distância suficientemente longo.

Em adição ao problema de sedimentação estática mencionado acima, existem vários problemas de separação dinâmica das partículas e do fluido-suporte. Dois deles são: a eletroforese das partículas para um ou ambos os eletrodos sob aplicação de um campo elétrico, e a filtração das mesmas durante o escoamento do fluido ER através dos eletrodos. Quanto à eletroforese, a sua extensão depende de fatores como: tamanho das partículas, viscosidade do fluido-suporte, intensidade do campo elétrico, etc. Entretanto, o fator predominante é o tempo de relaxação da partícula sob campos elétricos ac, que se for suficientemente pequeno, a eletroforese não será observada, pois qualquer carga acumulada pela partícula terá sido dissipada antes que a mesma tenha se movido uma distância apreciável. Assim, a migração de partículas para um dos eletrodos pode ser inibida através de campos elétricos alternados [jord-89], entretanto deve-se ter em mente que campos ac requerem maior potência. Com relação à filtração das partículas, ela ocorre quando o fluido escoar por um canal (eletrodos) e as partículas ficam presas nele devido à força eletrostática, a qual depende da intensidade do campo, do tamanho das partículas e da taxa de escoamento [bare-89][stan-83]. Para partículas pequenas e fluido-suporte de alta viscosidade, a força hidrodinâmica sobre a partícula supera a força eletrostática (que a manteria presa entre os

eletrodos) e a separação do fluido não é observada. Todavia, com o aumento do diâmetro da partícula ( $d > 100 \mu\text{m}$ ) e/ou diminuição da viscosidade do fluido-suporte (2 cSt), chega-se a um ponto em que a força eletrostática supera a hidrodinâmica e, como consequência, há a separação das partículas e do fluido-suporte [bare-89].

Além desse tipo de separação dinâmica das partículas, há também a centrifugação das mesmas. Johnson [john-94], ao verificar a centrifugação de partículas em uma embreagem ER, destacou a importância e a urgência em se desenvolver novos fluidos que contornem adequadamente este problema.

Existem alguns trabalhos que verificam o efeito ER em cristais-líquidos<sup>2</sup> [moris-93] [wiss-93] [inou-96]. A vantagem desses materiais é a ausência de água e a existência de uma única fase, de modo que o problema da sedimentação de partículas fica eliminado [wiss-93]. Inoue [inou-96] estudou este tipo de material e observou que os mecanismos envolvidos no efeito ER de polímeros CL termotrópicos e liotrópicos são diferentes. De acordo com Wissbrum [wiss-93], as desvantagens do cristal-líquido residem na limitada faixa de temperatura (o que pode ser um pouco contornado com o uso de cristais-líquidos liotrópicos), e o longo período de tempo para a formação das propriedades do material sob a aplicação do campo elétrico. A condutividade elétrica de cristais-líquidos associada com a instabilidade eletrohidrodinâmica também pode ser um problema, tanto devido ao consumo de potência como pela possibilidade de mudança de suas características com o tempo, levando a uma resposta ER instável. Para Wissbrum, os cristais-líquidos podem ser melhor usados como fluidos magneto-reológicos (MR) do que como fluidos ER.

Além disso, também é importante destacar o aspecto tribológico dos fluidos eletro-reológicos. Em alguns casos, quando são exigidas características lubrificantes por parte dos fluidos ER, as propriedades tribológicas podem ser mais importantes que a viscosidade da suspensão em si. Para Lingard e Bullough [ling-89] alguns fluidos que empregam fluido de

---

<sup>2</sup> Cristal-líquido (CL) é definido como um fluido homogêneo, geralmente exibindo anisotropia em muitas de suas características e uma tendência inerente para orientação instantânea de sua estrutura molecular, mesmo sob baixos campos elétricos. Os cristais-líquidos podem ser divididos em quatro classes de acordo com o formato e a orientação de suas moléculas: nemático, esmético, colestérico e discótico. A fase líquido-cristalino (entre sólido e líquido) é chamada de estado mesófase e pode ocorrer a uma dada temperatura (CL termotrópico) ou a uma dada concentração (CL liotrópico).



silicone ou bifenil clorado como fluido-suporte podem apresentar problemas tribológicos devido à sua relativa não-polaridade. Como se sabe, tanto o líquido base como os materiais eletro-reologicamente ativos contribuem significativamente para o desgaste e o atrito entre o fluido ER e o material com o qual ele fica em contato. De acordo com o artigo, os lubrificantes convencionais são eficazes somente em uma fina camada que fica em contato com a superfície do material a ser protegido, e esta camada se forma devido à existência de uma substância no fluido-suporte, que pode ser ou um surfactante polar ou uma substância que reaja quimicamente com a superfície do material (por exemplo, sulfetos). Segundo Lingard e Bullough, o fluido-suporte precisa ter propriedades similares a estas, sendo que a seleção de um fluido-suporte puramente neutro pode causar problemas de desgaste inaceitáveis. Ainda no mesmo artigo, os autores comentam que, apesar de os particulados terem um tamanho médio nominal muito maior que a espessura do filme em contato, eles são capazes de atravessar o contato, podendo, portanto, agir como abrasivos e/ou sólidos lubrificantes. Segundo eles, existem evidências de ambos os efeitos. Para John R. Wilson [wils-93], ainda não está claro se o encapsulamento das partículas com um material de baixíssima condutividade poderia evitar o atrito, ou se partículas mecanicamente mais flexíveis seriam melhores que as mais rígidas.

No projeto de aplicativos ER, é de fundamental importância saber o comportamento relógico detalhado do fluido eletro-reológico a ser usado [carl-89]. Para Filisko [fili-93], o mais sério impedimento para o projeto de dispositivos ER são a falta de bons modelos mecânicos e reológicos, a ausência de boas equações matemáticas que simulem adequadamente o comportamento de materiais ER, e a falta de detalhes de projeto de engenharia apropriados. Idealmente, para o uso em embreagens, o comportamento do fluido ER pode ser aproximado por um fluido de Bingham, o qual exibe um limite de escoamento bem definido. Entretanto, se o limite de escoamento estático de um fluido exceder o dinâmico, tem-se uma condição de grande queda na tensão de cisalhamento logo no início do escoamento, dificultando, assim, o controle dinâmico de uma embreagem, por exemplo. Somado a isso está o fato de que fluidos ER que se comportam desta maneira podem apresentar um alto torque estático; porém, se o fluido começar a escoar, o torque dinâmico que ele pode suportar cai violentamente tornando-o relativamente sem uso para futuras ações de embreagem. Já os fluidos que exibem um comportamento pseudoplástico, fazem com que o

desempenho de embreagens a baixas taxas de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) diminua. Neste caso, o fluido não tem um limite de escoamento estático definido para baixos valores de  $\dot{\gamma}$ . Desta maneira, uma embreagem que utilize este tipo de fluido pode operar satisfatoriamente para altos valores de  $\dot{\gamma}$ ; porém, para baixas taxas de cisalhamento terá uma capacidade de torque reduzida e não conseguirá manter-se no modo estático de maneira satisfatória. Outro problema apresentado por fluidos ER é a ocorrência de histerese nas curvas da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) em função da taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), o que dificulta enormemente o controle de dispositivos mecânicos [bull-89].

Como se pode perceber, os requisitos de engenharia e economia impõem restrições importantes a aplicações práticas dos fluidos ER. Alguns dos problemas citados constituem um empecilho considerável ao emprego genérico de aplicativos de engenharia. Além deles, existem outros, tais como: a necessidade de uma fonte de alta tensão pequena, leve e capaz de prover potência suficiente; o projeto de um trocador de calor para garantir que o dispositivo opere dentro de uma faixa de temperatura aceitável; o isolamento e o aterramento apropriados para o dispositivo, etc [chen-89]. Os dispositivos ER ainda não estão disponíveis no mercado devido ao fato de não existirem fluidos ER que possuam a força necessária, estabilidade e durabilidade. Entretanto, se se tiver uma visão mais ampla dos fluidos ER e se os problemas forem analisados com respeito aos requisitos de eventuais aplicações, então as soluções virão.

### 2.1.1 A Pesquisa e o Desenvolvimento da Eletro-Reologia em Diversos Países

Dentre as aplicações possíveis para os fluidos ER, as mais promissoras encontram-se em:

- materiais inteligentes (onde um sensor detecta uma condição e envia um sinal de controle para um receptor [conr-93]);
- amortecimento automotivo [conr-93] [boyl-93] [lord-93] [ford-93];
- sistemas de embreagem [conr-93] [boyl-93] [lord-93];

- máquinas de terceira geração (controle eletrônico de dispositivos simples que exijam cargas leves dando sofisticação à saída e, por conseguinte, muita rapidez [goodwi-93]);
- dispositivos de frenagem [conr-93];
- absorvedores de choque [goodwi-93], coxins [dow-93];
- controle de vibração [boyl-93];
- suspensões [boyl-93];
- dispositivos onde haja transmissão de potência [boyl-93];
- estruturas espaciais [lord-93];
- amortecimento do corpo do painel do carro [ford-93];
- atuadores especialistas [goodwi-93].

Vários pesquisadores de diversos países têm se empenhado em estudar e desenvolver novos tipos de fluidos ER e dispositivos que o utilizem. A seguir tem-se a relação de alguns dos órgãos e pesquisadores que estudam os fluidos eletro-reológicos.

#### 2.1.1.1 Estados Unidos

**North Carolina State University** [conr-93]: Hans Conrad, um dos maiores pesquisadores na área de eletro-reologia, já publicou inúmeros artigos sobre o assunto, acompanha várias pesquisas e recebe suporte financeiro de indústrias, da NSF e de Army Research Office. Atualmente ele está direcionando suas investigações no entendimento do mecanismo básico do efeito ER.

**RheoActive Inc.** [boyl-93]: esta empresa foi formada em 1987 pela Lubrizol Inc. e está concentrando suas pesquisas nos aspectos eletromecânicos de sistemas ER, dando enfoque ao mercado automotivo (suspensões, controle de vibrações, transmissão de potência, embreagens, etc.).

**Lord Corporation Corporate Research Labs** [lord-93]: a ênfase do laboratório desta empresa focaliza a medida de propriedades importantes de engenharia (tais como alta tensão dinâmica ao cisalhamento e baixa condutividade elétrica com estabilidades química e física)

mais do que o desenvolvimento da compreensão básica de fluidos ER. Uma atenção especial tem sido dada ao desenvolvimento de hardware e software para o controle ativo do movimento e vibração em automóveis e estruturas espaciais. Tanto fluidos convencionais como anidros têm sido estudados, porém o foco de atenção está sobre este último.

**Ford Motor Company** [ford-93]: a Ford começou a se desenvolver na área de eletro-reologia em 1990 quando se interessou pela utilização de fluidos ER em aplicações automotivas, como por exemplo, o amortecimento do corpo do painel de um carro. Eles têm algumas publicações na área e seus esforços estão concentrados na avaliação dos fluidos produzidos por outros grupos, no estudo do tempo para formação de fibras e em simulações para estudar o mecanismo de polarização e a dinâmica da formação da estrutura fibrosa.

**Dow Chemical Company** [dow-93]: a Dow iniciou seus estudos sobre fluidos ER em 1989 e seus esforços foram direcionados para a avaliação de mercado e determinação de parâmetros críticos que controlam a atividade ER; entretanto pararam de trabalhar nesta área em 1992. Neste período foram publicadas algumas patentes.

#### 2.1.1.2 Reino Unido [goodwi-93]

**Cranfield Institute of Technology**: seu principal pesquisador é o professor H. Block que iniciou seu trabalho em eletro-reologia em 1979 devido a observações feitas em mudanças de propriedades dielétricas em sistemas sob escoamento. Foram publicados alguns artigos e patentes. Uma das aplicações promissoras que estão sendo estudadas são os atuadores especialistas. Neste instituto também está sendo explorada uma faceta importante da eletro-reologia: a anisotropia elétrica sob campo elétrico. Além disso, estudos sobre a sedimentação de partículas estão sendo conduzidos usando-se uma série de eletrodos de modo a permitir que a sedimentação em fluidos opacos seja observada através de mudanças nas propriedades elétricas. Neste instituto foi desenvolvido um fluido ER com partículas poliméricas contendo menos de 5% de água e que podem operar a temperaturas superiores a 200°C [gold-90].

**Airlog Ltd.**: localizada perto da base militar de Aldershot, esta empresa tem fabricado e vendido fluidos eletro-reológicos patenteados por British Technology Group desde 1989.

Em particular, a companhia está desenvolvendo dispositivos automotivos anti-vibração, válvulas para robôs e inúmeras aplicações médicas. Apesar de se dizer que a Airlog tem fluidos ER prontos para serem usados em sistemas de suspensão de automóveis, informações oficiais admitem que ainda é necessário muito trabalho para que os fluidos sejam usados com toda sua potencialidade [gold-90].

**Advanced Fluid Systems Ltd.:** o interesse desta pequena companhia no assunto iniciou em 1965. Os primeiros fluidos ER foram feitos à base de sílica e o estudo continuado de materiais ER resultou em algumas patentes em dispositivos mecânicos. Segundo seus pesquisadores, as mais promissoras aplicações são os absorvedores de choque e o uso de fluidos ER nestes tipos de dispositivos implicam em economia de energia. Nos laboratórios desta empresa existe uma rotina de testes que inclui: determinação da tensão mínima de escoamento ( $\tau_y$ ), escoamento do fluido ER em células do tipo Couette ( $10 \leq \dot{\gamma} \leq 3000 \text{ s}^{-1}$  e  $0 \leq E \leq 2,5 \text{ kV/mm}$ ) e escoamento tipo Poiseuille (regime permanente,  $P \leq 60 \text{ bar}$  e  $Q = 15 \text{ l/min}$ ), testes oscilatórios em função do campo e da frequência, compressão entre eletrodos infinitos, análise do tamanho da partícula, estocagem do fluido por longo período de tempo, bombeamento do fluido por longo tempo e desempenho do escoamento. Segundo a companhia, existem muitas informações na literatura que são confusas e pouco confiáveis.

**Sheffield University:** o professor W. Bullough trabalha com fluidos ER desde 1967 e, atualmente, desenvolve controles eletrônicos de dispositivos simples e leves, dando sofisticação de saída e rapidez de resposta. Ele já tem mais de 60 publicações sobre válvulas, embreagens e sistemas de controle. O principal problema com o qual os pesquisadores desta universidade têm se deparado é a sedimentação de partículas. Outras dificuldades são: encontrar fluidos ER com uma tensão mínima de escoamento apropriada, cuja viscosidade não diminua com o cisalhamento e que tenha uma resposta suficientemente rápida; além disso, estão tentando combinar a reologia e a química de superfície de modo a reduzir a viscosidade do fluido ER quando na ausência de campo elétrico, e tentando diminuir o aquecimento e a perda de energia. Esses objetivos devem ser atingidos sem prejuízo das propriedades do material ER.

**University of Sussex:** os doutores D. Heyes e J. Melrose estão trabalhando com simulações há cerca de 6 anos na área de eletro-reologia fazendo uso da dinâmica molecular.

**Iniciativa do Governo:** foi feito um esquema de união com o departamento de Comércio e Indústria (U.K. Department of Trade and Industry) a fim de incentivar o desenvolvimento da tecnologia ER e com o objetivo de produzir dispositivos para serem usados comercialmente. A indústria financia uma parte da pesquisa, enquanto que o DTI financia a outra; o trabalho é desenvolvido em universidades e em companhias que estão colaborando.

**ER Fluid Developments:** esta é uma pequena empresa dirigida pelos doutores J. Stangroom e L. Evans. Foram construídos vários dispositivos demonstrativos, sendo que a idéia mais importante foi o uso de fluidos ER em um modo amplificador/servo. A companhia tem muitas patentes e publicações.

**Lotus Engineering:** nesta companhia foi desenvolvido um suporte para o sistema de tração nas quatro rodas de um veículo. Na prática, o eixo diretor de cada roda é ligado eletronicamente ao sistema de suspensão da Lotus, sendo que sensores ligados a cada roda detectam o peso da suspensão e alteram suas características conforme a necessidade. Os sinais dos sensores são mandados para a unidade do fluido ER em cada eixo, instruindo-o a alterar o torque [gold-90].

### 2.1.1.3 Japão [filis-93]

**Nissan Motor Company:** atualmente, seus esforços estão concentrados na área de materiais e suas aplicações: estão interessados em desenvolver materiais aperfeiçoados, em saber como é seu mecanismo de funcionamento e, principalmente, em desenvolver sistemas de amortecimento ativo, como suspensão ativa em automóveis. Segundo eles, as aplicações mais promissoras são coxins, sistemas de suspensão ativa e outros dispositivos de amortecimento. Para a caracterização dos materiais ER, verifica-se a sedimentação das partículas e a reologia dos mesmos. Não é feita a monitoração da degradação do fluido com o tempo ou o uso. De acordo com eles, os principais problemas e obstáculos ao

desenvolvimento da tecnologia ER são: fluidos com baixa tensão mínima de escoamento, alta corrente elétrica, altas voltagens, sedimentação de partículas e abrasão.

**Toyota Motor Corporation:** a Toyota começou a se envolver com eletro-reologia em 1988. Sua atividade atual está concentrada na área de materiais (na tentativa de aumentar a tensão mínima de escoamento e diminuir a decantação) e da área de dispositivos. Um dos sistemas estudados por eles envolve partículas semicondutoras (poli (p-fenileno)) e a maior parte dos fluidos estudados são à base de silixano. Já existem várias publicações e patentes feitas pela Toyota, e os maiores problemas encontrados por eles são baixos valores de  $\tau_y$  (tensão mínima de escoamento), decantação de partículas, erosão e abrasão. Como vazios na pesquisa básica de eletro-reologia, eles incluem a falta de compreensão da ciência de superfície envolvida e dos mecanismos responsáveis pelas mudanças eletro-reológicas do material.

**Asahi Chemical Industry Company LTD.:** Asahi começou a trabalhar com fluidos eletro-reológicos em 1986. Sua principal atividade é o desenvolvimento de novos fluidos visando sua estabilidade a altas voltagens, a altas temperaturas e durabilidade sob condições reais de operação e por longo tempo. Os testes para caracterização dos fluidos incluem testes dinâmicos e contínuos. Também estão sendo desenvolvidos dispositivos para amortecimento direcionado a indústrias automotivas. Até o ano de 1993 eles ainda não tinham conseguido desenvolver um fluido que pudesse ser usado comercialmente.

**Bridgestone Corporation:** seu trabalho começou por volta de 1986, sendo que suas principais atividades são: desenvolvimento de fluidos ER, de absorvedores de choques, coxins e sistemas de suspensão ativa. Uma das aplicações sugeridas por eles são absorvedores de choque e controle de pequenas vibrações para microscópios eletrônicos. Eles já têm publicações e patentes e desejam ser os maiores fornecedores de fluidos ER. Na sua rotina de testes está incluída a verificação da sedimentação de partículas e a estabilidade dos fluidos sob cisalhamento e altas voltagens por longos períodos de tempo. Alguns de seus desafios são encontrar um tipo de fluido em que não haja sedimentação de partículas e que tenha um bom desempenho a voltagens menores (principalmente devido à corrente e à potência envolvidas).

Segundo eles, os estudos sobre eletro-reologia devem ser conduzidos na direção de encontrar fluidos com melhor desempenho a menores campos elétricos e compreender os aspectos fundamentais do fenômeno eletro-reológico.

#### **2.1.1.4 China [xu-93]**

Até 1988 não havia nenhuma pesquisa explícita em eletro-reologia na China, apesar de alguns pesquisadores se interessarem pelo assunto. O professor C. Wei, juntamente com o professor Bullough (Inglaterra) iniciou suas pesquisas com fluidos ER; enquanto isso, o professor Y. Z. Xu começou a estudar a resposta eletro-reológica e o desenvolvimento de um novo tipo de fluido ER anidro baseado em polímeros semicondutores. Wei e Xu estão trabalhando juntos e desenvolvendo fluidos mais eficientes. Eles pesquisam o mecanismo ER na sua essência e projetam novos dispositivos para a indústria automotiva, dando ênfase a embreagens e sistemas de amortecimento. Um dos problemas encontrados por eles tem sido manter a corrente em níveis aceitáveis. O Dr. Lu e seus colaboradores da Universidade de Xi'an Jiaotong fabricaram um fluido que, segundo eles, apresenta uma tensão mínima de escoamento de até 30 kPa. Apesar disso, afirmam que ainda não foi possível identificar um fluido que preencha os requisitos de todos os dispositivos ER. De acordo com os pesquisadores chineses, a eletro-reologia ainda precisa se desenvolver na pesquisa básica, como por exemplo, na transferência de força e de elétrons na interface das partículas e do fluido-suporte, além de ampliar a faixa de temperatura sem deterioração das propriedades do fluido eletro-reológico.

#### **2.1.1.5 França [boss-93] [krie-93]**

Dr. Bossis tomou conhecimento da existência de fluidos ER no Instituto de Tecnologia da Califórnia em 1988. Desde então, juntamente com E. Lemaire, passou a desenvolver o assunto de eletro-reologia e magneto-reologia (MR) na Universidade de Nice. De acordo com Dr. Bossis, a vantagem de fluidos MR é a ausência de problemas relacionados com a condutividade finita dos fluidos ER na presença de altos campos (aquecimento de Joule, degradação eletroquímica, quebra do dielétrico, etc.). Além disso, a tensão mínima de



escoamento a campos magnéticos relativamente baixos (1000 Oersted) são da mesma ordem de grandeza observada em fluidos ER (1 a 5 kPa). Este programa de pesquisa foi fundado pelo CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) e pela Rhône Poulenc (uma empresa química privada). Segundo DR. Bossis, na França existem duas empresas que efetivamente estão pesquisando fluidos ER: a Rhône Poulenc, que sistetiza fluidos à base de fluido de silicone, e a Thomson Sintra, que faz monitoramento de impedâncias acústicas). A Renault ainda está no início e está procurando a colaboração européia para o desenvolvimento de dispositivos de amortecimento. Além dessas empresas, existem pessoas que também fazem pesquisa nesta área: Pierre Atten (Grenoble) trabalha com forças eletrostáticas entre duas esferas dielétricas macroscópicas em um fluido isolante; ele e o Dr. Foulc estão investigando os efeitos da condutividade no modelo de forças entre partículas. Dr. Fermigier (Paris) estuda a cinética da agregação de partículas coloidais magnéticas localizadas em um campo magnético.

#### **2.1.1.6 Alemanha [krieg-93][baye-96]**

A Bayer está envolvida com eletro-reologia desde 1983, sendo que seus esforços estão direcionados para a síntese de fluidos ER e a decantação de partículas. De acordo com Irvin M. Krieger, a única aplicação para fluidos ER em uso é o controle de tensão de um fio enquanto ele está sendo enrolado em um carretel [krieg-93]. O carro chefe para aplicações futuras é no campo automotivo. Até 1993, o principal problema encontrado por eles era obter fluidos com a reologia e a estabilidade requeridas, além do alto custo envolvido para sua produção em grande escala. Somado a isso, existem alguns problemas para se reproduzir as propriedades dos fluidos de uma batelada para outra. Atualmente a Bayer já está no mercado vendendo fluidos eletro-reológicos anidros (Rheobay®) à base de partículas de polímeros em fluidos de silicone (Baysilone®). Os produtos Rheobay® (TP AI 3565\* e TP AI 3566\*) apresentam alto efeito ER, sendo que a tensão de cisalhamento pode chegar a 16 kPa para taxas de cisalhamento de  $30000 \text{ s}^{-1}$ ,  $E_{cc} = 6 \text{ kV/mm}$  e  $T = 60^\circ\text{C}$ . Entretanto a temperatura máxima dos testes apresentados em seus catálogos de venda não ultrapassa  $100^\circ\text{C}$  [baye-96].

### 2.1.1.7 Antiga URSS [koro-93]

Existem vários pesquisadores estudando o efeito ER na antiga União Soviética, sendo que muitas das pesquisas são desenvolvidas por um grupo encabeçado por Academician P. A. Rebinder. Com relação à natureza do efeito ER, os esforços têm se concentrado no estudo do tempo de resposta de fluidos ER, na verificação da influência de aditivos, do tamanho e formato de partículas, da temperatura, etc. e na descrição teórica dos efeitos ER. Além disso, eles têm estudado a composição desses fluidos, suas propriedades mecânicas sob cisalhamento constante e oscilatório, suas propriedades elétricas e suas características termofísicas, acústicas e ópticas.

### 2.1.1.8 Brasil

No nosso país, a eletro-reologia ainda está dando seus primeiros passos. Existem pouquíssimos pesquisadores que estão se dedicando a esta área. Dentre eles estão Mendes e Santana [mend-96] que estudaram o comportamento reológico de fluidos ER à base de sulfato de hidrazina-lítio, e Bombarb e Joekes [bomb-96] que analisaram o efeito ER de suspensões de PVA em óleo de milho. Ambos os fluidos pesquisados são anidros.

## 2.2 Fluidos Eletro-Reológicos

Os fluidos eletro-reológicos (ER) são suspensões compostas por finas partículas dielétricas (geralmente polímeros de 1 a 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro) em líquidos de baixa constante dielétrica, não-condutivos, (fluidos-suporte) [conr-91] [bonne-92]. Segundo Klingenberg e Zukoski IV [klin-90] a condutividade dos fluidos ER está na faixa de  $10^{-9}$  a  $10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ . Como exemplos destes fluidos, citam-se: partículas de amido em óleo de cereal, sílica gel em óleo mineral, celulose em óleo de transformador, zeólitos em fluido de silicone, sílica gel em querosene, etc.. O princípio de funcionamento deles é bem simples: o fluido ER é colocado entre dois eletrodos, sendo, em seguida, submetido à ação de um campo elétrico da ordem de

4 kV/mm. Desta forma, o fluido, inicialmente líquido, tem suas características reológicas alteradas a tal ponto que alguns autores chegam a classificá-lo como um sólido fraco ao invés de um líquido resistente – apesar de este último ser o ponto de vista mais aceito na literatura [conr-87] [carl-88] [broo-89] [tao-91]. Quanto maior for a magnitude do campo, mais "rígido" se torna o fluido. Este fenômeno ocorre reversivelmente em intervalos de tempo da ordem de milisegundos, ou seja, basta remover o campo elétrico para que, dentro de frações de segundo, o fluido ER volte a ter as mesmas características iniciais [ducl-88] [conr-91] [hill-91]. Há alguns autores que dizem que, no tocante à reorganização das partículas no fluido-suporte depois de removido o campo elétrico, é necessário um certo tempo para que o material ER volte ao seu estado inicial ou, até mesmo, que ele seja cisalhado.

### 2.2.1 Materiais Usados em Eletro-Reologia

Desde a sua descoberta, os fluidos ER mostraram reconhecido potencial em aplicações de engenharia. Os primeiros fluidos eram feitos à base de óleo mineral e partículas de amido ou sílica contendo água adsorvida (promotora da separação de cargas elétricas dentro das partículas). Infelizmente, a adição de água também provoca um aumento do fluxo de cargas de uma partícula para outra, principalmente a temperaturas mais altas, elevando a potência requerida pelo fluido e aumentando o custo de um possível dispositivo mecânico. Além disso, a presença da água causa a ocorrência da ruptura do dielétrico a campos cada vez menores [fili-90] e torna o fluido susceptível à degradação química, eletroquímica e térmica. Atualmente estão sendo pesquisadas combinações de fluido-suporte/partícula que, quando submetidas a um campo elétrico, apresentem baixo consumo de energia e sejam capazes de resistir a altas tensões de cisalhamento. Devido à necessidade deste baixo consumo de energia, essas combinações são escolhidas de modo a aumentar a separação de cargas e evitar o fluxo delas entre as partículas. Alguns centros de pesquisa como *Thomas Research Center* nos EUA e *Cranfield Institute of Technology* no Reino Unido estão desenvolvendo fluidos anidros. O resultado disso são fluidos que operam em uma larga faixa de temperatura, o que não acontece com aqueles que contêm água – cuja faixa está limitada entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $70^{\circ}\text{C}$ .

Outra característica desejada para o fluido ER é a baixa viscosidade após a remoção do campo elétrico. Para tanto, o fluido-suporte deve ter viscosidade mínima e baixa pressão de vapor para evitar dificuldades de operação provocadas pelo aumento da viscosidade do fluido ER como resultado da volatilização do mesmo. Na maioria dos novos fluidos eletro-reológicos, as partículas são à base de polímeros, minerais ou cerâmicas. Como foi dito, requer-se delas um bom nível de polarização e uma passagem mínima de corrente entre elas. Os fluidos-suporte precisam ser bons isolantes e compatíveis com os materiais com os quais estarão em contato. Atualmente, os mais usados são fluido de silicone, óleo mineral, óleo de transformador e parafina clorada. Dentre os fluidos que apresentam os requisitos necessários, os três primeiros são os mais disponíveis no mercado e, por isso, têm maior potencial de aplicação. Além disso, os hidrocarbonetos halogenados (como parafina clorada) são tóxicos.

De acordo com o artigo de Jordan e Shaw [jord-89], o tamanho das partículas de um fluido ER deve variar de 0,04 a 50  $\mu\text{m}$ , sendo que partículas muito grandes respondem muito lentamente para serem usadas em aplicações práticas, sem se levar em conta a maior propensão que elas têm à sedimentação. Alguns autores acham que é vantajoso usar partículas menores, enquanto que outros argumentam que uma distribuição delas é desejável [carl-88]. Outros ainda concluíram que o efeito ER aumenta com o diâmetro da partícula até um determinado tamanho onde o efeito é máximo e a partir daí ele diminui. Se as partículas forem anisotrópicas na forma ou nas propriedades dielétricas, o tempo requerido para que as partículas se alinhem com o campo elétrico faz com que o tempo de resposta aumente apreciavelmente; porém, como vantagem, as partículas com formato elipsóide, uma vez alinhadas com o campo, apresentam um momento de dipolo induzido maior que o de esferas, além de serem necessárias menos partículas para formar a estrutura fibrosa.

Block e Kelly [bloc-87] apresentaram em seu trabalho uma lista de fluidos eletro-reológicos convencionais, cuja ativação (polarizabilidade da fase dispersa) vem pela adição de água, soluções salinas e líquidos polares (Tab.2.1). Segundo Korobko [koro-94], bons ativadores são, em primeiro lugar, compostos orgânicos capazes de formar pontes de hidrogênio (água, álcoois etílicos, butílicos e propílicos, etileno glucol, dietileno glucol, etc.) e, em segundo lugar, as aminas (alifáticas, aromáticas primária e secundária). Às vezes, com o intuito de se estabilizar a dispersão, são adicionados surfactantes, os quais podem ter, ou não,

Tab. 2.1: Soluções Eletro-reológicas convencionais – [bloc-87]

| <b>MATERIAL</b>                  | <b>ADITIVO*</b>          |
|----------------------------------|--------------------------|
| Titanato de Cálcio               | Água                     |
| Dextrana                         | Água                     |
| Celulose                         | Água<br>Soluções Salinas |
| Argila Mineral                   | Água<br>Dietilamina      |
| Resinas de Troca Iônica          | Água                     |
| Óxidos de Ferro                  | Água                     |
| Piezocerâmica (não especificada) | Água                     |
| Sais de Poliacrilato             | Água                     |
| Álcool de Polivinila             | Água                     |
| Sílica                           | Água<br>Dietilamina      |
| Carboximetil Celulose de Sódio   | Água                     |
| Carboximetil Dextran de Sódio    | Água                     |
| Amido                            | Água                     |
| Óxido de Estanho                 | Água                     |
| Dióxido de Titânio               | Água<br>Trietanolamina   |

\* Muitos sistemas contêm surfactantes que não estão listados.

papel ativo no efeito eletro-reológico. Sem esses aditivos, alguns fluidos ER podem apresentar atividades eletro-reológicas fracas ou até mesmo serem totalmente inativos. Os materiais para formulação de fluidos ER apresentados na tabela 2.1 fornecem suspensões que contêm íons móveis, mesmo que a fonte destes seja um aditivo ou surfactante. Na tabela 2.2 estão

relacionados alguns dos fluidos anidros encontrados na literatura. Dentro desta classificação, existem fluidos ER cujo fluido-suporte é um cristal-líquido ao invés de fluido de silicone [hoss-95]. Segundo Hosseini-Sianaki, a tensão de cisalhamento atingida por esse tipo de material é da ordem de 10 kPa para  $E = 3 \text{ kV/mm}$  e taxa de cisalhamento de  $3000 \text{ s}^{-1}$  (dez vezes maior que para fluidos ER à base de fluidos de silicone). Há ainda outros fluidos ER desenvolvidos e estudados [bloc-88]. Weiss e Carlson [weis-94] apresentam uma série de fluidos ER já patenteados.

Também quanto ao tipo de fluido-suporte usado, Stangroom [stan-91] observou que o fluido de silicone e o óleo mineral fornecem fluidos ER com uma atividade moderada, enquanto que o benzeno e o tolueno são pobres eletro-reologicamente falando, e o fluorsilicone e o bromonaftaleno são bons. Xu e Liang [xu-91] notaram que os fluidos que utilizavam fluido de silicone apresentavam um desempenho eletro-reológico melhor que aqueles com óleo mineral.

Tab. 2.2: Soluções eletro-reológicas anidras

| <b>PARTÍCULA</b>  | <b>FLUIDO-SUPORTE</b> | <b>REFERÊNCIA</b> |
|---|-----------------------|-------------------|
| Esferas de Al revestidas<br>por $\text{NaCO}_3$                       | Dimetil Sililoxano    | [inou-89]         |
| Poliacrilonitrila Pirolicada  | Óleo*                 | [maka-89]         |
| Sulfato de Hidrazina Lítio<br>( $\text{LiN}_2\text{H}_5\text{SO}_4$ ) | Fluido de Silicone    | [carl-88]         |
| Antraceno (PAQR)  | Fluido de Silicone    | [bloc-90]         |
| Silicato de Al  | Fluido parafínico     | [fili-91]         |
| Ftalocianina de Cobre   | **                    | [jorda-89]        |

\* Não especificado

\*\* Não citado

## 2.2.2 Estrutura do Fluido Eletro-Reológico

Ao estudar a estrutura dos fluidos ER, Winslow constatou que, sob a ação de um campo elétrico, as partículas do fluido se alinhavam ao longo da direção do campo formando uma estrutura fibrosa (em forma de cadeias) [conr-91]. Ele atribuiu o aumento da resistência ao cisalhamento apresentada pelo fluido à força requerida para que essas fibras se rompessem. Segundo Chen [chen-91] o alinhamento das partículas formando uma estrutura fibrosa e o aumento da resistência ao cisalhamento se deve à polarização das partículas e à força resultante de atração entre elas.

Conrad e Sprecher [conr-91] estudaram a estrutura formada por contas de vidro de 27  $\mu\text{m}$  em fluido de silicone sob as condições estática (sem cisalhamento) e dinâmica (durante cisalhamento). A seguir são descritas ambas as estruturas com alguns detalhes.

### 2.2.2.1 Estrutura Estática

Conrad [conr-91] fez experimentos com fluidos ER compostos por contas de vidro de 27  $\mu\text{m}$  de diâmetro (a 20% em volume) imersas em fluido de silicone. Em seus estudos, analisou a estrutura que se desenvolvia neles quando colocados entre dois eletrodos e submetidos a campos elétricos cc de diferentes intensidades. Conrad observou que, para pequenos valores de campo, as partículas começavam a se agrupar tendendo a um alinhamento na direção do mesmo. Quando o campo atingia 0,5 kV/mm, percebeu a formação das primeiras fibras que, a partir deste valor, aumentavam em espessura e número (Fig.2.1). Alguns pesquisadores, estudando as energias de várias estruturas de rede possíveis, concluíram que a estrutura preferida pelas fibras mais espessas (colunas) é a tetragonal de corpo centrado [tao1-91] [chen-92] [davi-92].

Na Fig.2.2 estão listados os parâmetros estereológicos da estrutura do modelo eletro-reológico estudado por Conrad. O espaço entre duas correntes ( $\lambda_c(\perp)$ ), a espessura delas ( $X_c(\perp)$ ) e o espaço livre médio entre a intersecção das cadeias ( $\lambda_c(\parallel)$ ) são mostrados na Fig.2.2-a. Na Fig.2.2-b, observa-se que o grau de orientação das partículas ( $\Omega_{1,2}$ ) aumenta

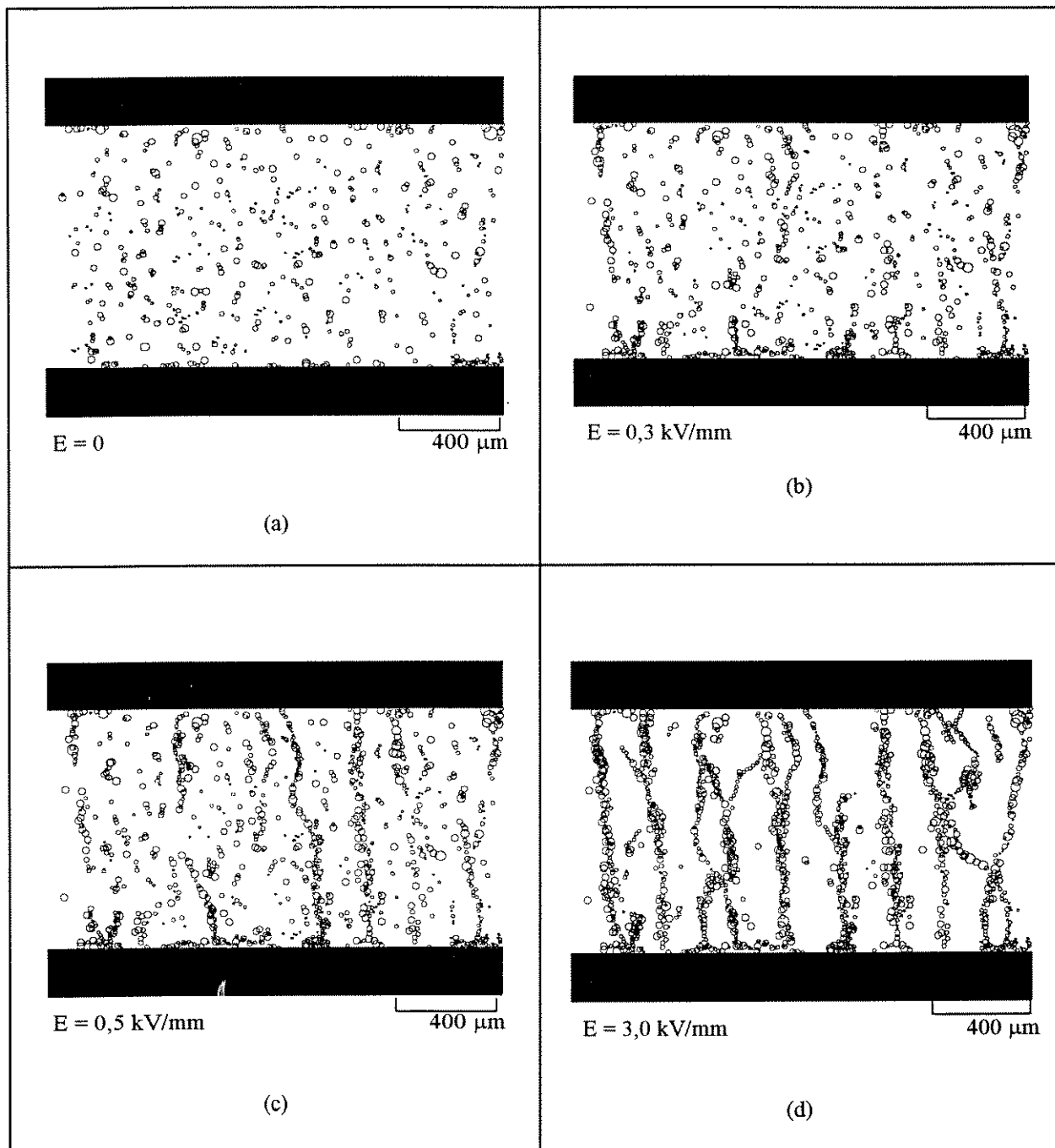


Fig.2.1 - Desenvolvimento da estrutura fibrosa com o aumento do campo elétrico - [conr-87].



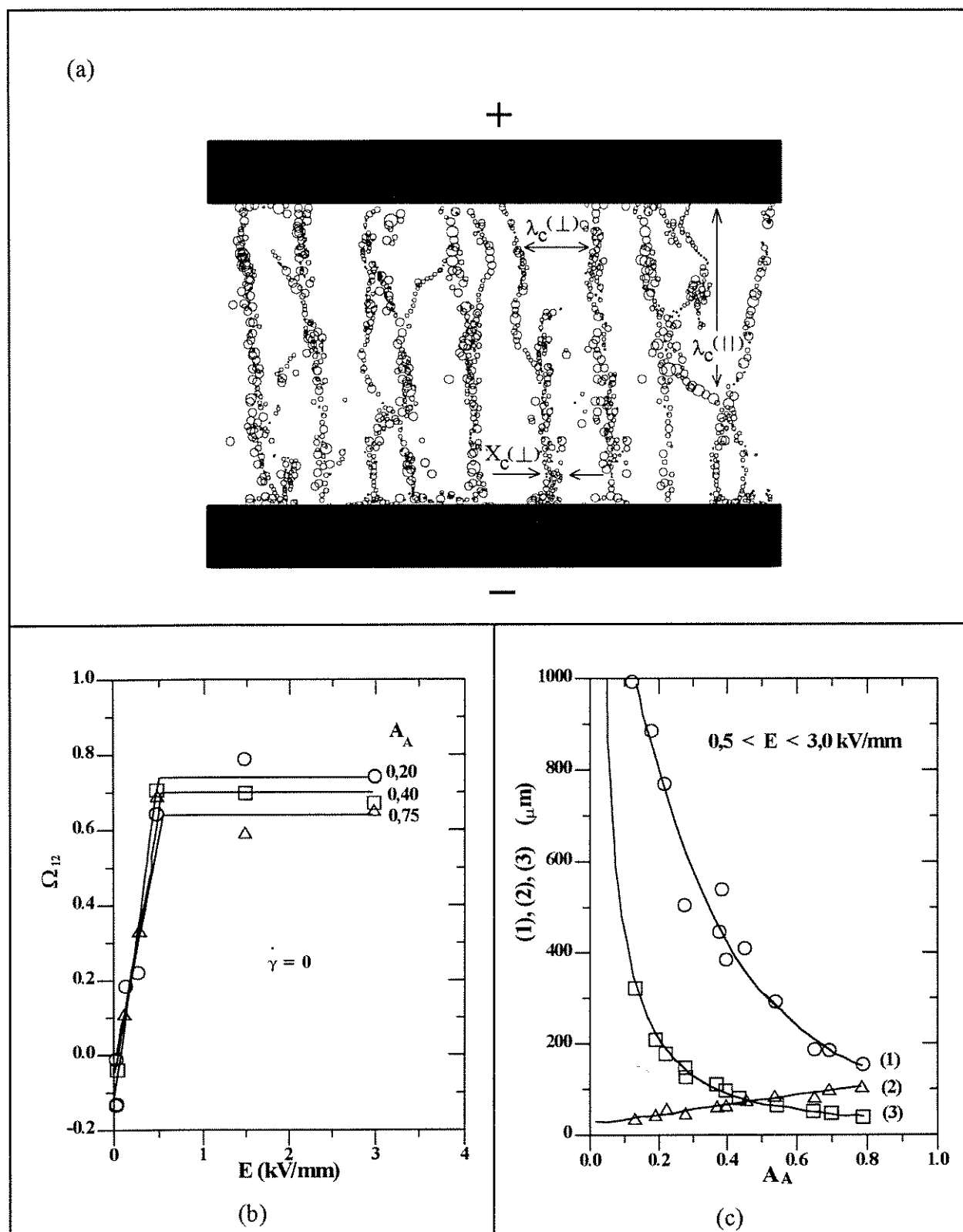


Fig.2.2 - a)Parâmetros estereológicos usados para caracterizar a estrutura de fluidos ER; b)Efeitos do campo elétrico; c)Efeitos da fração de área das contas nestes parâmetros (sendo (1) =  $\lambda_c(\parallel)$ , (2) =  $X_c(\perp)$  e (3) =  $\lambda_c(\perp)$  - [conr-91].

rapidamente com o campo até que ele atinja um valor próximo de 1 kV/mm, a partir do qual se mantém constante. Para campos maiores que este, a fração de área das partículas ( $A_A$ ) passa a influenciar o grau de orientação das mesmas. Quanto menor for a fração em volume das contas de vidro, o que implica em menor  $A_A$ , mais facilmente as partículas se alinharão na direção do campo, aumentando, assim,  $\Omega_{1,2}$ . A Fig.2.2-c mostra que, para  $0,5 < E < 3$  kV/mm, os parâmetros  $\lambda_c(\perp)$ ,  $\lambda_c(\parallel)$  e  $X_c(\perp)$  são praticamente independentes do campo elétrico. Entretanto, observa-se uma forte dependência com relação à fração de área das esferas. É interessante notar que estes parâmetros podem ser medidos somente após a formação das fibras, ou seja, a partir de 0,5 kV/mm. Além dessas observações, Conrad destacou o fato de que o aspecto geral da estrutura se desenvolve com tanta rapidez que se torna impossível acompanhar o fenômeno com os olhos. Os ajustes e movimentos de contas isoladas ainda permanecem por mais algum tempo.

Tao [tao-93] estabeleceu que existem duas transições de fase no fluido ER à medida que o campo elétrico é aplicado e que essas transições ocorrem em dois campos elétricos críticos:  $Ec_2 < Ec_1$ . Quando  $E < Ec_2$ , o sistema é fluido; para  $Ec_2 < E < Ec_1$ , o sistema começa a formar cadeias entre os eletrodos de maneira randômica. Este estado é similar a um cristal-líquido nemático induzido, pois as cadeias têm orientação na direção do campo. Quando  $E > Ec_1$ , o sistema é um sólido com uma estrutura tetragonal de corpo centrado (tcc).

Já para Taylor [tayl-93], dependendo do intervalo de tempo que se aplica o campo elétrico (se este for pequeno em comparação com o tempo característico do fluxo de energia no material ER) o sistema formado é análogo a um líquido super-resfriado. Na literatura ainda não existe nenhum trabalho que tenha explorado totalmente a cinética de solidificação ER.

Smith e Fuller [smit-87] investigaram a anisotropia da estrutura de dispersões de esferas de sílica imersas em ciclohexano sujeitas a diferentes campos elétricos. Para isso, variaram a concentração e o tamanho das partículas (49 nm e 130 nm) permitindo, assim, que a cinética da formação dos agregados pudesse ser estudada. As técnicas usadas por eles

envolviam a birrefringência<sup>3</sup> e o dicroísmo<sup>4</sup> da sílica. O simples fato de ambos (tanto o dicroísmo quanto a birrefringência) ocorrerem revelou que houve a agregação das partículas. Além disso, como as respostas forneceram sinais positivos, foi evidenciada a formação de estruturas alongadas (correntes) na direção do campo elétrico. Os resultados obtidos por eles mostraram que:

- à medida em que a concentração aumenta, a anisotropia diminui (diminui  $\Omega_{12}$ ), pois há uma limitação no número de possíveis configurações das partículas esféricas;
- o tempo<sup>5</sup> para a formação da estrutura fibrosa diminui com o aumento do campo, apesar desta dependência não ser forte. Para campos de 1 kV/mm o tempo observado foi  $\sim 0,1$  s; enquanto que para 4 kV/mm, foi de aproximadamente 0,05 s;
- Tanto para o dicroísmo quanto para a birrefringência, existe um aumento linear da anisotropia óptica em função de  $E^2$  para baixos valores de campo. Para valores maiores, o aumento não é tão grande, chegando, algumas vezes, a haver um decréscimo.

#### 2.2.2.2 Estrutura Dinâmica

São poucos os pesquisadores que estudam a estrutura de fluidos ER durante cisalhamento. Conrad, Shamala e Sprecher [conr-87] observaram a estrutura dinâmica de suspensões de Cab-O-Sil<sup>6</sup> imersas em fluido de silicone com densidade de 0,96. Na Fig.2.3 é apresentado o esquema de uma célula de cisalhamento usada para este tipo de teste, sendo que os resultados obtidos por eles estão na Fig.2.4.

Na parte superior da Fig.2.4 tem-se o perfil de velocidades e na inferior, a estrutura desenvolvida pelo fluido ER. Para baixas intensidades de campo elétrico e taxas de cisalhamento ( $\dot{\gamma} \leq 1 \text{ s}^{-1}$ ), as fibras se rompem e se refazem continuamente, mantendo uma estrutura fibrosa homogênea ao longo dos eletrodos. Com o aumento do campo, desenvolve-se

<sup>3</sup> Propriedade óptica dos cristais anisotrópicos que, para certos ângulos de incidência, dividem o raio refratado em dois, com diferentes direções e diferentes estados de polarização.

<sup>4</sup> Propriedade das substâncias anisotrópicas que têm diferentes coeficientes de absorção para a luz polarizada em certos planos.

<sup>5</sup> Este tempo foi obtido pela determinação do ponto no qual o dicroísmo e a birrefringência atingiam metade de seus valores no estado estacionário.

<sup>6</sup> Partículas de sílica fundida preparadas por Cabot Corp..

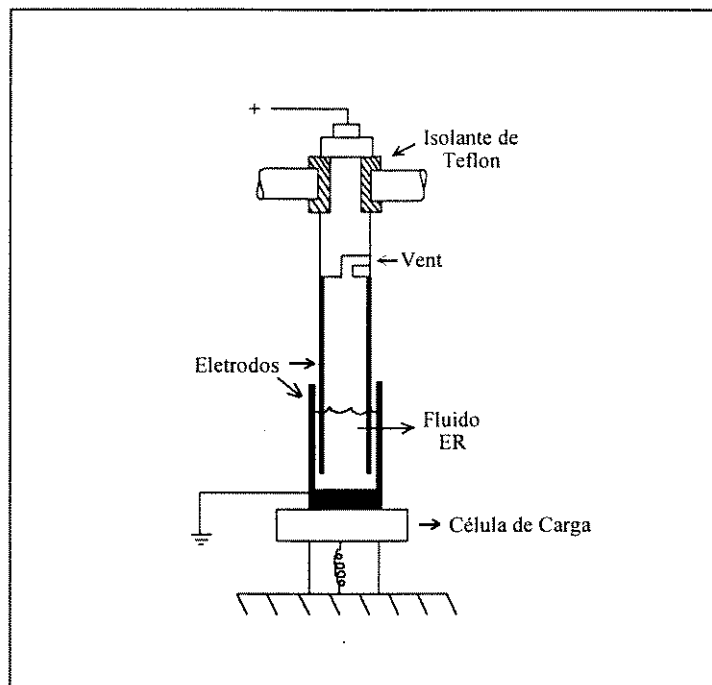


Fig.2.3 - Esquema de uma célula de cisalhamento [conr-87].

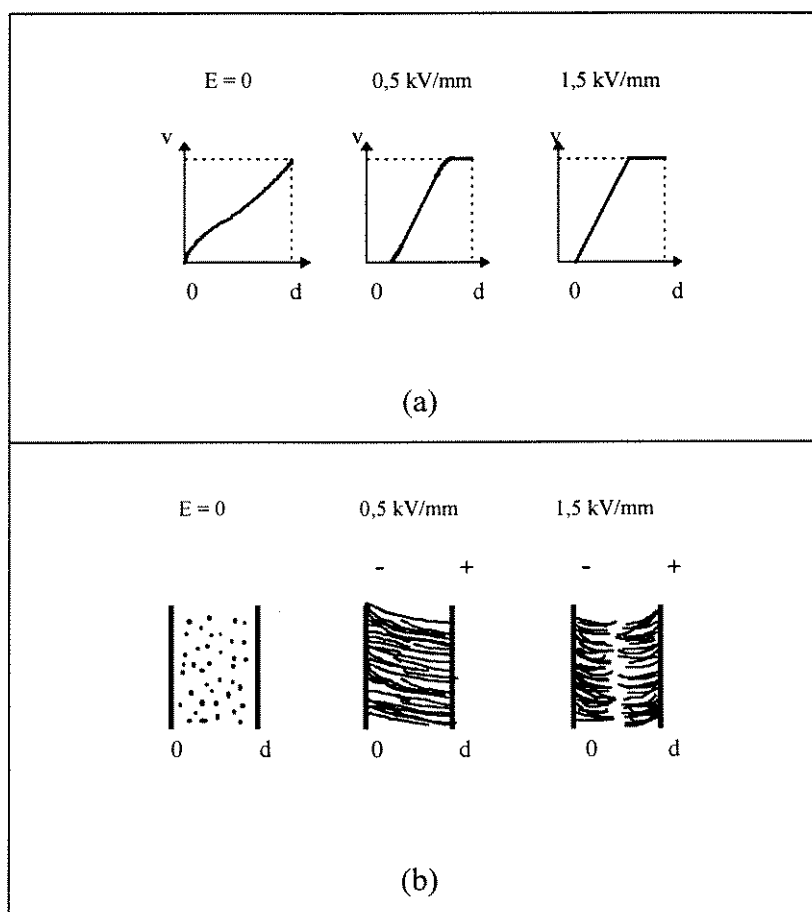


Fig.2.4 - Perfil de velocidades e estrutura associada dos fluidos ER sob cisalhamento com  $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$  (microscopia óptica) - [conr-87].

uma zona sem fibras entre os eletrodos devido à quebra das mesmas causada pelo movimento de rotação do cilindro interno da célula. Ocasionalmente, para campos de 1 a 2 kV/mm, o fluido sofre um movimento em forma de redemoinho (efeito eletrohidrodinâmico) que destrói a estrutura fibrosa. Todavia, caso cesse o cisalhamento, as fibras voltam a se formar. Conrad também observou que para  $\dot{\gamma} > 1 \text{ s}^{-1}$ , o movimento do fluido é mais turbulento e a formação da região sem fibras no centro não é bem definida. Frequentemente a turbulência destrói completamente a estrutura fibrosa.

Woestman [woes-93] observou que a estrutura fibrosa suporta o cisalhamento até atingir a tensão do limite elástico ( $\tau_{\text{elim}}$ ). Com a continuação deste cisalhamento, essa estrutura começa a escorregar até que parte dela é quebrada provocando uma pequena vibração no cilindro interno do reômetro. Se o cisalhamento continuar, uma nova estrutura fibrosa é formada, em seguida é quebrada, o material novamente começa a escoar até que pára devido a uma nova microestrutura que é formada, e assim por diante. Woestman trabalhou com deformações  $\gamma < 1$ .

Alguns autores afirmam que, quando as fibras são estreitas, a ruptura delas ocorre no centro das mesmas; porém, para fibras espessas, a quebra acontece na superfície do eletrodo [jord-89]. Na região onde ocorre essa ruptura há a predominância da dissipação viscosa e nas outras regiões, as forças de polarização é que dominam [xu-91].

### 2.2.3 Mecanismos para o Efeito Eletro-Reológico

A literatura apresenta um fenômeno básico para explicar o aumento na resistência ao cisalhamento de fluidos ER submetidos a um campo elétrico: a polarização. Este fenômeno aparece tanto em fluidos anidros como em fluidos convencionais. De acordo com o artigo de Inoue [inou-89], a polarização das partículas pode ser de natureza iônica ou eletrônica (Tab.2.3). Entretanto, para fluidos convencionais, além da polarização iônica, há também a possibilidade de haver a polarização molecular, onde uma molécula polar pode ser usada como aditivo (ex.: água pura).

Tab.2.3 - Comparação entre fluidos convencionais e anidros – [inou-89].

| <b>Fluido ER</b> | <b>Partícula</b> | <b>Polarização</b> |
|------------------|------------------|--------------------|
| convencional     | hidrófila        | iônica             |
| anidro           | polarizável      | eletrônica         |

### 2.2.3.1 Polarização Iônica e/ou Molecular

De modo geral, os fluidos eletro-reológicos convencionais apresentam atividade eletro-reológica graças à presença de aditivos como água, soluções salinas e líquidos polares em sua formulação, cuja função é aumentar a condutividade das partículas sem mudar muito a condutividade do fluido-suporte [foul-92]. Existem alguns requisitos mínimos para que esses fluidos sejam eletro-reologicamente ativos:

- o fluido-suporte deve ser hidrofóbico;
- as partículas sólidas devem ser hidrófilas e porosas a fim de que uma quantidade apreciável de água possa ser adsorvida sem que elas fiquem molhadas exteriormente – a água adsorvida pelas partículas é essencial e sua quantidade tem grande influência nas propriedades finais do fluido ER.

Um dos primeiros modelos para o mecanismo ER foi proposto por Winslow em 1949 em que cadeias ou fibras eram formadas ao longo dos eletrodos sob a ação de um campo elétrico em condições estáticas. Através de observações da formação destas fibras, Winslow supôs que, sob cisalhamento, estas cadeias seriam distorcidas até se romperem, voltando a se formar rapidamente com a continuação do cisalhamento. O ponto de maior inquietação deste modelo envolvia a escala de tempo para a reconstrução significativa da estrutura fibrosa, principalmente a altas taxas de cisalhamento. Klass e Martinek [klas-67] questionaram este modelo baseado nos seguintes fatos:

- os fluidos apresentavam atividade ER a frequências muito altas de campo elétrico alternado e que essas cadeias não poderiam estar sendo reconstruídas a tais velocidades;

- Brooks et al. [broo-86] relataram um tempo para ocorrer a fibrilação em torno de 20 segundos, que é muito maior que o tempo de resposta do efeito ER (alguns milisegundos) [klas-67] [klass-67].

É razoável pensar que as partículas por si só e/ou em conjunto com o fluido-suporte interajam com o campo elétrico para formar cadeias, de modo a produzir uma tensão mínima de escoamento ou para formar agregados de partículas. Existem pelo menos duas maneiras pelas quais os materiais envolvidos podem interagir. As partículas e líquidos podem interagir independentemente com o campo devido a suas propriedades elétricas e dielétricas inerentes a eles. Por outro lado, os componentes podem agir cooperativamente devido à dupla camada elétrica<sup>7</sup> que se desenvolve ao redor de partículas coloidais em um líquido dispersante e devido à polarização interfacial que surge graças às cargas móveis na interface dos dois materiais como uma consequência da diferença nas propriedades dielétricas e na condutividade de ambos. Segundo Shulman, Deinega et al. [fili-93], as cargas móveis responsáveis por essa polarização interfacial também envolve a camada de água. A dupla camada elétrica e a polarização interfacial são as situações mais comumente consideradas como relacionadas à atividade ER; entretanto não está claro na maioria das discussões da literatura até que ponto estas duas situações estão inter-relacionadas ou se fazem parte de um mesmo mecanismo. Parte da confusão vem do fato de que, apesar de a polarização interfacial ser razoavelmente bem conhecida, as teorias relacionadas com as duplas camadas elétricas (bem desenvolvidas para suspensões em fluidos eletrolíticos) são pouco entendidas em um meio dispersante não-condutor como os usados em fluidos ER [fili-93].

Klass e Martinek [klas-67] [klass-67] [weis-94] foram os primeiros a propor a polarização induzida da dupla camada elétrica como um mecanismo plausível para o fenômeno ER. Eles sugeriram que a porção difusa das duplas camadas (a porção dos íons que reside na fase líquida) se polarizaria sob a influência do campo elétrico, sendo que as interações eletrostáticas resultantes dessas duplas camadas distorcidas requereriam energia adicional para escoarem, especialmente para suspensões concentradas onde as camadas se

---

<sup>7</sup> Em qualquer sistema com uma interface, existe uma distribuição de íons que pode ser representada por uma camada dupla elétrica consistindo de: (a) uma monocamada distinta (densa de íons), bem aderida à superfície sólida, e (b) uma camada difusa e larga que se estende a alguma distância dentro do líquido (Fig.2.5) [jord-89].

sobreporiam. Esta energia é requerida devido à repulsão das duplas camadas, de modo que as partículas não podem simplesmente se mover numa linha de corrente na direção do escoamento, mas precisa haver uma componente transversal que inicie uma dissipação adicional de energia. Na Fig. 2.5 a dupla camada elétrica é representada esquematicamente.

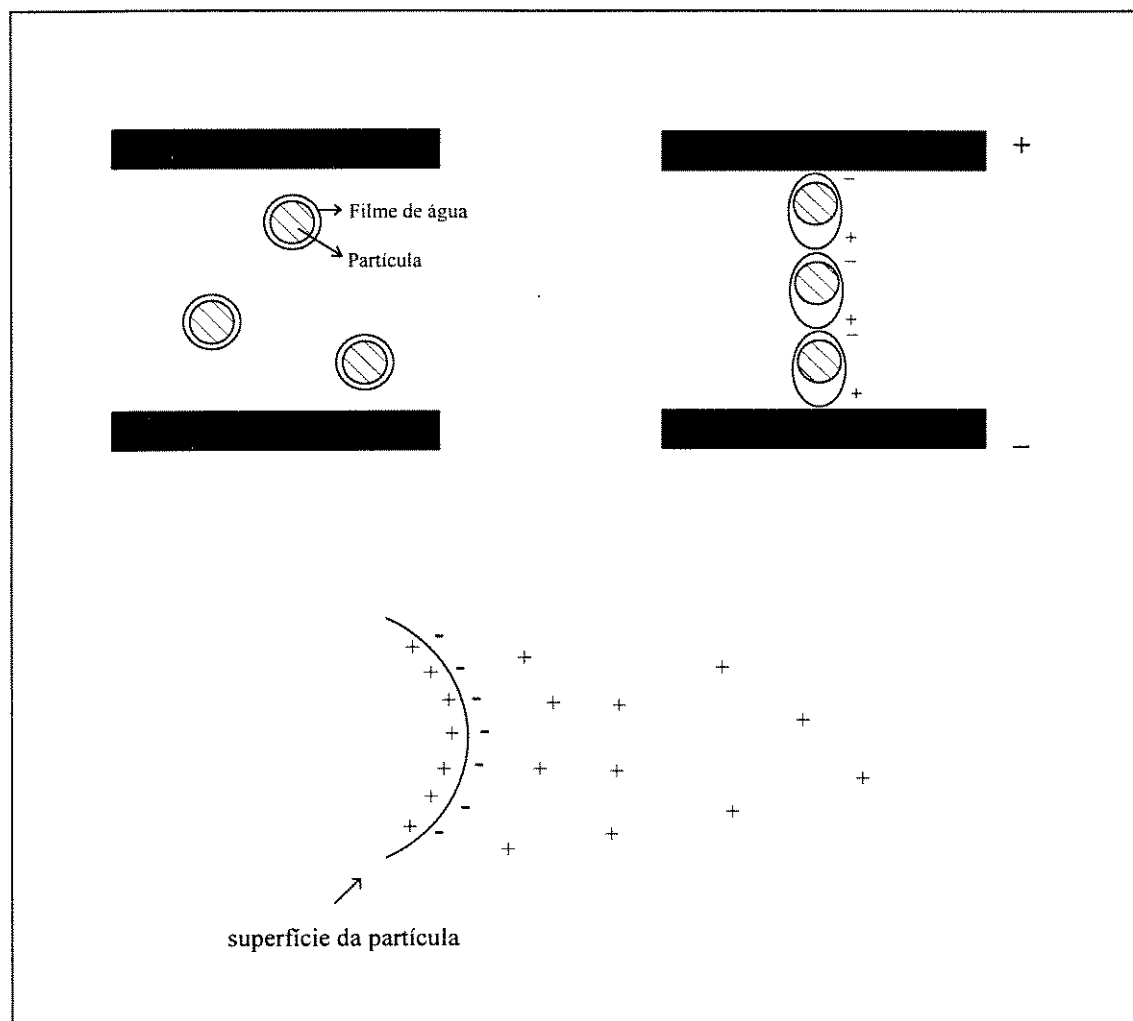


Fig.2.5 - Distorção da dupla camada seguida por atração de Coulomb – [bloc-88] [jord-89].

Existem outros mecanismos que foram propostos para explicar o fenômeno eletro-reológico em fluidos convencionais. Stangroom [stan-83] apresenta uma teoria para a atividade eletro-reológica e compara os fluidos ER na ausência de um campo elétrico com uma pequena quantidade de farinha seca. À medida que se adiciona água à farinha, a água fica confinada nos interstícios de suas partículas passando a formar pontes entre elas de modo



que, para deformar a massa de farinha, é necessário uma força extra a fim de vencer a tensão superficial (Fig.2.6). Assim, a farinha fica cada vez mais rígida. Este mesmo processo ocorre quando a farinha está imersa em um líquido hidrofóbico formando uma suspensão. Neste caso, a tensão interfacial confere rigidez à suspensão.

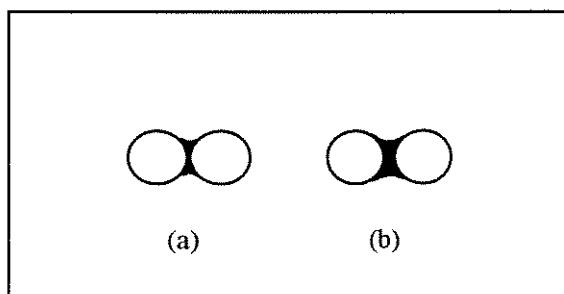


Fig.2.6 - Teoria da adesão do líquido- "Pontes" de água: (a)situação normal; (b)sob tensão [stan-83].

No caso de fluidos ER convencionais, Stangroom<sup>8</sup> [stan-83] [conr-91] assume que existem íons móveis no interior dos poros das partículas que agregam moléculas de água ao redor de si<sup>9</sup>. Quando um campo elétrico é aplicado ao fluido, os íons se movimentam para a extremidade da partícula carregando consigo a água. Então, uma das extremidades da partícula fica totalmente molhada possibilitando, assim, a formação de "pontes" de água com a partícula adjacente (como no caso da farinha). A tensão interfacial entre a água e o fluido-suporte provê uma fonte de resistência ao cisalhamento. Tão logo o campo seja removido, o dipolo induzido desaparece e a água novamente se aloja no interior da partícula. Em princípio, este mecanismo é similar à formação de dipolo [koro-94].

<sup>8</sup> Os primeiros fluidos ER desenvolvidos por cientistas continham uma certa quantidade de água em sua composição. Entretanto, em alguns casos, a presença de água não era tão necessária. Block e Kelly [bloc-87], por exemplo, apresentaram uma lista de fluidos ER (Tab.2.1) dizendo que a atividade eletro-reológica deles vinha dos aditivos. Porém, alguns desses fluidos contêm partículas polarizáveis, dispensando a presença de aditivos como é o caso do dióxido de titânio e carboximetilcelulose de sódio. Stangroom [stan-83] também trabalhou com fluidos contendo água (convencionais), fossem as partículas hidrófilas ou polarizáveis. É importante ter este histórico em mente para poder compreender melhor os resultados e conclusões obtidos por eles.

<sup>9</sup> Apesar de Stangroom dizer sobre a possibilidade da existência de íons móveis, eles não são imprescindíveis.

Existe uma grande quantidade de dados disponíveis na literatura que dão suporte a esta teoria. Em primeiro lugar, de acordo com Stangroom<sup>10</sup> [koro-94], fluidos ER que contenham muita água adsorvida, ou qualquer outro ativador, respondem de forma menos intensa a altos campos elétricos; e em segundo lugar, fluidos ER com sólidos ionizáveis são mais ativos do que aqueles com sólidos aparentemente não-ionizáveis. Neste caso, o que importa é a densidade de carga dos íons móveis. Íons com densidade de carga muito alta (como cálcio e magnésio) fornecem fluidos eletro-reológicos inativos, pois os íons estão tão firmemente confinados que não têm como se mover. Do mesmo modo, se a densidade de cargas for muito baixa, os fluidos ER resultantes também serão inativos ou exibirão um efeito ER fraco, já que os íons não conseguem reter firmemente a água. Os fluidos ER mais ativos são formados por sais de metais alcalinos (grupo 1A da tabela periódica), sendo que, a começar pelo lítio, a atividade destes fluidos decresce mais ou menos de forma regular até o céscio (inativo devido à sua baixa densidade de carga).

E em terceiro lugar, alguns estudiosos, ao comparar fluidos ER feitos com o mesmo tipo de partículas e fluidos-suporte diferentes, verificaram que alguns líquidos fornecem fluidos bem mais ativos que outros. Com isso, há uma forte tendência a crer que exista uma correlação entre a atividade de um fluido ER à base de um determinado líquido (fluido-suporte) e a tensão interfacial entre este líquido e a água.

Para o caso de fluidos ER convencionais, Wong [wong-89] afirma que a chave do efeito ER não é somente a quantidade de água na partícula, mas também o estado ou localização da mesma. O excesso de água pode fazer com que ela migre da partícula para o fluido-suporte, diminuindo o efeito ER e aumentando a intensidade de corrente.

Segundo Jordan e Shaw [jord-89], em alguns casos a água pode ser substituída por um outro líquido polar, como por exemplo, álcoois, etilenoglicol, dimetilamina e formamida. Klingenberg [klin-95] adicionou proteínas às partículas e observou um aumento considerável na tensão de cisalhamento; porém, o uso de proteínas como ativadores apresenta o inconveni-

---

<sup>10</sup> Para Uejima [ueji-72] a água situada na partícula pode ser classificada em dois tipos: (a) água adsorvida na superfície da partícula para formar as "pontes" de água e (b) água absorvida na parte interna das partículas.

ente de sua degradação com o aumento da temperatura.

### 2.2.3.2 Polarização Eletrônica

O maior avanço para o mecanismo eletro-reológico ocorreu em relatórios sobre fluidos ER anidros. A ausência de um ativador nesses fluidos sugere que o mecanismo responsável pela atividade ER pode ser uma característica química e física intrínseca dos materiais e não somente dependente de fatores externos, como a água. Os modelos propostos para esta atividade não são muito diferentes dos discutidos na secção anterior, mas são modificados no sentido de que a dupla camada elétrica é provavelmente menos dominante e os portadores de cargas móveis não são uma consequência de um eletrólito adsorvido à partícula. Block e Kelly [bloc-90] dão uma maior ênfase na polarização da partícula, que é idêntica à polarização interfacial.

A polarização eletrônica é restrita aos fluidos ER anidros com partículas polarizáveis. A Fig.2.7 ilustra bem o fenômeno. Se os eletrodos não estiverem carregados ( $E = 0$ ) as partículas não formam dipolos, ficando distribuídas uniformemente no fluido-suporte. Quando uma voltagem é aplicada em um dos eletrodos, induz-se a polarização das partículas que, devido à atração de Coulomb, tenderão a se alinhar na direção do campo formando uma

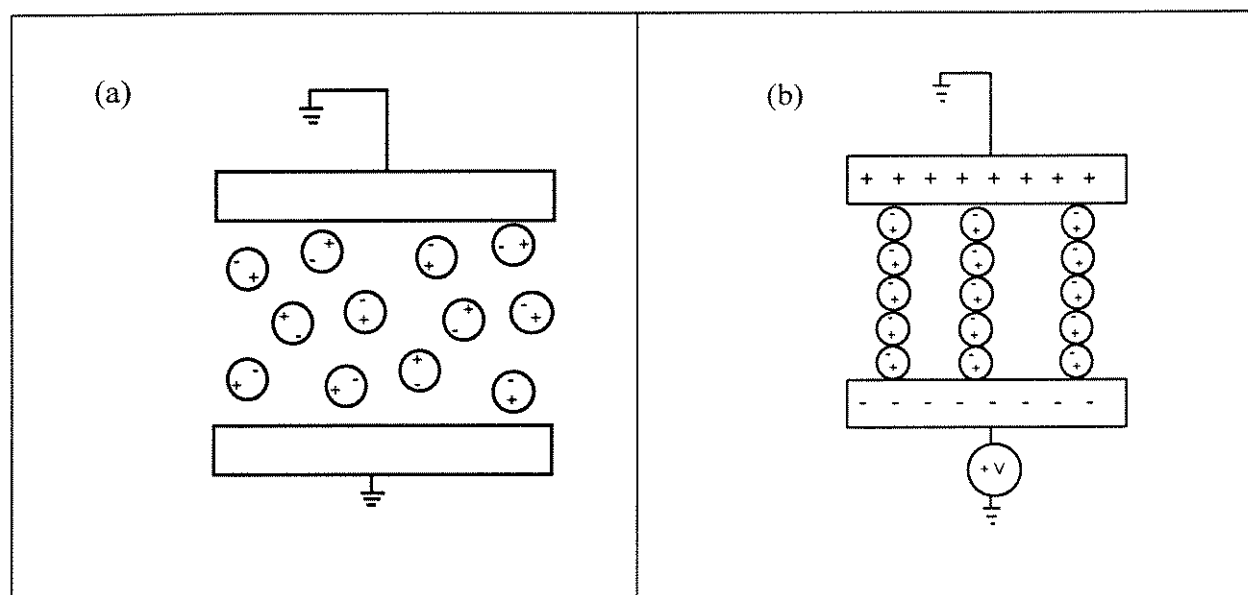


Fig.2.7 - Polarização das partículas no fluido ER para: (a)  $E = 0$ ; (b)  $E > 0$  - [ducl-88].

estrutura fibrosa. Essa polarização que acontece nas partículas pode ocorrer de várias formas, sendo que somente três delas (representadas na Fig.2.8) realmente acontecem [bloc-87]. De acordo com Klass [klas-67], as propriedades interfaciais e de superfície (Fig.2.8-b,c) das partículas são mais importantes que as globais (Fig.2.8-a); entretanto, a altas frequências de campo elétrico, espera-se que a polarização interna das partículas predomine em relação às duas primeiras.

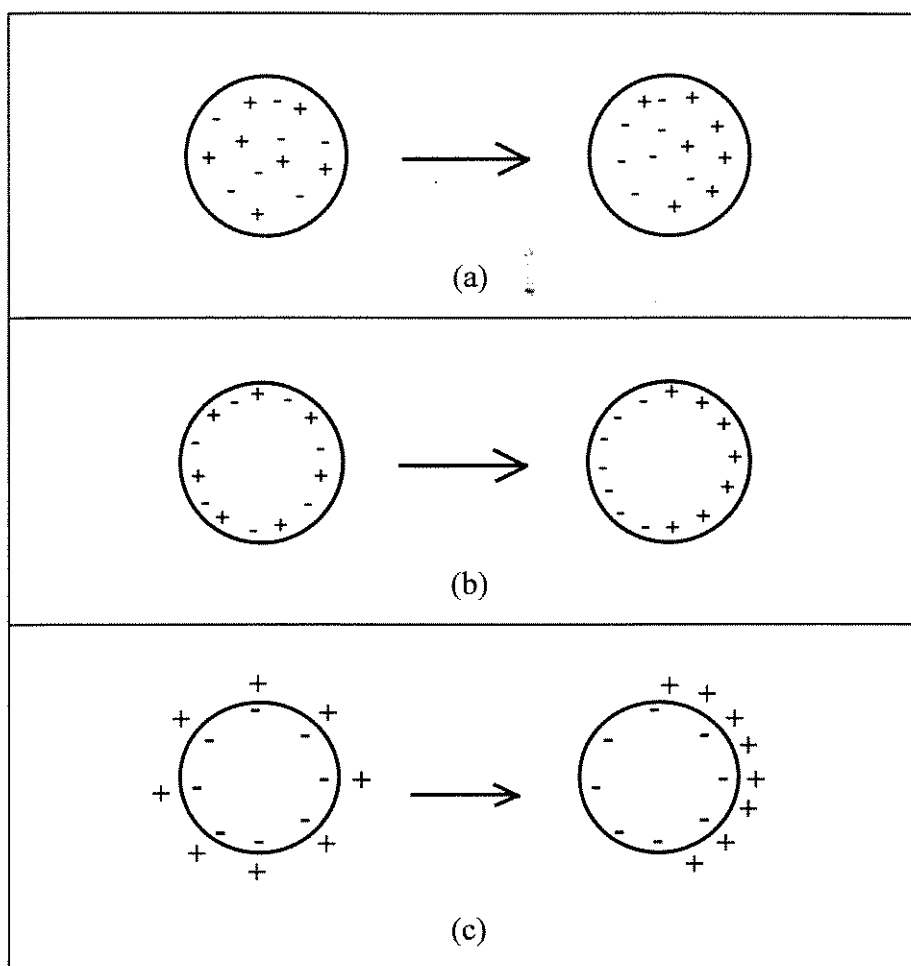


Fig.2.8 - (a) Condutância global; (b) condutância na superfície; (c) distorção da dupla camada elétrica – [bloc-87].

Para Bonnecaze e Brady [bonne-92], quando uma partícula descarregada é submetida a um campo elétrico, ela desenvolve um dipolo induzido somente se o meio onde ela estiver apresentar uma constante dielétrica diferente da sua. O mecanismo da fibrilação e alinhamento das partículas está representado na Fig.2.9, onde se pode observar a

interação dos dipolos causando atração, repulsão, rotação, alinhamento de partículas e criando cadeias que se alinham com o campo elétrico aplicado.

Existem situações em que o fluido ER pode estar escoando ao longo dos eletrodos (Fig.2.10). Neste caso, desenvolve-se um perfil de velocidades ao longo do escoamento, o qual provoca a rotação das partículas do fluido ER. Sendo assim, o dipolo induzido nas partículas começa a se desalinhar com relação ao campo  $e$ , então, surge uma corrente no interior da partícula para fazer com que a mesma volte à situação original de alinhamento.

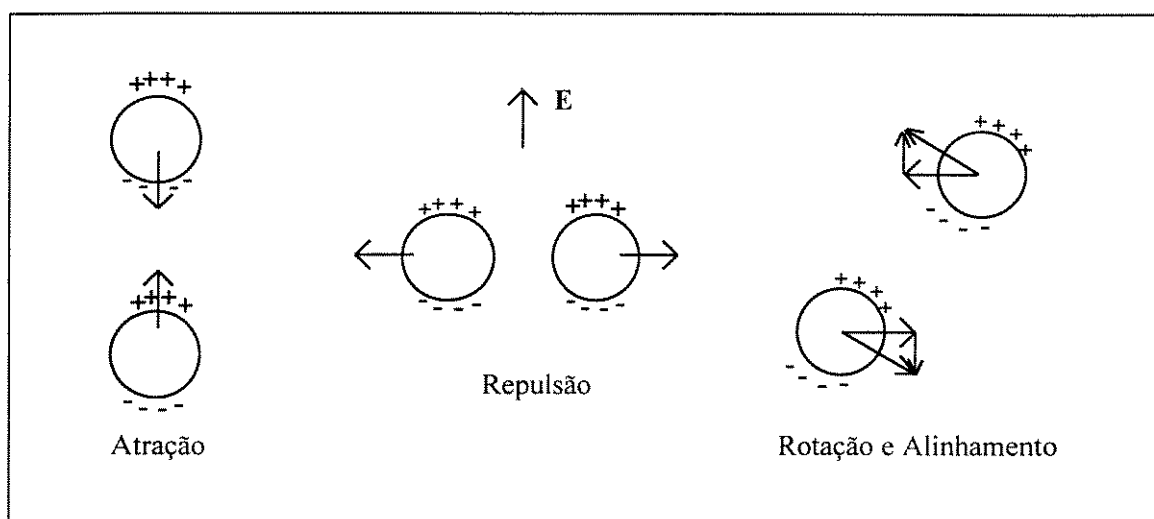


Fig.2.9 - Mecanismo de fibrilação e alinhamento de partículas dielétricas – [bonne-92].

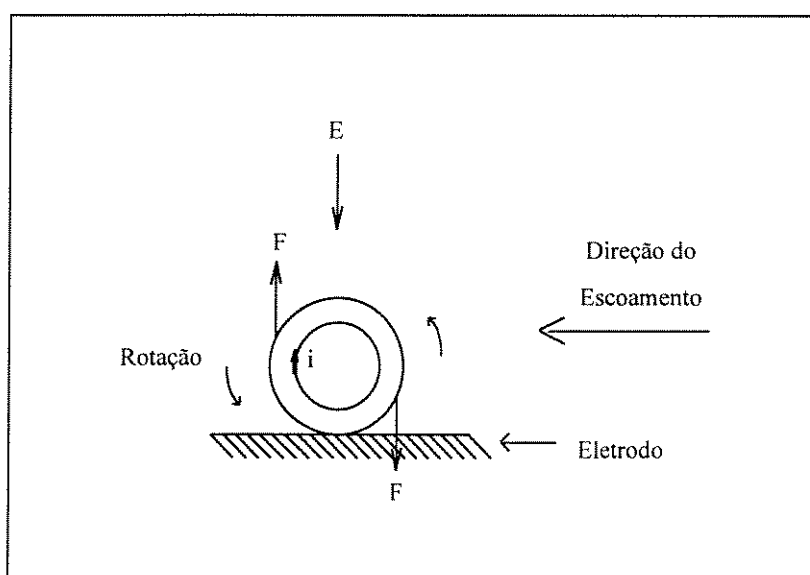


Fig.2.10 - Partícula de um fluido ER sob condição de escoamento – [stan-83].

### 2.3 Características Reológicas de Fluidos ER

Reologia é a ciência do escoamento de deformação da matéria, ou seja, o estudo da resposta da matéria a uma deformação, a uma força ou tensão. Quando a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento de um fluido em movimento é sempre constante, diz-se que este fluido é newtoniano, podendo ser representado pela seguinte equação:

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

onde  $\mu$  é a viscosidade newtoniana. Se por outro lado esta viscosidade não for constante, mas variar com  $\dot{\gamma}$ , o fluido é dito não-newtoniano. Geralmente os fluidos não-newtonianos são divididos em duas classes gerais:

#### Independentes do tempo:

- **Fluidos Plásticos de Bingham:** diferem dos fluidos newtonianos pelo fato de a relação linear entre a taxa e a tensão de cisalhamento não passar pela origem, pois, para que se inicie o escoamento, é necessária uma tensão de cisalhamento finita,  $\tau_y$ . Ex.: suspensões de rocha em água, lodo de esgoto, suspensões de grãos em água;

- **Fluidos Pseudoplásticos:** a viscosidade destes fluidos diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Eles englobam a maior parte dos fluidos e sua forma geral é do tipo  $\tau = \kappa \dot{\gamma}^n$  (onde  $n > 1$ ) e sua viscosidade é dada por  $\mu_a = \kappa \dot{\gamma}^{(n-1)}$ . Ex.: soluções de polímeros, suspensões de polpa de papel ou de pigmentos;

- **Materiais Dilatantes:** têm comportamento reológico oposto ao dos pseudoplásticos, ou seja, a viscosidade aumenta com  $\dot{\gamma}$ . Ex.: plastisóis de PVC. A Fig.2.11 ilustra cada um desses casos.

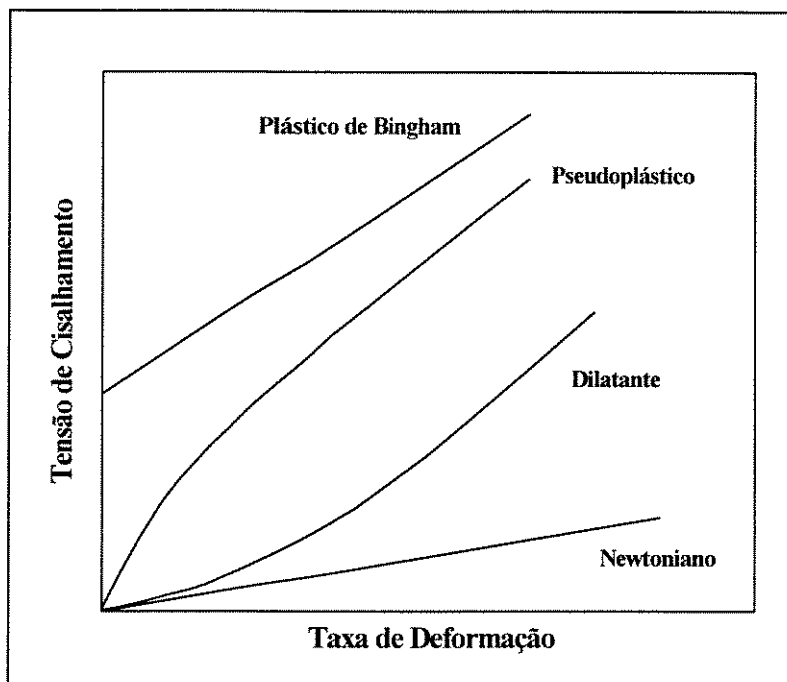


Fig.2.11 - Curvas reológicas de fluidos independentes do tempo.

### Dependentes do Tempo:

- **Fluidos Tixotrópicos:** possuem uma estrutura cuja ruptura é função do tempo e de  $\dot{\gamma}$ . Esta estrutura pode ser refeita por si mesma se não existirem forças que evitem sua reconstrução. Na Fig.2.12, a área do ciclo **OAD** indica o grau de tixotropia. Se, depois de ter atingido o ponto A da curva,  $\dot{\gamma}$  for mantida constante,  $\tau$  decresce ao longo de **AB** até que o ponto C seja atingido, além do qual não pode ocorrer qualquer ruptura adicional para aquela taxa de deformação. Se  $\dot{\gamma}$  for diminuído, a tensão segue a curva **CD**. Qualquer curva intermediária, como **BD**, é possível. Ex.: tintas, vernizes, maionese;

- **Fluidos Reopéticos:** têm comportamento oposto ao dos fluidos tixotrópicos, pois, além de a viscosidade aumentar rapidamente quando agitados, a tensão de cisalhamento é menor na curva de subida (quando  $\dot{\gamma}$  aumenta) do que na curva de descida (quando  $\dot{\gamma}$  diminui). Ex.: sais de pentóxido de vanádio, suspensões de gesso em água.

- **Fluidos Viscoelásticos:** Exibem uma recuperação elástica das deformações que ocorrem durante o escoamento. O maior grupo de fluidos desta classe é formado por líquidos

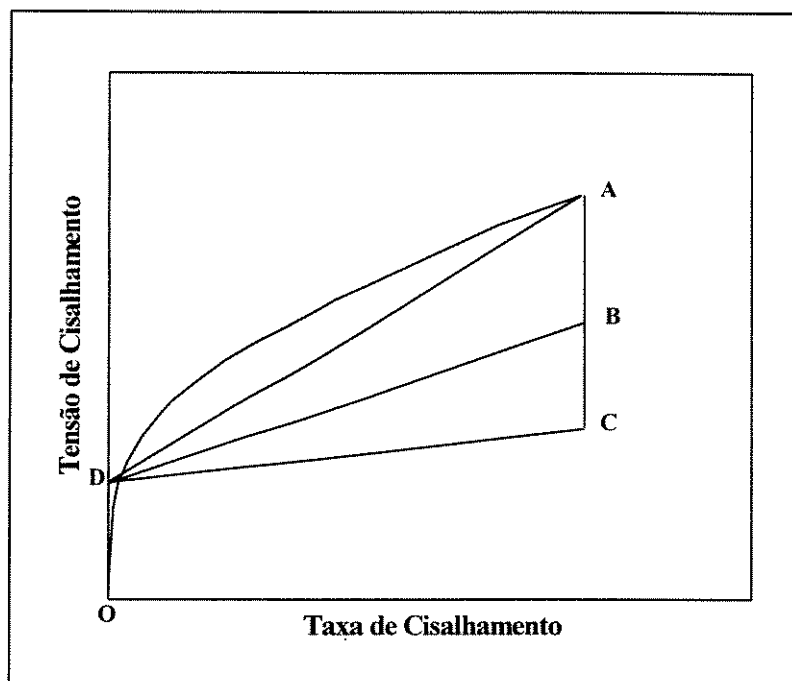


Fig.2.12 -Tixotropia de Fluidos.

poliméricos. No escoamento destes fluidos aparecem, além das tensões tangenciais usuais, tensões normais à direção do fluxo. Estas tensões normais dão origem a vários fenômenos como o efeito de Weissenberg, em que o fluido tem a tendência de subir num eixo que gira no mesmo. Para o escoamento em regime permanente de fluidos viscoelásticos aplicam-se equações desenvolvidas para os fluidos pseudoplásticos; as propriedades elásticas geralmente se manifestam como efeitos terminais.

### 2.3.1 Reologia de Fluidos ER em Testes Rotacionais

Em se tratando de reologia de fluidos ER, na literatura é comum definir-se quatro tipos diferentes de viscosidade:

- $\eta_0$ , que é a viscosidade aparente da suspensão quando  $E = 0$ ;
- $\eta_A$ , que é a viscosidade aparente da dispersão para  $E > 0$ ;
- $\eta_R$ , que é a viscosidade relativa ( $\eta_A/\eta_0$ );
- $\eta_E$ , a eletroviscosidade ( $\eta_A - \eta_0$ ).



Cada uma destas definições é usada repetidamente por diversos autores. Muitos estudiosos obtiveram resultados de suas pesquisas através de medidas utilizando um equipamento como o mostrado na Fig.2.3. Alguns pesquisadores como Conrad, Shamala e Sprecher [conr-87] estudaram as características reológicas de fluidos ER. Segundo eles, os fluidos ER usados têm um comportamento newtoniano na ausência de campo elétrico, e quando sob a ação do mesmo, exibem comportamento que se aproxima do de um sólido de Bingham (Fig.2.13-b), ou seja, são sólidos para tensões de cisalhamento inferiores a uma tensão crítica  $\tau_y$ , e líquidos para tensões superiores a ela. Assim, estes materiais podem ser descritos pela equação:

$$\tau = \tau_y(E) + \eta_0 \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

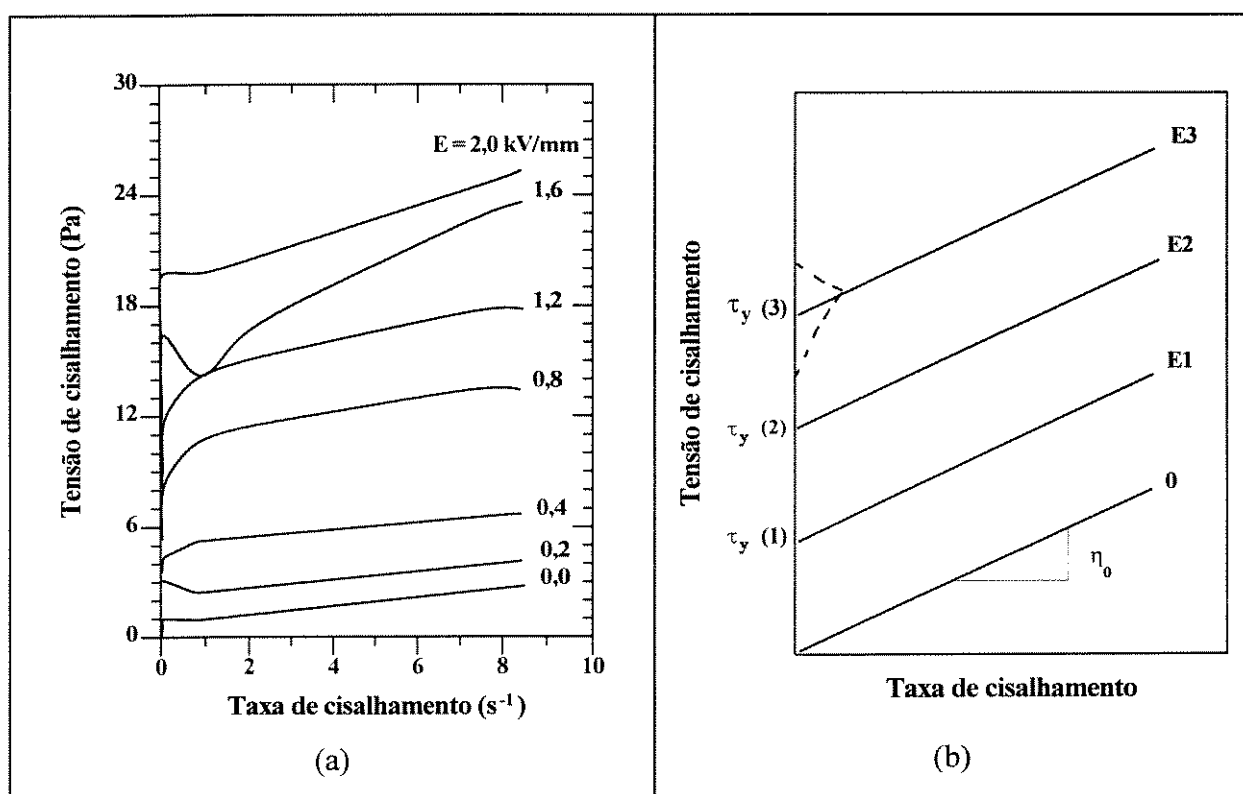


Fig.2.13 - (a) Dados obtidos por Conrad [conr-87] para partículas de sílica (1.64% em peso) em fluido de silicone a temperatura ambiente; (b) gráfico simplificado do item (a).

Apesar de Conrad ter usado a Eq.(2.2), na realidade o comportamento de fluidos ER é bem mais complexo do que o descrito por ela (Fig.2.13-a) e, segundo ele, isso pode ser reflexo da influência da deformação e da taxa de deformação na ruptura e formação da

estrutura fibrosa. Além disso, o modelo de Bingham não descreve os efeitos reológicos transientes [gind-95] e nem os de partida ("start-up") [fili-93], os quais são muito importantes em condições de carregamento dinâmico como ocorre em situações de amortecimento ou de tensões rápidas de impacto. Nestes casos, o modelo de Bingham omite completamente as propriedades do material a tensões inferiores a  $\tau_y$ . Uma descrição mais completa desses materiais pode ser ilustrada através de um gráfico de tensão de cisalhamento em função da deformação (Fig.2.14). Neste caso, os materiais podem ser descritos como sólidos viscoelásticos abaixo de  $\tau_y$  e de uma deformação crítica  $\gamma_c$ , e como líquidos viscosos para tensões acima de  $\tau_y$  e deformações maiores que  $\gamma_c$ . Quando caracterizado desta maneira, os materiais ER podem ser descritos de um modo mais correto.

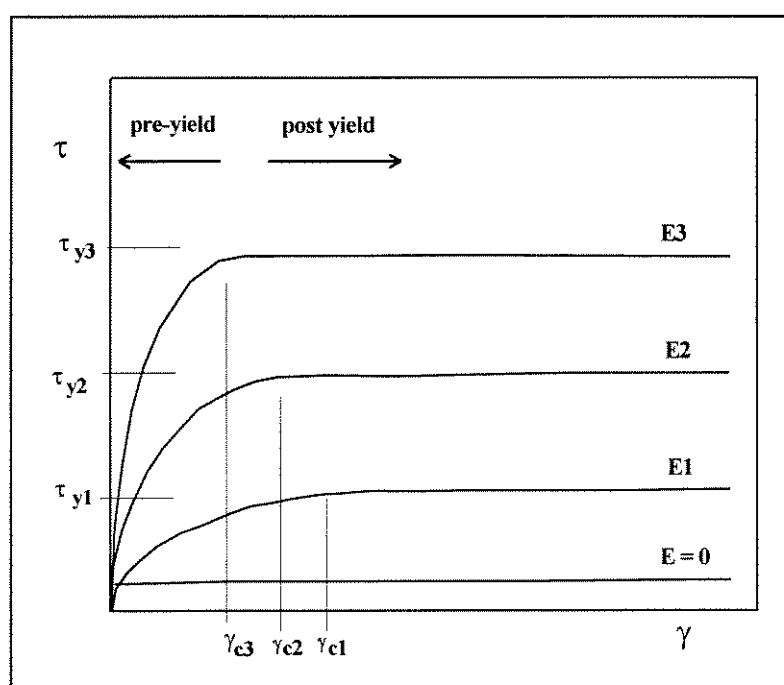


Fig.2.14 - Ilustração da tensão de cisalhamento em função da deformação para materiais ER típicos ( $E_3 > E_2 > E_1$ ) – [fili-93].

Segundo Brooks [broo-94], as características dos fluidos ER quando submetidos a um campo elétrico dependem de dois fatores primários (a intensidade do campo aplicado e a fração em volume de partículas) e de dois fatores secundários (a taxa da cisalhamento e a temperatura do fluido).

### 2.3.1.1 Efeito da Taxa de Cisalhamento

Klass e Martinek [klas-67] realizaram experimentos com suspensões de dois tipos: com partículas de sílica e com partículas de titanato de cálcio. Ambos os tipos de suspensão continham surfactante não-iônico e veículo naftênico. Os resultados mostraram que o comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento era similar ao das suspensões de sílica estudadas por Conrad (Fig.2.13-a). Com relação às viscosidades  $\eta_A$ ,  $\eta_R$  e  $\eta_0$  verificou-se um decréscimo em seus valores com o aumento de  $\dot{\gamma}$  (Fig.2.15), indicando que as cadeias deveriam estar sendo destruídas com o movimento rotativo do viscosímetro e nem todas estariam tendo tempo suficiente para se formarem novamente.

Shulman [shul-89] estudou fluidos ER com 60% de diatomito submetidas a um campo elétrico e taxa de cisalhamento constante. Ele notou que para  $E \geq 1,3$  kV/mm, inicialmente

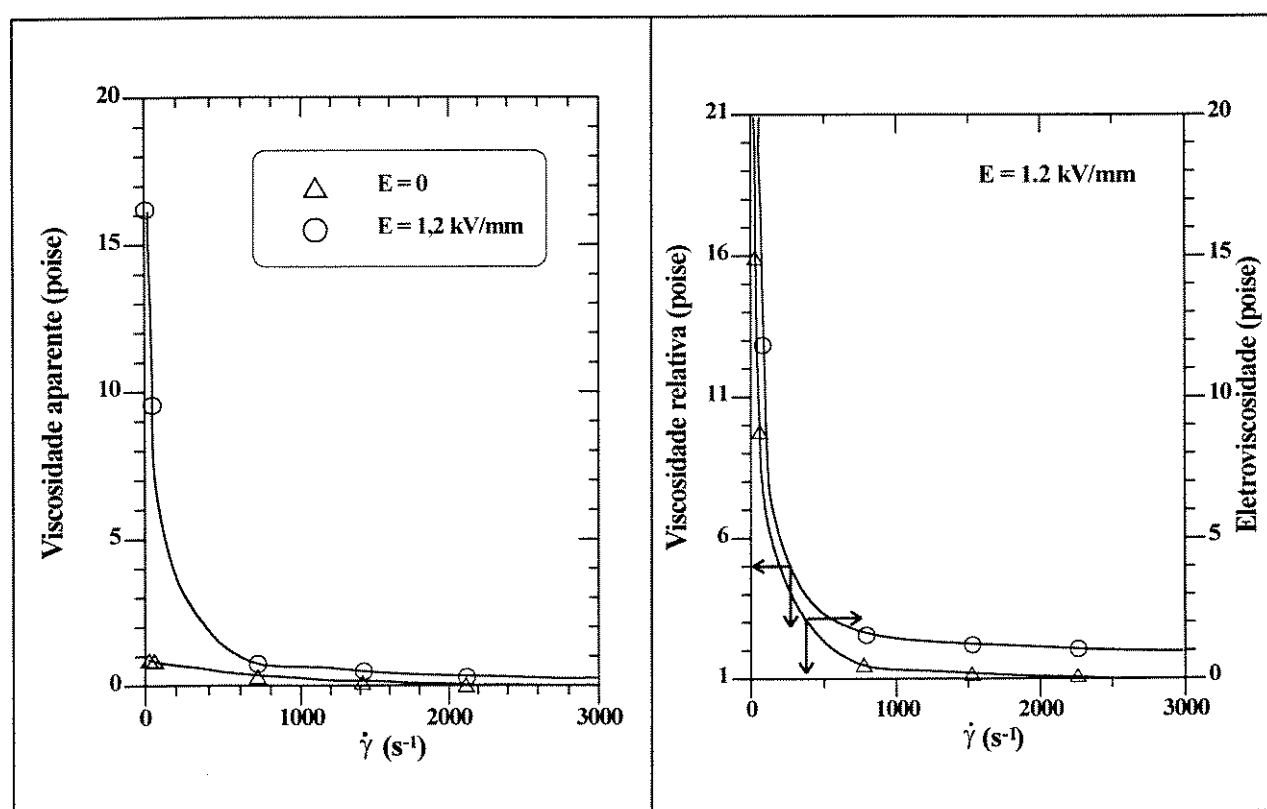


Fig.2.15 - Comportamento de  $\eta_A$ ,  $\eta_0$ ,  $\eta_R$  e  $\eta_e$  em função de  $\dot{\gamma}$  para dispersões de sílica (a 20% em volume e 38°C) sob um campo elétrico ac de 60 Hz com espaçamento entre eletrodos de 0,01 in – [klas-67].

( $t \sim 5$  s) a tensão de cisalhamento crescia, atingia um máximo, começava a decrescer e depois estabilizava. Para  $E = 0,65$  kV/mm a tensão de cisalhamento crescia estabilizando-se em um determinado valor.

### 2.3.1.2 Efeito do Campo Elétrico

Klass e Martinek [klas-67] observaram que para uma determinada taxa de cisalhamento, a viscosidade aparente da suspensão aumenta com a intensidade do campo elétrico (Fig.2.16) até ao ponto em que haja uma saturação elétrica ou até que se atinja a rigidez dielétrica da suspensão. Pela Fig.2.16 pode-se verificar que, para uma intensidade específica de campo  $E$ , o aumento de  $\dot{\gamma}$  faz com que a viscosidade aparente do fluido ER diminua devido à quebra de um maior número de cadeias.

De acordo com Conrad e Sprecher [conr-91], o efeito do campo elétrico na tensão mínima de escoamento ( $\tau_y$ ) pode ser descrito por:

$$\tau_y = A E^n \quad (2.3)$$

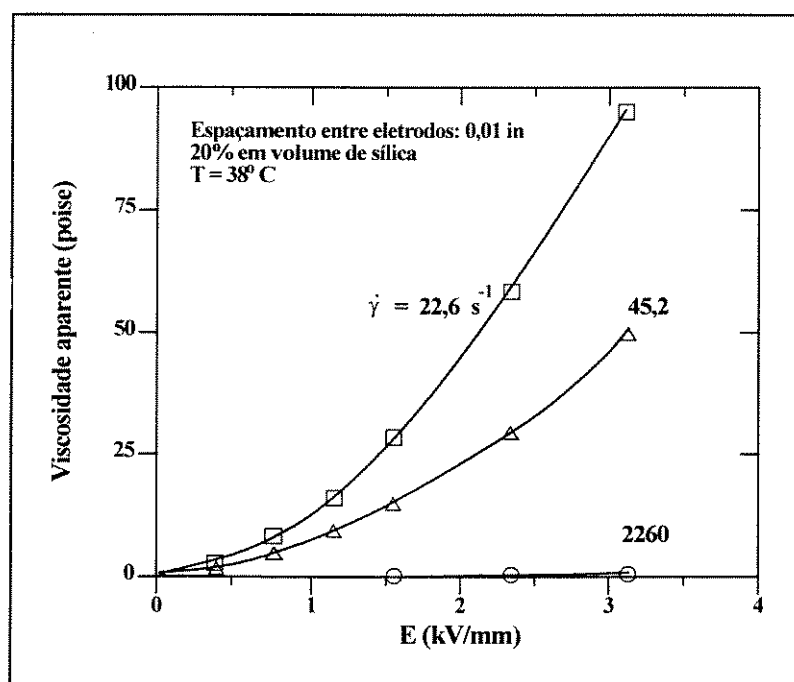


Fig.2.16 - Efeito do campo elétrico (60 Hz) em  $\eta_A$  de dispersões de

sílica a diferentes valores de  $\dot{\gamma}$  - [klas-67].

onde  $A$  e  $n$  dependem do campo e das características do fluido ER ( $1 \leq n \leq 2,5$ ). O valor mais comum para  $n$  é 2 [wins-49] [ueji-72] [conr-91];  $n = 1$  ocorre para altos valores de campo [stan-83] e  $n > 2$ , para baixos valores de  $E$ .

Abu-Jdayil e Brunn [abuj-95] estudaram os efeitos de um campo elétrico não-uniforme em um fluido eletro-reológico escoando entre dois eletrodos. Os resultados dos casos estudados por eles mostraram que o efeito ER era maior quando o campo era não-uniforme.

Os estudos de Klass [klas67] revelaram que a viscosidade aparente da suspensão de sílica permanece praticamente constante para campos com frequência variando de 0 a 150 Hz. A partir de 150 Hz,  $\eta_A$  decresce rapidamente (Fig.2.17). Segundo Block e Kelly [bloc-88] este fenômeno pode ser bem compreendido quando entende-se que à medida que a frequência se aproxima de zero (o que corresponde a um campo cc), existe mais tempo disponível para que o transporte de cargas atinja o estado de polarização completa, ou seja, há tempo suficiente para ocorrer a relaxação e rearranjo das cargas nas partículas. Sendo assim, a eletroviscosidade ( $\eta_E$ ) é maximizada quando a frequência é menor que aquela correspondente ao tempo para polarização completa. Entretanto, apesar de a viscosidade aparente da dispersão de sílica ser bem menor a  $10^4$  Hz, ela ainda é o dobro de  $\eta_0$ , mostrando que, mesmo para altas

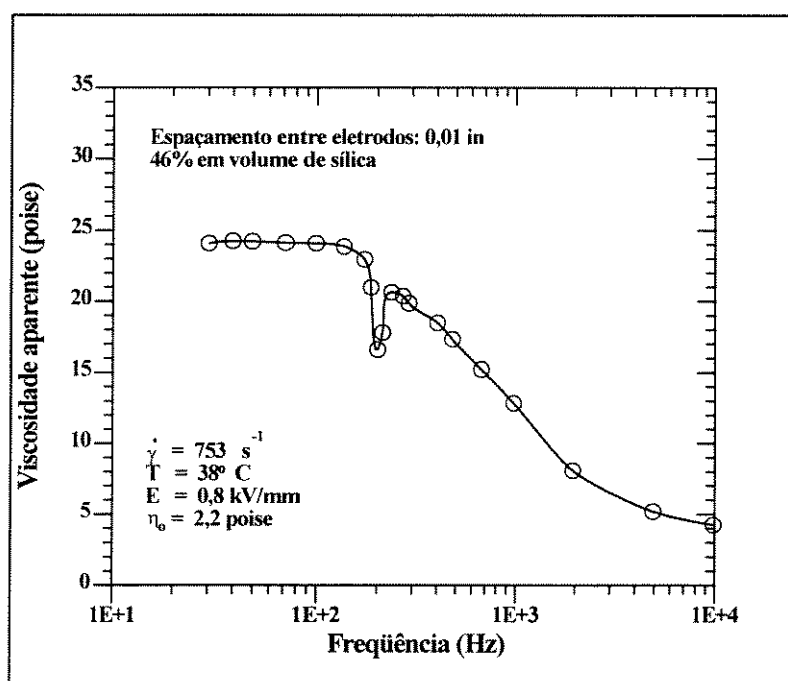


Fig.2.17- Efeito da frequência em  $\eta_A$  de suspensões de sílica – [klas-67].

freqüências, o efeito eletro-reológico está presente.

Sprecher [conr-91] observou o comportamento de partículas de zeólito em óleo de condensador. Para este sistema, inicialmente ocorreu um aumento em  $\tau_y$  com a freqüência, chegando a um valor máximo e depois decrescendo. Inoue [inou-89] verificou que em sistemas anidros compostos por partículas de metal recobertas por polímeros,  $\tau_y$  aumentava com a freqüência. Em pesquisas realizadas na China [xu-93], observou-se uma diminuição de  $\tau_y$  com a freqüência do campo elétrico, sendo que acima de 20 kHz não foi detectado nenhum incremento ER. Segundo os pesquisadores, este fato está relacionado com o tempo de resposta do fluido ER.

### 2.3.1.3 Efeito da Concentração de Partículas

De modo geral, a tensão mínima de escoamento dos fluidos ER aumenta com a fração em volume ( $\phi$ ) das partículas. Uejima [ueji-72] trabalhando com fluidos convencionais compostos por partículas de celulose cristalina em óleo isolante, reportou que existe uma concentração ótima de partículas para o efeito de Winslow (ou efeito ER). No caso em questão, concluiu que  $\eta_R$  atinge seu valor máximo para uma concentração de 10% (Fig.2.18)

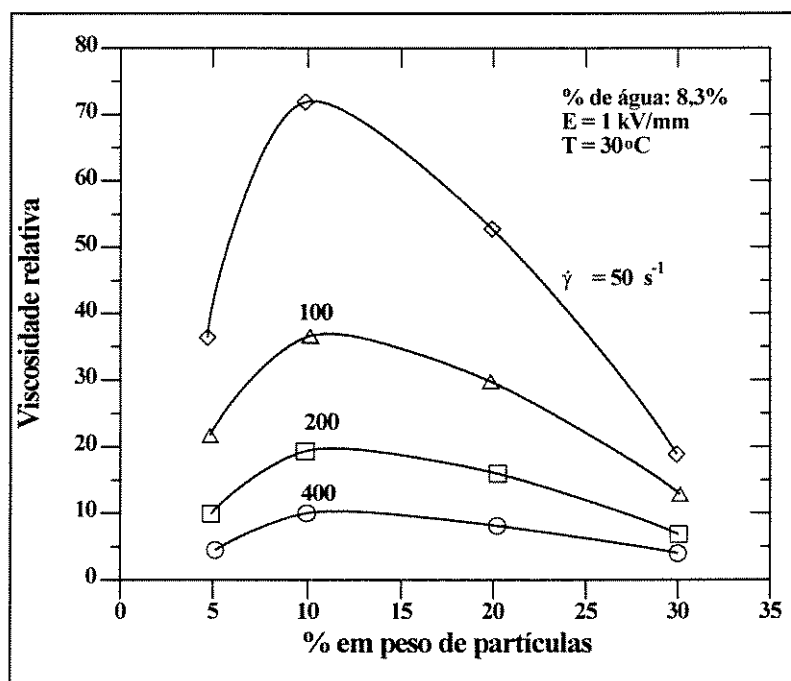


Fig.2.18 - Concentração ótima para o efeito de Winslow – [ueji-72].

e explicou o fenômeno da seguinte maneira: para altas concentrações, as partículas estão tão próximas umas das outras que as "pontes" de água começam a se sobrepor umas às outras. Como a interação entre as partículas aumenta com a diminuição da distância entre elas, tem-se como resultado que os íons adsorvidos às partículas saem das mesmas de modo que o efeito de Winslow não ocorre, mesmo que se aumente a concentração do fluido ER. Assim, a partir de uma concentração crítica de partículas, este efeito pode saturar levando a um decréscimo de  $\eta_R$  com a concentração. Para Jordan e Shaw, a concentração ótima de partículas maximiza o efeito ER enquanto mantém a fluidez da suspensão na ausência de um campo elétrico [jord-89].

Em seu artigo, Klass [klas-67] escreveu que, para alguns sistemas com altas concentrações de fase dispersa, a suspensão se solidifica reversivelmente para campos elétricos muito altos e que, sob tais condições,  $\eta_E$  é infinita.

Alguns autores [bloc-87] [conr-87] [conr-91] relacionaram  $\tau_y$  com a fração em volume de sólidos ( $\phi$ ) da seguinte forma:

$$\tau_y = B \phi^m \quad (2.4)$$

onde B é uma constante e  $\frac{2}{3} \leq m \leq \frac{3}{2}$ . Para Conrad [conr-87], por exemplo,  $m = \frac{2}{3}$ .

#### 2.3.1.4 Efeito da Quantidade de Água Adsorvida nas Partículas

A quantidade de água em fluidos convencionais tem um comportamento similar ao da concentração de partículas. Um aumento na quantidade de água adsorvida leva, primeiramente, a um aumento em  $\tau$ . A partir de um certo valor, o efeito satura e finalmente conduz a um decréscimo na tensão de cisalhamento. Uejima [ueji-72] [bloc-88] observou este efeito e concluiu que, para o fluido com que estava trabalhando, acima de 12% de água adsorvida o efeito de Winslow não ocorria devido ao decréscimo na força dielétrica da suspensão.

Jaggi e Woestman [jagg-89] analisaram a força da estrutura fibrosa com a concentração de água contida nas partículas. Para tanto, definiram o parâmetro  $E_c$  como sendo o campo elétrico crítico a partir do qual há mudança de fase da suspensão ER. Para determinar o valor de  $E_c$ , a suspensão ficava entre dois eletrodos na posição vertical e era submetida ao máximo campo elétrico permitido pelo sistema. Nestas condições, o material se encontrava no estado sólido. Em seguida o campo era reduzido gradualmente até que a suspensão começasse a fluir devido à força da gravidade. Este então era o campo crítico  $E_c$ . Para cada uma das suspensões analisadas verificaram que, com o aumento da concentração de água nas partículas,  $E_c$  também aumentava, ou seja para manter a suspensão no estado sólido era necessário um campo elétrico cada vez maior, significando que a suspensão estava se tornando eletro-reologicamente mais fraca.

### 2.3.1.5 Efeito da Temperatura

A Fig.2.19 ilustra o efeito da temperatura na tensão mínima de escoamento de partículas de zeólito (34% em peso) em óleo de silicone [conr-91]. Inicialmente, aumentando-se  $T$ , há um aumento de  $\tau_y$  até que a curva atinje um máximo a partir do qual passa a

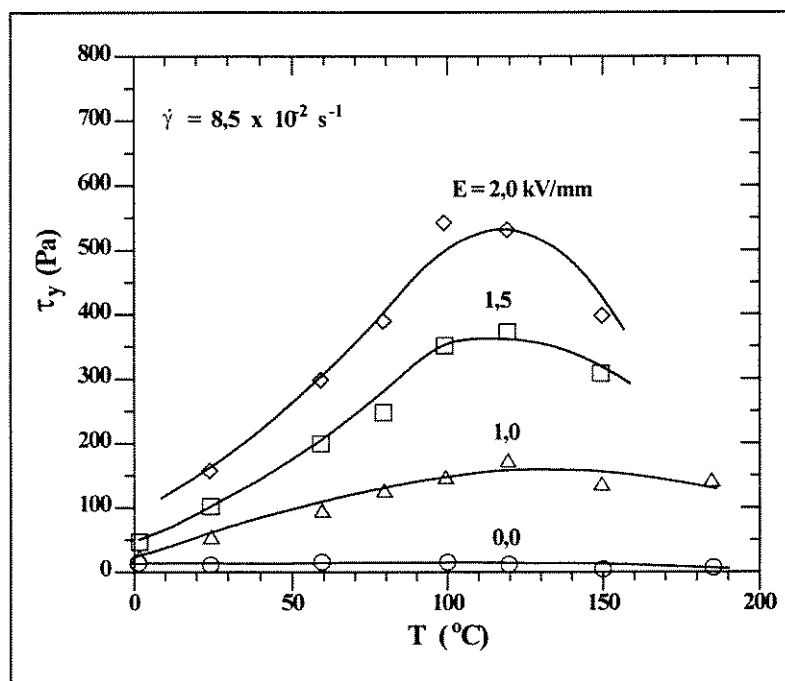


Fig.2.19 - Efeito da temperatura na tensão mínima de escoamento - [conr-91].



decrecer. Este tipo de comportamento é característico de fluidos ER convencionais e pode ser facilmente compreendido.

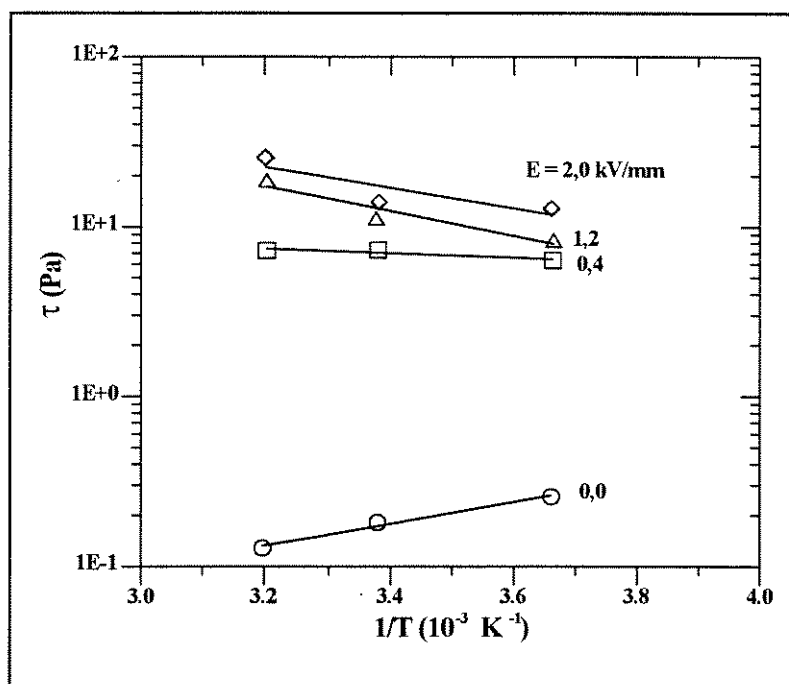
Sabe-se que  $\eta_0$  diminui com o aumento da temperatura devido à maior mobilidade das moléculas. Sendo assim, ao se aplicar um campo elétrico na suspensão, a quantidade de energia elétrica requerida para formar as "pontes" de água também é menor a temperaturas mais elevadas. Entretanto, se a temperatura for tal que se inicie a evaporação da água, de modo a alterar a composição do fluido ER e conseqüentemente sua polarizabilidade, o fenômeno eletro-reológico tem seu efeito diminuído. Mesmo sem perda de água, espera-se que a atividade eletro-reológica diminua a temperaturas suficientemente altas devido ao movimento browniano que interrompe a estrutura fibrosa da suspensão. O movimento browniano se torna importante em fluidos cuja fase dispersa é composta por partículas de pequeno diâmetro ( $d < 0,1 \mu\text{m}$ ) e para temperaturas inferiores a  $500^\circ\text{C}$  [jord-89].

Em seu artigo, Uejima [ueji-72] notou que, para suspensões de celulose cristalina em óleo isolante, quando  $T$  aumenta, a tensão de cisalhamento também aumenta, mas a viscosidade aparente ( $\eta_A$ ) diminui. Segundo ele, este fenômeno provavelmente se deve à dependência da constante dielétrica com a temperatura.

Um comportamento diferente foi relatado por Conrad, Shamala e Sprecher [conr-87]. Eles trabalharam com suspensões de sílica em fluido de silicone e observaram que para campos menores que  $0,4 \text{ kV/mm}$ , a tensão de cisalhamento diminui com a temperatura e que somente a partir de  $1,2 \text{ kV/mm}$  é que ela aumenta com o aumento de  $T$  (Fig.2.20). Conrad atribuiu esses efeitos opostos na tensão de cisalhamento a dois fatores:

- um decréscimo na viscosidade do fluido-suporte com a temperatura;
- um aumento na força da estrutura fibrosa produzida pelo campo elétrico, pois o aumento de  $T$  aumenta a agitação dos elétrons, íons ou moléculas do aditivo adsorvido às partículas, favorecendo a polarização das mesmas.

Em outro artigo, Conrad [conra-91] estudou suspensões à base de zeólito e verificou que para temperaturas mais elevadas ( $120$  a  $150^\circ\text{C}$ ) havia uma saturação na tensão mínima de escoamento (ela permanecia constante com o aumento de  $T$ ).

Fig.2.20 - Variação de  $\tau$  com o inverso da temperatura para suspensões

de 1,64% em peso de sílica imersa em óleo de silicone com  $\gamma = 8,5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  - [conr-87].

Makatum e Vorobev [maka-89] compararam o comportamento da curva de  $\eta_R$  em função da temperatura de fluidos ER convencionais com a de fluidos anidros, e observaram que no primeiro caso havia uma saturação do efeito ER caracterizado por um ponto de máximo na curva para temperaturas próximas de  $70^\circ\text{C}$ . Já para o fluido anidro  $\eta_R$  crescia com o aumento de T.

### 2.3.1.6 Efeito do Espaçamento entre os Eletrodos

Klass [klas-67] estudou o efeito do espaçamento entre os eletrodos sobre a reologia de fluidos ER. Ele usou eletrodos com diferentes espaçamentos (0,25 mm, 0,51 mm e 1,27 mm) e fez experimentos a várias taxas de cisalhamento e intensidades de campo elétrico. Por fim, concluiu que, para os valores testados, a distância entre os eletrodos quase não altera as características reológicas dos fluidos ER (Fig.2.21). Entretanto, deve existir um limite para o espaçamento entre os eletrodos a partir do qual o efeito ER comece a decair.

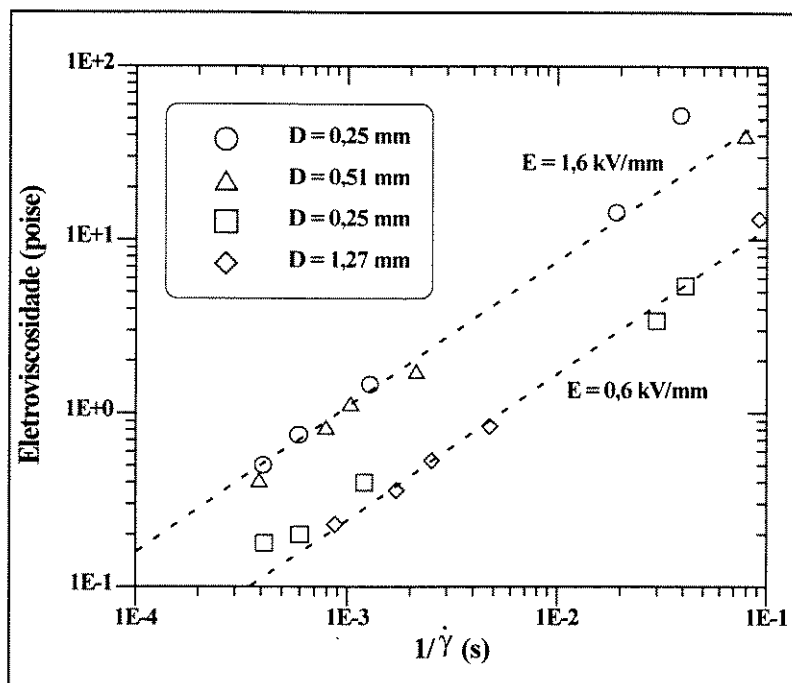


Fig.2.21 - Efeito da taxa de cisalhamento na eletroviscosidade de dispersões de sílica (20% em volume e  $45^\circ\text{C}$ ) a diferentes espaçamentos entre os eletrodos (D) – [klas-67].

Bullough [bullo-89] estudou o comportamento de amido em óleo de transformador e observou que o aumento do espaçamento entre os eletrodos ( $0,5 \text{ mm} < D < 1 \text{ mm}$ ) modificava as propriedades reológicas do material ER.

### 2.3.1.7 Efeito do Tamanho das Partículas

De acordo com Jordan e Shaw [jord-89], para fluidos ER com partículas muito pequenas, as forças devido ao movimento Browniano tendem a competir com as forças elétricas que induzem o efeito ER. Por outro lado, partículas muito grandes respondem muito lentamente a um campo elétrico alternado para aplicações práticas; além disso, são mais propensas à sedimentação.

Entretanto, existe uma teoria de que somente quando as forças térmicas prevalecerem sobre as de polarização é que o tamanho das partículas teriam alguma influência sobre o efeito

ER; caso contrário, a previsão seria de que isso não ocorreria [jord-89]. Os resultados obtidos por Mendes e Santana [mend-96] confirmam esta teoria. Eles estudaram fluidos eletro-reológicos à base de sulfato de hidrazina-lítio com partículas de diferentes tamanhos e observaram que o efeito do diâmetro das partículas na tensão mínima de escoamento só era significativa quando ou a temperatura ou a concentração aumentavam. Com relação ao comportamento reológico desses fluidos, os autores relataram que, para as partículas menores, a suspensão se comportava como um fluido de Bingham. Todavia, para diâmetros maiores, esse comportamento às vezes se afastava do modelo de Bingham dependendo do campo, temperatura e concentração.

### 2.3.2 Reologia de Fluidos ER em Testes Oscilatórios

Como já foi dito em seções anteriores, os fluidos ER sob a ação de um campo elétrico são altamente anisotrópicos, sendo que, em testes de cisalhamento, a deformação tende a romper a estrutura fibrosa formada ao longo da direção do campo. As propriedades viscosas e elásticas, bem como a força da microestrutura, podem ser determinadas a partir de medidas de escoamento oscilatório de amplitude variável. No apêndice A é desenvolvida a teoria da viscoelasticidade.

Nas seções anteriores foi visto somente o escoamento permanente de fluidos ER no qual os efeitos transientes da região "pre-yield" foram colocados de lado. Entretanto, esta região pode ser estudada através de testes oscilatórios, que é uma reprodução do que ocorre durante o amortecimento de vibrações. Sob tais condições, a amplitude da resposta da tensão a uma dada deformação cíclica é uma função forte do campo elétrico. Para baixos campos, a resposta da tensão segue o formato da deformação; mas, com o aumento de  $E$ , chega-se a uma tensão limite a partir da qual a resposta da tensão se torna truncada ou cortada como visto na Fig.2.22-a [fili-93] [gamo-91].

Reologicamente, a aparência do corte na curva para  $E = 2,5$  kV/mm na Fig.2.22-a é uma indicação de que o material está começando a escoar. Em outras palavras, durante uma tensão oscilatória, o material se deformará como um sólido em uma parte do ciclo, e como

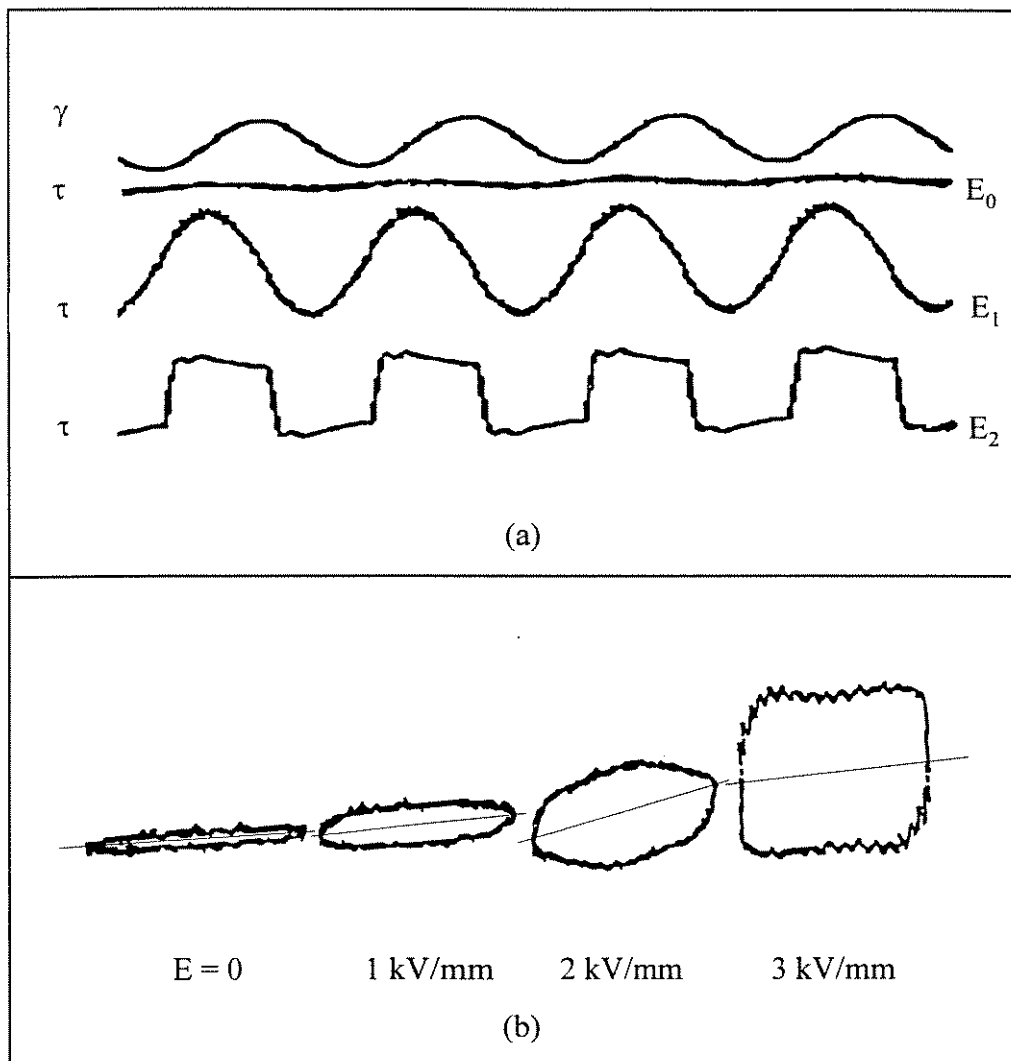


Fig.2.22 - (a) Resposta da tensão a uma amplitude de deformação para vários campos elétricos ( $E_0 = 0$ ,  $E_1 = 1 \text{ kV/mm}$ ,  $E_2 = 2,5 \text{ kV/mm}$ ), (b) histerese de fluidos ER para diferentes campos elétricos e uma dada amplitude de deformação – [fili-93].

líquido em outra parte. Uma outra maneira de observar o efeito do campo elétrico sob carregamento cíclico é através da curva da histerese desses materiais a uma amplitude e frequência constante de deformação para diferentes intensidades de campo (Fig.2.22-b). À medida que o campo aumenta, tanto a área dentro da curva quanto o ângulo que o maior eixo forma com a abscissa aumentam. Isto é um indicativo da ocorrência ou não de um comportamento que possa ser descrito pela teoria da viscoelasticidade linear (curva elíptica), onde a componente viscosa é determinada pela área dentro da curva, e a componente elástica, pela inclinação do eixo maior. Ambas são fortemente dependentes do campo elétrico. Se a

amplitude de deformação imposta for suficientemente grande, a deformação pode ativar o regime líquido do material (ele escoar), como no caso da Fig.2.22-b para  $E = 3 \text{ kV/mm}$ .

De acordo com Klingenberg e Zukoski [klin-90], para taxas contínuas de deformação, as suspensões ER observadas por eles se separavam em duas regiões: uma (líquida) que escoava como líquido, enquanto que a outra (sólida) continha partículas geralmente empilhadas uma sobre a outra, formando fibras com respeito ao campo elétrico na direção da força de cisalhamento aplicada. O aumento gradual de  $\tau$  causava uma degradação das regiões parecidas com um sólido. Segundo estes autores, estas observações sugerem que a estrutura fibrosa se deforma elasticamente abaixo de uma tensão crítica (onde não há deformação irreversível), mas se deforma continuamente acima deste valor. Na região sólida são as forças elétricas que dominam (forças de polarização), enquanto que na região fluida, as forças hidrodinâmicas.

O escoamento oscilatório pode ser produzido a baixas deformações (não-destrutivas) ou a deformações progressivamente maiores e suficientes para romper a microestrutura fibrosa. As medidas de viscoelasticidade feitas através do escoamento oscilatório dão informações tanto sobre a capacidade de armazenamento de energia da microestrutura quanto sobre a perda de energia. Em contraste, o escoamento permanente interrompe a estrutura fibrosa de um fluido ER por causa da alta e crescente deformação, e assim, as medidas de viscosidade dão informação sobre a perda de energia devido ao deslizamento da estrutura interrompida.

Segundo Jordan e Shaw [jord-92], espera-se que durante um experimento, onde a deformação  $\gamma$  varie, existam:

- um regime de baixas deformações onde o módulo de elasticidade  $G'$  domine (região viscoelástica [gamot-91]) que indica que as fibras estão intactas e as forças elétricas superam as hidrodinâmicas[otsu-92];
- uma região de transição (viscoelástica-plástica [gamot-91]) em que o módulo de perda  $G''$  se aproxime de  $G'$  (quando mais e mais fibras se rompem). Esta parte da curva pode ser vista como o limite de escoamento do material;

- uma zona de altas deformações ( $\gamma$ ) onde os módulos  $G'$  e  $G''$  sejam de magnitude similar e decresçam com o aumento de  $\gamma$  (região plástica [gamot-91]). Aqui as forças hidrodinâmicas superam as de polarização.

Klingenberg e Zukoski [klin-90] relataram que para deformações suficientemente baixas, a estrutura fibrosa se inclina na direção do escoamento sem que haja sua ruptura; e que este comportamento sugere que a estrutura em questão é capaz de sustentar uma tensão e então se comportar como um sólido elástico.

Muitas suspensões exibem viscoelasticidade não-linear ( $\gamma > 0,01$  [good-93]), mesmo quando sujeitas a deformações muito baixas. Em outras palavras, o módulo de perda  $G''$ , o módulo de elasticidade  $G'$ , assim como a viscosidade complexa  $\eta^*$ , variam com a deformação dinâmica. As suspensões ER estudadas por Xu e Liang [xu-91] mostraram uma forte dependência das propriedades dinâmicas com a deformação oscilante ( $\gamma$ ) e eles observaram que  $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^* \propto \gamma^{-a}$ , onde  $a$  é constante e dependente do material ER.

Para McLeish [mcle-91] as fibras soltas (não ligadas aos eletrodos) contribuem significativamente com a parte dissipativa (ou viscosa) dos módulos, enquanto que as fibras ligadas aos eletrodos contribuem com o armazenamento (parte elástica).

Thurston e Gaertner [thur-91] desenvolveram um novo método de medida da viscoelasticidade de fluidos ER usando o princípio de escoamento oscilatório em um duto retangular. Eles usaram suspensões de amido de milho em óleo mineral. Entretanto, pelo fato de não terem usado estabilizante para a suspensão, Thurston e Gaertner relataram problemas para conseguir uma reprodutibilidade nos testes. A seguir estão listadas algumas das características viscoelásticas de fluidos ER.

### 2.3.2.1 - Variação Transiente da Viscoelasticidade com o Campo Elétrico

A fim de examinar a velocidade de crescimento e decaimento da estrutura fibrosa, Thurston e Gaertner [thur-91] mediram a viscoelasticidade antes, durante e depois da aplicação de um campo elétrico. A Fig.2.23 mostra a mudança na viscoelasticidade (medida a

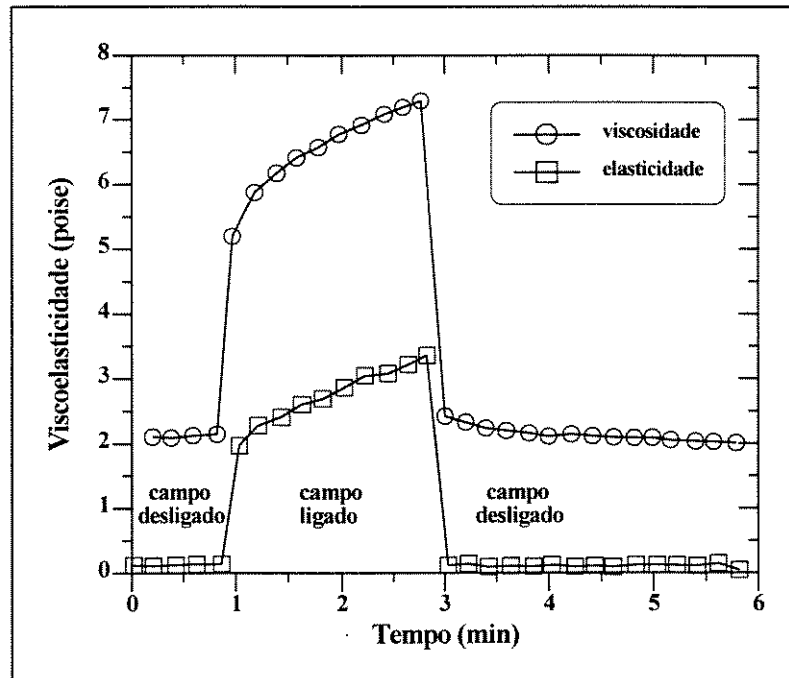


Fig.2.23 - Resposta da viscoelasticidade a degraus na intensidade do campo elétrico cc ( $\gamma = 0,6$  (rms),  $E = 0,914$  kV/mm) – [thur-91].

uma deformação de 0,6 (rms)) para  $E = 0,914$  kV/mm (cc) ligado durante dois minutos. Quando o campo elétrico foi desligado, a viscoelasticidade decresceu rapidamente, mas não voltou exatamente ao seu valor inicial. Segundo os pesquisadores, isso é uma indicação de que, enquanto a resposta ao campo elétrico é bem rápida no início, no final (após a retirada do campo) o processo de volta à estrutura inicial pode ser bem lento.

Korobko e Shulman [koro-89] também analisaram a formação da estrutura fibrosa de fluidos ER sob condições transientes. A Fig.2.24 apresenta dados de uma suspensão de partículas de sílica-diatomito (20% em peso) imersas em óleo de transformador. Primeiramente a suspensão foi mantida sob um campo elétrico de 1,5 kV/mm durante um determinado tempo  $t_E$  e então mediu-se a tensão mínima de escoamento (curva (1)). A curva (2) se refere a medidas de  $\tau_y$  logo após o campo ter sido desligado, ou seja, após o campo ter estado ativo durante um tempo  $t_E$ , este foi desligado e a tensão mínima de escoamento, medida. Neste caso,  $t_E$  é o tempo do efeito do campo sobre o fluido ER imediatamente antes dele ter sido desligado. Com isso, pode-se caracterizar a força da estrutura fibrosa logo após a retirada do campo elétrico. Em ambos os tipos de testes, a diferença em  $\tau_y$  reflete a



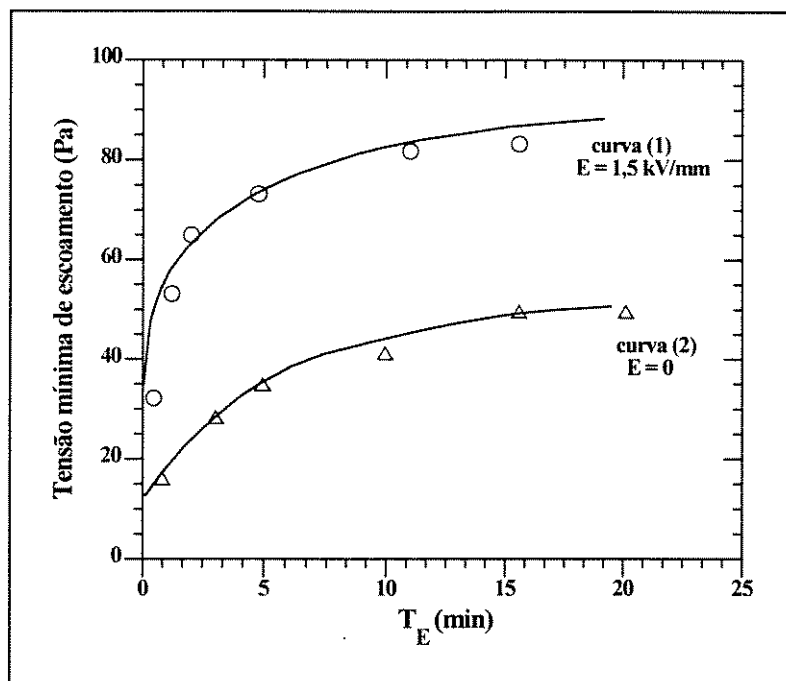


Fig.2.24 - Efeito de  $t_E$  sobre  $\tau_y$  para: (1)  $E = 1,5 \text{ kV/mm}$  e (2)  $E = 0$  – [koro-89].

contribuição das forças de interação do campo elétrico com a força da estrutura. Como pode ser visto, o aumento de  $t_E$  causa um aumento em  $\tau_y$  devido ao aumento da força da estrutura fibrosa (mais fibras são formadas). Depois de 10 minutos, o valor de  $\tau_y$  se aproxima de uma constante. Resultados parecidos com esses foram obtidos para outros valores de  $E$  e outras concentrações de partículas. O tempo característico para atingir a saturação na curva de  $\tau_y$  em função de  $t_E$  diminui com o aumento da concentração e da intensidade do campo. Korobko e Shulman também plotaram a viscosidade efetiva em função do tempo após a retirada do campo para várias intensidades de  $E$  e obtiveram um resultado similar, sendo que o tempo para se atingir um valor constante de viscosidade efetiva aumentava com o campo (Fig.2.25).

### 2.3.2.2 Comportamento de $G'$ e $G''$ com o Campo Elétrico

Korobko [koro-89] estudou suspensões de partículas de diatomito imersas em óleo de transformador a diferentes concentrações e intensidades de campo (Fig.2.26). Observou que o aumento mais acentuado das curvas de  $G'$  e  $G''$  vs.  $E$  ocorre para  $0 \leq E < 0,5 \text{ kV/mm}$ . A baixas

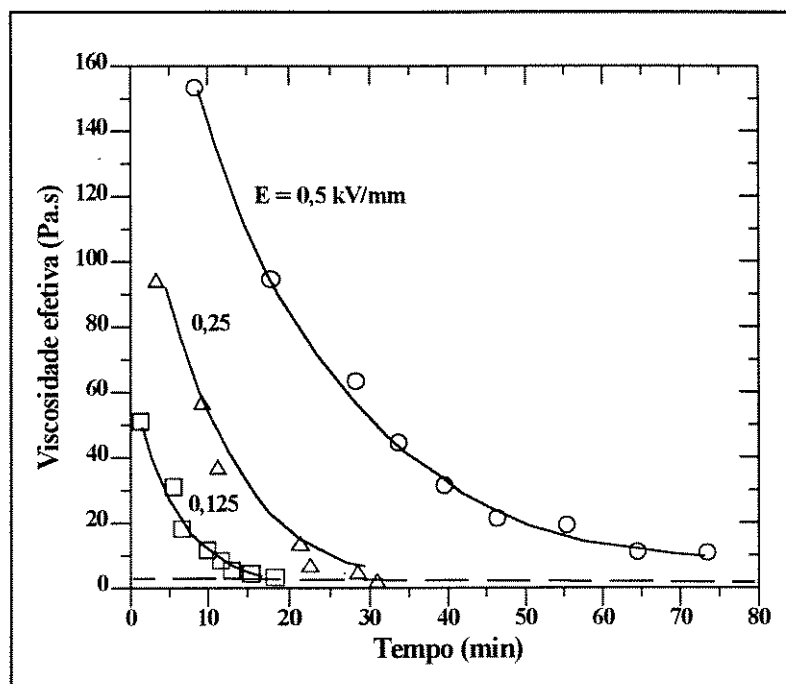


Fig.2.25 - Variação da viscosidade efetiva com o tempo logo após a suspensão do campo elétrico ( $\tau = 2,24$  Pa,  $C = 40\%$  em peso,  $t_E = 300$  s) - [koro-89].

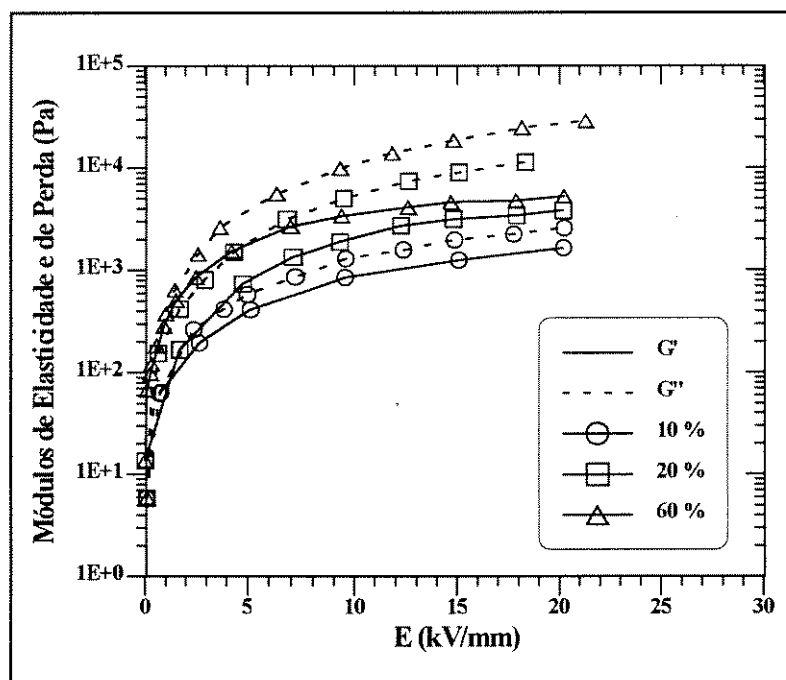


Fig.2.26 - Módulos de elasticidade e de perda em função da intensidade do campo elétrico para diferentes concentrações de diatomito - [koro-89].

concentrações  $G'$  e  $G''$  têm suas curvas bem próximas uma da outra e, à medida que a concentração de diatomito aumenta, essas curvas vão se afastando a ponto de  $G'$  exceder  $G''$  em mais de dez vezes. Segundo os autores, isso pode ser devido à sensibilidade do módulo de elasticidade à formação da estrutura espacial de fluidos ER, a qual possui alta rigidez. Para campos extremamente altos e fluidos com a estrutura fibrosa já completa,  $G'$  e  $G''$  tenderão a valores constantes.

Shulman [jord-92] estudou os módulos de elasticidade e de perda para suspensões de diatomita hidratada em óleo de transformador. Ele observou que para suspensões com baixa concentração de partículas e baixos campos elétricos,  $G''$  dominava a resposta ER; enquanto que para fluidos suficientemente concentrados e campos suficientemente altos,  $G'$  dominava. Isto é consistente com a idéia de que as fibras ligadas aos eletrodos contribuem em grande parte com o módulo de elasticidade  $G'$  e as fibras livres, com o módulo de perda,  $G''$ .

Otsubo, Sekine e Katayama [otsu-92] notaram que, para fluidos à base de sílica, o módulo de elasticidade diminui com o aumento da deformação para frequências ( $\omega$ ) maiores que 10 rad/s, mas que o efeito da amplitude de deformação em  $G'$  é muito complicado a baixas frequências. Além disso, a curva de  $G''$  em função de  $\omega$  apresenta um máximo para deformações extremamente baixas, sendo que esse máximo muda na direção de frequências mais baixas com o aumento da deformação.

Gamota e Filisko [gamot-91] estudaram suspensões de silicato de alumínio em óleo parafínico e concluíram que a tangente do ângulo de fase ( $\tan \delta$ ) diminui com o aumento do campo elétrico e com a frequência de deformação ( $300 \leq f \leq 400$  Hz na Fig.2.27); enquanto que  $G'$  e  $G''$  aumentam com  $E$ . No decorrer do artigo, os autores sugeriram dois mecanismos possíveis para a dissipação de energia em materiais ER. O primeiro envolve o escoamento da fase líquida. À medida que as partículas se alinham, os espaços entre elas se tornam menores. Com o aumento do campo, o escoamento do fluido-suporte se torna cada vez mais difícil devido à diminuição do espaço entre as partículas. O segundo mecanismo possível para a dissipação de energia está relacionado com a polarização de cargas na superfície das partículas. Neste caso, ou as cargas se movem na superfície das mesmas à medida que as fibras se inclinam com o cisalhamento, ou as partículas sofrem uma rotação para se manterem

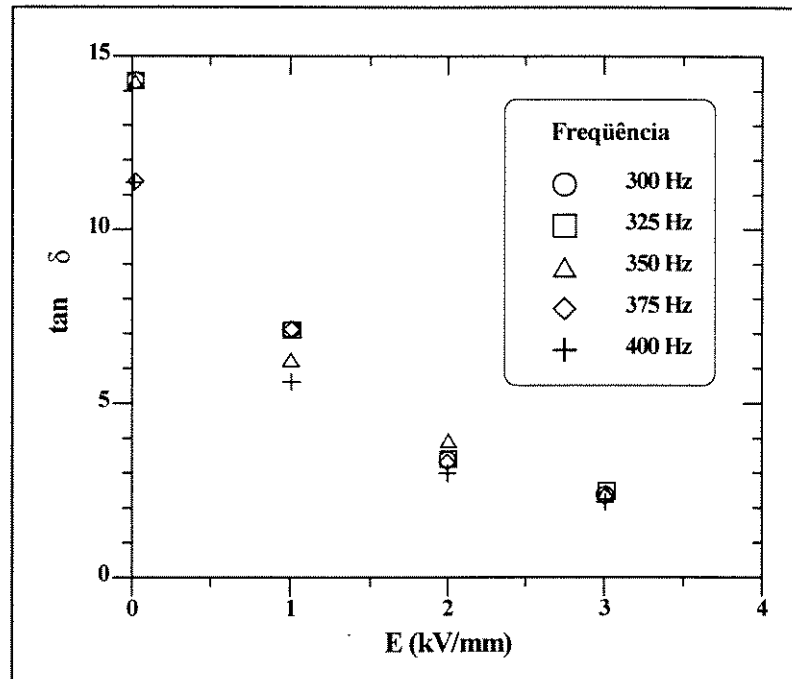


Fig.2.27 - Tangente do ângulo de fase em função do campo elétrico e da frequência - [gamot-91].

alinhadas com o campo elétrico [gamot-91].

Shiga [shig-93] estudou a viscoelasticidade de partículas de sal de cobalto derivado de um ácido polimetacrílico em gel de silicone. Além de estudar o comportamento da suspensão quando submetida a um cisalhamento oscilatório, também estudou o fluido sob deformação compressiva (deformação na direção do campo elétrico). Os resultados obtidos mostraram que as curvas de  $G'$ , de  $G''$  e da tangente do ângulo de fase em função da constante dielétrica ( $k'$ ) das partículas, em função da concentração e em função do campo elétrico, têm o mesmo formato tanto para testes com deformação compressiva quanto para cisalhante. Porém, os valores obtidos para os módulos de elasticidade e de perda na deformação compressiva chegaram a ser até 280 vezes maiores que na deformação cisalhante.

### 2.3.2.3 - Variação da Viscoelasticidade com a Taxa de Cisalhamento

A Fig.2.28 mostra o comportamento da elasticidade ( $\eta''$ ) e da viscosidade ( $\eta'$ ) em função de  $\dot{\gamma}$  para diversas intensidades de campo elétrico. Antes do início dos testes, o campo

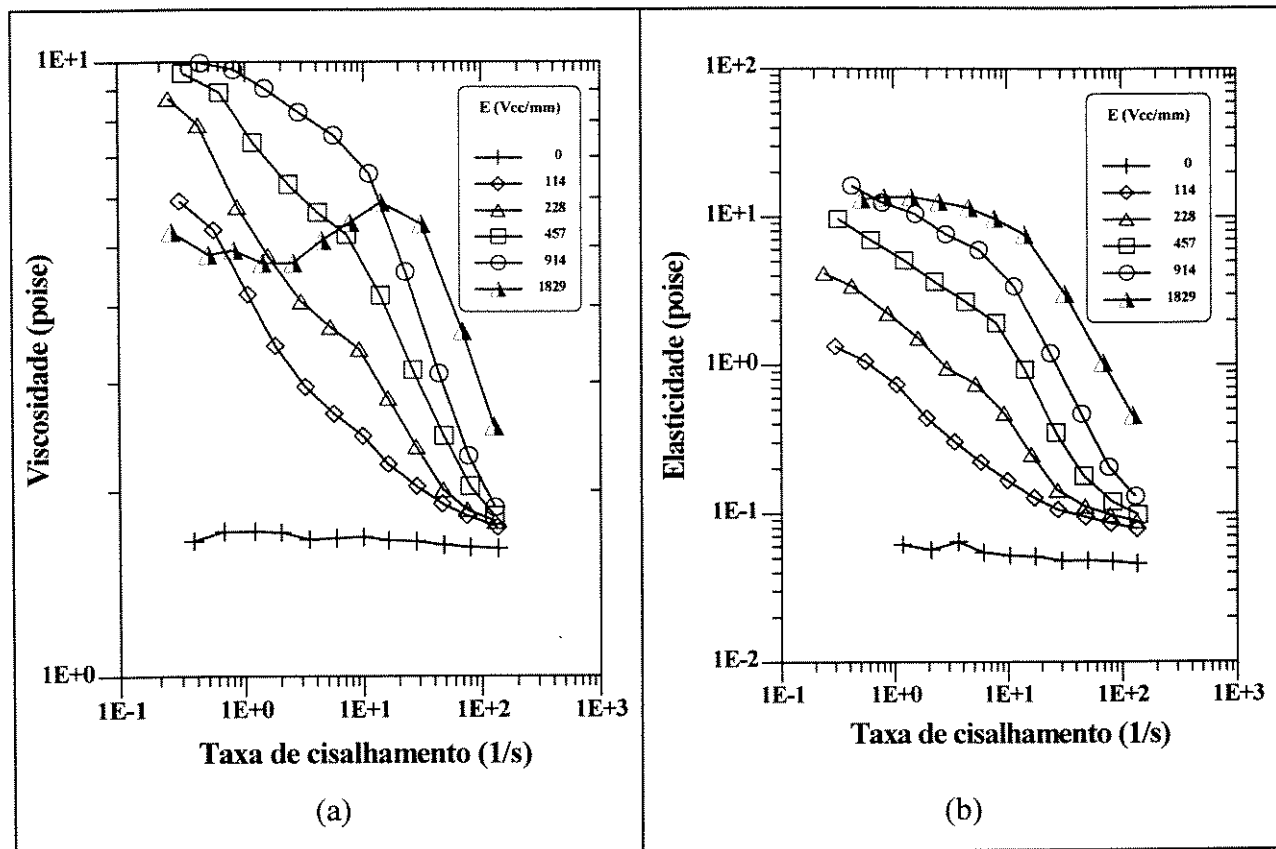


Fig.2.28 - Viscoelasticidade de partículas de amido de milho (5% em peso) em óleo mineral – [thur-91].

foi aplicado durante aproximadamente cinco minutos para permitir que a microestrutura fibrosa se desenvolvesse completamente. O padrão de comportamento das curvas de viscoelasticidade mostra um aumento tanto na viscosidade quanto na elasticidade com o aumento do campo elétrico. Entretanto, este aumento se torna cada vez menor à medida que a taxa de cisalhamento cresce. Pode-se notar que o crescimento da elasticidade com  $E$  é muito maior que o da viscosidade. A 1829 Vcc/mm a viscoelasticidade produz um resultado anômalo: a baixas taxas de cisalhamento ela é menor que para intensidades de campo menores e, além disso, a viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento (efeito da dilatância); entretanto, para altos valores de taxa de cisalhamento a viscoelasticidade é a maior do grupo. Segundo Thurston, esse comportamento mostra que a formação da estrutura fibrosa é inibida quando o fluido ER é submetido a tensões muito altas; todavia, as estruturas localizadas que são formadas estão menos sujeitas à degradação devido ao cisalhamento do que as estruturas formadas a intensidades de campo elétrico mais baixas.

A seguir é mostrado o comportamento de  $G'$  e  $G''$  em função da amplitude de deformação periódica (Fig.2.29). Os módulos de elasticidade e de perda diminuem com a deformação, sendo que este efeito é mais pronunciado quanto maior for a concentração. O módulo de elasticidade apresenta mudanças mais drásticas que o módulo de perda, indicando uma fratura frágil da estrutura sob carga dinâmica. De acordo com a teoria da viscoelasticidade linear, um material é linear se o módulo complexo  $G^*$  for dependente somente da frequência e não da amplitude de deformação. A estrutura do material não é alterada; entretanto, com o aumento da amplitude da deformação, as condições de deformação não-linear são atingidas. Em fluidos ER,  $G^*$  se torna dependente da amplitude de deformação devido ao rearranjo de elementos estruturais quando submetidos a um campo elétrico. O estudo da transição da deformação linear para a não-linear permite a determinação do tipo de estrutura responsável pelo comportamento do material como viscoplástico, viscoelástico ou elástico.

Gamota e Filisko [gamot-91] estudaram materiais ER compostos por partículas de silicato de alumínio em óleo parafínico e notaram a ocorrência de uma ligeira dependência de  $G'$  e  $G''$  com a frequência de deformação.

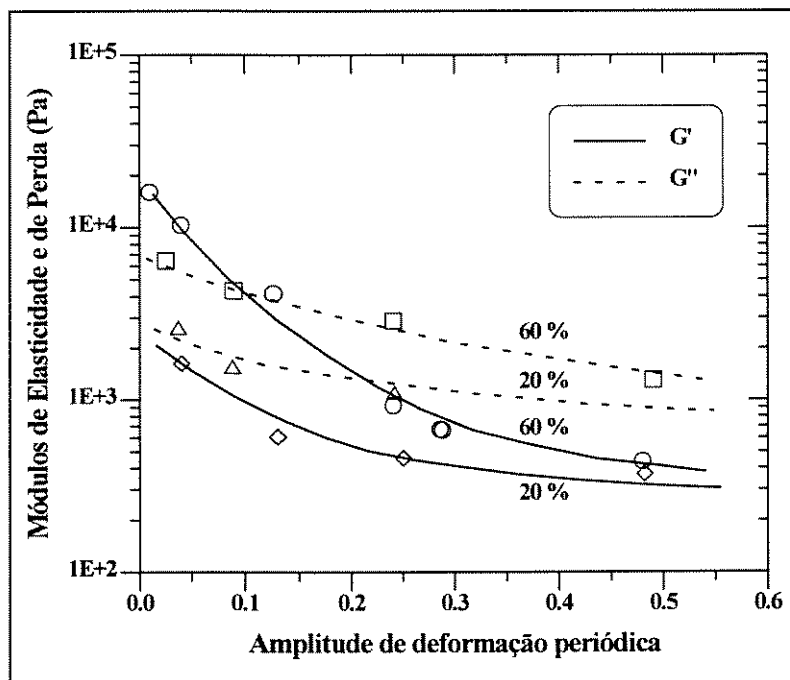


Fig.2.29 - Módulos de elasticidade e de perda em função da amplitude de deformação periódica de um fluido ER a 20% e 60% em peso ( $E = 1 \text{ kV/mm}$ ) – [koro-89].

### 2.3.2.4 Tensões Viscosas e Elásticas

A Fig.2.30 mostra a variação das tensões viscosa ( $\tau_v$ ) e elástica ( $\tau_E$ ) em função da deformação e do campo elétrico. Na ausência de campo, a relação tensão-deformação é linear, e sob a ação dele a elasticidade apresenta um desvio da linearidade a uma deformação de 0,1. Para  $\gamma \cong 1$ , tem-se um valor máximo ( $\tau_{E\max}$ ) de energia potencial elástica armazenada por unidade de volume por unidade de deformação. A diminuição da tensão elástica com a deformação indica uma mudança na estrutura elástica no sentido de diminuir sua capacidade de armazenar energia elástica, ou seja, há uma degradação da estrutura fibrosa. Assim,  $\tau_{E\max}$  é definida como a tensão mínima de escoamento da microestrutura.

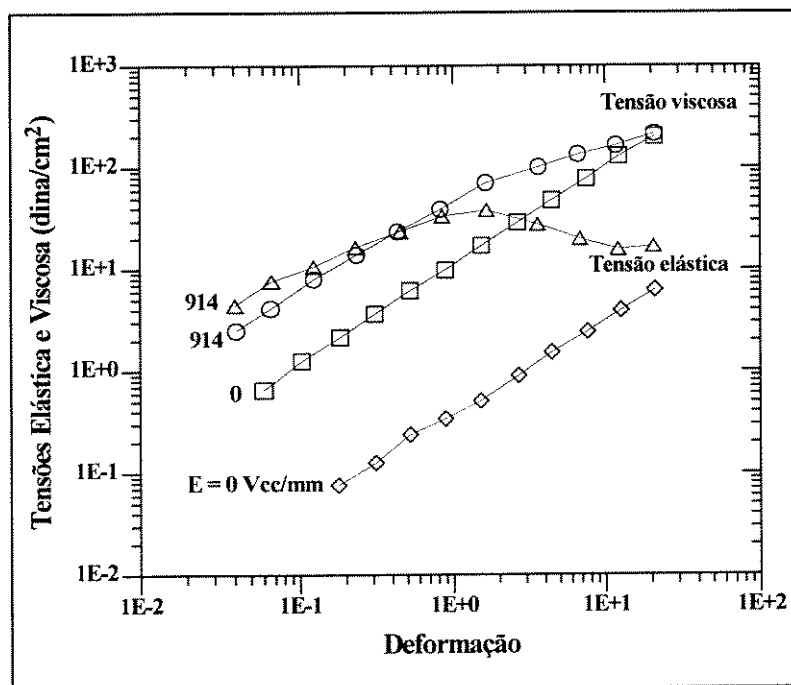


Fig.2.30 - Componentes viscosas e elásticas da tensão de cisalhamento em função da deformação de cisalhamento (valores em rms) – [thur-91].

Na Fig.2.31 estão assinalados os pontos de inflexão ( $\tau_{E\max}$ ) para cada uma das curvas de tensão elástica. A partir desta figura, Thurston plotou a tensão elástica em função do campo elétrico e ajustou a melhor curva, obtendo a seguinte relação:

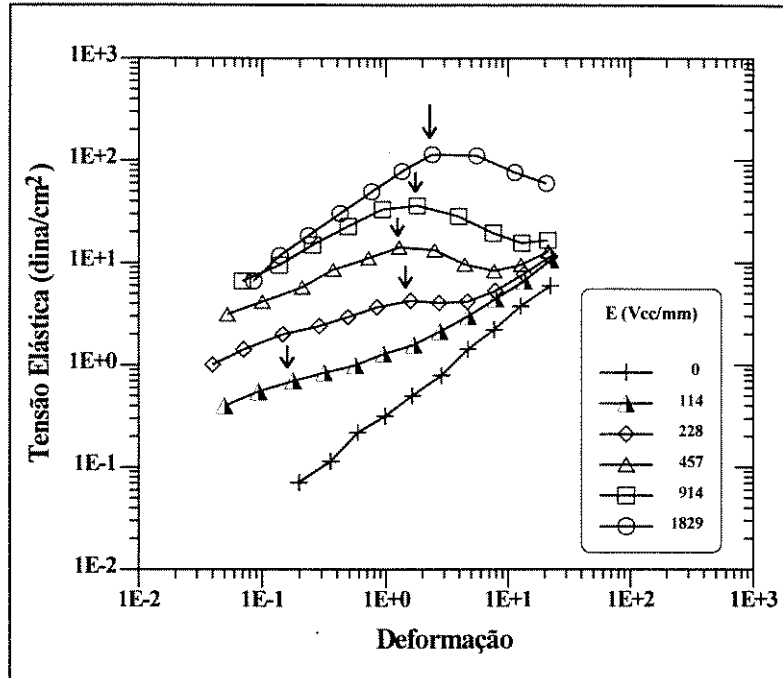


Fig.2.31 - Tensão elástica em função da deformação (o nível de tensão em que existe uma mudança brusca na habilidade da estrutura do fluido em armazenar energia elástica,  $\tau_{E_{max}}$ , está assinalado) – [thur-91].

$$\tau_{E_{max}} = -1,1572 + 0,0204 E + 2,352 \times 10^{-5} E^2 \quad (2.5)$$

onde  $\tau_{E_{max}}$  e  $E$  são medidos em  $\text{dinas/cm}^2$  e  $V_{cc}/\text{mm}$ , respectivamente.

### 2.3.2.5 Efeito da Concentração sobre a Viscoelasticidade

Com o intuito de analisar o comportamento da viscoelasticidade para fluidos com diferentes concentrações de amido de milho, Gaertner [thur-91] fez medidas a baixas deformações (0,01 (rms)) para que a estrutura fibrosa não fosse rompida (Fig.2.32). O comportamento da viscoelasticidade é muito similar para as três concentrações, sendo que para  $E \sim 30 V_{cc}/\text{mm}$  há um acréscimo significativo em seu valor. Outra observação é que para altos valores de  $E$  há uma diminuição na viscoelasticidade, sendo mais pronunciada a concentrações maiores.



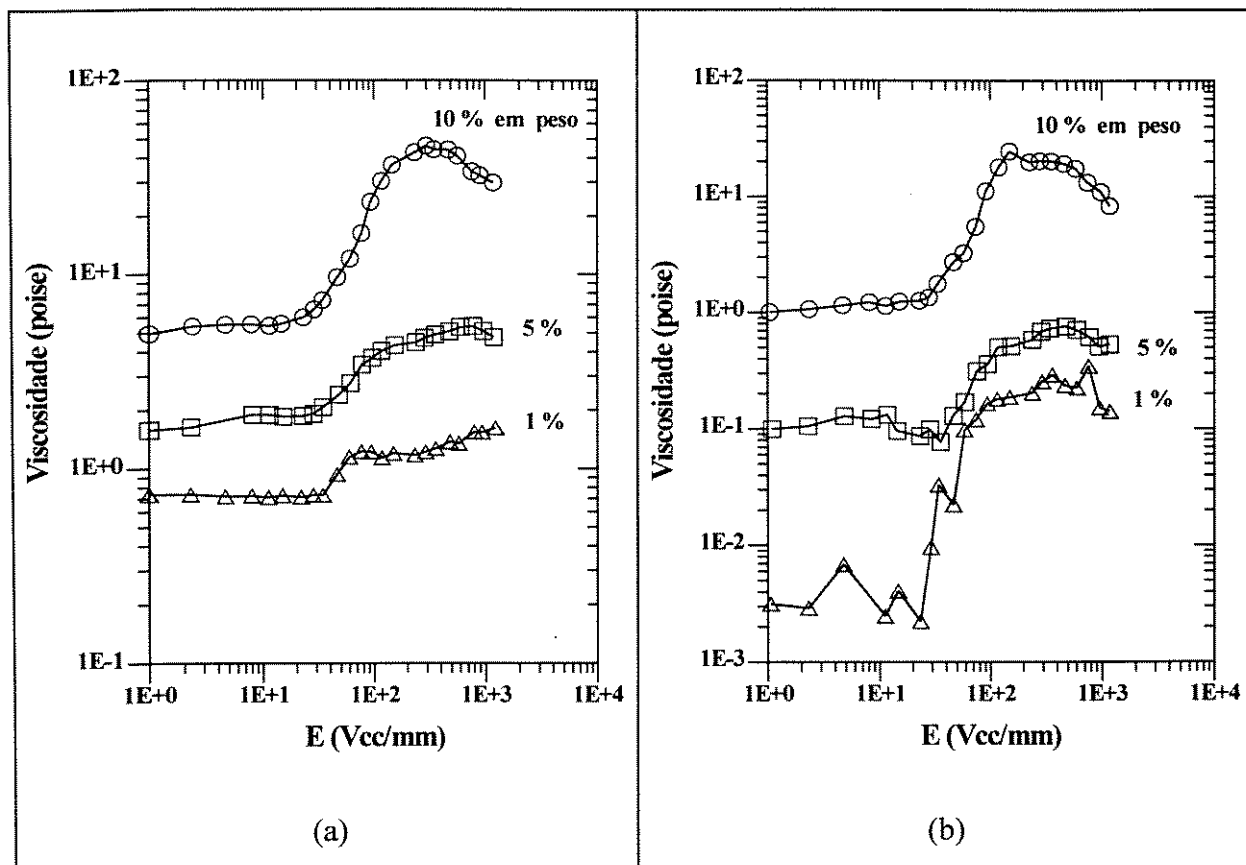


Fig.2.32 - Viscoelasticidade em função de E para várias concentrações de amido de milho em óleo mineral ( $f = 2 \text{ Hz}$ ,  $\gamma = 0,01 \text{ (rms)}$ ) – [thur-91].

Na Fig.2.28 foram plotadas as curvas de viscoelasticidade em função da taxa de cisalhamento para uma concentração de 5% em peso de amido para várias intensidades de campo elétrico. Gaertner e Thurston estudaram curvas deste tipo para concentrações de 1 e 10% em peso e observaram que para  $C = 1\%$ , a viscosidade aumenta uniformemente com o aumento do campo; entretanto, a elasticidade apresenta superposição das curvas a baixos valores de taxa de cisalhamento. Já para 10% em peso, a viscoelasticidade aumenta com E para altas taxas de cisalhamento, porém para baixos valores de taxa de cisalhamento as curvas se sobrepõem.

Na Fig.2.33 tem-se a viscosidade dinâmica complexa absoluta ( $\eta^*$ ) em função da concentração de diatomito disperso em óleo de transformador para diferentes intensidades de campo elétrico [koro-89]. Pode-se observar que  $\eta^*$  aumenta com o campo elétrico e com a concentração de partículas. Korobko e Shulman também plotaram  $\log(\eta^*)$  vs.  $\log(\omega)$  (obtido

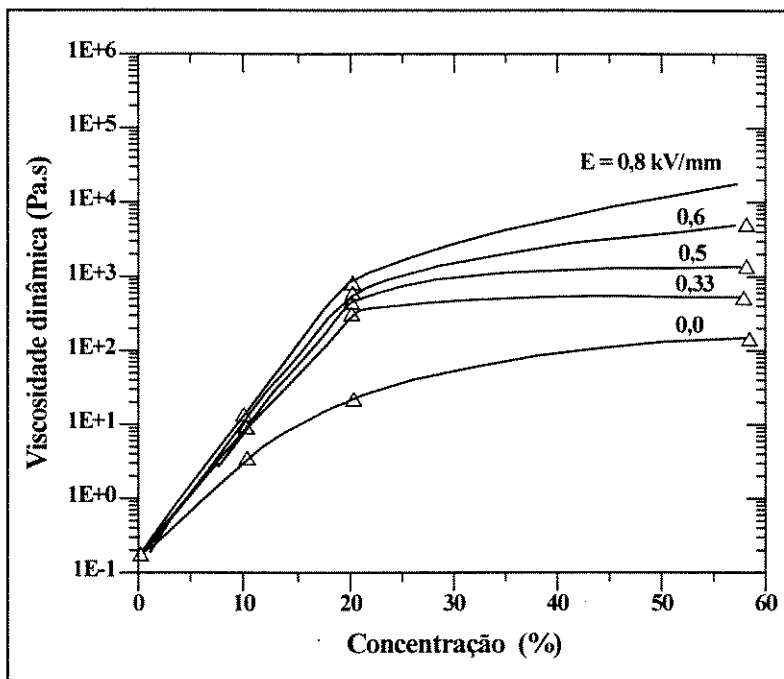


Fig.2.33 - Viscosidade dinâmica ( $\eta$ ) em função da concentração de diatomito - [koro-89].

em testes oscilatórios) e compararam com  $\log(\eta)$  vs.  $\log(\dot{\gamma})$ , onde  $\eta$  é a viscosidade efetiva calculada através de dados obtidos em testes rotacionais. Seus resultados mostraram que  $\eta^*$  é maior que  $\eta$  em toda a faixa de frequências de deformação ( $\omega$ ) e taxas de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ). Entretanto, para pequenos valores de  $\omega$  e  $\dot{\gamma}$  essas diferenças quase que desapareceram.

Segundo Jordan e Shaw [jord-89], para um dado campo elétrico, o aumento da concentração de partículas intensifica o efeito ER que é evidenciado pelo aumento do módulo de elasticidade  $G'$ . O mesmo foi verificado por Korobko na Fig.2.29.

### 2.3.2.6 Comparação entre Campos Alternados e Contínuos

Uma série de medidas foram feitas a fim de comparar os resultados obtidos através de testes com fluidos ER submetidos a campos elétricos contínuos (cc) e alternados (ac). A Fig.2.34 mostra a viscoelasticidade em função da intensidade de  $E$ , tanto para campos cc quanto para ac. Para as duas amostras de fluido, as viscosidades para  $E = 0$  diferem de 8%,

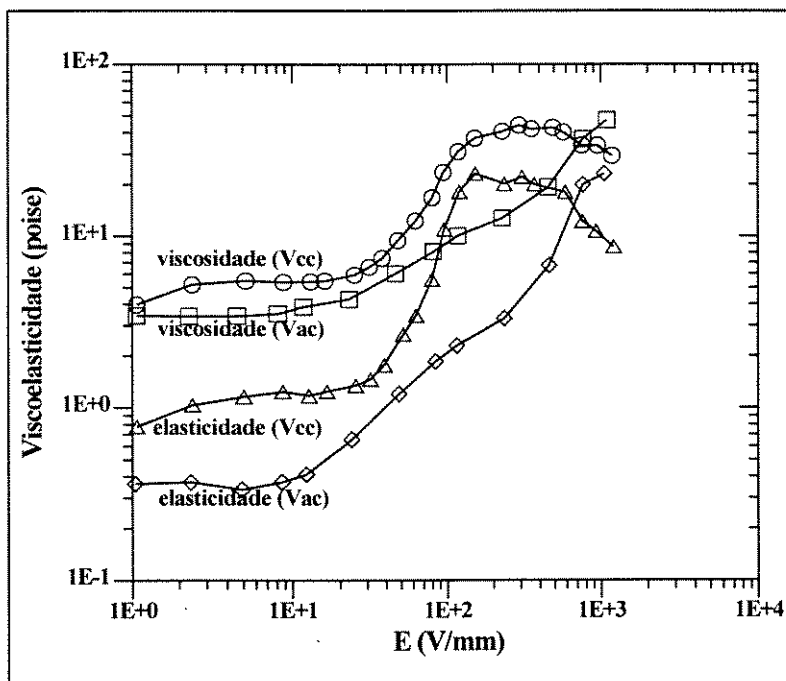


Fig.2.34 - Comparação de efeitos de campos ac e cc sobre a viscoelasticidade para suspensões a 10% em peso de amido de milho em óleo mineral. Os campos ac estão a uma frequência de 1 kHz. A viscoelasticidade é medida a uma deformação de 0,01 (rms) a 2 Hz – [thur-91].

enquanto que as elasticidades, 40%. A viscoelasticidade tem um aumento em  $E \approx 6 V_{ac}/\text{mm}$  e  $E \approx 20 V_{cc}/\text{mm}$ . Aumentando-se a intensidade do campo ac, a viscoelasticidade continua a crescer mesmo para campos mais intensos. Já para altos valores de campo cc, há um decréscimo na viscoelasticidade (ocorre um efeito de saturação). Segundo Thurston [thur-91], talvez estas diferenças se devam, em parte, a diferenças nas amostras. Entretanto, espera-se que as interações entre campos ac e cc com dipolos permanentes e induzidos produzam alinhamentos diferentes de partículas e, então, cadeias de diferentes microestruturas.

### 2.3.2.7 Tensão Normal ao Plano de Cisalhamento

Diferentemente dos fluidos viscoelásticos tradicionais, os fluidos eletro-reológico, sob um campo elétrico, podem sustentar uma tensão normal mesmo na ausência de cisalhamento. Isso se deve ao fato de que sobre o fluido ER atua, além da tensão normal, uma outra tensão na direção do campo elétrico e que é proporcional ao seu quadrado. O sentido desta tensão

pode ser fixo (para o caso de campo contínuo) ou pode mudar com o tempo (campo alternado), de modo que ela pode contribuir com a tensão normal (se tiver o mesmo sentido que ela) ou diminuir seu efeito (sentido contrário). Na Fig.2.35 está ilustrado o escoamento de um fluido ER e as tensões atuantes sobre ele. Testes experimentais podem determinar se o sentido da tensão normal resultante é tipicamente de tração ou de compressão [fili-93]. Este tipo de comportamento é restrito aos materiais ER. Os efeitos desta nova tensão normal (que é a resultante entre  $T_{22}$  e a tensão produzida por  $E$ ) tem implicações interessantes no padrão de escoamento de um fluido eletro-reológico num dispositivo ER, na estabilidade do escoamento devido a distúrbios e no projeto do recipiente que aloja o fluido ER.

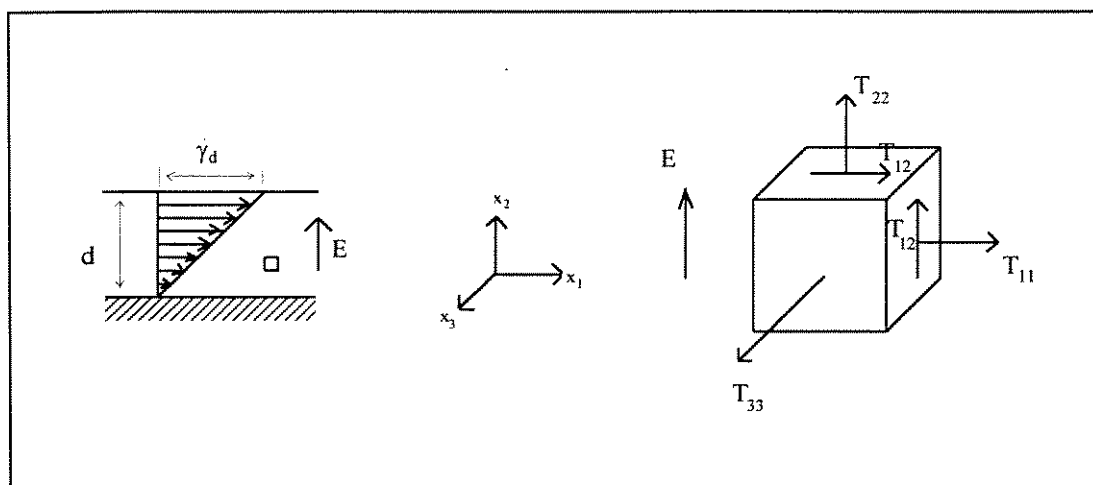


Fig.2.35 - Escoamento cisalhante de um fluido ER – [fili-93].

Jordan e Shaw [jord-92] estudaram o fluido ERX-02 fornecido pela Lord Corporation, plotaram a curva da tensão normal em função do quadrado do campo elétrico e observaram que para campos elétricos até 3 kV/mm havia um comportamento linear da componente normal. Já para campos mais elevados, ocorria um desvio da linearidade.

## 2.4 Características Elétricas de Fluidos ER

O mecanismo proposto para explicar o efeito eletro-reológico – a saber, a polarização induzida por um campo elétrico externo – requer uma relação direta entre as propriedades

reológicas e elétricas da dispersão. As propriedades elétricas de maior importância são a condutividade e a tensão de ruptura dielétrica. A condutividade determina a potência requerida e o aquecimento Joule; enquanto que a quebra do dielétrico limita a magnitude do efeito ER, restringindo o campo elétrico a ser usado. Para que o efeito eletro-reológico exista, é preciso que a condutividade das partículas seja bem maior que a do fluido-suporte [foul-92]. Se esta condição não for satisfeita, tem-se o que Boissy [bois-95] denominou "efeito ER negativo", caracterizado pela diminuição da viscosidade aparente com o aumento do campo elétrico.

Alguns pesquisadores estudaram a relação entre as propriedades elétricas e reológicas da suspensão e publicaram artigos sobre o assunto. Apesar de estas propriedades serem típicas da maioria das dispersões ER, existem exceções quanto ao efeito de parâmetros específicos. A seguir são discutidas algumas das propriedades elétricas dos fluidos ER.

#### **2.4.1 Efeito do Cisalhamento e do Campo Elétrico sobre a Condutividade do Fluido ER**

Muitos dos pesquisadores que têm estudado o fenômeno eletro-reológico relataram em seus trabalhos que, para que o efeito de Winslow ocorra, necessariamente as partículas devem ser polarizáveis e o fluido-suporte, dielétrico (o que implica em uma pequena condutividade no fluido ER). Como já é sabido, em se tratando de fluidos ER convencionais, há a necessidade da presença de aditivos para que o mecanismo da camada dupla seja ativo. No caso dos fluidos anidros, eles não são necessários.

Sabe-se que uma tensão de cisalhamento aplicada transversalmente ao campo elétrico perturba a polarização das camadas duplas das partículas dos fluidos ER. Isso ocorre porque o cisalhamento é responsável por um movimento relativo entre as partículas e as cargas. Desta forma, quando o fluido ER escoar em tubos capilares, há um rearranjo de carga nas partículas e, em consequência disso, surge um gradiente de potencial elétrico. Assim, há uma diminuição da resistividade do sistema e inicia-se a passagem de uma corrente elétrica [klass-67]. Este é o chamado fenômeno eletrocinético. A Fig.2.36 mostra os resultados obtidos por Klass e Martinek para fluidos ER contendo partículas de sílica (5,3% a 46% em volume). Eles

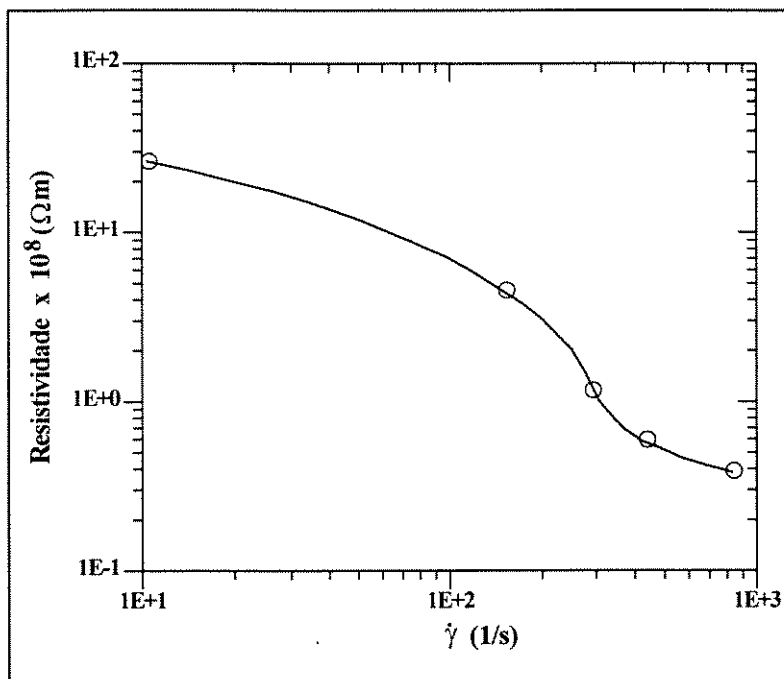


Fig.2.36 - Efeito da taxa de cisalhamento na resistência específica (46% em volume de sílica,  $T = 49,5^{\circ}C$ ,  $D = 1,27$  mm) – [klass-67].

observaram que, quando os fluidos ER eram submetidos a uma tensão de cisalhamento, instantaneamente havia uma queda na resistividade, sendo que podiam-se detectar uma pequena diferença de potencial e um fluxo de corrente entre os eletrodos. Entretanto, quando o fluido ER era submetido, simultaneamente, a um campo elétrico e a um cisalhamento, observava-se a existência de uma potência cc de saída dependente da taxa de cisalhamento e da carga resistiva externa que era transmitida através do circuito externo (Fig.2.37). Assim, Klass e Martinek perceberam que os fluidos ER sob cisalhamento apresentam características de uma pequena célula elétrica (apêndice B). De acordo com Klass, a condutividade é uma parte inerente ao mecanismo de polarização induzida e a ação de um campo elétrico cc em um fluido ER resulta em uma corrente sobreposta a qualquer condução devido às cargas móveis. Além disso, a aplicação de uma tensão de cisalhamento torna o processo de condução mais complexo, já que a condutividade também depende do cisalhamento. Para Stangroom [stan-89] e Bullough [bull-87], os fluidos eletro-reológicos não se comportam como uma carga puramente resistiva, mas como uma carga resistiva associada a uma carga capacitiva.

Oppermann [oppe-89], depois de ter observado que fluido ER têm muita sensibilidade

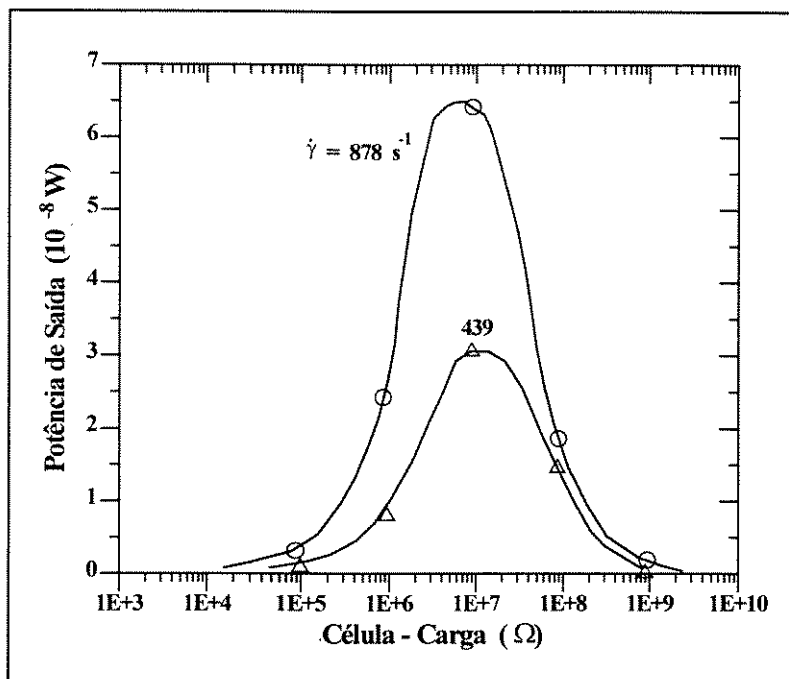


Fig.2.37 - Efeito da célula-carga (resistência) na potência de saída a diferentes taxas de cisalhamento ( $D = 0,25$  mm,  $T = 49,5^{\circ}\text{C}$ ,  $C = 46\%$  em volume de partículas de sílica) – [klass-67].

a movimentos forçados de modo a apresentar uma alteração na corrente elétrica, descobriu que isso pode ser usado para a construção de um sensor de movimento ou até para instalar um controle de malha automático.

Apesar de alguns autores terem verificado o aumento da condutividade de fluidos ER com o cisalhamento, na literatura há controvérsias sobre o assunto. Conrad, Shamala e Sprecher [conr-87] estudaram as características de fluidos ER compostos por partículas de sílica imersas em óleo de silicone a baixas deformações e taxas de deformação. Segundo eles, a condutividade dos fluidos ER durante o cisalhamento decresce com o aumento da deformação ao cisalhamento, sendo que, quanto maior for o campo elétrico, maior é essa taxa de decréscimo (Fig.2.38). Além disso, observaram que, para uma dada deformação, a densidade de corrente  $j$  é diretamente proporcional ao campo elétrico desde que  $E \leq 1,2$  kV/mm (Fig.2.39). Para campos maiores,  $j$  não é tão sensível à variação de  $E$ . Outra observação foi o aumento da densidade de corrente com a temperatura. De acordo com Brooks [broo-94], a densidade de corrente é uma função forte do campo elétrico e da temperatura, e uma função fraca da taxa de cisalhamento e da fração em volume de partículas.

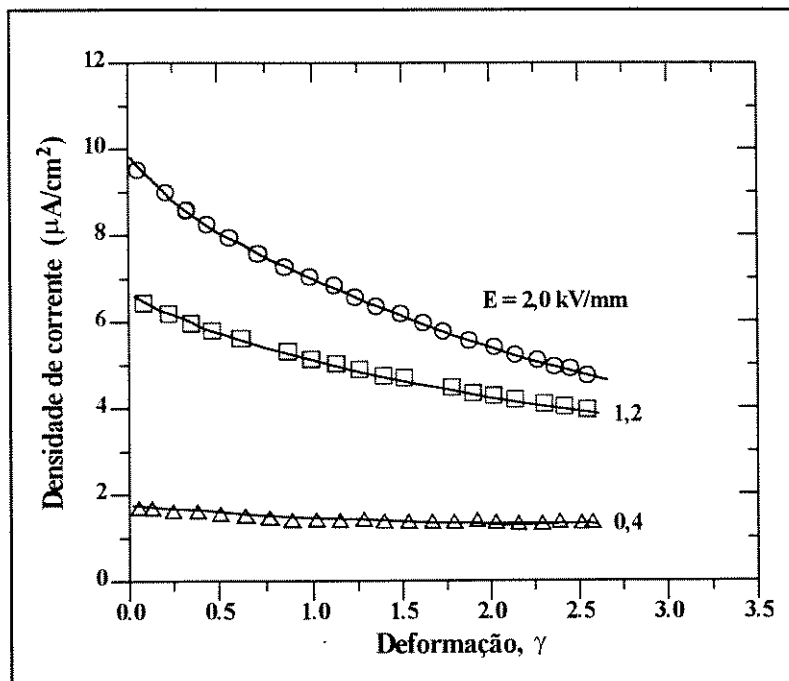


Fig.2.38 -  $j$  em função de  $\gamma$  em função do campo elétrico para suspensões de partículas de sílica (1,64% em peso) imersas em fluido de silicone ( $T = 273 \text{ K}$ ,  $\dot{\gamma} = 8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) - [conr-87].

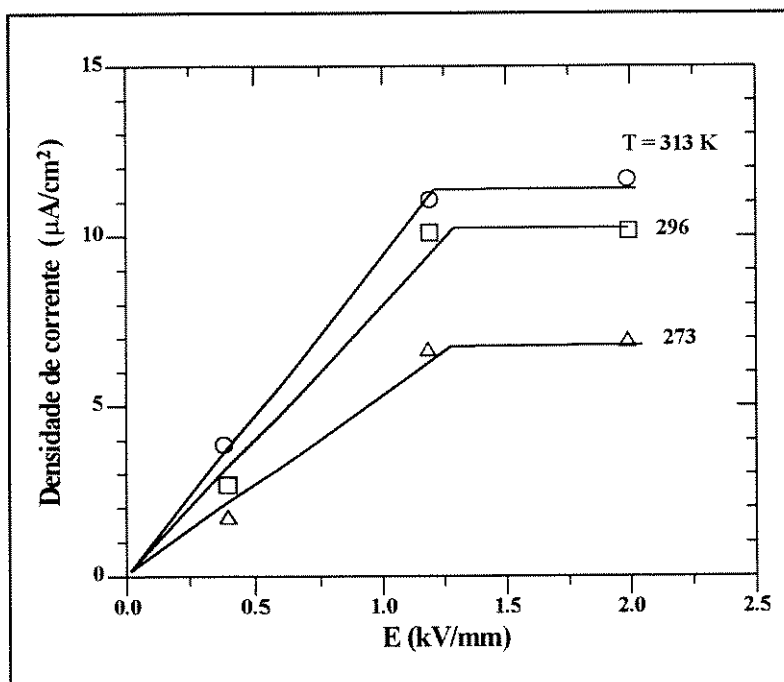


Fig.2.39 -  $j$  em função de  $E$  e da temperatura para suspensões de partículas de sílica (1,64% em peso) imersas em fluido de silicone ( $\gamma = 2,5$ ,  $\dot{\gamma} = 8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) - [conr-87].



Kollias observou que a resistividade (inverso da condutividade) de fluidos à base de zeólitos aumenta com  $\dot{\gamma}$  até  $15000 \text{ s}^{-1}$  [koll-94].

A Fig.2.40 mostra o comportamento da eletroviscosidade e da corrente em função da voltagem cc aplicada em um fluido ER [klass-67]. A baixas intensidades de campo, a eletroviscosidade e a corrente são extremamente baixas. Com o aumento do campo, a eletroviscosidade começa a crescer, podendo ser descrita como uma função quadrática da voltagem. Já a corrente apresenta um desvio do comportamento retilíneo com relação à voltagem. Segundo Klass e Martinek, a potência consumida no caso estudado por eles é baixa, mesmo quando se tem altas voltagens.

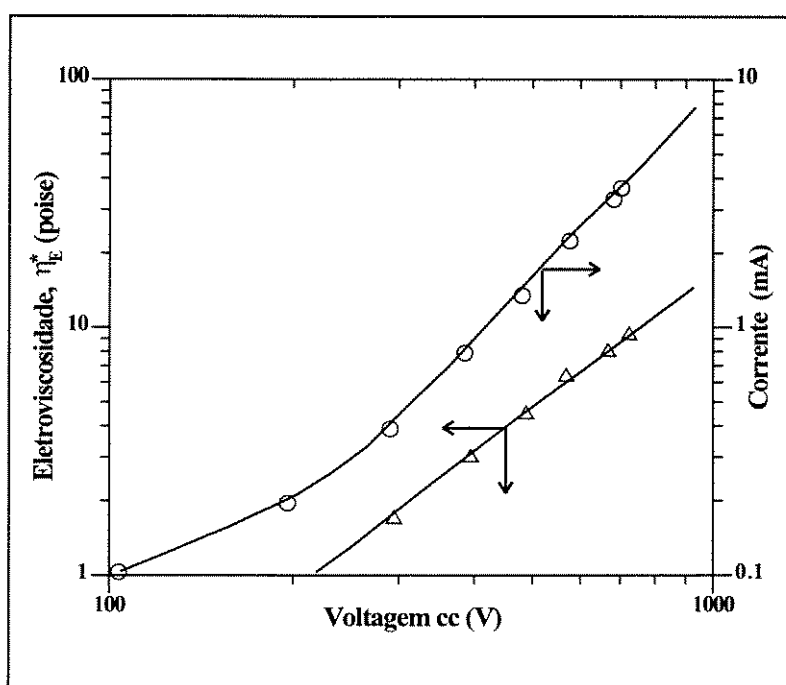


Fig.2.40 - Eletroviscosidade e corrente em função da voltagem cc aplicada ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 6152 \text{ s}^{-1}$ ,  $C = 44\%$  em peso de partículas de sílica e  $D = 0,25 \text{ mm}$ ) - [klass-67].

Inoue [inou-89] trabalhou com fluidos anidros (esferas de alumínio recobertas por uma camada de material não-condutor em óleo de silicone) e verificou que a densidade de corrente ( $j$ ) para campos ac ( $E = 3 \text{ kV/mm}$ ) não era muito sensível a variações de temperatura entre

298 K (25°C) e 393 K (120°C), enquanto que fluidos à base de sílica hidratada apresentaram um aumento superior a 680%. De modo geral, o crescimento de  $j$  com a temperatura pode ser atribuído ao aumento da ionização no fluido ER. Assim, o leve aumento observado para as partículas de alumínio sugere que o mecanismo de seu efeito ER seja não-iônico.

De acordo com Stangroom [stan-91], sempre há uma corrente passando através de fluidos eletro-reológicos, a qual pode ser grande o suficiente para se tornar uma séria limitação em algumas aplicações práticas. Geralmente, os fluidos ER não obedecem à lei de Ohm, e não existe nenhuma concordância geral sobre a forma como ocorre a condução. Sob condições estáticas, uma representação da densidade de corrente  $j$  em função do campo elétrico é:

$$j = P E + Q E^2 \quad (2.6)$$

onde  $P$  e  $Q$  são constantes do fluido. Destas,  $Q$  é particularmente interessante, pois varia sistematicamente com a temperatura. Segundo Yatsuzuka [yats-95], a corrente elétrica é proporcional à quarta potência da voltagem aplicada no fluido eletro-reológico, enquanto que para Froot [froot-89] e Brooks [broo-94], a densidade de corrente é da forma  $j \approx E^n$ , onde  $n$  depende do campo elétrico e do fluido ER, mas independe da viscosidade do fluido-suporte e do espaçamento entre os eletrodos.

Com relação à quantidade de água nas partículas, Carlson [carl-88] afirmou que a corrente elétrica que passa através do fluido ER cresce exponencialmente com o aumento da mesma e que  $i$  tem seu valor dobrado a cada 6°C.

#### 2.4.2 Constante e Perda Dielétricas

Como já foi dito anteriormente, os fluidos ER são compostos por partículas dielétricas imersas em um líquido de baixa constante dielétrica. No apêndice C são apresentadas algumas das características dos dielétricos.

Klass e Martinek [klass-67] estudaram o comportamento de dispersões de sílica (a

25°C) submetidas a campos elétricos com uma frequência de 5 Mhz e cisalhamento zero. Os resultados obtidos por eles mostraram que o fluido-suporte tinha uma constante dielétrica baixa ( $k' \cong 2,2$ ) enquanto que as partículas apresentavam valores para  $k'$  da ordem de 7,4. Segundo o artigo, isso forneceu um forte embasamento para que cressem que o mecanismo reinante no sistema fosse o da dupla camada, pois, neste caso (em que o fluido-suporte tem uma baixa constante dielétrica e as partículas apresentam um alto valor de  $k'$ ), a polarização interfacial seria facilitada.

A Fig.2.41 mostra que existe uma relação linear entre a constante dielétrica e a fração em volume da fase dispersa – exceto para altas concentrações de partículas de sílica onde as interações partícula-partícula se tornam importantes. Uejima [ueji-72] obteve resultados semelhantes para  $k'$  em função de C (porcentagem em peso de partículas). Com relação à quantidade de água nas partículas, o seu aumento provocava um aumento na constante dielétrica.

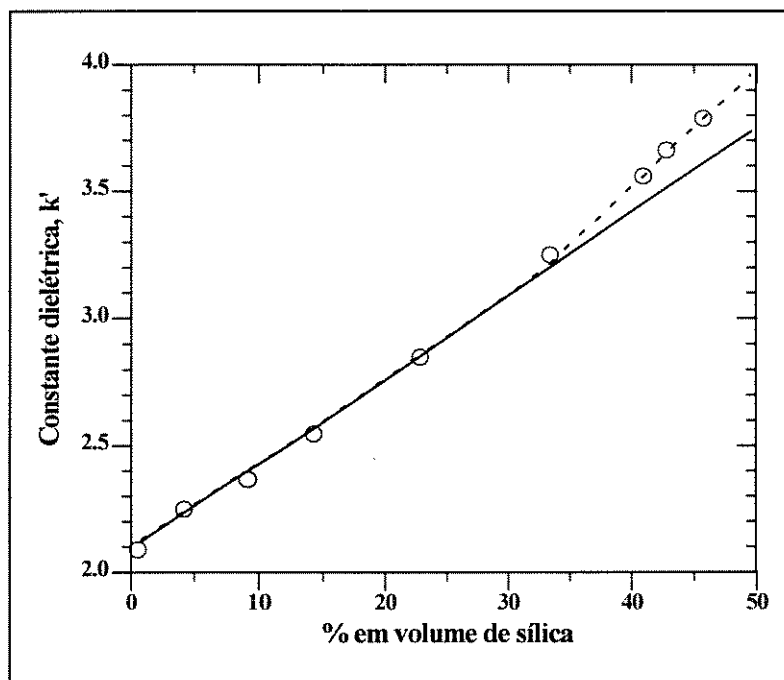


Fig.2.41 - Constante dielétrica do fluido ER ( $k'$ ) em função da fração em volume da fase dispersa ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 0$ ,  $f = 5 \text{ MHz}$ ) – [klass - 67].

No mesmo artigo, Klass e Martinek apresentaram um gráfico (Fig.2.42) mostrando o comportamento da constante dielétrica e da perda dielétrica em função da frequência do campo elétrico ac. A diminuição da constante dielétrica com a frequência reflete o grau de polarização atingido pelo processo (quanto maior for a polarização, maior será a constante dielétrica) – existem partículas em que a polarização é muito maior que em outras devido à existência de dipolos naturais, onde o centro das cargas positivas não coincide com o centro das cargas negativas. O ponto de inflexão na curva da constante dielétrica (ou o ponto de máximo da curva de perda dielétrica) ocorre a uma frequência crítica,  $f_c$ , que está muito próxima da frequência natural do processo (inverso do tempo de relaxação). Para baixas frequências, os dipolos acompanham as mudanças do campo elétrico. Aumentando-se  $f$ , chega-se a um ponto além do qual é impossível aos grupos polares das moléculas acompanhar o campo elétrico. Esta frequência limite ( $f_c$ ) varia com as dimensões do dipolo e com a temperatura (a energia térmica suplementa a força do campo elétrico no deslocamento dos portadores de carga). Aumentando-se a frequência e diminuindo-se a temperatura, há uma redução na constante dielétrica, uma vez que o tempo disponível para o alinhamento de dipolos é menor. À medida que a frequência se aproxima de zero, verifica-se um aumento na

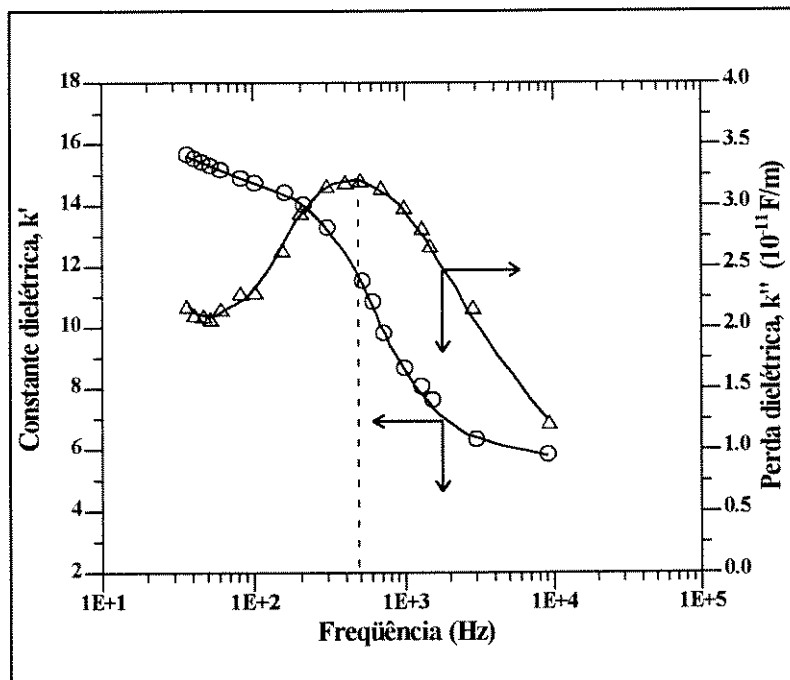


Fig.2.42 - Efeito da frequência em  $k'$  e em  $k''$  para dispersões com partículas de sílica a 46% em volume e  $f < 500$  Hz  $\chi = 0$ ,  $T = 20,4^\circ\text{C}$  e  $D = 0,76$  mm) – [klass-67].

eletroviscosidade dos fluidos ER. Este resultado é esperado pelo mecanismo da dupla camada e pelo efeito dos campos contínuo e alternado na eletroviscosidade, já que os íons pertencentes à dupla camada passam a acompanhar as mudanças ocorridas no campo elétrico [klass-67]. O decréscimo do efeito ER a altas frequências é atribuído ao fato de o tempo para as partículas se polarizarem novamente ser insuficiente [jord-89]. Block e Kelly [bloc-87] obtiveram um comportamento semelhante para as curvas de  $k'$  e  $k''$  em função da frequência.

De acordo com Block e Kelly [bloc-87] o comportamento de  $k'$  na Fig.2.42 é modificado quando ocorre o mecanismo de condutância global nas partículas do fluido ER (Fig.2.43). Neste caso, algumas informações sobre a curva da perda dielétrica são perdidas, uma vez que o seu ponto de máximo não aparece. Segundo Ven [ven-93], para frequências muito altas ( $> 10^6$  Hz), os íons móveis não conseguem mais acompanhar as mudanças no campo elétrico, de modo que as polarizações superficial e da dupla camada são prezíveis, restando a polarização pela condutância global.

Os efeitos da tensão de cisalhamento e da temperatura na constante e na perda

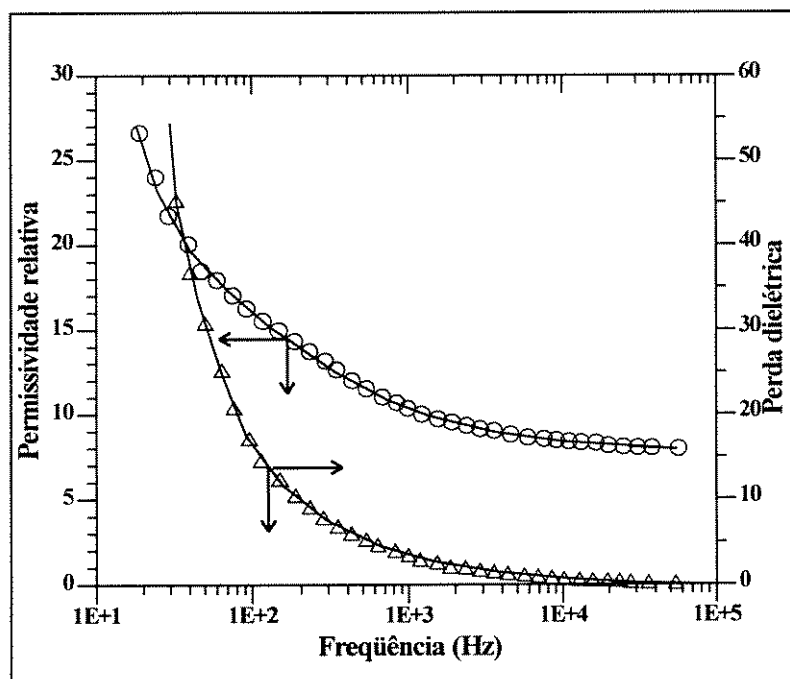


Fig.2.43 - Permissividade relativa ( $k'$ ) e perda dielétrica ( $k''$ ) de partículas de polimetacrilato de lítio dispersas em parafina clorada em função de  $f$  com interferência do efeito de condutância de volume – [bloc-87].

dielétricas são semelhantes aos observados na viscosidade aparente [klass-67] (Fig.2.44). Segundo Klass, aumentando-se a temperatura (desde que ela varie dentro de uma faixa que não destrua a dupla camada da partícula) a polarização é facilitada devido à diminuição da viscosidade do fluido-suporte, ao enfraquecimento das forças eletrostáticas dentro da camada dupla e ao aumento da mobilidade iônica. Sendo assim, a constante dielétrica aumenta com a temperatura. Com relação à tensão de cisalhamento aplicada transversalmente ao campo, o efeito é contrário, pois ela perturba a camada dupla das partículas, dificultando a polarização induzida, de modo que a constante dielétrica diminui (Fig.2.44-b).

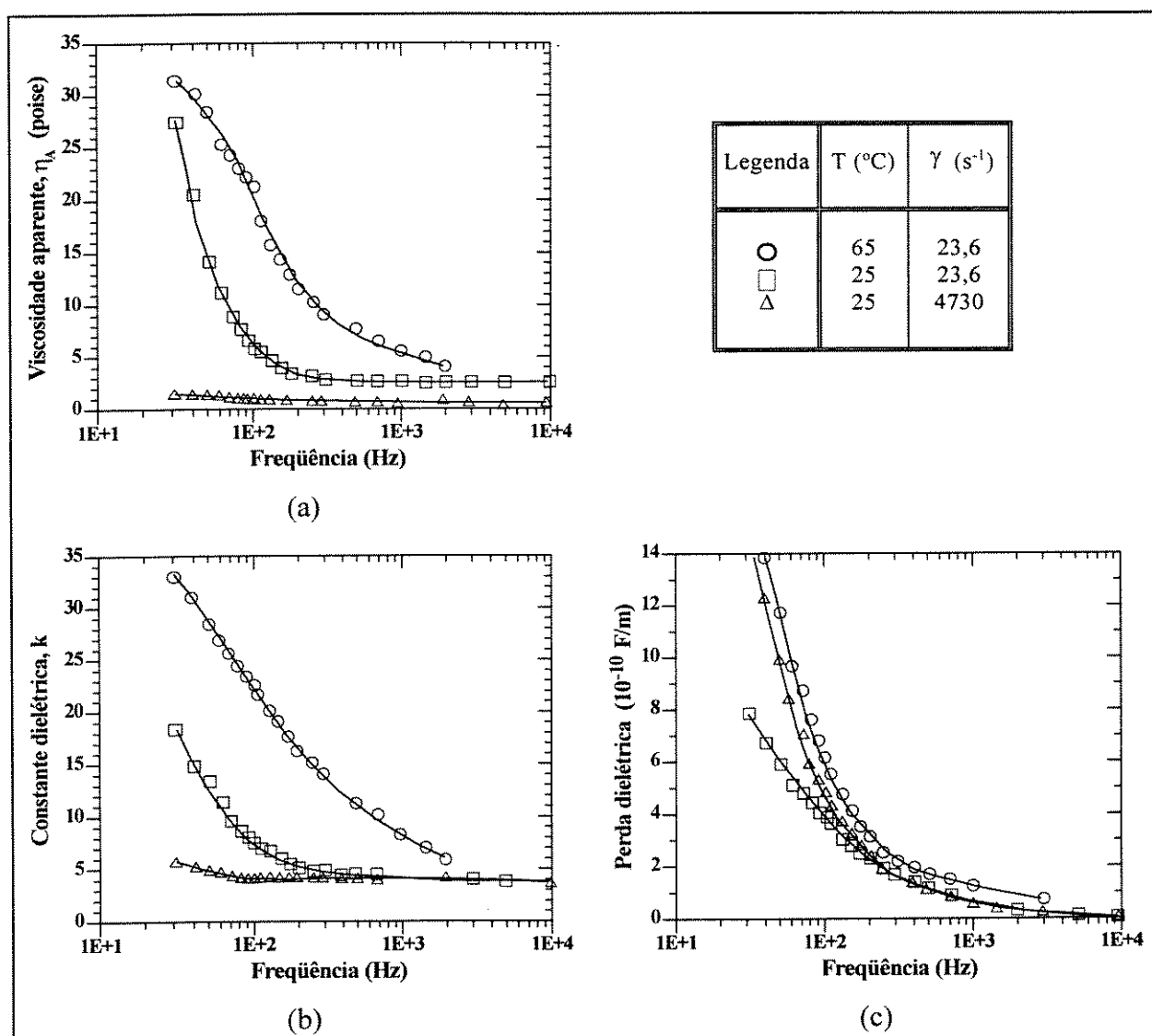


Fig.2.44 - Efeitos da frequência em: (a) viscosidade aparente; (b) constante dielétrica; (c) perda dielétrica – resultados obtidos para suspensões de sílica a 38% em volume,  $E = 0,8$  kV/mm e espaçamento entre eletrodos de 0,25 mm [klass-67].

Já para a perda dielétrica (Fig.2.44-c), Klass e Martinek [klass-67] observaram que, para uma dada frequência, aumentando-se a taxa de cisalhamento, a perda dielétrica aumenta ao invés de diminuir (porque para essa suspensão, em particular, o cisalhamento provoca um aumento na condutividade do fluido ER). Segundo eles, caso a polarização interfacial da camada dupla fosse o único processo de condução, o aumento da taxa de cisalhamento resultaria em uma menor perda dielétrica para frequências maiores que a frequência característica de relaxação (devido à redução da polarização). Sendo assim, concluíram que pelo menos três processos de condução a baixas frequências deveriam estar ocorrendo:

- um processo dependente da frequência (a qual atrapalha a polarização quando não existe tempo suficiente para que as partículas se repolarizem);
- outro dependente do cisalhamento (o qual poderia aumentar a condutividade do fluido ER dependendo do tipo de fluido usado);
- e um terceiro, intrínseco à composição.

Desta forma, caso o segundo tipo de condução fosse o predominante, a perda aumentaria ao invés de decrescer com o cisalhamento. Através desta linha de raciocínio puderam explicar o comportamento do gráfico obtido por eles (Fig.2.44-c). Os dados também mostraram o efeito da temperatura sobre a perda dielétrica. Como é sabido, tanto a polarização interfacial quanto a condutividade aumentam com o aumento da temperatura e, por esta razão, a perda dielétrica também aumenta. A frequência característica de relaxação, que pode ser identificada pelo pico da curva da perda dielétrica (Fig.2.42), não aparece na Fig.2.44-c. De acordo com Klass, ou as condições de cisalhamento atrapalham o processo de relaxação ou então o ponto de máximo ocorre em  $f < 30$  Hz.

### **2.4.3 Efeito do Campo Elétrico e da Concentração na Polarização Interfacial das Partículas**

Da mesma forma que a fração de partículas de um fluido ER é um parâmetro eletro-reológico importante capaz de alterar sua eletroviscosidade  $\eta_E$ , ela também influencia o comportamento dielétrico da suspensão.

A Fig.2.45 mostra os resultados obtidos por Klass [klass-67] para suspensões de sílica. Quando a porcentagem em volume da fase dispersa é baixa, as duplas camadas das partículas estão bem distantes umas das outras. Assim, aumentando-se a intensidade do campo elétrico tem-se uma maior eletroviscosidade, uma maior constante dielétrica (já que esta é uma medida do grau de polarização) e uma maior perda dielétrica (Fig.2.45-(a), (d), (e)). Com o aumento da concentração de partículas, as duplas camadas das partículas começam a interagir entre si, mesmo quando  $E = 0$  (isso ocorre quando a distância entre elas é igual à metade do diâmetro de uma partícula, o que corresponde a 20% em volume para suspensões com partículas do mesmo tamanho). Assim, o fluido passa a exibir um comportamento não-newtoniano. A altas concentrações de fase dispersa ( $\approx 45\%$ ), aumentando-se o campo elétrico em quatro vezes (de 0,79 a 3,15 kV/mm) a viscosidade aparente fica cerca de treze vezes maior, enquanto que o mesmo aumento para baixos campos elétricos ( $3,9 \times 10^{-3}$  a  $15,7 \times 10^{-3}$  kV/mm) faz com que  $\eta_A$  tenha um acréscimo de somente 5% (Fig.2.45-(a)). Quando se tem altas concentrações de partículas e campos elétricos intensos, as duplas camadas, além de interagirem umas com as outras, podem se sobrepor [klass-67]. O aumento dessas interações faz com que o fluido ER tenha uma eletroviscosidade maior. Entretanto, apesar de, neste caso, a polarização por unidade de volume de fluido ER ser maior (devido à maior concentração de partículas), a capacidade relativa de se armazenar mais energia elétrica começa a diminuir com o aumento do campo. Assim, a constante e a perda dielétricas podem atingir um máximo e, a partir daí, começarem a decrescer com o campo, já que as duplas camadas estão completamente polarizadas e inicia-se um efeito de saturação (Fig.2.45-(b) a Fig.2.45-(e)). Este mesmo comportamento é observado em fluidos ER que contenham componentes polares nas partículas.

De acordo com o artigo de Jordan e Shaw [jord-89], para fluidos com amido hidratado,  $k'$  inicialmente aumenta com o campo e depois se estabiliza; todavia, para fluidos à base de sílica gel, o contrário é observado, sendo que para alguns materiais a direção da mudança depende da temperatura e da concentração de partículas.

#### 2.4.4 Efeito da Condutividade das Partículas no Desempenho ER

Segundo alguns autores [bloc-87], partículas metálicas não fornecem fluidos ER que



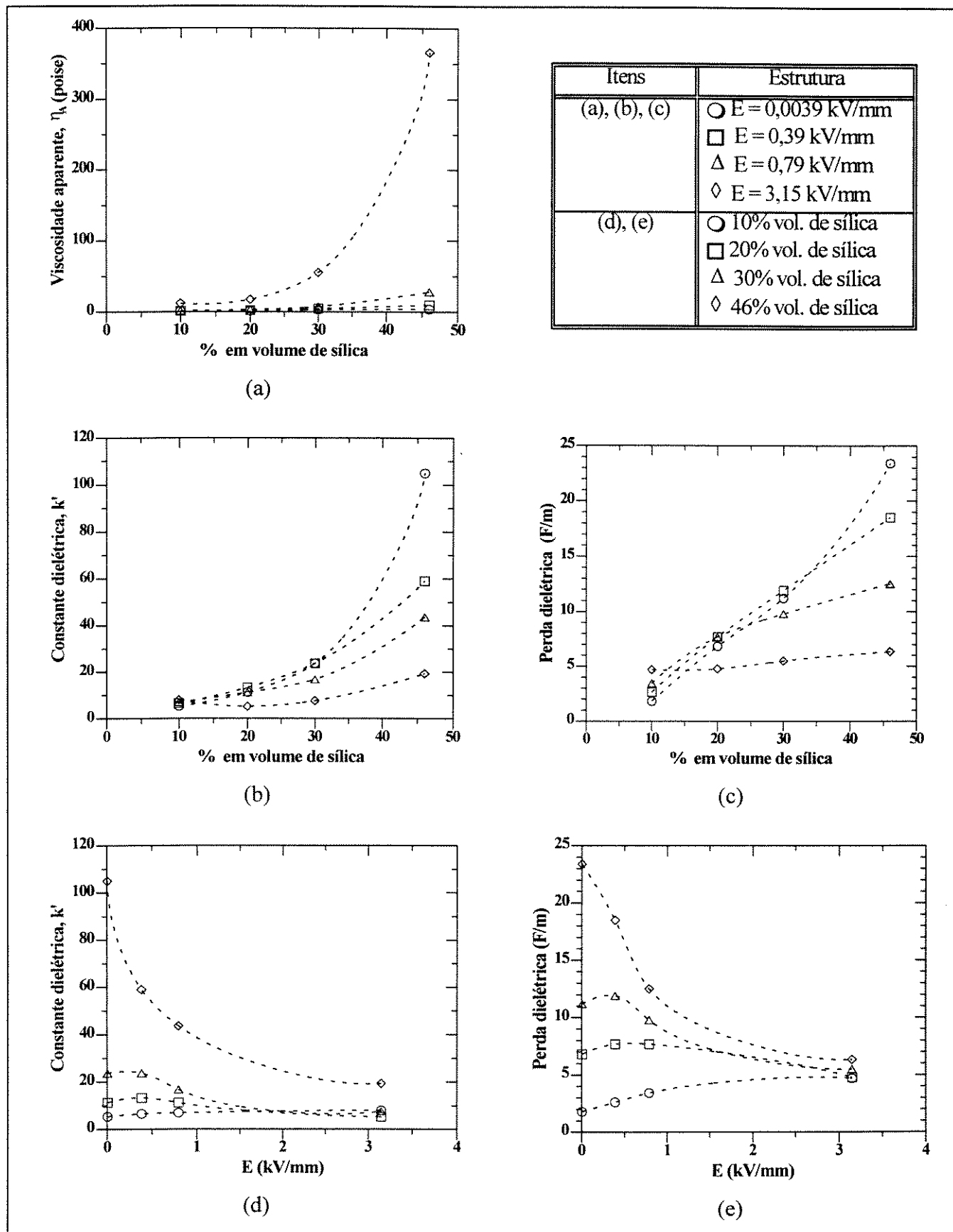


Fig.2.45 - Efeito da % em volume de sílica em: (a)  $\eta_a$ ; (b)  $k'$ ; (c)  $k''$ . Efeito do campo elétrico em: (d)  $k'$ ; (e)

$k''$  ( $T = 65^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 23,6 \text{ s}^{-1}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $D = 0,25 \text{ mm}$ ) - [klass-67].

apresentem um bom desempenho. A justificativa encontrada por eles é que, quando a polarização ocorre de forma muito fácil, ela pode levar a estruturas fracas devido ao fato de as forças (eletrostáticas e/ou inerciais) que reorientam as partículas agirem muito mais prontamente se a polarização sofrer uma rápida relaxação. Assim, se o fluido ER estiver escoando, uma polarização rápida pode significar uma tendência contínua ao rearranjo da estrutura fibrosa e um regime muito dinâmico para haver qualquer interação entre as partículas [bloc-90]. Além disso, bons condutores podem romper o dielétrico com um número limitado de fibras ao longo dos eletrodos devido à alta intensidade de corrente elétrica. Por outro lado, partículas que se polarizam muito lentamente também formam estruturas fibrosas fracas, pois a rotação das mesmas (devido ao escoamento do fluido ER) pode fazer com que o tempo para separação de cargas e reconstrução da polarização seja insuficiente. De acordo com Block e Kelly [bloc-87], o tempo de relaxação para a polarização de partículas condutoras imersas em isolantes depende da condutividade da fase dispersa. Sendo assim, a condutividade pode ser um fator de influência na seleção de partículas eletro-reologicamente ativas.

Inoue [inoue-89] estudou o comportamento de esferas de alumínio ( $20\ \mu\text{m}$ ) envoltas por uma fina camada de material não-condutor (com uma espessura ótima de  $0,2\ \mu\text{m}$ ) e imersas em dimetil siloxano. Os resultados revelaram um desempenho superior ao de fluidos à base de partículas de sílica.

Block e Kelly estudaram a condutividade de um grupo de polímeros – poli(aceno quinonas) – (Fig.2.46 e Tab.2.4) e mostraram qual a sua influência no comportamento de  $\tau_y$  para várias intensidades de campo cc (Fig.2.47). Segundo eles, o PNQR e o PAQR fornecem

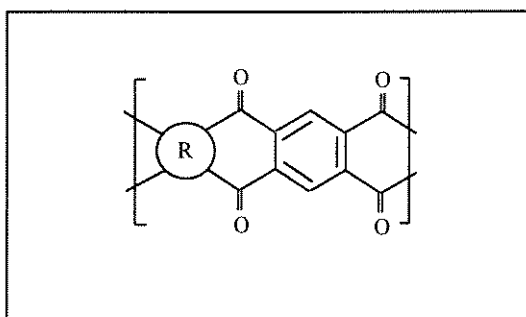
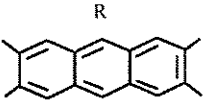
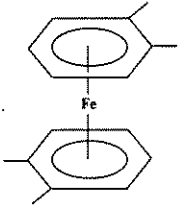
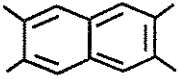
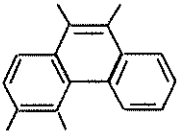
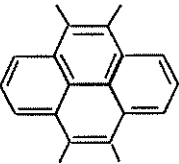
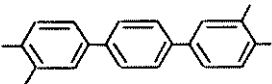


Fig.2.46 - Estrutura geral de poli(aceno quinonas) – na Tab.2.4 estão os radicais R.

Tab.2.4 - Estrutura dos radicais e condutividade de poli(aceno quinonas) – [bloc-87].

| Código | Estrutura   | $\sigma$ (S/cm) |
|--------|---|-----------------|
| PAQR   |    | $10^{-6}$       |
| PFQR   |    | $10^{-9}$       |
| PNQR   |  | $10^{-7}$       |
| PPhQR  |  | $10^{-5}$       |
| PPQR   |  | $10^{-4}$       |
| PTQR   |  | $10^{-11}$      |

fluidos ER anidros cuja atividade eletro-reológica é comparável à dos fluidos ER convencionais. Os demais polímeros são menos ativos, apresentando um valor mais baixo para  $\tau_y$  em condições similares. Este comportamento está de acordo com a teoria, sustentada por eles, de que a efetividade do fluido ER depende da condutividade das partículas. Logo, na opinião de Block, o PTQR é inativo devido à sua baixa condutividade ( $5 \times 10^{-11}$  S/cm) e ao seu baixo e lento nível de polarização; enquanto que o PPQR ( $\sigma = 10^{-4}$  S/cm) polariza muito rápido para que seja altamente efetivo (Fig.2.47). Em seus estudos, Yatsuzuka [yats-95], chegou à conclusão de que deve existir um valor ótimo de condutividade superficial da partícula para maximizar o efeito eletro-reológico, e de acordo com Block [bloc-92], este valor deve estar entre  $10^{-8}$  e  $10^{-5}$  S/cm.

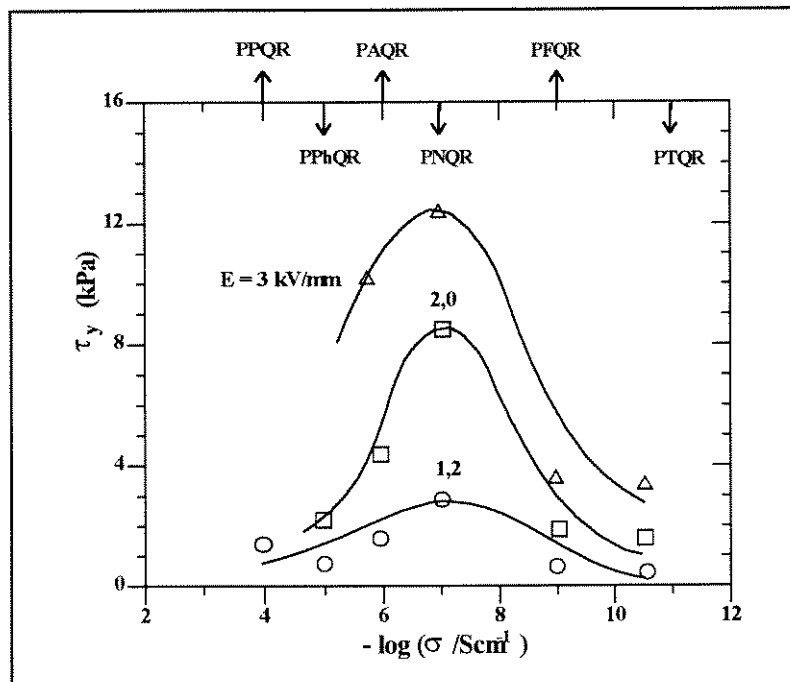


Fig.2.47 - Tensão mínima de escoamento em função da condutividade para partículas de poli(aceno quinonas) (35% em volume) dispersas em parafina clorada - [bloc-87].

Segundo Conrad [conra-91] a condutividade  $\sigma$  é muito sensível à temperatura e, para sistemas à base de zeólito em fluido de silicone, seu valor está compreendido dentro de uma faixa de  $10^{-10}$  a  $10^{-6} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$  quando a temperatura aumenta de  $21^\circ\text{C}$  para  $162^\circ\text{C}$ . Ele também observou o aumento da condutividade com o campo elétrico.

Kojima [koi-94] sintetizou uma única classe de compostos conjugados formados por derivados de um composto aromático policíclico condensado com um grupo fenil e um oligômero difenildiacetileno pelo enriquecimento do difenildiacetileno sob elevadas pressões. Kojima observou que a condutividade do composto aumentava de  $10^{-15}$  a  $10 \text{ Scm}^{-1}$  com o aumento da pressão de recozimento.

#### 2.4.5 Efeito de Campos Elétricos Alternados e Contínuos

Os fluidos ER exibem efeito ER tanto em campos elétricos alternados como em contínuos, sendo que, de modo geral, o mesmo é mais pronunciado em campos cc do que em ac [oppe-89]. Entretanto, para fluidos compostos por partículas esféricas de alumínio cobertas por material não-condutor foi observado o oposto [inou-89]. Neste caso, o fluido submetido a um campo elétrico alternado apresentou valores muito superiores para a tensão de cisalhamento ( $\tau_{EG} = \tau_{(E \neq 0)} - \tau_{(E = 0)}$ ), indicando uma diferença básica entre dispersões com partículas hidratadas e anidras no tocante ao mecanismo de indução do efeito ER. Em compensação, a densidade de corrente para campo contínuo se manteve praticamente constante ( $\sim 0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) com o aumento da intensidade de E, enquanto que para campos alternados houve um aumento superior a 3000% (Fig.2.48).

Além disso, Inoue realizou testes com fluido à base de partículas de alumínio submetidas a um campo elétrico pulsativo cc e comparou os resultados com os observados com o campo ac. Segundo ele,  $\tau_{EG}$  para campo pulsativo cc apresentou um aumento significativo, chegando a valores próximos do campo ac. Com relação à densidade de corrente  $j$ , observou-se um comportamento similar. Estes resultados sugerem que mudanças na intensidade do campo elétrico, mais que a inversão da polaridade, são responsáveis pelo aumento no efeito ER do fluido testado. De acordo com os autores, as cargas induzidas na superfície da camada não-condutora das partículas ( $\delta^+$  e  $\delta^-$ ) por um campo elétrico externo cc podem tender a se relaxar dentro da partícula ou se combinarem através de contato entre as partículas, e então, decair. Em campos ac ou pulsativos cc, a indução ocorre a uma taxa mais rápida que o decaimento de carga, resultando, assim, em  $\tau_{EG}$  relativamente alta. Para um campo elétrico constante cc com rápido decaimento de carga e nenhuma indução de carga

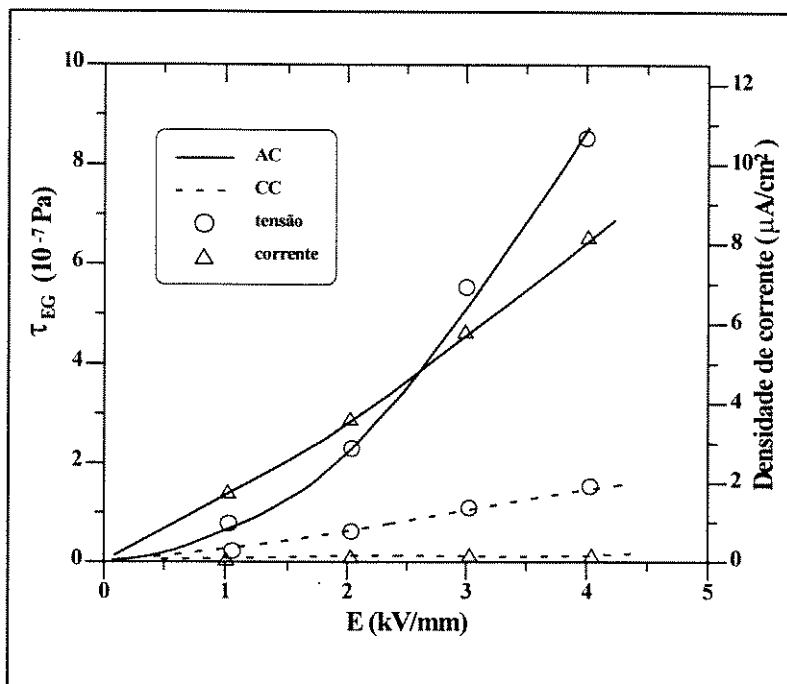


Fig.2.48 - Efeito do tipo de campo elétrico (cc ou ac) na tensão  $\tau_{EG}$  e na densidade de corrente (espessura da camada não-condutora:  $0,2 \mu\text{m}$ ) - [inou-89].

adicional, espera-se um valor de  $\tau_{EG}$  bem inferior. Também verificou-se que a frequência de pulsação do campo cc altera  $\tau_{EG}$ .

Spurk e Huang [spur-94] observaram que a eletroviscosidade de fluidos à base de sílica em fluido de silicone diminui com o tempo para campos elétricos contínuos e se mantém constante para campos alternados.

De acordo com o artigo de Ginder [gind-95], fluidos ER que apresentam uma grande diferença de condutividade entre a partícula e o fluido-suporte são eletro-reologicamente ativos em campos elétricos contínuos; enquanto que fluidos com grande diferença na constante dielétrica podem apresentar atividade ER somente em campos alternados.

## 2.5 Dispositivos ER

O desempenho ideal de dispositivos que utilizam fluidos ER geralmente é atingido através de uma análise de custos e benefícios. Dentre as condições importantes de um projeto estão consumo de potência elétrica e características de transferência de calor (a qual implica em um aumento de temperatura e, conseqüentemente, influencia os requisitos de potência). O motor de um veículo trabalha em uma faixa de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$  [bloc-92] e o calor gerado pelo efeito Joule pode apresentar problemas de dissipação deste calor, particularmente quando se opera a altas temperaturas. De acordo com Duclos [duclo-88] os fluidos ER disponíveis têm aumento de consumo de potência elétrica de 100 a 1000 vezes a  $100^{\circ}\text{C}$  quando comparados com seu valor à temperatura ambiente; e também têm sua condutividade dobrada a cada  $7 - 10^{\circ}\text{C}$ . Além disso, os materiais isolantes elétricos utilizados com esses fluidos precisam ter uma alta tensão de ruptura dielétrica e alta resistividade elétrica, também estabilidades mecânica e química.

Na literatura sobre eletro-reologia encontram-se algumas aplicações para os fluidos ER, tais como: válvulas, freios, amortecedores, isolantes de vibração, embreagens, etc. A seguir estão os esquemas de alguns destes dispositivos.

### 2.5.1 Embreagem

A aplicação mais simples de se prever para um fluido ER é uma embreagem, a qual consiste de dois discos, entre os quais é colocado um fluido ER. Se nenhum campo elétrico for aplicado através do fluido, o disco motriz pode girar produzindo um efeito mínimo no outro disco. Com a aplicação do campo, o fluido ER (que passa a ter um comportamento reológico que, geralmente, pode ser descrito pelo modelo de Bingham) apresenta uma tensão mínima de escoamento, a qual faz com que ambos os discos girem juntos. Assim que o campo é removido, o fluido ER volta a ter um comportamento newtoniano, sendo que um dos discos pára de girar, enquanto que o outro continua seu movimento rotatório (Fig.2.49).

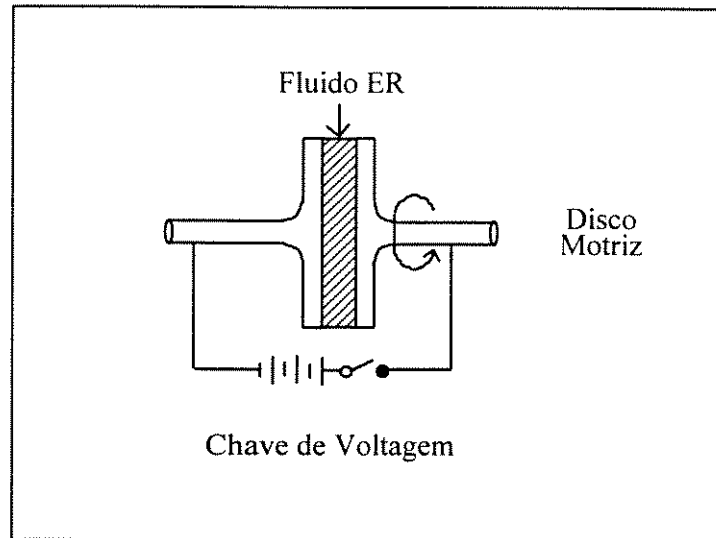


Fig.2.49 - Modelo de uma embreagem eletro-reológica.

De acordo com o artigo publicado na revista “Automotive Engineering” [duclo-88], para uma embreagem engrenada de um automóvel comum, é necessária uma transmissão de torque de 500 N.m com velocidade relativa de zero entre os eixos; e, quando desengrenada, um torque de 5 N.m e uma velocidade relativa de 700 rpm. Foi feita uma estimativa do volume de fluido necessário e da potência consumida por uma embreagem com um desempenho desejado. Desconsiderando-se os requisitos da potência, o autor chegou à conclusão de que somente o volume de fluido necessário ( $0,09 \text{ m}^3$ ) já torna o projeto impraticável, pois se o raio do disco da embreagem for de 0,1 m, ela terá um comprimento de 2,8 m; caso este comprimento seja de 0,1 m, seu raio terá que ser de 0,5 m. Estas dimensões foram calculadas sem se levar em consideração o volume dos discos da embreagem. Além disso, o consumo de potência é muito alto, mesmo à temperatura ambiente (devido ao volume de fluido necessário). Qualquer aumento adicional de temperatura aumenta ainda mais a potência requerida. Duclos estimou que a tensão mínima de escoamento que um fluido ER deveria ter para ser usado em uma embreagem de automóvel (com dimensões, custo e potência razoáveis), teria que ser maior do que 20 kPa. A seguir (Fig.2.50) estão dois modelos de embreagens sugeridos por Hartsock, Novak e Chaundy [hart-91].

Monkman [monk-91] fez testes com uma embreagem onde colocava uma camada de tecido entre os eletrodos e o fluido eletro-reológico e observou que havia um aumento significativo no efeito ER produzido. O autor atribuiu o fenômeno ao fato de o campo elétrico



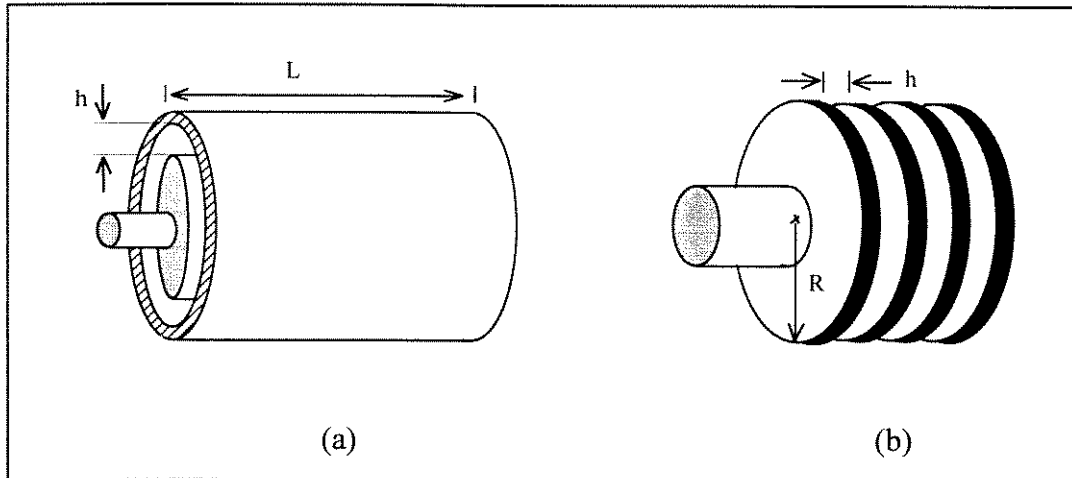


Fig.2.50 - Embreagens de (a) cilindros concêntricos e de (b) discos paralelos – [hart-91].

possibilitar a polarização do tecido e, assim, contribuir para o aumento da atividade ER do sistema.

### 2.5.2 Amortecedor

Hartsock, Novak e Chaundy [hart-91] analisaram dois tipos de amortecedores: com eletrodos fixos e com eletrodos deslizantes (Fig.2.51). No amortecedor de eletrodos fixos, a força de amortecimento é gerada pelo aumento da pressão causada pelo efeito ER (pois há a restrição do escoamento ao longo dos cilindros concêntricos devido à formação de fibras). No amortecedor de eletrodos deslizantes, a força é gerada tanto pela tensão de cisalhamento quanto pelo aumento de pressão resultante do efeito ER. Segundo os autores, os fluidos ER atualmente existentes não são eficientes para serem usados em amortecedores; os fluidos de “médio prazo” (fluidos a serem desenvolvidos dentro de 3 ou 4 anos) estão bem próximos de serem usados em amortecedores de eletrodos deslizantes; porém, somente os fluidos a serem formulados num período de 10 a 20 anos terão uso em ambos os tipos de amortecedor. Na tabela 2.5, estão listados parâmetros que permitiram que os autores chegassem a estas conclusões.

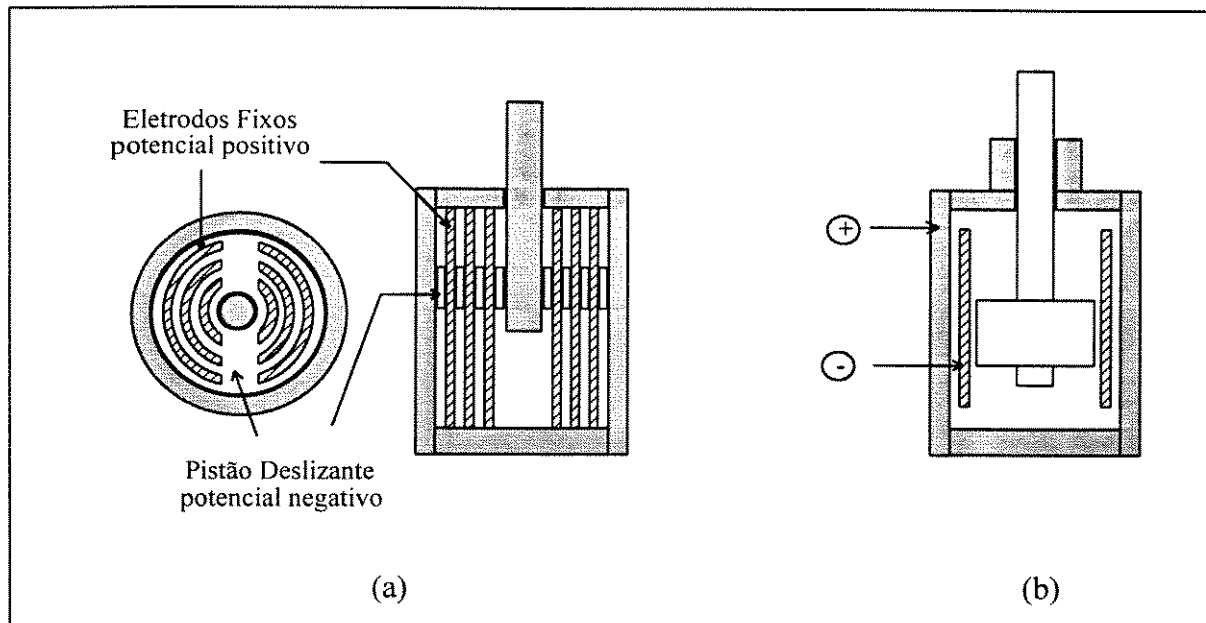


Fig.2.51- Amortecedores com (a) eletrodos deslizantes e com (b) eletrodos fixos de cilindros concêntricos – [hart-91].

Tab.2.5 - Resultados analíticos de absorvedores de choque [hart-91]

|                               | Espaçamento mínimo entre eletrodos (mm) | Voltagem requerida @ 4 kV/mm (V) | Comprimento mínimo dos eletrodos (mm) | Atingiu o objetivo? |
|-------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| <b>Amortecedor Fig.2.51-a</b> |   |                                  |                                       |                     |
| Objetivo                      | 3,0                                     | 12000                            | 100                                   | —                   |
| Fluidos atuais                | 4,2                                     | 16800                            | 961                                   | não                 |
| Fluidos de “médio prazo”      | 1,1                                     | 4400                             | 118                                   | próximo             |
| Fluidos de “longo prazo”      | 0,1                                     | 2000                             | 50 <sup>(a)</sup>                     | sim                 |
| <b>Amortecedor Fig.2.51-b</b> |   |                                  |                                       |                     |
| Objetivo                      | —                                       | —                                | 300 <sup>(b)</sup>                    | —                   |
| Fluidos atuais                | 5,7                                     | 22800                            | 2372                                  | não                 |
| Fluidos de “médio prazo”      | 1,2                                     | 4800                             | 187                                   | sim                 |
| Fluidos de “longo prazo”      | 0,5                                     | 2000                             | 10 <sup>(a)</sup>                     | sim                 |

(a) valores para espaçamento mínimo entre eletrodos de 0,5 mm

(b) o comprimento permitido para o prato do amortecedor de eletrodos fixos é 3 vezes maior que o para eletrodos deslizantes para um mesmo deslocamento relativo.

De acordo com Duclos [duclo-88], o critério de projeto de amortecedores é de 1000 N quando ativo e 100 N quando desligado e velocidade relativa de movimento de 0,5 m/s. Segundo o artigo, o volume de fluido ER necessário é da ordem de 0,1 a 0,6 litros, o que fornece dimensões razoáveis para amortecedores. Para o amortecedor com eletrodos deslizantes, sugerido pelo autor, produzir uma força de 1000 N (Fig.2.52-a) é necessária uma área de  $0,5 \text{ m}^2$  (uma vez que a tensão mínima de cisalhamento é de 2 kPa). Com isso, o espaço entre os eletrodos deve ser de 0,25 mm. Já para o amortecedor com eletrodos fixos (Fig.2.52-b) são necessários 10 cilindros concêntricos com espaçamento de 1 mm entre eles. Estes não são projetos fisicamente impossíveis, como diz o artigo, entretanto representam um desafio industrial. Segundo Duclos, tanto o amortecedor quanto a embreagem revelam a ineficiência dos fluidos ER existentes atualmente.

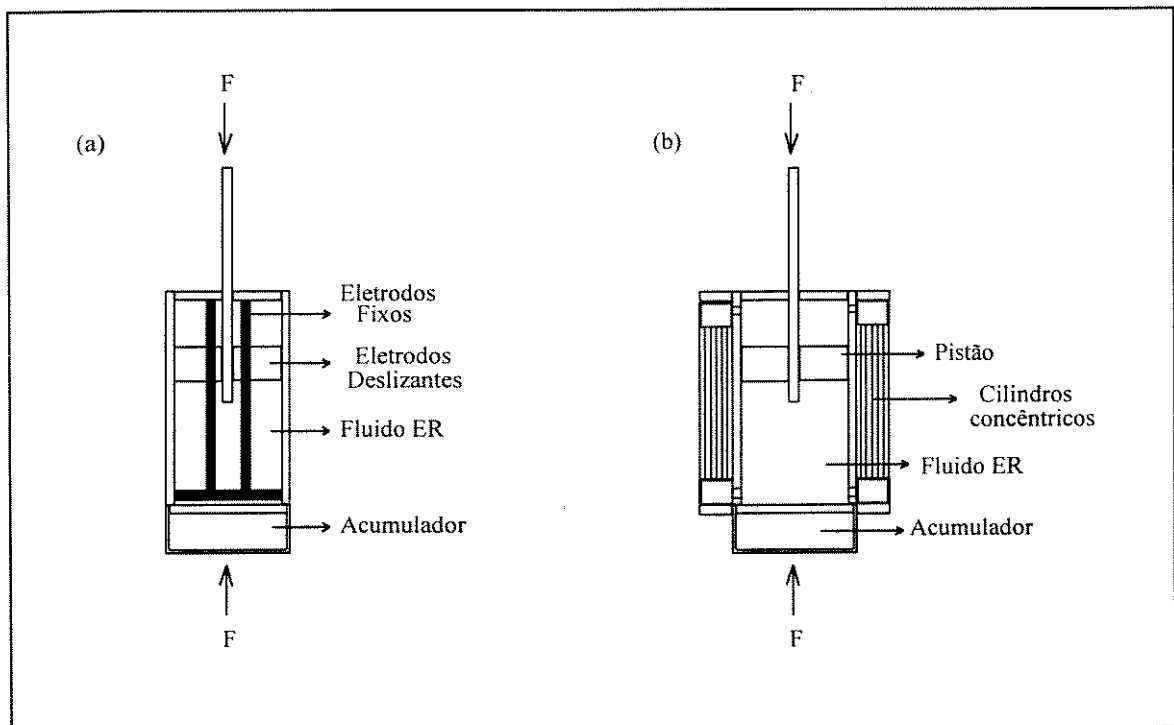


Fig.2.52 - Exemplos de amortecedores monotubos que utilizam fluidos ER – [duclo-88].

### 2.5.3 Suporte para Máquinas

Duclos [duclo-88] propôs um suporte para máquinas (Fig.2.53) que contém duas câmaras separadas por uma válvula ER composta por eletrodos fixos. Este projeto de suporte visa obter um diferencial de pressão de 10 kPa para a válvula em funcionamento, um diferencial de 0,1 kPa para a válvula fechada e uma vazão de  $3,9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  (39 ml/s). Segundo o autor do artigo, um suporte de máquinas com estas especificações é viável, mesmo para os fluido ER já existentes.

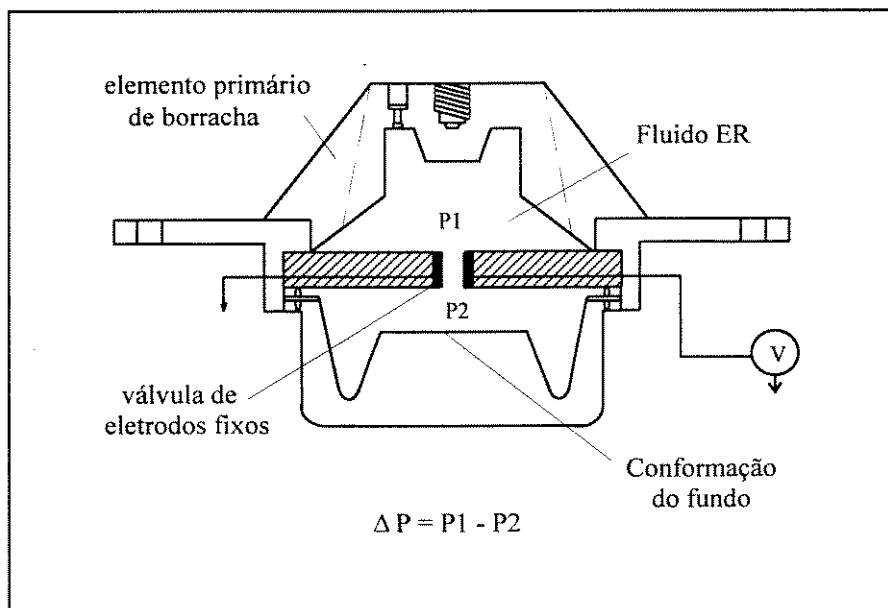


Fig.2.53 - Suporte de máquinas que utiliza fluido ER – [duclo-88].

Hartsock, Novak e Chaundy [hart-91] também desenvolveram um suporte para máquinas (Fig.2.54) e estudos revelaram que este tipo de dispositivo já tem as condições necessárias para ser fabricado (Tab.2.6).

Esses são alguns dos dispositivos eletro-reológicos apresentados na literatura. Entretanto, o controle desses equipamentos pode ser impossível de ser realizado caso o comportamento reológico do fluido ER não seja totalmente conhecido. Sabe-se que quando um fluido eletro-reológico, submetido a um campo elétrico, sofre a ação de uma força cisalhante perpendicular à direção do campo, a relação entre a tensão resultante e a taxa de

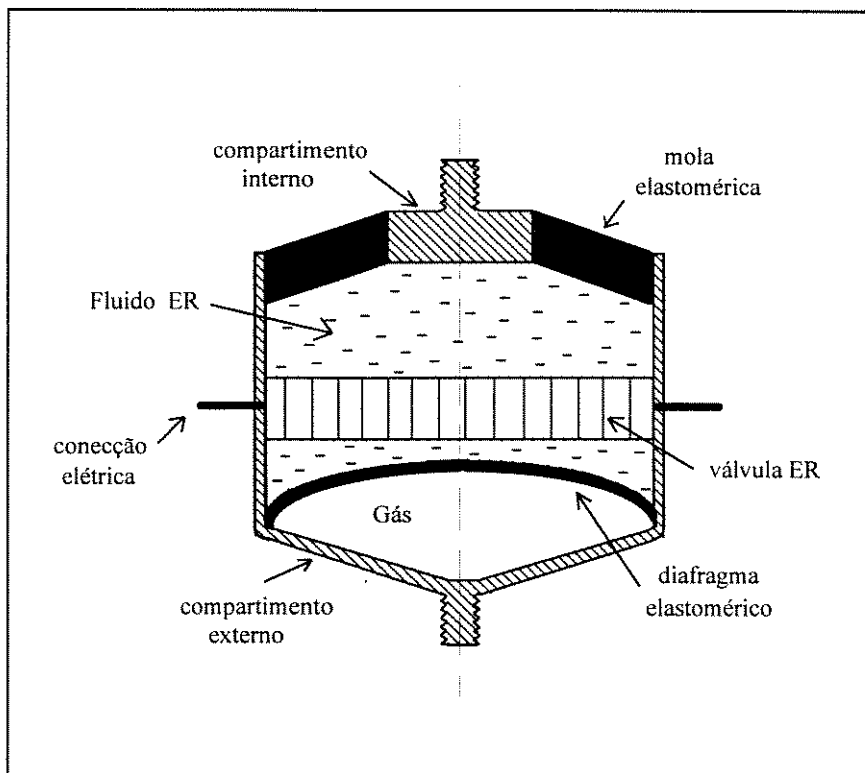


Fig.2.54 - Suporte para máquinas – [hart-91].

Tab.2.6 - Resultados analíticos de um suporte para máquinas – [hart-91].

|                             | Espaçamento<br>entre<br>eletrodos<br>(mm) | Voltagem<br>requerida @<br>4 kV/mm<br>(V) | Diâmetro<br>externo<br>(mm) | Comprimento<br>do orifício<br>(mm) | Volume<br>requerido<br>(cm <sup>3</sup> ) | Atinge o<br>objetivo? |
|-----------------------------|---|---|-----------------------------|------------------------------------|---|-----------------------|
| Objetivo                    | 3,0                                       | 12000                                     | 75                          | 10                                 | 25  | –                     |
| Fluidos existentes          | 2,0                                       | 8000                                      | 70                          | 7                                  | 14  | sim                   |
| Fluidos de “médio<br>prazo” | 1,0                                       | 4000                                      | 48                          | 1.3                                | 0.7                                       | sim                   |
| Fluidos de “longo<br>prazo” | 0,5                                       | 2000                                      | 19                          | 0.6                                | 0,004                                     | sim                   |

deformação pode ser aproximada pelo modelo de Bingham ( $\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_y$ ). A dificuldade surge no fato de que a tensão mínima de escoamento  $\tau_y$  é função da intensidade do campo elétrico, porém ela pode ser contornada através do conhecimento da relação:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \alpha E^m \quad (2.7)$$

onde  $\alpha$  e  $m$  são constantes específicas para um determinado fluido ER, podendo ser determinadas com um reômetro tipo couette.

Quanto ao controle dos dispositivos ER, existem vários artigos sobre o assunto, sendo que dentre eles podem-se citar o controle semi-ativo de vibrações (que tem como vantagens sobre o controle de sistemas totalmente ativos o aumento da estabilidade e a diminuição da potência requerida [coul-89]), o controle de rede neural adaptativo [mori-93] e o sistema de controle baseado na regra da lógica nebulosa [choi-94]. Segundo Morishita e Ura [mori-94], a técnica de controle através de redes neurais é um dos mais adequados para os dispositivos ER, uma vez que é muito difícil desenvolver um sistema de controle convencional devido à não-linearidade do efeito ER quanto à intensidade do campo elétrico, à temperatura ou à taxa de cisalhamento.

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

#### 3.1 Escolha e Preparo dos Materiais ER

##### 3.1.1 Escolha dos Materiais

Inicialmente foram feitos testes preliminares para se definir quais seriam os materiais a serem utilizados, e como deveriam ser as condições de trabalho. Para isso foram testados vários tipos de fluidos no reômetro RV-20 da Haake (Fig.3.1), sendo analisada sua capacidade de serem, ou não, eletro-reológicos. O esquema deste reômetro é mostrado na Fig.2.3 sendo que o sensor utilizado foi o ZA15 (cilindros concêntricos com comprimento ( $L$ ) de 1,08 cm e espaçamento ( $D$ ) entre eles de 0,0545 cm).

Os testes preliminares consistiam na determinação da curva reológica de cada um dos fluidos na ausência e na presença de campo elétrico ( $E = 0$  e  $E = 3$  kV/mm). A fonte de alta tensão era de corrente contínua, sendo que a tensão máxima de saída era de 12,5 kV e corrente máxima permitida pela fonte era de 10 mA. Os fluidos escolhidos para estes testes eram compostos por partículas polarizáveis (hidratadas ou não) dispersas em fluido de silicone (FS) de 500 cSt. A Tab.3.1 mostra os resultados obtidos para alguns dos materiais testados e na Fig.3.2 estão as suas respectivas curvas reológicas (tensão de cisalhamento  $\tau$  em função da

Tab.3.1 - Testes preliminares para verificar a possível atividade eletro-reológica de alguns fluidos (o fluido-suporte utilizado em todos os casos foi o fluido de silicone (FS) de 500 cSt).

| Partículas<br>(20% em peso) | Aditivo | Sedimentação**<br>* | $\tau @ 0 \text{ kV/mm,}$<br>$200 \text{ s}^{-1} \text{ e } 20^\circ\text{C}$<br>(Pa) | $\tau @ 3 \text{ kV/mm,}$<br>$200 \text{ s}^{-1} \text{ e } 20^\circ\text{C}$<br>(Pa) | Atividade<br>ER |
|-----------------------------|---------|---------------------|---|---|-----------------|
| amido                       | água    | pode ocorrer        | 265   | 959   | forte           |
| carboximetilcelulose        | –       | ocorre              | 261   | 1564  | forte           |
| sílica gel*                 | água    | ocorre              | 216   | 248   | fraca           |
| silicato de alumínio**      | água    | pode ocorrer        | 171   | 201   | fraca           |
| pantotenato de cálcio       | –       | ocorre              | 223   | 268   | fraca           |
| hidroclorotiazida           | –       | pode ocorrer        | 185   | 195   | fraca           |
| dióxido de titânio          | –       | ocorre              | 182   | 257   | fraca           |
| gelatina                    | –       | ocorre              | 184   | 583   | média           |
| óxido de zinco              | –       | ocorre              | 224   | 412   | média           |
| ácido tânico                | –       | não ocorre          | 764   | 813   | fraca           |
| oxibenzona                  | –       | ocorre              | 210   | 192   | ausente         |
| metilparabeno               | –       | ocorre              | 246   | 269   | fraca           |

Não foi possível realizar os testes para fluidos com sílica gel nas mesmas condições que os demais devido ao fato de a corrente elétrica ser maior que a permitida pela fonte de alta tensão ( $i = 10 \text{ mA}$ ). Portanto, as condições de teste foram alteradas:  $E = 1 \text{ kV/mm}$ ,  $T = 30^\circ\text{C}$  e  $C = 25\%$  (com 10.7% de água nas partículas).

\*\* Para o silicato de Al, usou-se  $C = 2,5\%$  (com 1,81 % de água nas partículas) devido à impossibilidade de realização dos testes a concentrações mais elevadas.

\*\*\* A verificação da sedimentação dos fluidos foi visual, após uma semana de repouso das suspensões.

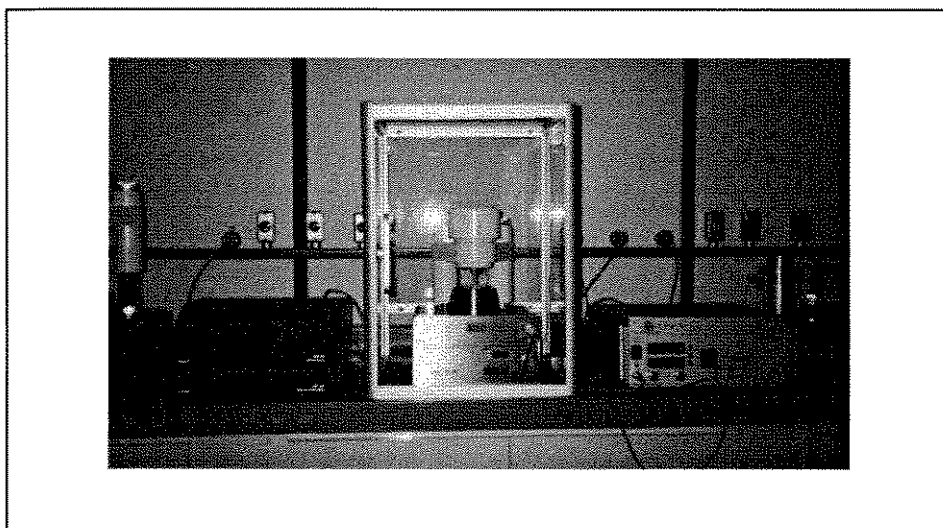


Fig.3.1 - Reômetro RV-20 da Haake usado para os testes com fluidos eletro-reológicos.



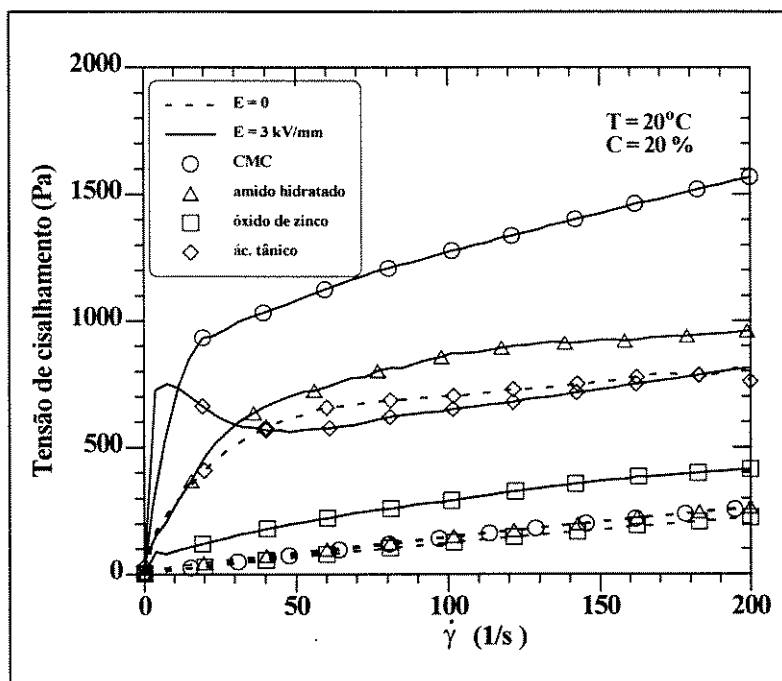


Fig.3.2 - Gráfico de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  para alguns dos fluidos testados.

taxa de cisalhamento  $\dot{\gamma}$ ).

Para uma análise mais detalhada sobre o comportamento reológico e mecânico de fluidos eletro-reológicos (ER), foram escolhidos dois dos fluidos apresentados na tabela 3.1. O critério de escolha baseou-se no melhor desempenho ER em testes rotacionais; ou seja, os materiais escolhidos foram aqueles que apresentaram maior valor de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) para  $\dot{\gamma} = 200 \text{ s}^{-1}$  e  $E = 3 \text{ kV/mm}$ . Desta forma, os fluidos à base de amido hidratado e de carboximetilcelulose (CMC) foram selecionados. Após o estudo do comportamento reológico e mecânico dos mesmos, foi testada uma embreagem cujo funcionamento dependia desses materiais.

### 3.1.2 Preparo das Suspensões

Foram preparados dois tipos de fluidos eletro-reológicos (FER): um à base de amido hidratado em fluido de silicone (fluido ER convencional) e outro à base de

carboximetilcelulose (CMC) em fluido de silicone (fluido ER anidro). Na Tab.3.2 estão listados os fornecedores dos materiais usados na formulação de ambos os fluidos estudados, enquanto que na Fig.3.3 é mostrada a análise granulométrica feita para o amido e para o CMC. Esta análise foi realizada em duas etapas. A primeira dessas etapas foi feita por peneiramento (Fig3.3-a) sendo que a trama das peneiras tinha diâmetro de 149, 177, 210, 297, 420 e 590  $\mu\text{m}$

Tab.3.2 - Fornecedores das matérias-primas usadas na formulação dos fluidos ER estudados neste trabalho.

| Material           | Fornecedores  |
|--------------------|---|
| amido              | Maizena® fornecida por Refinações de Milho Brasil LTDA            |
| CMC                | de grau farmacêutico, fornecido por Galena Química e Farmacêutica |
| fluido de silicone | dimetilsiloxano, fornecido por Dow Corning do Brasil              |

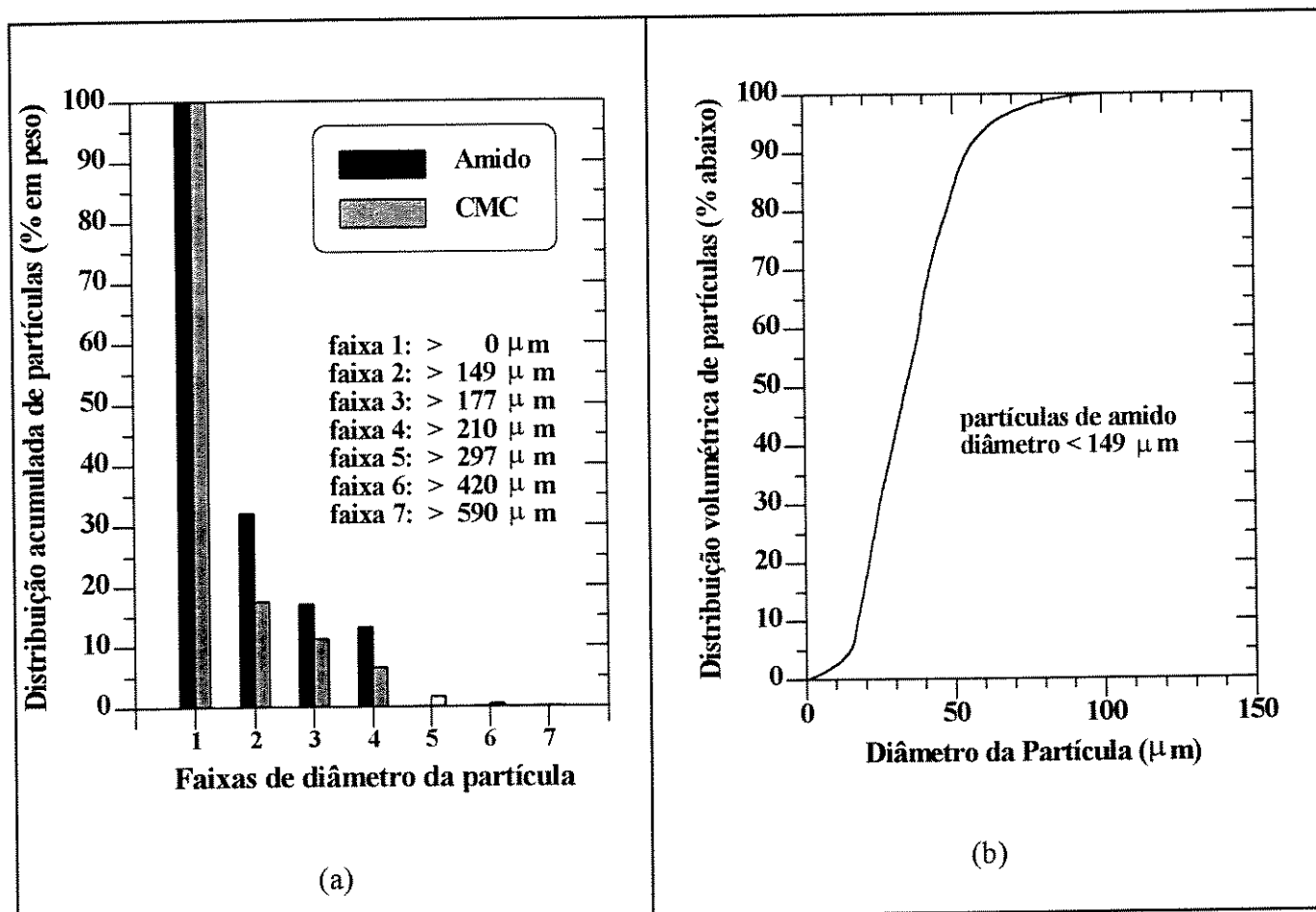


Fig.3.3 - Distribuição granulométrica das partículas usadas na formulação de fluidos ER obtida: (a) por peneiramento e (b) através do sistema de análise de tamanho de partículas Galai CIS-1.

590  $\mu\text{m}$ . Depois de peneiradas, as partículas com diâmetros menores que 149  $\mu\text{m}$  foram submetidas à segunda etapa da análise granulométrica. Nesta fase foi obtida a distribuição de tamanho de partículas para o amido (Fig3.3-b) através do analisador Galai CIS-1 (sistema de análise de tamanho de partículas baseado em difração de raio-laser). Para o CMC, não foi possível a conclusão da análise granulométrica para  $d < 149 \mu\text{m}$  devido a problemas mecânicos que surgiram no Galai CIS-1.

Os fluidos ER convencionais foram preparados da seguinte maneira: as partículas foram deixadas em ambiente úmido a fim de serem hidratadas, e em seguida foram adicionadas ao fluido-suporte na proporção desejada. Para saber qual a quantidade de água contida nas partículas, colocou-se um grama das mesmas em uma estufa a  $100^{\circ}\text{C}$  (por 3 horas) e, então, a quantidade de água pode ser calculada através da diferença de massa da amostra antes e depois da secagem. Quanto aos fluidos anidros, bastou-se acrescentar as partículas secas ao fluido-suporte na concentração desejada.

### 3.1.2.1 Estabilidade das Suspensões

A tabela 3.3 mostra a estabilidade dos fluidos eletro-reológicos com respeito à sedimentação de partículas. A verificação da sedimentação foi feita visualmente após uma semana de repouso dos fluidos ER. Através desta tabela, observa-se que todos os fluidos com CMC tiveram suas partículas decantadas, enquanto que para os fluidos ER à base de amido havia uma dependência da sedimentação com a concentração.

TAB.3.3 - Verificação visual da sedimentação de partículas nos fluidos ER estudados.

| <b>Tipo de Partícula</b> | <b>% em peso de partículas</b> | <b>ocorrência de sedimentação</b> |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Amido (FS – 100)         | 20                             | sim                               |
| Amido (FS – 500)         | 10 a 25                        | sim                               |
|                          | 30 a 40                        | não                               |
| Amido (FS – 1000)        | 20                             | não                               |
| CMC (FS – 100 e 1000)    | 20                             | sim                               |
| CMC (FS – 500)           | 10 a 30                        | sim                               |

Uma vez que todos os fluidos ER com potencial comercial são, atualmente, suspensões de uma fase sólida em um líquido (sistemas de uma única fase têm sido descobertos, mas são muito caros e inexplorados para oferecer potencial comercial), a suspensão precisa ser estabilizada para prevenir a sedimentação. A separação de fases pode causar perda do desempenho do fluido, entupimento dos caminhos de escoamento e outros problemas [wils-93]. Como já foi visto anteriormente, as técnicas para estabilizar suspensões incluem:

- ajuste da densidade do sólido ou fluido a fim de serem o mais próximas possível (o único problema disso é que esse ajuste só é exato para uma determinada temperatura);
- uso de surfactantes (limitado a sistemas que contenham água, sua presença apresenta o inconveniente de geralmente aumentar a condutividade dos mesmos);
- uso de partículas menores e mais fáceis de serem dispersas (entretanto, isso pode causar uma redução da magnitude e da velocidade do efeito ER).

Segundo Wilson [wils-93], até agora, o ajuste de densidade parece ser o melhor a ser feito; principalmente para sistemas anidros, para os quais ainda não estão disponíveis surfactantes. Neste trabalho eles não foram usados.

### 3.2 Abordagens Possíveis para Materiais ER

Na literatura, os materiais ER são analisados e caracterizados como se fossem líquidos muito viscosos. Entretanto, alguns autores chegam a classificá-los como sólidos. Jaggi, Woestman e Tao [jagg-89], acreditando na ocorrência de uma possível transição de fases em fluidos eletro-reológicos, definiram  $E_c$  como o campo elétrico em que há o início da solidificação de um fluido ER e determinaram seu valor para algumas amostras. Para eles,  $E_c$  é o menor campo elétrico a partir do qual o fluido ER consegue suportar seu próprio peso sem escoar quando colocado entre duas placas verticais.

Neste trabalho, foram exploradas essas duas abordagens, com uma ênfase especial na de sólidos. A seguir tem-se a descrição de como os fluidos ER foram tratados sob a óptica de líquidos viscosos e de sólidos.

### 3.2.1 Líquidos Viscosos

Estes testes foram feitos no reômetro RV-20 da Haake (Fig.3.1) utilizando o sensor ZA15 (cilindros concêntricos com  $L=1,08$  cm e  $D=0,0545$  cm) para campos elétricos contínuos até 4 kV/mm, taxa de cisalhamento de 0 a  $200\text{ s}^{-1}$  e temperatura entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ . Foram analisados os fluidos à base de amido e de CMC com respeito à variação de suas propriedades reológicas em testes com cisalhamento permanente em função da taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), do campo elétrico cc (E), da concentração de partículas (C), da viscosidade do fluido-suporte e da temperatura (T). Para cada um dos casos estudados, foi obtida a curva reológica do material ( $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$ ).

### 3.2.2 Sólidos

Sabe-se que a determinação das propriedades mecânicas de um material sólido é obtida por meio de vários ensaios, os quais são realizados através da aplicação de esforços sobre o mesmo. Com isso obtém-se a resistência do material a um certo tipo de esforço.

Alguns autores, baseados no gráfico da Fig.3.4, classificam os fluidos ER como sólidos quando sujeitos a campos elétricos altos. Sendo assim, neste trabalho os fluidos ER terão um tratamento semelhante ao de sólidos, ou seja, serão submetidos a alguns dos ensaios mecânicos feitos com materiais sólidos, com a diferença na forma de acondicionamento da amostra. É importante ressaltar que todos os dispositivos construídos para a realização dos ensaios mecânicos deste trabalho são inéditos, podendo ser aperfeiçoados.

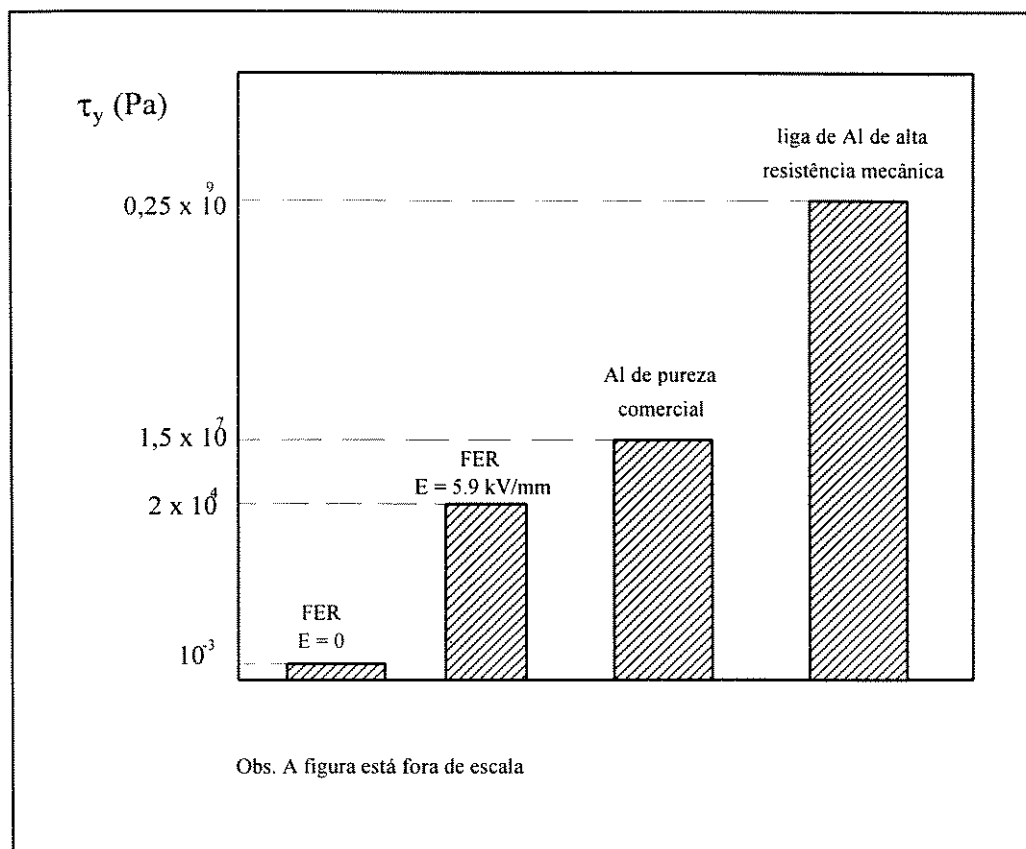


Fig.3.4 - Comparação entre as tensões mínimas de escoamento de fluidos ER e metais – [conr-91] [juvi-91].

### 3.2.2.1 Ensaios de Tração em Fluidos ER

O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. O corpo de prova, com formas e dimensões padronizadas, é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de um extensômetro, e é ensaiado até sua ruptura. Assim, se uma barra metálica cilíndrica de secção transversal uniforme  $S_0$  e comprimento  $L_0$  (Fig.3.5) for submetida a uma única força de tração ( $Q$ ) coincidente com seu eixo longitudinal, a tensão convencional  $\sigma$  produzida na barra e sua deformação de engenharia  $\epsilon$  são dadas por:

$$\sigma = \frac{Q}{S_0} \quad (3.1)$$

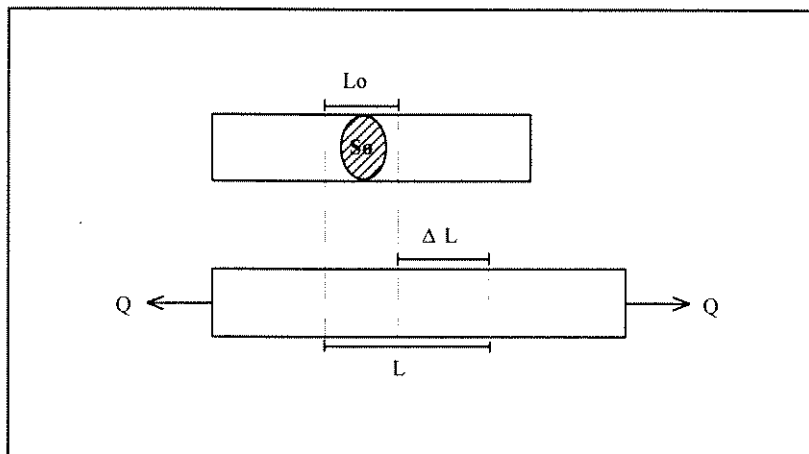


Fig.3.5 - Ensaio de tração em uma barra metálica.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

Através destes dados tem-se o gráfico de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$ , a partir do qual pode-se fazer a análise do material ensaiado.

No caso de fluidos ER existe uma dificuldade para realizar ensaios mecânicos: o fluido precisa estar alojado em um recipiente para que não escoe antes do início do ensaio. Entretanto, deve-se tomar cuidado para que o recipiente não tenha influência sobre os resultados finais. No caso de ensaios de tração, construiu-se o aparato da Fig.3.6 para acondicionar o fluido ER. Desta maneira, além de a amostra não ser destruída, é possível mudar-se o tipo de fluido contido no recipiente de cobre. Na Fig.3.7 é mostrada a montagem feita em laboratório para estes ensaios. Os fluidos testados foram preparados à base de amido e de CMC e foram ensaiados na MTS (um sistema que faz ensaios de tração, compressão e fadiga em materiais sólidos). Esta máquina tem capacidade de até 10 toneladas e os ensaios de tração foram conduzidos a uma velocidade de 0,02 mm/s. A temperatura inicial dos ensaios variou de 20 a 25°C, o campo elétrico contínuo foi até 4 kV/mm e a concentração das amostras variou de 10 a 40% em peso. Durante os ensaios de tração, a tensão  $V_0$  aplicada nos eletrodos era mantida constante, porém, como a distância entre os mesmos ia aumentando, o campo elétrico diminuía com o tempo segundo a equação:  $E = V_0 / (1 + 0,02 t)$ .

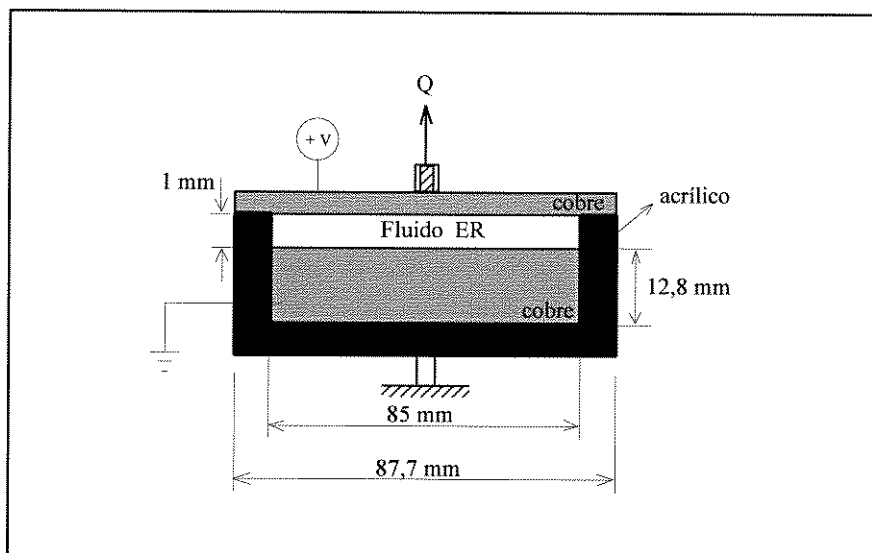


Fig.3.6 - Acondicionamento do fluido ER para os ensaios de tração.

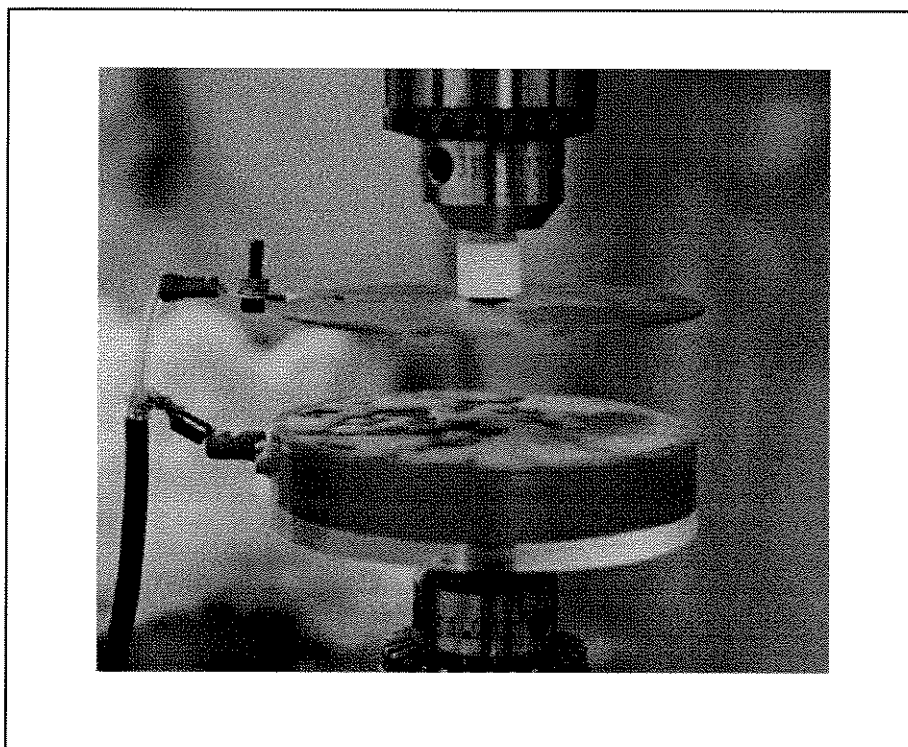


Fig.3.7 - Montagem para os ensaios de tração na MTS.



### 3.2.2.1.1 Correspondência entre os Dados Obtidos a Partir de Ensaio de Tração em Sólidos e em Materiais ER

Para o caso de metais, os dados obtidos neste tipo de ensaio são os limites de proporcionalidade  $\sigma_p$  (limite onde é válida a lei de Hooke), o limite de elasticidade  $\sigma_{el}$  (ponto abaixo do qual o material, depois de ser deformado, volta à sua forma original) e limite de resistência  $\sigma_t$  (tensão acima da qual o sólido se rompe quando submetido à tração) – Fig.3.8.

Para os materiais ER, a menos dos conceitos de limite de proporcionalidade e de elasticidade, há a necessidade de se redefinir o conceito de limite de resistência à tração. Durante os ensaios de tração, o material ER é deformado elasticamente, passando pelos limites de proporcionalidade e de elasticidade; a partir daí, ele apresenta uma região plástica em que a tensão vai aumentando com a deformação até atingir um valor máximo, a partir do qual começa a decrescer. Este valor máximo é definido como o limite de resistência do material e é onde grande parte das fibras da estrutura fibrosa são rompidas (Fig.3.9). A sua diferença com os sólidos é que se o campo elétrico for desligado depois do término do ensaio e a mistura for bem homogeneizada, o material volta a ter suas propriedades iniciais, podendo ser ensaiado novamente. Isso só não será possível se for atingida a tensão elétrica de ruptura do dielétrico e as partículas se queimarem.

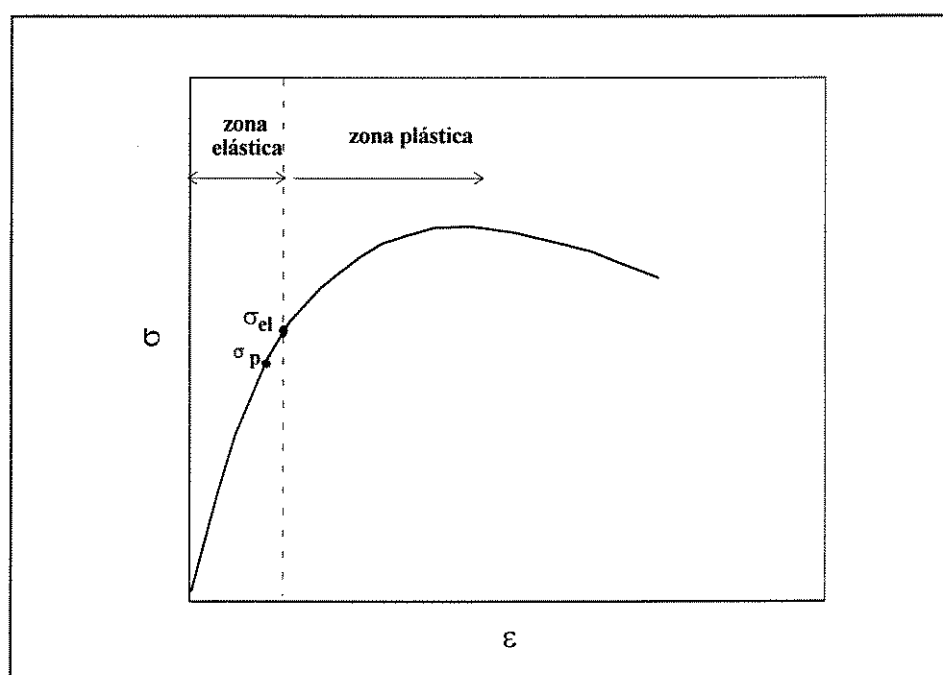


Fig.3.8- Gráfico tensão-deformação para metais ou liga metálica [souz-82].

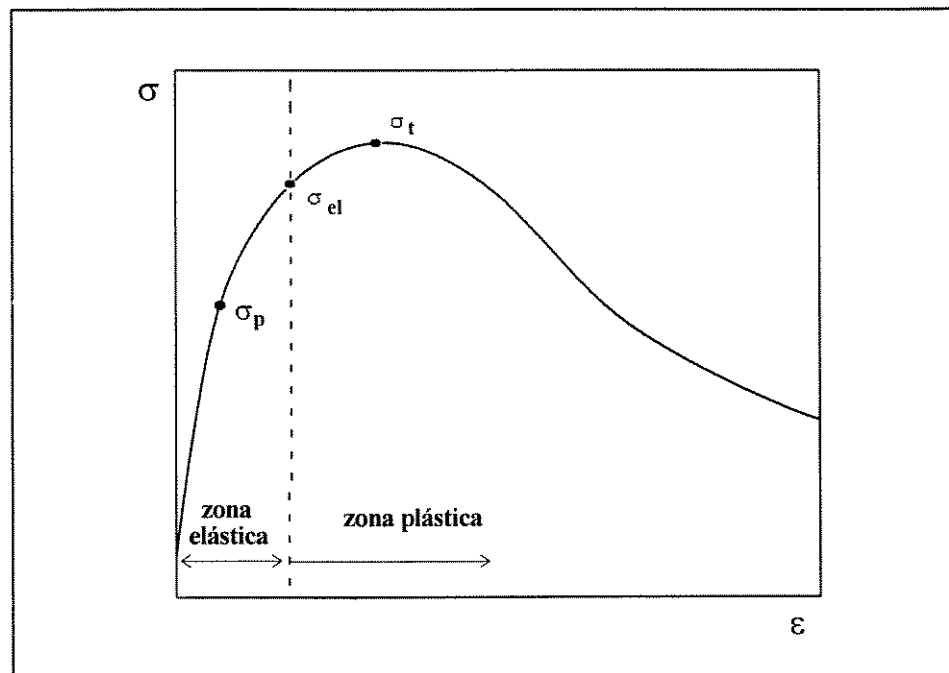


Fig.3.9 - Gráfico tensão-deformação para um material ER.

Com relação aos demais parâmetros apresentados na Fig.3.9, tem-se que o limite de elasticidade foi obtido através do segundo método de Johnson [souz-82], enquanto que o limite de proporcionalidade foi determinado por meio da parte reta da curva da tensão em função da deformação na região elástica (onde vale a lei de Hooke).

### 3.2.2.2 Ensaio de Fadiga em Fluidos ER

O limite de resistência de um determinado material através de um ensaio de tração é função da carga máxima atingida durante o ensaio, após a qual ocorre a ruptura do mesmo. Sendo assim, o material não se romperá com uma carga menor que aquela quando submetido a esforços estáticos. Entretanto, quando o material é submetido a esforços cíclicos, o mesmo pode se romper com uma carga bem inferior à carga máxima atingida na tração ou compressão. Nesse caso, tem-se a ruptura por fadiga do material. O número de ciclos de tensões suportada pelo corpo de prova até a ruptura é designado por  $N$ .

A Fig.3.10 ilustra três dos diversos ciclos de tensões possíveis para o ensaio de fadiga. A Fig.3.10-(a) mostra um ciclo onde as tensões máxima ( $S_{max}$ ) e mínima ( $S_{min}$ ) são iguais e de sinais opostos. Na Fig.3.10-(b), as tensões  $S_{max}$  e  $S_{min}$  são desiguais e positivas. Já o ciclo da Fig.3.10-(c) tem tensões positivas e negativas, sendo  $S_{max}$  e  $S_{min}$  também desiguais.

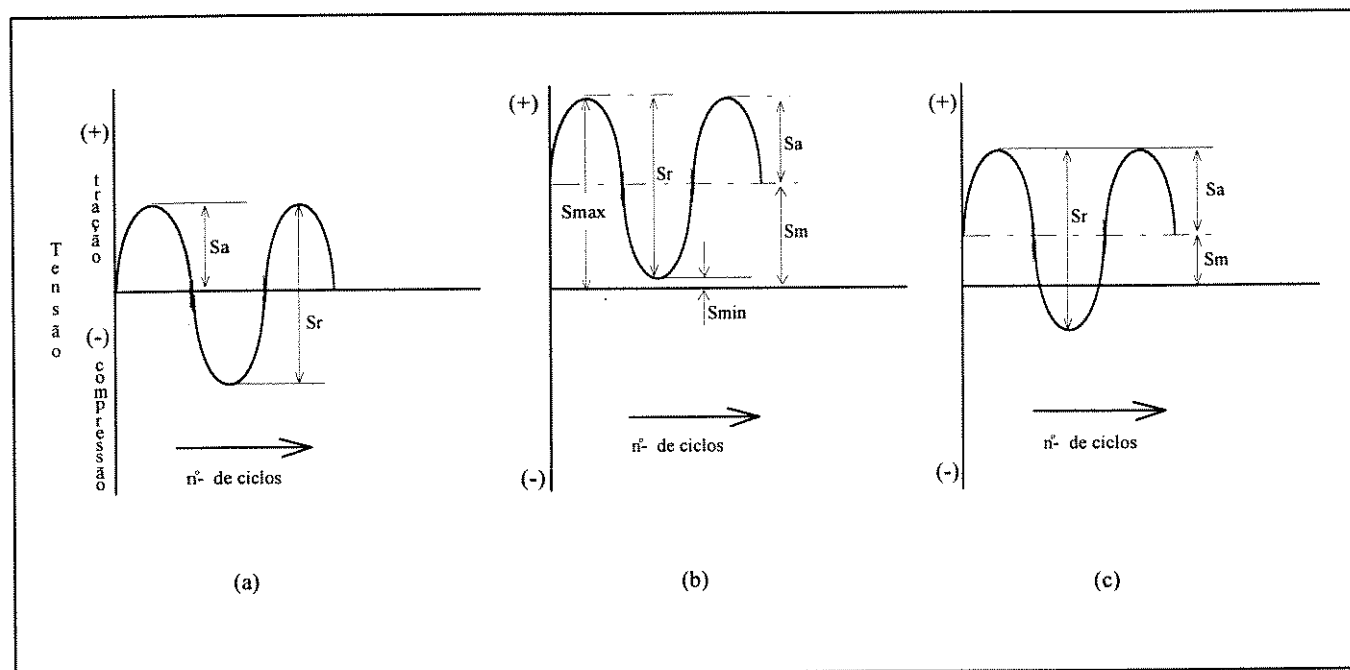


Fig.3.10 - Ciclos regulares de tensões: (a) tensão reversa; (b) tensão repetida (campo de tração); (c) tensão repetida (campo de tração e compressão).

Na Fig.3.11 é mostrada a curva da vida em fadiga de alguns polímeros. Por meio dela, observa-se que com a diminuição da amplitude da tensão de sollicitação da amostra, há um aumento do número de ciclos. Esse mesmo gráfico foi feito para fluidos ER com o fim de comparar seus resultados com os de alguns polímeros.

Para a realização dos ensaios de fadiga em fluidos ER, foi utilizado o dispositivo da Fig.3.6. Os materiais ER foram ensaiados com cargas ( $S_{max}$ ) menores que seu limite de resistência à tração, sendo que  $S_{min} = 0$ . Após um certo número de ciclos  $N$ , o material se rompia como no caso de um sólido. Os valores de  $N$  para diferentes cargas foram anotados e foi construída uma curva de Wöhler ( $S_{max}$ - $N$ ) para cada amostra ensaiada. Essas curvas foram analisadas e comparadas entre si.

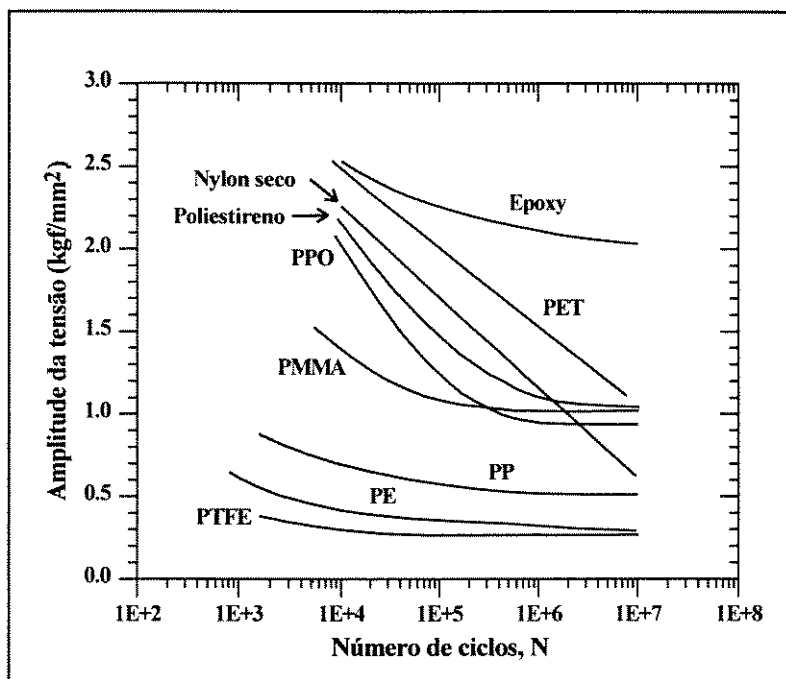


Fig.3.11 - Vida em fadiga de alguns polímeros ensaiados com uma frequência de 30 Hz (PTFE = politetrafluoretileno, PE = polietileno, PP = polipropileno, PMMA = polimetilmetacrilato, PPO = poli(óxido de 2,6-dimetil 1,4-fenileno), PET = polietileno tereftalato) - [kinl-83]

Uma das dificuldades encontradas neste tipo de ensaio foi determinar qual seria a melhor frequência para solicitar a amostra. Para frequências muito altas, o controle de carga na máquina de ensaios mecânicos (MTS) ficava comprometido, podendo levar a grandes erros. Já para frequências mais baixas, esse controle de carga era muito bom, porém havia o inconveniente da amostra ficar por mais tempo sendo ensaiada. Assim, o efeito Joule era mais intenso, provocando um maior aumento da temperatura e da corrente elétrica. Este aumento de T modificava toda a estrutura fibrosa e, conseqüentemente, alterava o resultado final do ensaio. A solução encontrada para este problema foi escolher a maior frequência possível de modo a se ter um bom controle de carga na MTS. A frequência usada para os fluidos à base de amido foi de 5 Hz. Entretanto, para fluidos ER compostos por partículas de CMC, esta frequência era baixa, sendo necessário aumentá-la para 9 Hz devido ao aumento excessivo da corrente elétrica durante os ensaios de fadiga.

### 3.2.2.3 Ensaio de Compressão em Fluidos ER

O ensaio de compressão para metais não é muito usado devido a alguns obstáculos que surgem durante o mesmo: a existência de atrito entre o corpo de prova e as placas da máquina, a possibilidade de flambagem, a dificuldade de medida dos valores numéricos do ensaio, além de outros fatores que provocam incidência considerável de erros.

Para o caso de um metal dúctil (como por exemplo, o cobre), somente as propriedades referentes à zona elástica podem ser determinadas com certa precisão, sendo impossível medir-se a carga máxima atingida (carga de ruptura).

Entretanto, quando um metal é frágil (como o ferro fundido cinzento), ele sofre compressão, não apresentando deformação lateral apreciável, sendo que a ruptura ocorre por cisalhamento e escorregamento, ao longo de um plano inclinado de aproximadamente  $45^\circ$ . Neste caso, podem-se determinar algumas propriedades da zona plástica, como o limite de resistência (carga máxima dividida pela secção original do corpo de prova) ou limite de ruptura que coincidem para esses materiais.

Os fluidos ER, quando vistos sob a óptica de sólidos, podem ser classificados como materiais dúcteis, e portanto, os resultados possíveis de serem obtidos virão de sua região elástica. A Fig.3.12 mostra o dispositivo construído para os ensaios de compressão em materiais ER, enquanto que na Fig.3.13 está ilustrada a montagem feita em laboratório. Observa-se que no dispositivo para compressão existem dois furos laterais circulares para permitir o escoamento do material quando o limite de resistência do mesmo for atingido. É importante destacar que o comportamento do material depende das dimensões, do formato e da quantidade de furos no cilindro externo. Além disso, a própria granulometria das partículas do fluido ER afeta o escoamento.

Os fluidos usados foram preparados à base de amido e de CMC ( $10 \leq C \leq 40\%$  em peso), sendo que a temperatura inicial dos ensaios foi a ambiente ( $T \cong 20$  a  $25^\circ\text{C}$ ) e o campo elétrico variou de 0 até 4 kV/mm. Os fluidos ER à base de amido foram ensaiados na MTS a uma velocidade de 0,005 mm/s, enquanto que os feitos com CMC foram ensaiados na Syntech

20 (máquina de tração e compressão com célula de carga de 5000 N e resolução de  $5 \times 10^{-9}$  N) a uma velocidade de 0,02 mm/s.

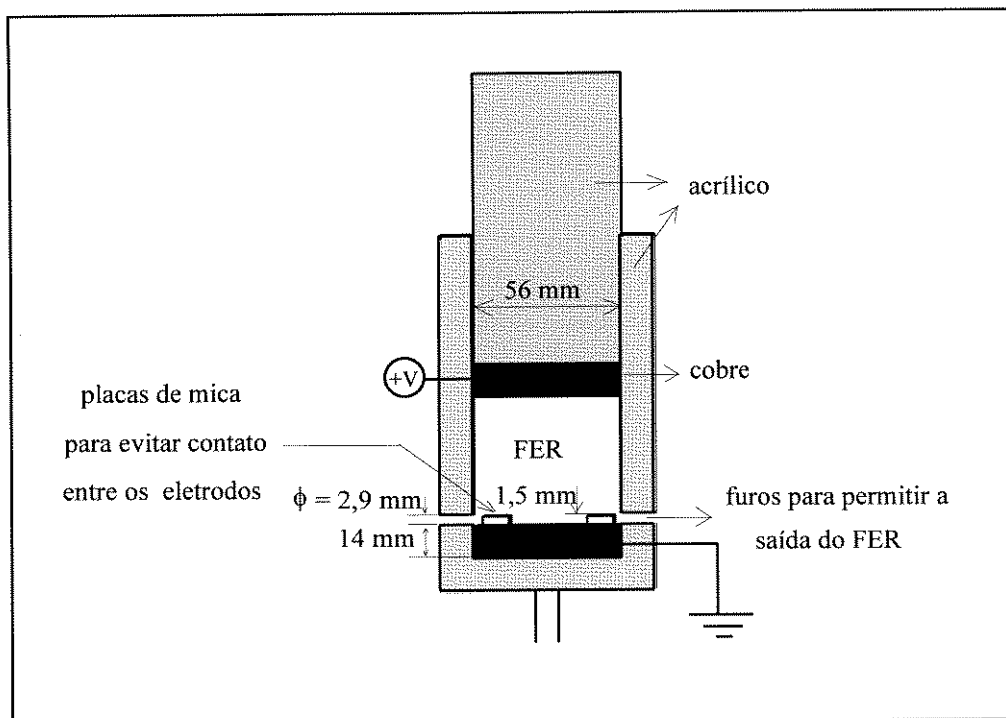


Fig.3.12 - Acondicionamento do fluido ER para os ensaios de compressão.

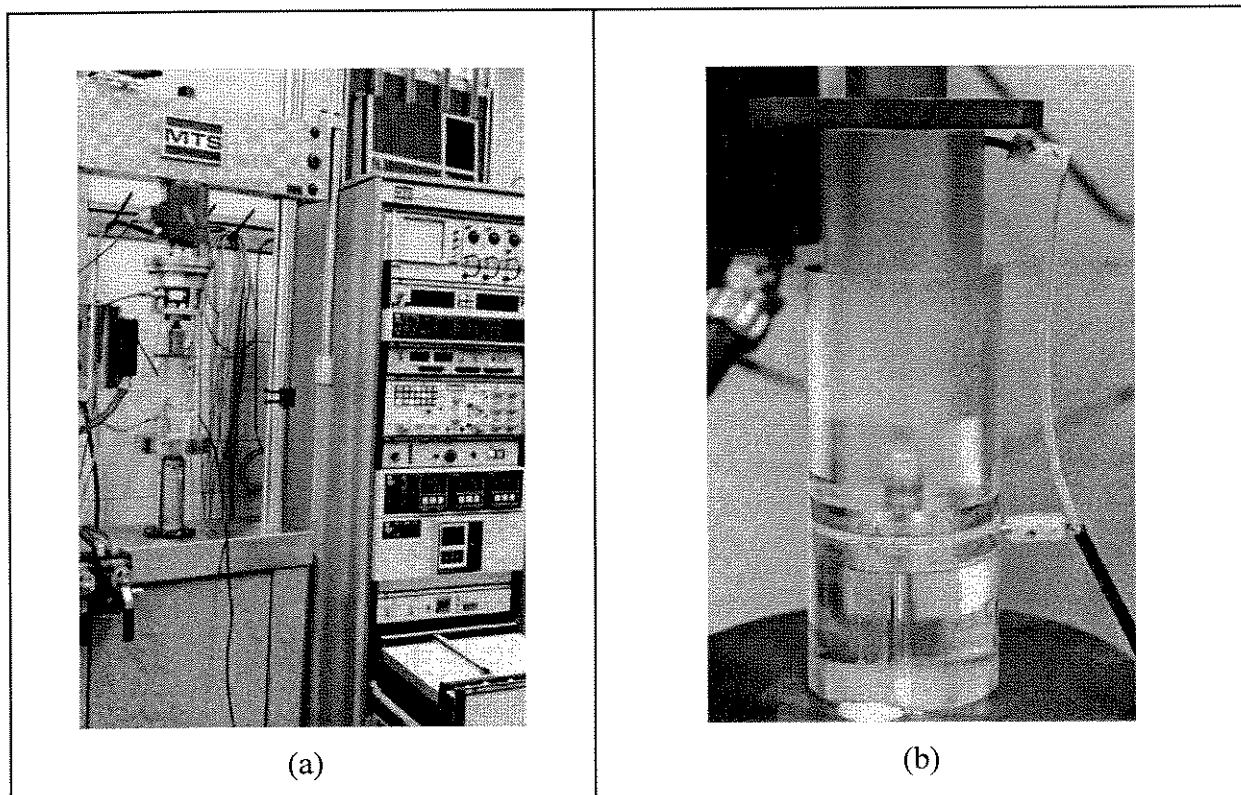


Fig.3.13 - (a) Montagem para os ensaios de compressão na MTS; (b) detalhe da montagem.

A Fig.3.14 mostra o comportamento da tensão em função da deformação de materiais ER. Inicialmente, a tensão cresce, apresentando uma região onde é válida a lei de Hooke. Esta tensão atinge um certo valor (indicado pela seta na Fig.3.14) que é justamente o ponto onde ocorre a ruptura de grande parte das fibras da estrutura fibrosa e o material começa a fluir através dos furos laterais do dispositivo montado para os ensaios de compressão. A partir daí, o material ER continua escoando, sendo que a tensão aumenta continuamente. O dado que se obtém por meio deste ensaio é o limite de ruptura do material, que é dado pela máxima tensão atingida durante o ensaio antes do início de seu escoamento através dos furos laterais mostrados nas figuras 3.12 e 3.13. Caso a amostra fosse novamente homogeneizada e nada do material fosse perdido, o ensaio poderia ser novamente repetido.

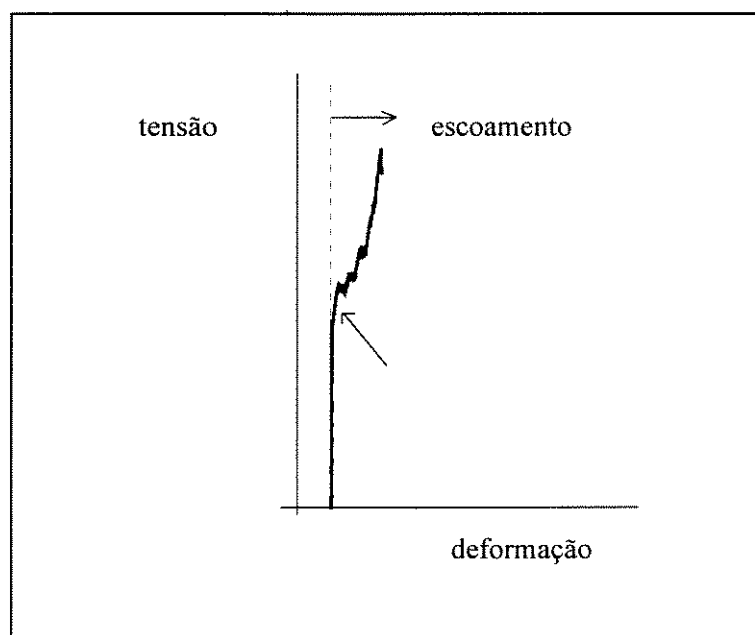


Fig.3.14 - Formato do gráfico tensão-deformação de um material ER submetido a um ensaio de compressão.

#### 3.2.2.4 Ensaios de Cisalhamento em Fluidos ER

Por definição, um material é submetido a um esforço de cisalhamento quando sofre a ação de uma força cortante. Na Fig.3.15, ao receber a ação de uma carga cortante, o ponto C se desloca para a posição C'; enquanto que o ponto D, para a posição D', gerando um ângulo de distorção,  $\gamma$ . Esta distorção é medida em radianos através da relação entre a tensão de

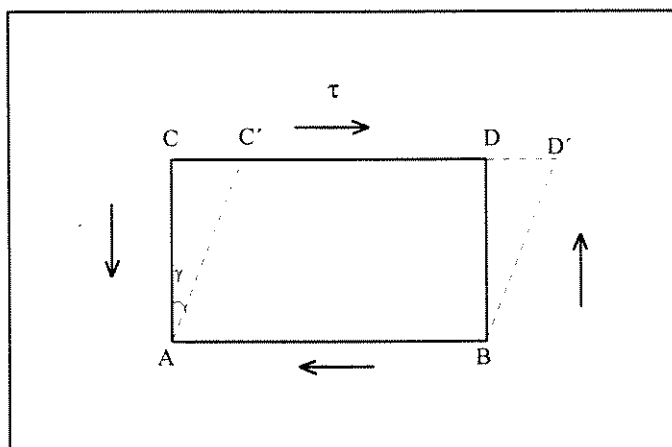


Fig.3.15 - Cisalhamento em Sólidos

cisalhamento  $\tau$  (causada pela ação da força cortante sob a área da secção transversal do material) e o módulo de elasticidade do material  $G$ :

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3.3)$$

Os ensaios de cisalhamento realizados nos materiais ER foram feitos com o dispositivo apresentado na Fig.3.16. Este dispositivo nada mais é do que uma balança de braços, sendo que um de seus pratos foi substituído por um conjunto de dois cilindros concêntricos com espaçamento de 1mm, entre os quais foi alojado o fluido ER. Antes do início de cada ensaio, a balança era nivelada de modo que a força peso exercida pelo conjunto de cilindros/fluido ER em um dos braços da balança era anulada pela força peso exercida pelo prato no outro braço. À medida em que se adicionavam pesos de massa conhecida no prato, o cilindro interno era puxado para cima; porém, ele só começava a se movimentar a partir de uma determinada massa  $m$ , que era proporcional à tensão mínima de escoamento estática do material ER ( $\tau_e$ ). O valor desta massa foi obtido para cada uma das amostras e  $\tau_e$  pode ser calculado ( $\tau_e = m.g / A$ ). A seguir foi feita uma análise desses resultados. Na Fig.3.17 está uma foto da montagem desta balança no laboratório.

Durante os ensaios foi necessário muito cuidado para que não houvesse um desalinhamento do cilindro interno com relação ao externo, pois isso certamente afetaria os resultados finais. Outra dificuldade encontrada foi a remoção do ar entre os cilindros. Para



contornar isso, foi feita uma reentrância na base do cilindro interno (não mostrada na Fig. 3.16) de modo que o ar existente entre os cilindros ficasse alojado nela.

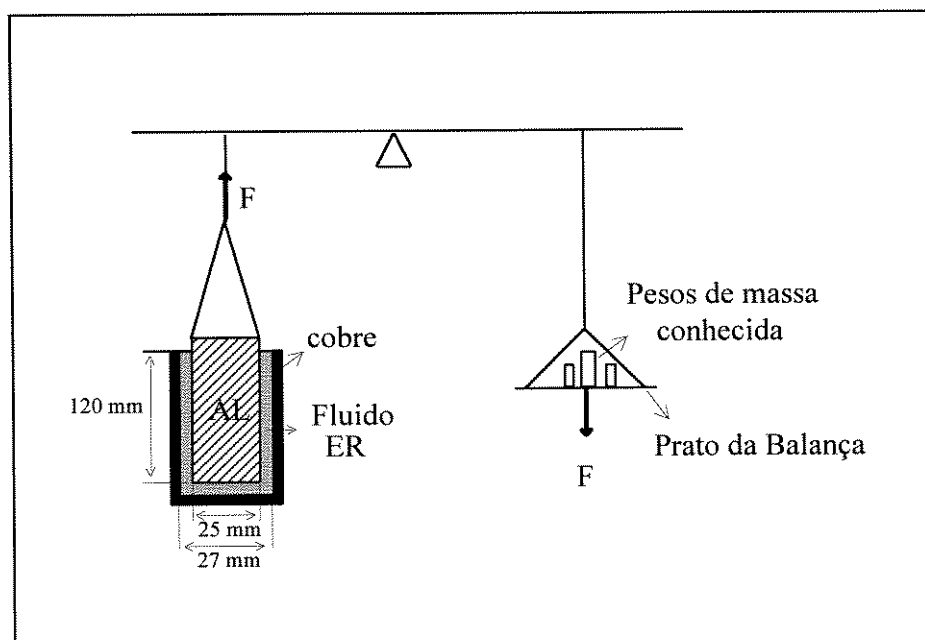


Fig.3.16 - Dispositivo para ensaios de cisalhamento em materiais ER.

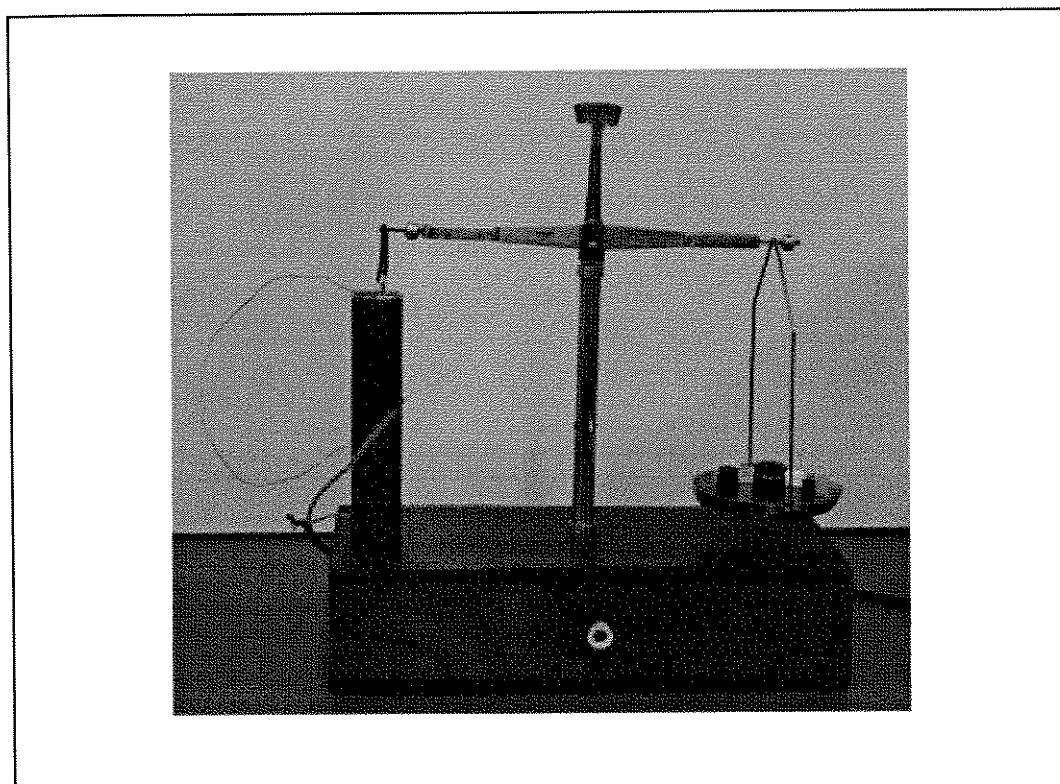


Fig.3.17 - Dispositivo montado no laboratório para os ensaios de cisalhamento em materiais ER.

### 3.3 Embreagem ER

Um dos dispositivos mecânicos mais comentados na literatura é a embreagem. A título de demonstração, foi montada uma embreagem de bancada conforme o esquema da Fig.3.18. Na Fig.3.19 está representada a embreagem com maiores detalhes e na Fig.3.20 está uma foto de sua montagem no laboratório.

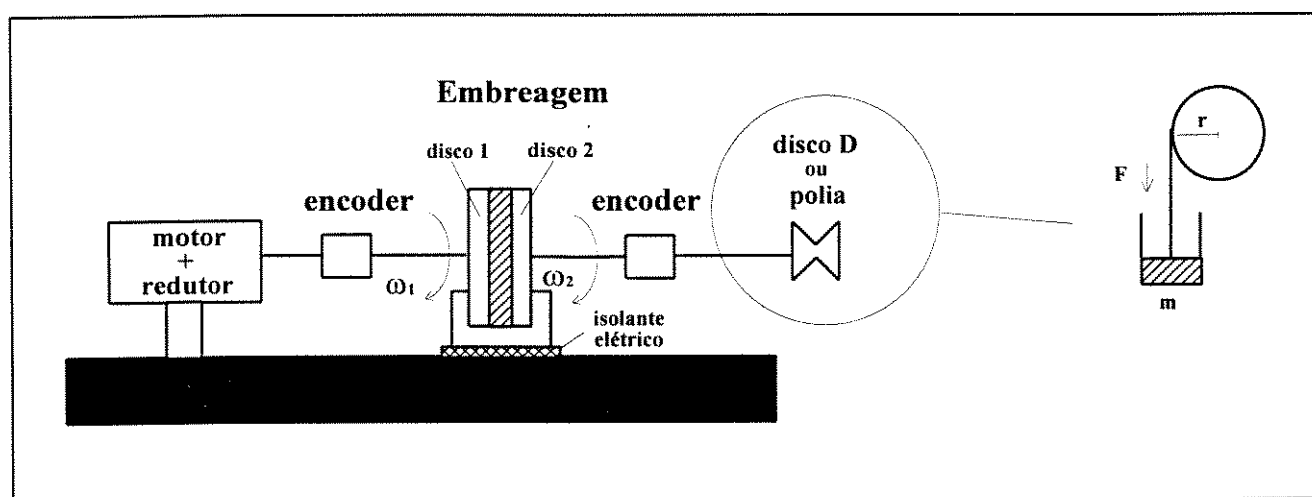


Fig.3.18 - Esquema de montagem da embreagem.

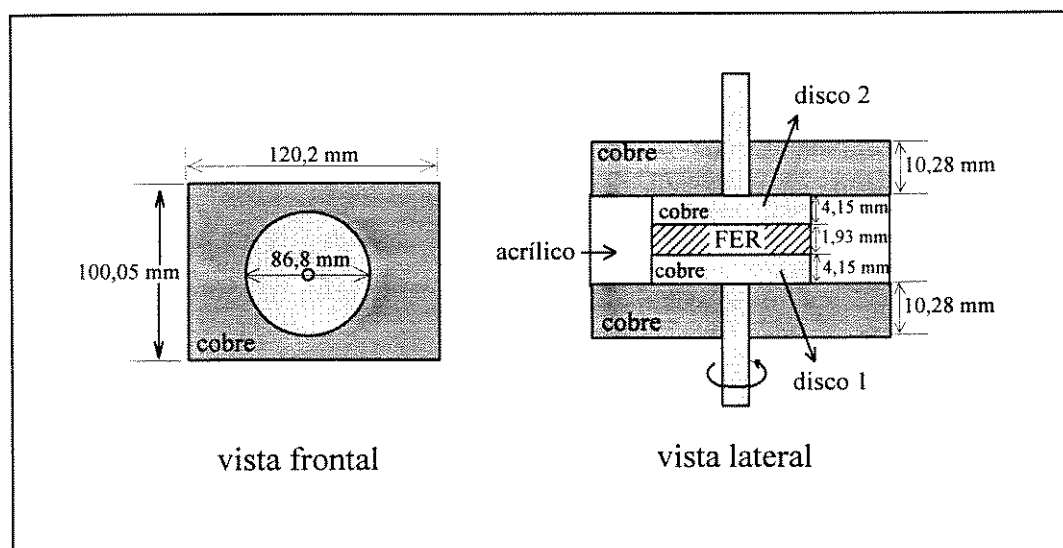


Fig.3.19 - Esquema da embreagem em detalhe.

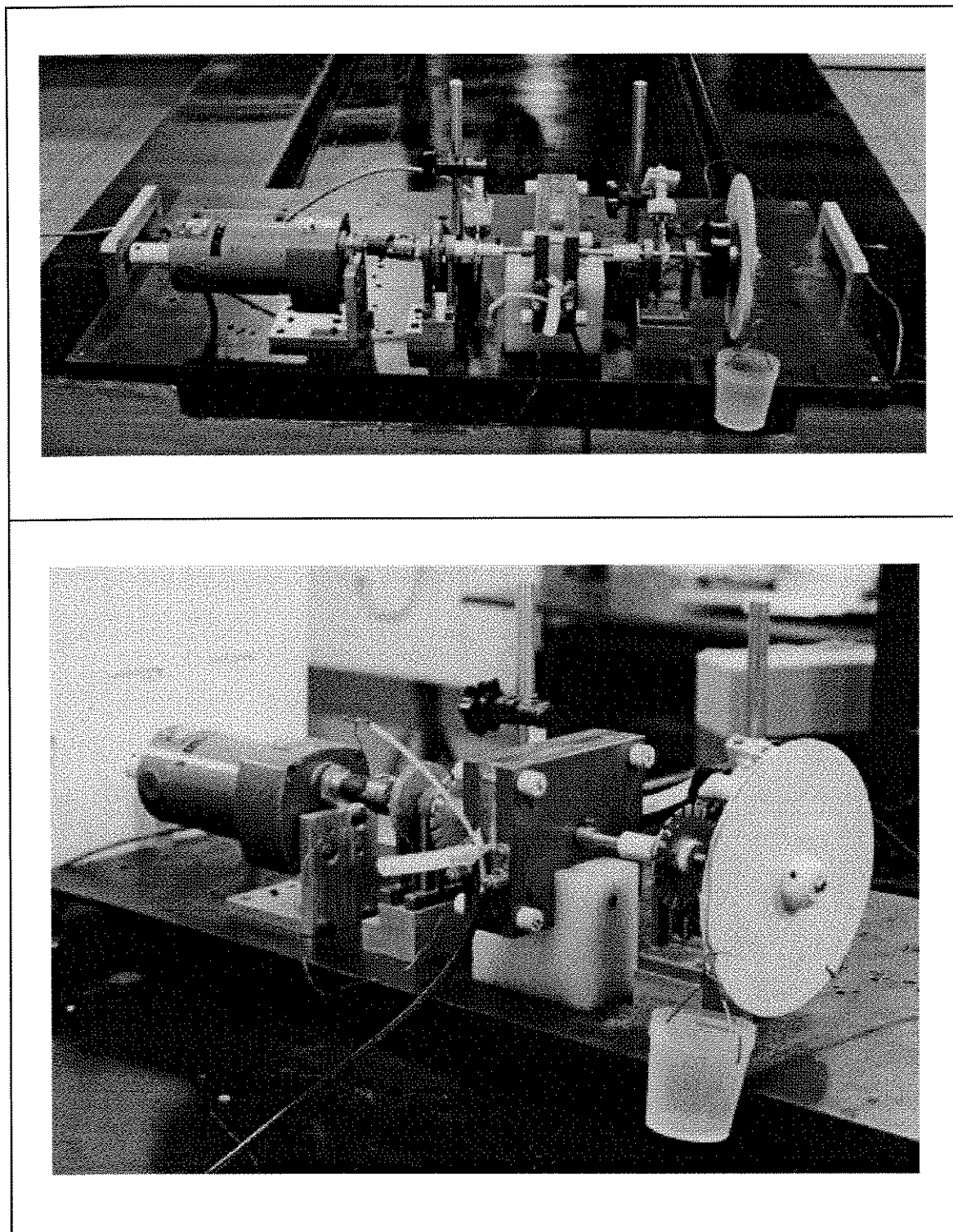


Fig.3.20 - Embreagem montada no laboratório para demonstração de uma das aplicações de fluidos ER.

A embreagem foi testada para amostras com 15% de amido em fluido de silicone e para amostras com 15% de CMC em fluido de silicone sob diferentes intensidades de campo elétrico. Nela foram feitos dois tipos de testes:

- **Teste Estático** – um dos lados da embreagem foi mantido fixo ( $\omega_1 = 0$ , ou seja, o disco 1 era o próprio conjunto motor-redutor), enquanto que o outro disco foi ligado a uma polia aonde eram adicionados pesos até que ele começasse a girar. Como  $T = F.d = m.g.r$  (onde  $r = 74,8$  mm), obtinha-se o torque estático ( $T_E$ ) para iniciar o movimento do disco 2 da embreagem. A adição de pesos foi feita logo depois de o campo elétrico ter sido ativado.

- **Teste Dinâmico** – depois de ligado o campo elétrico, foi imprimida uma determinada velocidade ao disco 1 (o torque do motor era fixo ( $I = \text{cte}$ )). Com isso, o disco 2 começava a girar e podia-se medir  $\omega_1$  e  $\omega_2$  através do encoder para as diferentes massas acrescentadas no disco D. Com os valores de  $\omega_1$  e  $\omega_2$  em mãos, é possível descobrir a curva de deslizamento, e, tendo-se o momento de inércia, a aceleração do disco D e o ponto onde as velocidades (ou diferença de velocidades) começam a ser diferentes, tem-se o torque dinâmico.

Durante o movimento, o torque total transmitido pela embreagem é composto por duas parcelas: o torque estático e o dinâmico.

## Capítulo 4

### Discussão dos Resultados

Como já foi dito anteriormente, os fluidos eletro-reológicos foram estudados segundo duas abordagens distintas: como líquidos e como sólidos. Cada uma destas abordagens tem maior ou menor importância dependendo do tipo de aplicação de engenharia à qual o fluido será submetido. Por exemplo, em válvulas ER, as características reológicas do fluido ER são mais importantes que as mecânicas; porém, o mesmo não ocorre para sistemas de amortecimento, onde o modo compressivo merece uma maior atenção. Este é um dos motivos pelos quais neste trabalho é feito um estudo de fluidos ER com enfoque a líquidos e a sólidos. Além disso, como na literatura há um extenso material sobre o comportamento reológico de fluidos eletro-reológicos, achou-se por bem fazer-se, primeiramente, uma análise das propriedades reológicas dos materiais ER a fim de que suas características reológicas fossem bem conhecidas e pudessem ser comparadas com as de fluidos ER da literatura. Somente a partir daí é que foram estudadas suas propriedades mecânicas.

Para a caracterização mecânica de fluidos eletro-reológicos, foram feitos ensaios de tração, compressão, fadiga e cisalhamento. Os materiais usados em todos os experimentos realizados eram à base de amido hidratado em fluido de silicone (FS) e de CMC em fluido de silicone. Variaram-se parâmetros como temperatura, concentração de partículas, viscosidade do fluido-suporte e intensidade do campo elétrico contínuo. Também foi testada uma embreagem ER a título de ilustração. A seguir estão os resultados obtidos para as duas abordagens e também os resultados obtidos com os testes de uma embreagem ER.

## 4.1 Líquidos Viscosos: Testes Rotacionais

### 4.1.1 Fluidos ER à base de Amido

Os fluidos ER à base de amido necessitam da presença de um aditivo para serem eletro-reologicamente ativos. A água foi escolhida para este fim por facilidade e custo zero, apesar do inconveniente de aumentar a condutividade do fluido e limitar a faixa de temperatura de uso do material ER. A seguir estão os resultados obtidos por meio de testes rotacionais para as suspensões com amido hidratado em fluido de silicone para diferentes concentrações, temperaturas, intensidades de campo elétrico e viscosidade de fluido-suporte.

• **Efeito do campo elétrico:** a Fig.4.1 mostra os resultados obtidos para uma suspensão de amido de milho a 20°C e várias intensidades de campo elétrico. O aumento da tensão de cisalhamento  $\tau$  com a intensidade de  $E$  é significativo: para taxas de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) de 200 s<sup>-1</sup>, aumentando-se o campo em quatro vezes,  $\tau$  chega a ficar 2,9 vezes maior. O comportamento da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  na ausência de campo elétrico é o de um fluido newtoniano; em sua presença, a curva se aproxima da de um sólido de Bingham para  $E < 3$  kV/mm, sendo válida a equação (2.2):

$$\tau = \tau_y(E) + \eta_0 \dot{\gamma}$$

Entretanto, para campos maiores, o comportamento da suspensão não pode mais ser descrito pela equação de um fluido de Bingham.

Segundo Conrad [conr-87],  $\eta_0$  é uma constante e corresponde à viscosidade da suspensão na ausência de um campo elétrico. Entretanto, nos testes realizados com o amido a derivada da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  variou com a intensidade do campo e com  $\dot{\gamma}$  (Fig.4.1). Apesar de muitos autores usarem a equação acima, na realidade o comportamento

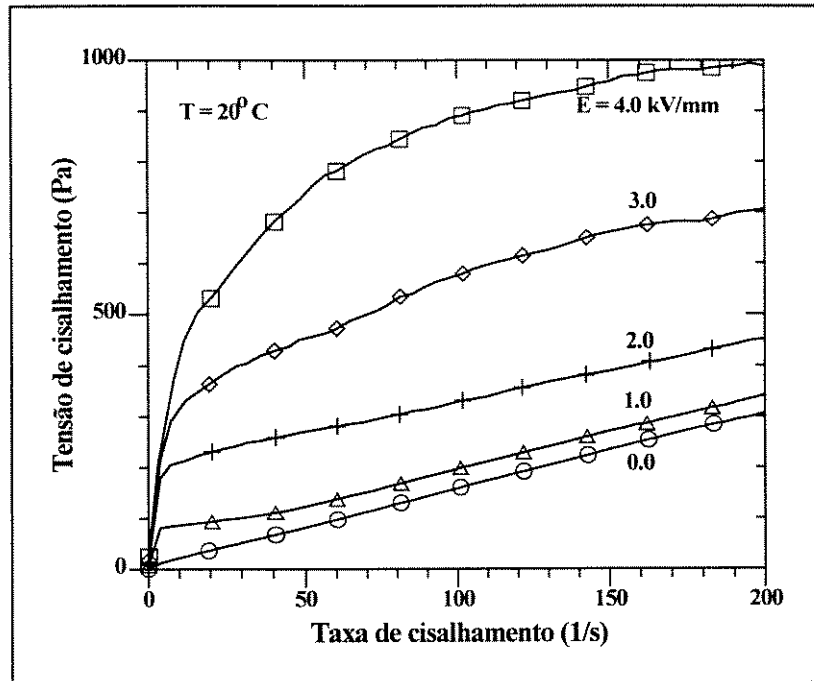


Fig.4.1 -  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  para fluidos com 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).

dos fluidos ER é bem mais complexo do que o descrito por ela devido, provavelmente, à interação entre as partículas do fluido e à influência da taxa de cisalhamento na ruptura e formação da estrutura fibrosa.

Com relação à viscosidade aparente, verificou-se um decréscimo em seus valores com o aumento de  $\dot{\gamma}$  (Fig.4.2), indicando que as cadeias deveriam estar sendo destruídas com o movimento rotatório do cilindro externo, sendo que nem todas estariam tendo tempo suficiente para se formar novamente.

A Fig.4.3 ilustra o comportamento da viscosidade aparente ( $\eta_A$ ) da suspensão em função da intensidade do campo elétrico (E). Nela, observa-se que, além de  $\eta_A$  aumentar com E, para um determinado valor de campo elétrico, o aumento da taxa de cisalhamento faz com que a viscosidade aparente do fluido ER diminua por causa da ruptura de um maior número de cadeias. É conveniente lembrar que o aumento de  $\eta_A$  com E ocorre até o ponto em que haja uma saturação elétrica, ou até que se atinja a rigidez dielétrica da suspensão.

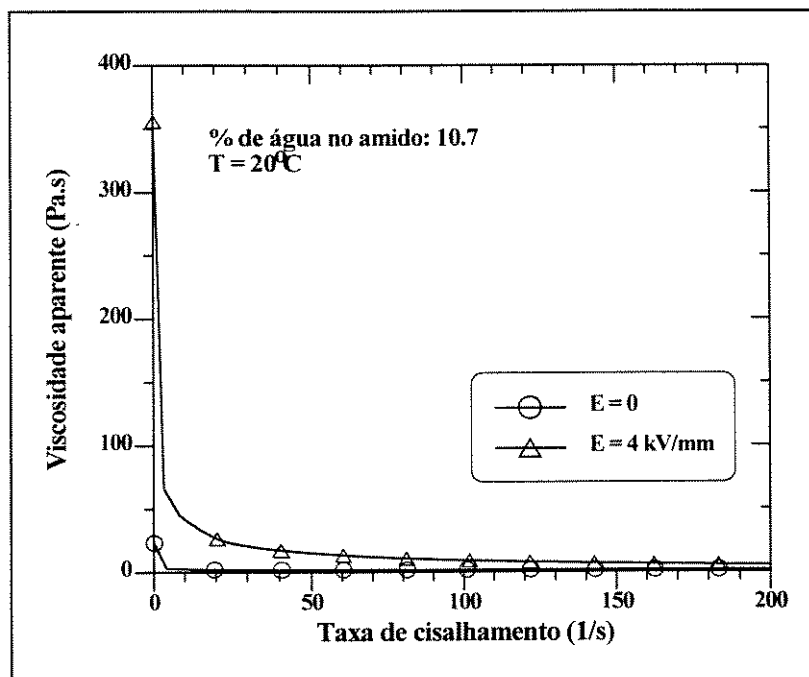


FIG.4.2 - Comportamento de  $\eta_A$  e  $\eta_0$  em função de  $\dot{\gamma}$  para suspensões de 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt)

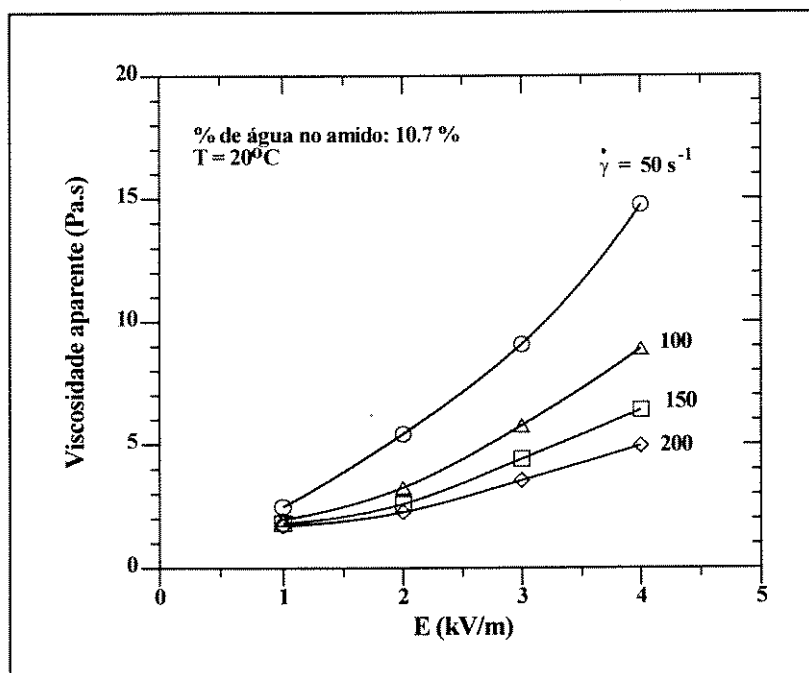


FIG.4.3 -  $\eta_A$  em função de  $E$  para fluidos com 25% em peso de amido de milho em fluido de silicone (980,7 cSt).



De acordo com a Fig.4.4, o efeito do campo elétrico na tensão mínima de escoamento ( $\tau_y$ ) pode ser descrito pela Eq.(2.3) e é independente da temperatura:

$$\tau_y = A E^n$$

onde  $n=1,67$  e  $A=62,29$ , sendo que  $A$  e  $n$  dependem do campo elétrico e das características do fluido ER. Segundo Conrad [conr-91],  $1 \leq n \leq 2,5$ , sendo que o valor mais comum para  $n$  é 2;  $n = 1$  ocorre para altos valores de campo e  $n > 2$  para baixos valores de  $E$ . O valor calculado para  $n$  neste trabalho está na mesma faixa de  $n$  encontrada por Conrad. É bom ressaltar que os valores de  $\tau_y$  aqui obtidos são uma extrapolação da região reta da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  (altos valores de taxa de cisalhamento) até  $\dot{\gamma} = 0$ ; ou seja,  $\tau_y$  é a tensão mínima de escoamento dinâmica e não a estática.

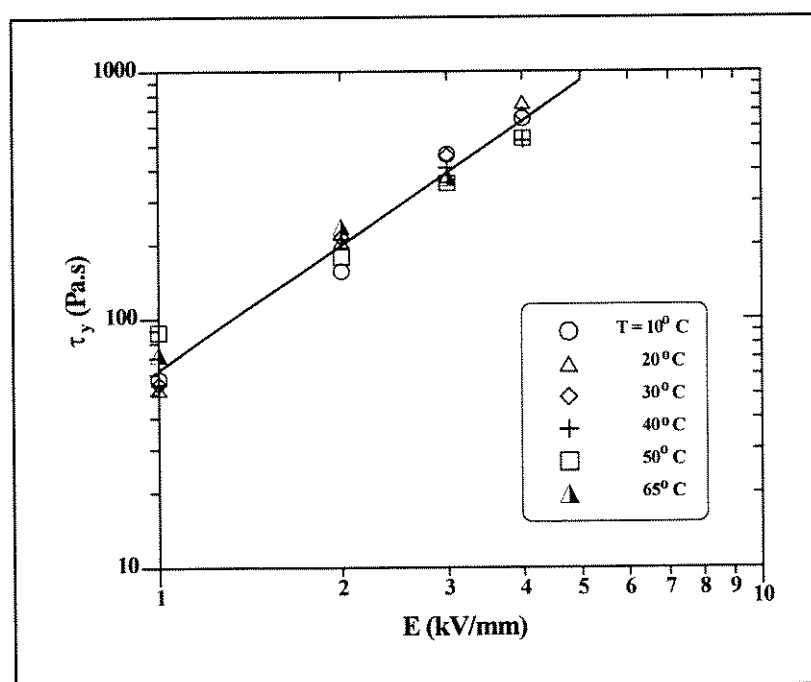


FIG.4.4 -  $\tau_y$  em função de  $E$  para suspensões a 25% em peso de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt) a várias temperaturas.

Pela Fig.4.5 observa-se que existe uma histerese nos fluidos ER à base de amido quando submetidos à ação de um campo elétrico; ou seja, a tensão de cisalhamento é menor quando  $\dot{\gamma}$  aumenta (curva de ida) do que quando  $\dot{\gamma}$  diminui (curva de volta). Isso acontece porque inicialmente a estrutura fibrosa que começa a ser formada tem seu desenvolvimento prejudicado pelo aumento constante do movimento rotatório (curva de ida), enquanto que na volta, a estrutura, já formada, pode ser incrementada à medida que  $\dot{\gamma}$  diminui. Nesta figura nota-se que, com o aumento do campo elétrico, a histerese tende a aumentar; entretanto, dependendo da intensidade do campo elétrico, a viscosidade do fluido-suporte influencia a histerese de maneira diferente. Para  $E = 2$  kV/mm, a diminuição da viscosidade do óleo de silicone provocou uma maior histerese no fluido ER. Isso se deveu ao fato de que, para um fluido-suporte com viscosidade de 100 cSt, as partículas têm maior mobilidade e, sendo assim, na curva de volta se movimentam com maior rapidez, de forma a incrementar a estrutura fibrosa, aumentando sua força. Isso provoca um aumento na tensão de cisalhamento. Este fenômeno é confirmado para  $E = 4$  kV/mm e  $\dot{\gamma} > 130$  s<sup>-1</sup>, onde a tensão de cisalhamento para 100 cSt é maior que para 500 cSt tanto na curva de ida quanto na de volta.

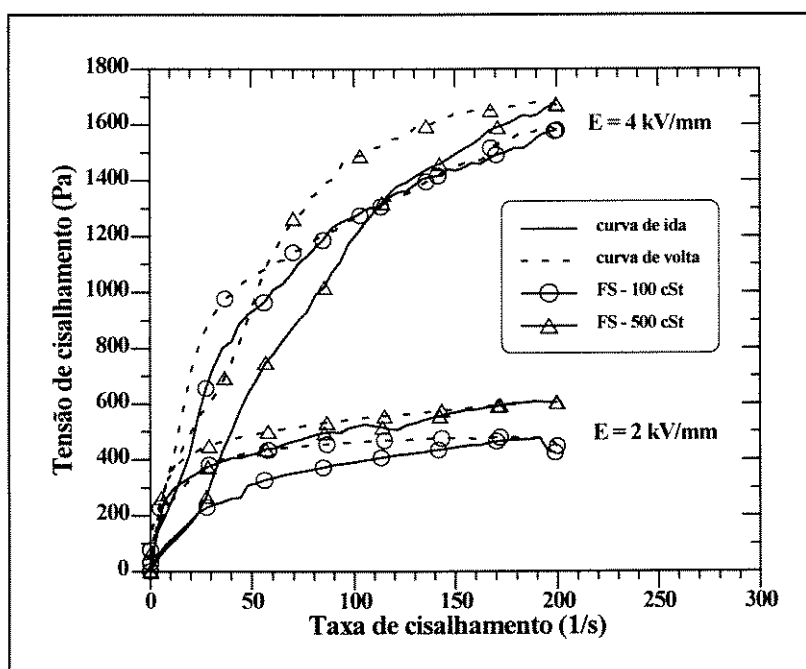


FIG.4.5- Influência da viscosidade do fluido-suporte no efeito ER de suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone (T=25°C).

Para 1000 cSt, a tensão de cisalhamento continua sendo mais alta que para as demais viscosidades de fluido de silicone, entretanto sua histerese é maior que a de 500 cSt.

• **Efeito da concentração:** De modo geral, a tensão mínima de escoamento dos fluidos ER aumenta com a fração de partículas dos mesmos. Na Fig.4.6 observa-se que existe uma concentração ótima de partículas para o efeito de Winslow. No caso em questão, a viscosidade relativa ( $\eta_A/\eta_0$ ) atinge seu valor máximo para uma concentração de aproximadamente 25%. Uma teoria para explicar esse comportamento é a de que a altas concentrações as partículas estão tão próximas umas das outras que as "pontes" de água das mesmas começam a se sobrepor umas às outras. Como a interação entre as partículas aumenta com a diminuição da distância entre elas, tem-se como resultado que os íons adsorvidos às partículas saem das mesmas, de modo que o efeito de Winslow não ocorre, mesmo que se aumente a concentração de partículas do fluido ER [ueji-72]. Esta teoria é válida, mas o efeito não é restrito aos fluidos convencionais. Alguns fluidos anidros também apresentam esse comportamento. Assim, a partir de uma concentração crítica de partículas, este efeito pode ser saturado, levando a um decréscimo da viscosidade relativa com a concentração. Esta concentração ótima varia com o tipo de fluido-suporte e partícula utilizados.

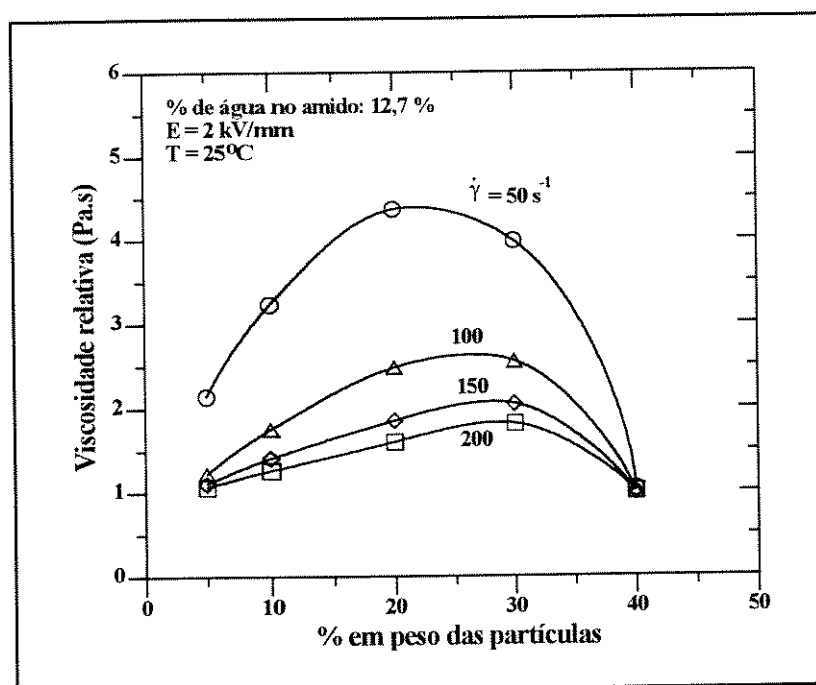


FIG.4.6 - Concentração ótima para o efeito de Winslow para partículas de amido de milho suspensas em fluido de silicone (980,7 cSt).

• **Efeito da temperatura:** Nas figuras 4.7 e 4.8 tem-se  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  para várias temperaturas e campos elétricos de 0 e 4 kV/mm. Pode-se observar que a tensão de cisalhamento diminui com o aumento da temperatura para  $E = 0$  kV/mm. Isso se deve ao fato de que  $\eta_0$  (viscosidade aparente para  $E = 0$ ) diminui com o aumento de  $T$  por causa da maior mobilidade de moléculas do fluido de silicone. Entretanto, para  $E = 4$  kV/mm existe um outro efeito associado que deve ser levado em conta: para  $10^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$ ,  $\tau$  aumenta com a temperatura uma vez que há um aumento na força da estrutura fibrosa produzida pelo campo. A partir de  $40^\circ\text{C}$ , a tensão de cisalhamento diminui com a temperatura porque o decréscimo na viscosidade do fluido-suporte passa a ter maior influência em  $\tau$  do que o aumento da força das fibras.

Na Fig.4.9, observa-se que para  $E < 2$  kV/mm a tensão mínima de escoamento aumenta com a temperatura e que a partir de 3 kV/mm ela diminui com o aumento de  $T$ . Esses efeitos opostos já foram vistos anteriormente e se devem a dois fatores: (a) decréscimo na viscosidade do fluido-suporte e (b) aumento na força da estrutura fibrosa produzida pelo campo. Assim, dependendo da temperatura e da intensidade do campo, estes fatores terão uma influência maior ou menor no sistema.

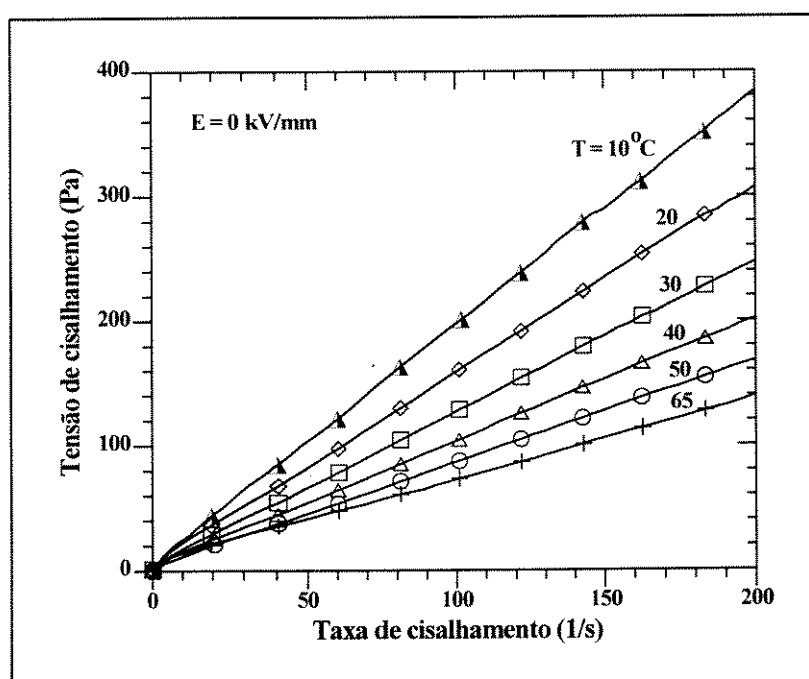


FIG.4.7 - Influência da temperatura em suspensões de 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).

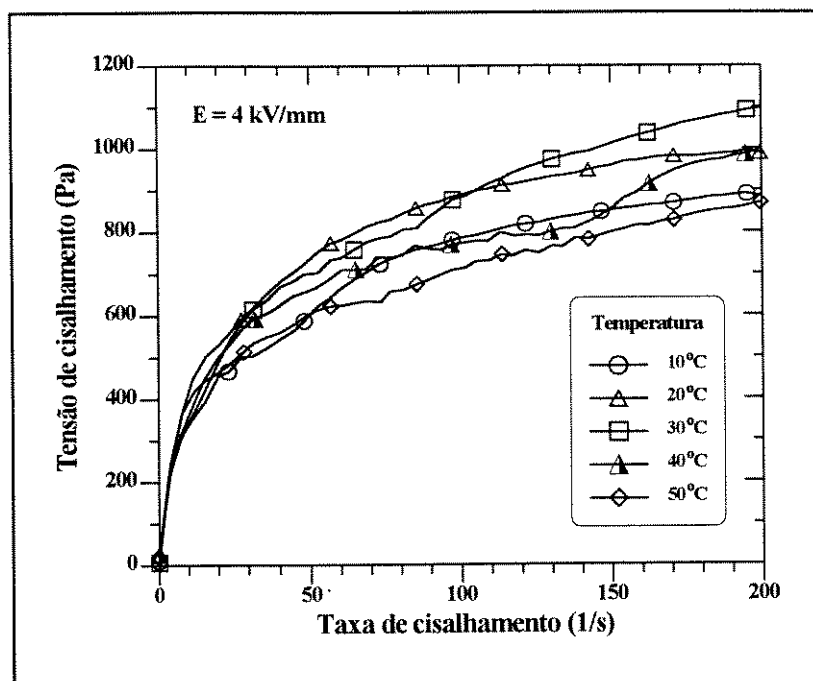


FIG.4.8 - Influência da temperatura nas curvas de  $\sigma$  em função de  $\dot{\gamma}$  para fluidos ER com 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).

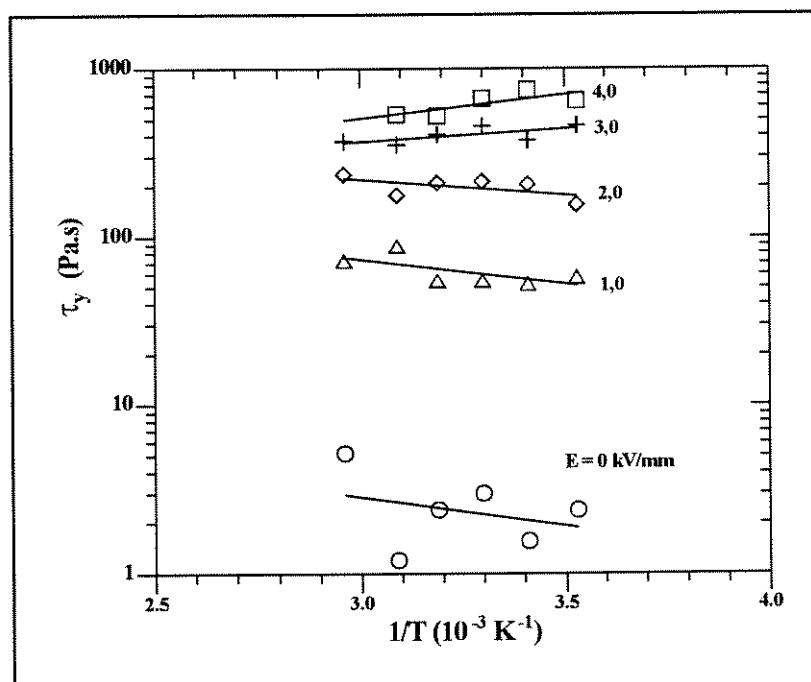


FIG.4.9 - Variação de  $\tau_y$  com o inverso da temperatura para fluidos com 25% de amido de milho (10,7% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt).

• **Aspecto transiente:** A Fig.4.10 mostra o comportamento transiente (variação de  $\tau$  com o tempo para  $\dot{\gamma}$  constante) de uma suspensão de 20% em peso de amido de milho (com 19,3% de água) em fluido de silicone (980,7 cSt) a 30°C. No início deste teste, o campo estava desligado e o fluido, submetido a uma taxa de cisalhamento de  $100 \text{ s}^{-1}$ . Repentinamente o campo elétrico foi ligado (3 kV/mm) fazendo com que houvesse um aumento rápido em  $\tau$ , passando de 150 Pa para 635 Pa em questão de segundos. A partir daí o aumento foi mais lento, sendo que a saturação do efeito ocorreu em  $\tau \approx 860 \text{ Pa}$  (aproximadamente 3,5 minutos após ter sido ligado o campo elétrico). A seguir o campo elétrico foi desligado, e o fluido ER apresentou um rápido decréscimo em  $\tau$ ; porém o material ER só voltou à tensão de cisalhamento inicial após 3,5 minutos. Este comportamento indica que o efeito ER é extremamente rápido; entretanto, é necessário um certo tempo para que haja uma estabilização do sistema.

Na Fig.4.11 pode-se observar que o aumento do campo elétrico não tem influência significativa no tempo de resposta das suspensões de amido (pelo menos não na escala de

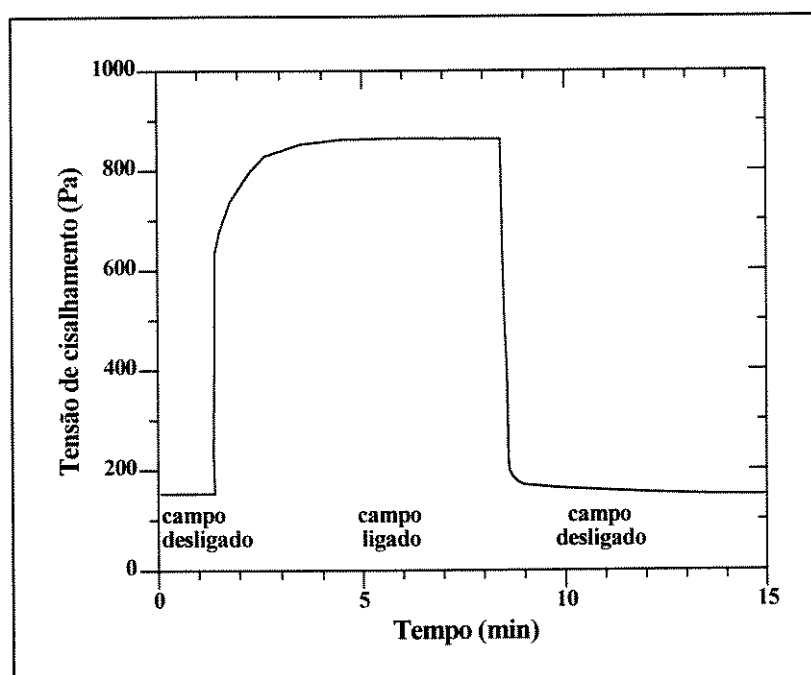


FIG.4.10 - Análise transiente de  $\tau$  para suspensões de 20% em peso de amido de milho (19,3% de água) em fluido de silicone ( $E=3 \text{ kV/mm}$ ,

$T=30^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).

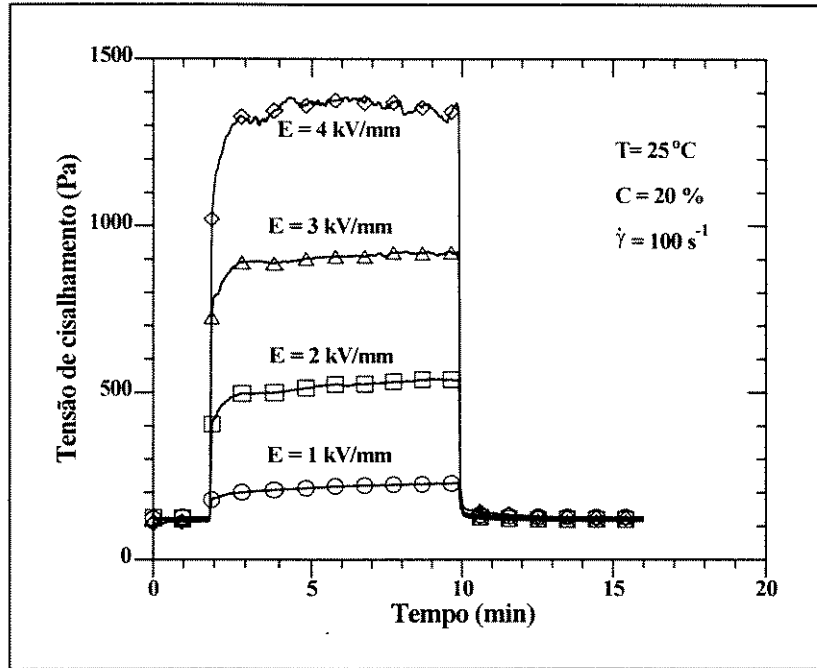


FIG.4.11 - Análise transiente de  $\tau$  para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).

tempo analisada). Com relação à concentração, o seu efeito sobre o tempo de resposta pode ser avaliado na Fig.4.12. De modo geral, com o aumento da concentração, a suspensão parece atingir o estado de equilíbrio mais rapidamente; entretanto, dependendo da concentração de partículas, o fluido não consegue atingir este equilíbrio em oito minutos. Sendo assim, decidiu-se analisar o comportamento de fluidos com concentrações de 15% e 20% para diferentes campos elétricos durante 210 minutos. De acordo com o gráfico da Fig.4.13, para o fluido de concentração de 20%, observou-se que tanto para  $E = 1 \text{ kV/mm}$  quanto para  $E = 2 \text{ kV/mm}$ , a tensão de cisalhamento aumentou durante todo o teste (mesmo que ligeiramente). Entretanto, para  $E = 3 \text{ kV/mm}$  houve um aumento inicial, seguido por um decréscimo em  $\tau$ , sendo que durante todo o teste a tensão de cisalhamento decrescia, mostrando, na média, uma tendência a diminuir a tensão de cisalhamento com o tempo. Duas possibilidades foram vislumbradas para explicar o fenômeno. A primeira considera que devido ao movimento rotatório do cilindro externo esteja ocorrendo uma centrifugação das partículas no caso de campos elétricos mais baixos, provocando assim um aumento na resistência ao cisalhamento ( $\tau$  aumenta). Para campos mais elevados, a centrifugação fica mais

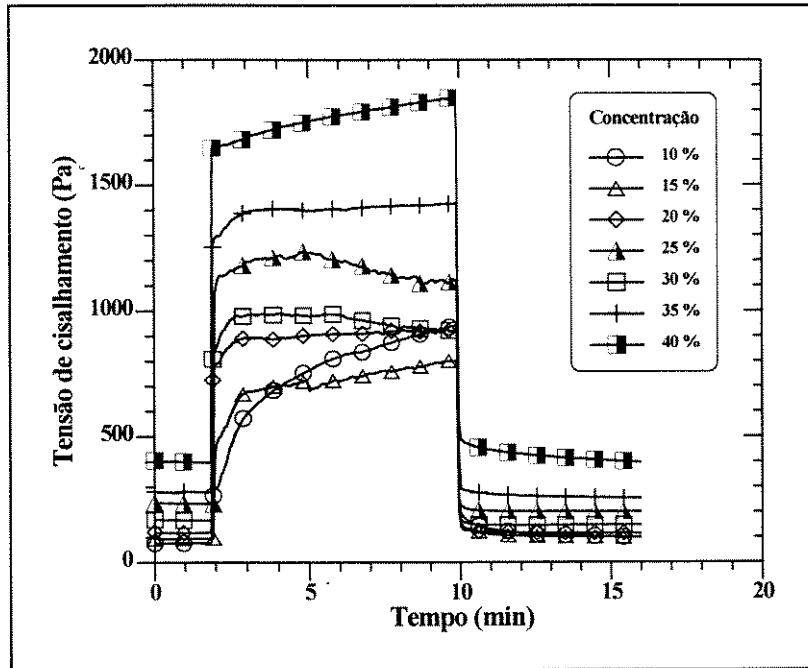


FIG.4.12 - Análise transiente de  $\tau$  para suspensões amido a várias concentrações de partículas (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ,  $E = 3 \text{ kV/mm}$ ).

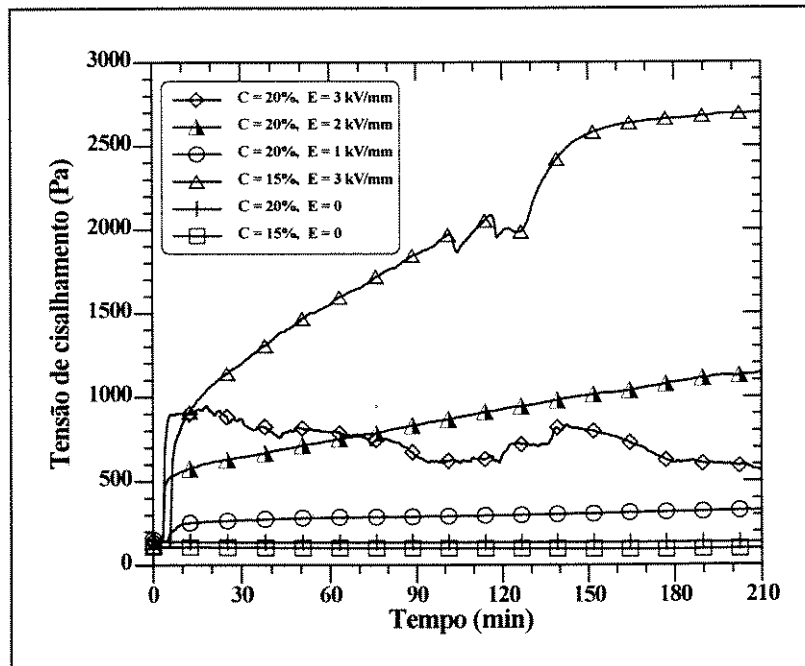


FIG.4.13 - Análise transiente de  $\tau$  para suspensões de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ).



difícil de ocorrer porque a estrutura fibrosa, que tem uma força maior, estaria impedindo que isso acontecesse. Para verificar a validade desta hipótese, foram feitos testes com as amostras de 15 e 20% sem campo elétrico e no final dos mesmos não foi verificada nenhuma centrifugação de partículas (tanto visualmente como pelo fato de  $\tau$  ter se mantido constante).

Assim, resta a segunda hipótese. Segundo Klingenberg, Swol e Zukoski [klin-91] [zuko-93], quando a estrutura fibrosa é formada por fibras estreitas, a tensão é transferida mais eficientemente que quando se tem fibras grossas (colunas). Segundo eles, fibras finas são continuamente deformadas e rompidas durante o cisalhamento, enquanto que as colunas (grupos grandes) simplesmente mudam de posição ou rolam através da suspensão. Baseado nisso é que surge a outra hipótese. De acordo com os testes realizados, percebe-se que para amostras de 20% de amido, o cisalhamento constante ( $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ ) atrapalha a formação das fibras (detectado pela diminuição em  $\tau$ ) para  $E = 3 \text{ kV/mm}$ , enquanto que para  $E \leq 2 \text{ kV/mm}$  ele parece contribuir no sentido de incrementar a estrutura fibrosa. A hipótese que surge é a de que, com o movimento rotatório do cilindro externo, as partículas que não fazem parte da estrutura fibrosa são deslocadas até atingirem a fibra mais próxima, passando a fazer parte da mesma (isso para  $E \leq 2 \text{ kV/mm}$ ). Com isso a força da estrutura fibrosa aumentaria, produzindo um aumento em  $\tau$ . Já para  $E = 3 \text{ kV/mm}$ , a estrutura fibrosa é formada por cadeias espessas (colunas) que têm um comportamento diferente frente ao cisalhamento: como a maioria das partículas já faz parte da estrutura, o movimento rotatório acaba tirando mais partículas das colunas do que adicionando partículas a elas. Isso é uma indicação de que o cisalhamento colabora com o efeito ER quando a estrutura fibrosa é composta por fibras estreitas ou quando existe um caminho livre médio mínimo para as partículas caminharem. O teste realizado para  $C = 15\%$  em peso de amido confirma esta hipótese, pois como a concentração é menor, existe mais espaço para as partículas poderem caminhar livremente a fim de fazerem parte de alguma fibra. Assim, mesmo para  $E = 3 \text{ kV/mm}$ , essa suspensão tem a resistência da estrutura fibrosa aumentada em mais de três vezes depois de 3 horas de cisalhamento. Logo, através destes testes, pode-se questionar a validade de uma afirmação insistente da literatura: a de que o cisalhamento atrapalha a formação de fibras. Isto é uma meia-verdade. De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, o cisalhamento atrapalha a formação de fibras desde que a taxa de cisalhamento varie com o tempo. Caso contrário, ele

pode até colaborar com o efeito ER, dependendo de condições como concentração, campo elétrico e temperatura.

Com relação à viscosidade do fluido-suporte, observou-se que quanto maior a viscosidade do mesmo, mais rapidamente a tensão de cisalhamento se estabiliza em um certo valor (Fig.4.14). Isso se deve à maior mobilidade das partículas em meios de menor viscosidade; assim, o movimento rotatório do cilindro externo contribui de forma mais eficiente para o incremento da estrutura fibrosa quanto menor for a viscosidade do fluido de silicone.

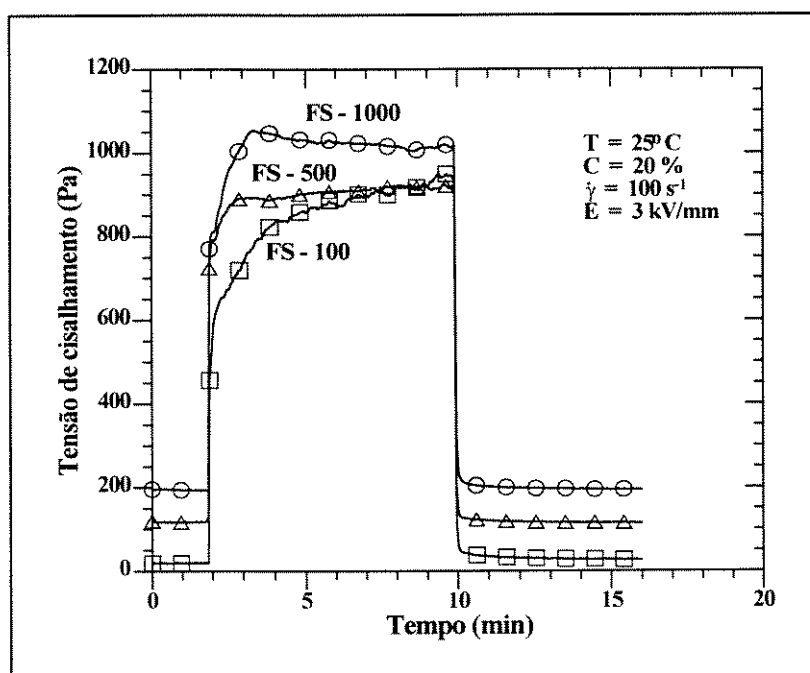


FIG.4.14 - Análise transiente de  $\tau$  para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de várias viscosidades.

• **Variação da corrente:** a passagem de corrente através de fluidos ER é muito pequena (da ordem de mA). Assim, a potência necessária também é baixa e tem seu valor próximo de 1 ou 2 watts. Durante os testes observou-se que aumentando-se a taxa de cisalhamento a corrente diminuía. Isso ocorreu devido ao movimento rotatório do cilindro externo do reômetro que dificultava a formação de fibras ao longo dos eletrodos. Na Fig.4.15 observa-se que, como conseqüência do aumento da intensidade do campo elétrico, existe um

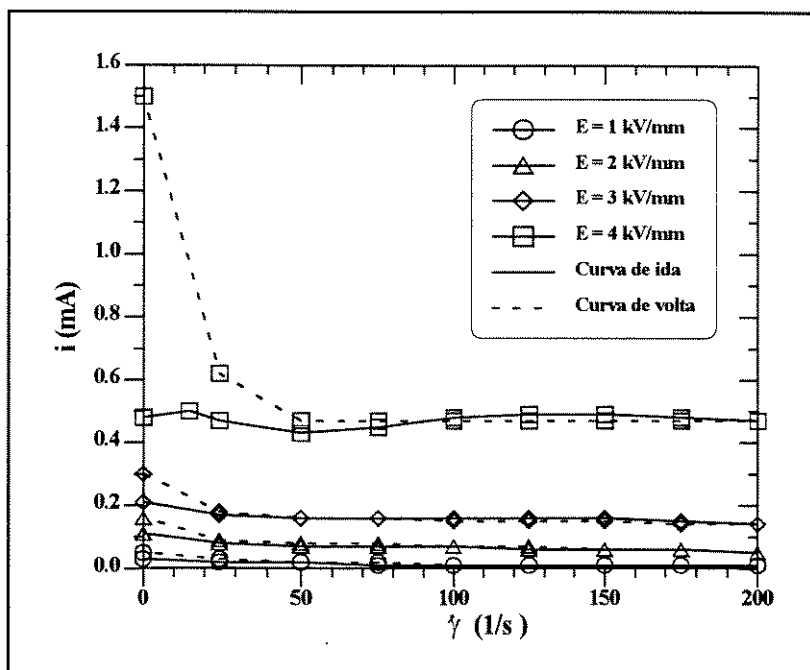


FIG.4.15 - Variação da corrente elétrica com  $\dot{\gamma}$  para suspensões de 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

aumento na corrente elétrica que passa através do fluido ER. Além disso, há uma histerese na curva de volta da corrente (quando  $\dot{\gamma}$  diminui), indicando que a estrutura final é diferente da inicial, diferença esta que é resultado do aumento do número e da espessura das fibras (incremento da estrutura fibrosa - Fig.4.15). A concentração e a temperatura produziram um comportamento sobre a corrente contrário ao descrito acima. Aumentando-se a concentração, a corrente também aumentava devido à maior proximidade das partículas (Fig.4.16); com o aumento da temperatura, a mobilidade dos íons aumentava provocando, também, um aumento na intensidade da corrente.

#### 4.1.2 Fluidos ER à base de CMC

Os fluidos eletro-reológicos à base de carboximetilcelulose (CMC) não precisavam conter água devido à presença de um grupo polar na molécula de CMC, responsável pelo

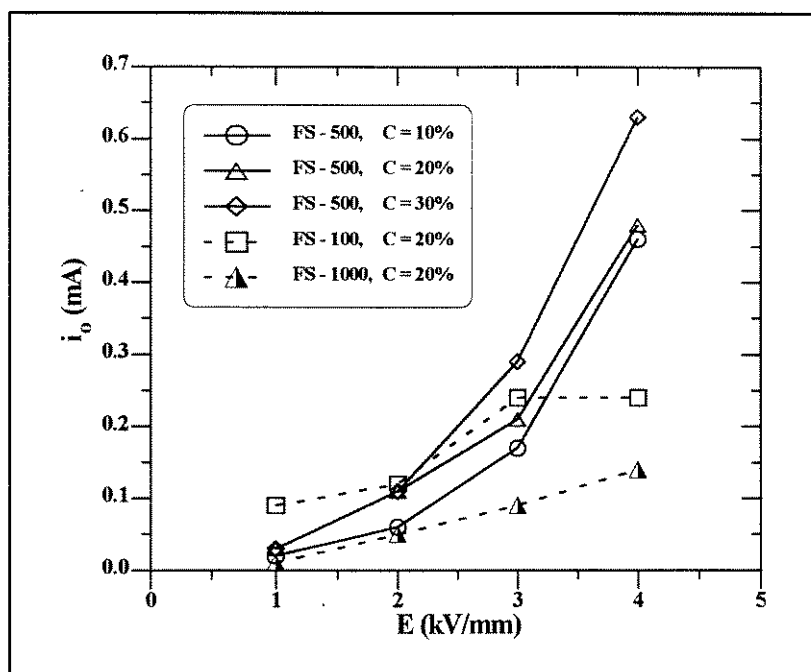


FIG.4.16 - Variação da corrente  $i_0$  ( $i$  para  $\dot{\gamma} = 0$ ) com o campo elétrico para suspensões de amido (22% de água) em fluido de silicone ( $T=25^\circ\text{C}$ ).

efeito ER neste caso. Observou-se que a velocidade de sedimentação de partículas nesse tipo de fluido era bem mais alta que nos fluidos à base de amido. Entretanto, seu desempenho ER foi muito mais acentuado, com o inconveniente de apresentar uma maior intensidade de corrente elétrica (apesar da ausência de água nas partículas). A seguir estão os resultados obtidos em testes rotacionais para suspensões com partículas de CMC imersas em fluido de silicone para diferentes concentrações, temperaturas, viscosidades de fluido-suporte e intensidades de campo elétrico.

- **Efeito do campo elétrico:** O comportamento de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  para as suspensões de CMC em fluido de silicone foi semelhante ao das suspensões de amido e de silicato de alumínio [viei-94] (Fig.4.17), entretanto seu efeito ER foi muito mais intenso que para os outros fluidos testados. Apesar disso, os resultados aqui obtidos mostraram que existem alguns fatores que dificultam a sua utilização em dispositivos mecânicos:

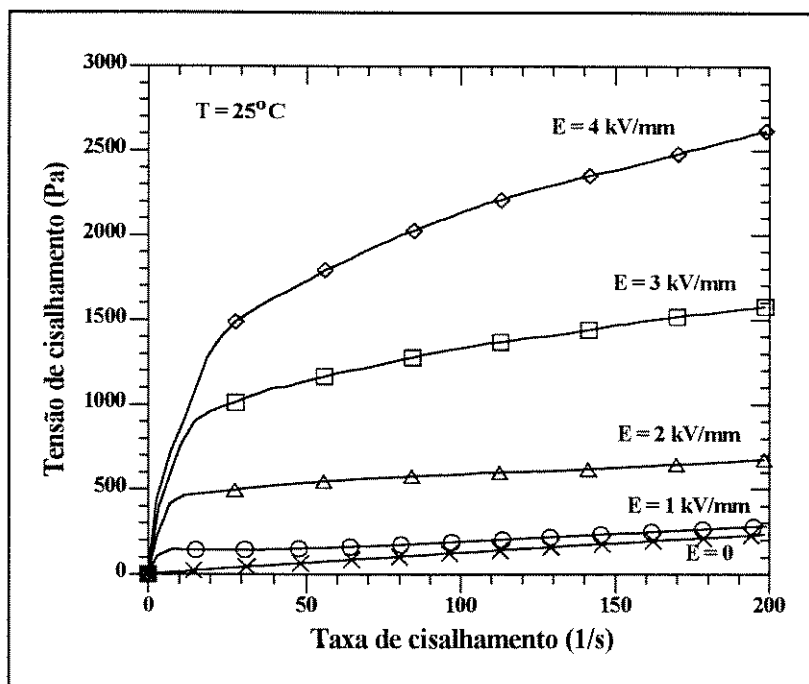


FIG.4.17-  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  para fluidos com 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt).

1. a sedimentação de partículas é mais rápida;
2. a corrente elétrica que passa através dele é mais alta;
3. à medida que o campo elétrico aumenta, o comportamento do fluido à base de CMC se afasta cada vez mais do modelo de Bingham;
4. com o aumento de  $E$ , existe um aumento da histerese na curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$ , indicando que este tipo de fluido tem uma memória grande e que sua resposta a uma tensão aplicada sobre ele vai depender muito do histórico de deformação que ele sofreu anteriormente a essa tensão (Fig.4.18).

Pela Fig.4.18 observa-se que existe uma histerese dos fluidos ER compostos por fluido de silicone com viscosidade de 1000 cSt (FS-100), mesmo quando  $E = 0$ , devido à memória<sup>1</sup> dos mesmos. Isso não ocorreu para FS-100 e 500 cSt. Quando o campo elétrico é ligado, essa histerese aumenta para todos os fluidos com 20% de CMC, ou seja,  $\tau$  passa a ser

<sup>1</sup> Dependendo do processo a que foi submetido anteriormente, o fluido ER se comporta de uma ou outra maneira. A isso foi dado o nome de "memória do fluido ER". Esta memória é responsável pela histerese do mesmo na curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento.

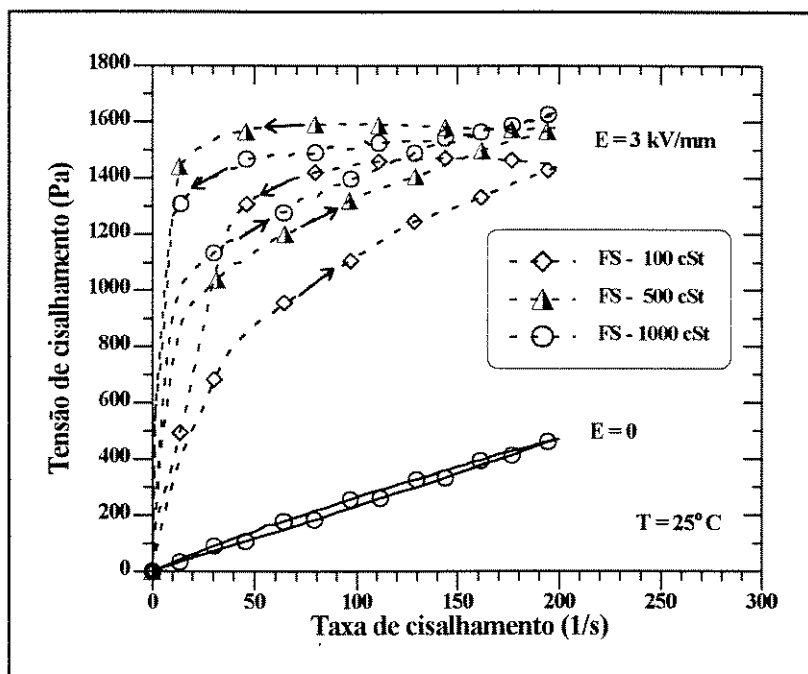


FIG.4.18 - Histerese em fluidos ER para 20% em peso de CMC e várias viscosidades de fluido-suporte.

bem maior quando  $\dot{\gamma}$  diminui (curva de volta) do que quando ele aumenta (curva de ida), pois, na volta, a formação das fibras rompidas pelo cisalhamento parte de um estado diferente que na ida, onde inicialmente não existem fibras. Outro aspecto que se nota, está relacionado com a influência da viscosidade do fluido-suporte sobre a histerese. Observa-se que para  $E = 2 \text{ kV/mm}$ , o aumento da viscosidade do fluido de silicone provoca um aumento na tensão de cisalhamento e uma diminuição da histerese do fluido. Essa diferença de histereses ocorre porque, aumentando-se a viscosidade do fluido-suporte, as partículas têm maior dificuldade em se movimentar dentro dele; assim, à medida que  $\dot{\gamma}$  vai diminuindo de  $200 \text{ s}^{-1}$  para  $\dot{\gamma} = 0$  (volta da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$ ), as fibras que foram rompidas com o cisalhamento tendem a se formar novamente e de maneira mais rápida quanto mais fácil for sua movimentação dentro do fluido-suporte (fluido de silicone de menor viscosidade); e esta diferença entre as curvas é tão maior quanto menor for a viscosidade do fluido de silicone. Esse efeito é ainda mais acentuado para  $E = 3 \text{ kV/mm}$ , onde o fluido com fluido de silicone de 500 cSt apresenta  $\tau$  maior que o de 1000 cSt na volta da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$ .

Na Fig.4.19 tem-se o comportamento de  $\eta_A$  em função de  $E$  que é semelhante ao comportamento observado no amido e no silicato de alumínio; ou seja, um aumento de  $\eta_A$  com  $E$  e uma diminuição de  $\eta_A$  com  $\dot{\gamma}$  (devido ao rompimento das fibras).

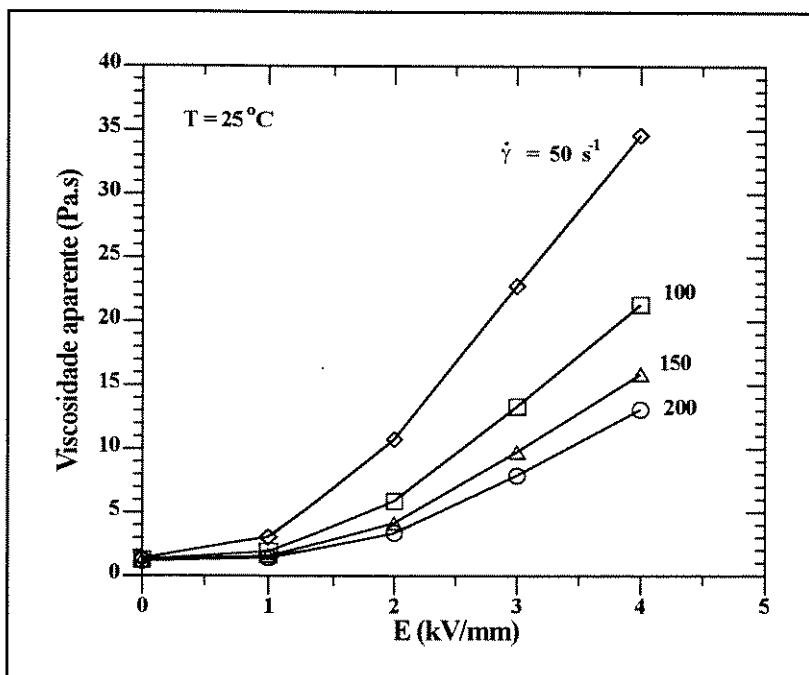


FIG.4.19 - Influência do cisalhamento e do campo elétrico na viscosidade aparente de fluidos ER com 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt).

Com relação ao efeito de  $E$  em  $\tau_y$  (Fig.4.20), pode-se afirmar que o aumento do campo elétrico provoca um aumento na tensão mínima de escoamento, e que a temperatura não tem influência sobre  $\tau_y$ . Entretanto, é preciso ter muito cuidado neste tipo de análise porque para fluidos à base de CMC, o que se observa para campos elevados é um comportamento que se afasta muito do modelo de Bingham. Assim, os valores de  $\tau_y$  obtidos para esses casos vêm de uma extrapolação da região reta da curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  (altos valores de  $\dot{\gamma}$ ) até  $\dot{\gamma} = 0$ ; ou seja, assume-se a intersecção da reta com o eixo-y como o ponto de tensão mínima de escoamento. Na realidade, a tensão mínima de escoamento estática não existe para suspensões de CMC submetidas a altos campos elétricos, sendo que os valores de  $\tau_y$  na Fig.4.20 foram determinados somente a título de comparação.

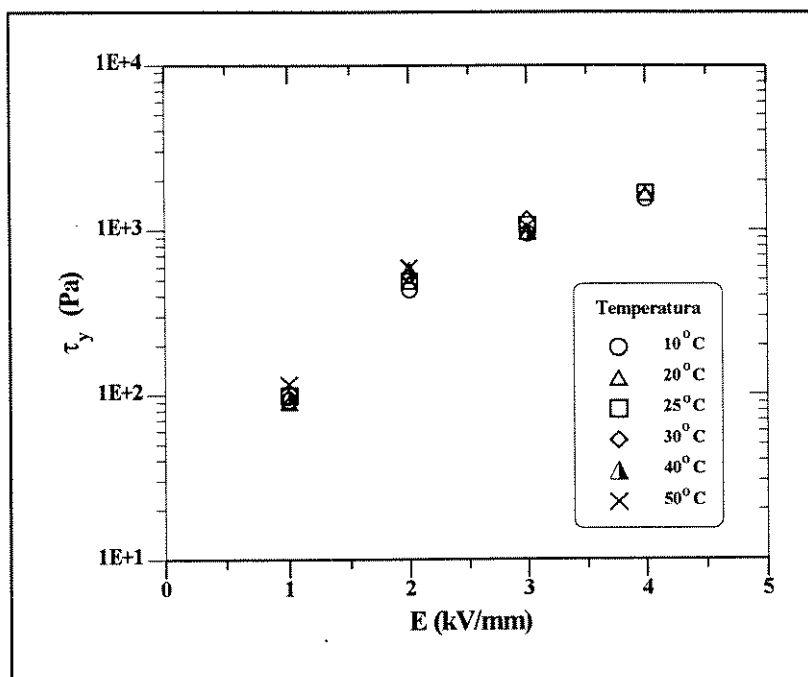


FIG.4.20 -  $\tau_y$  em função de  $E$  para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) a várias temperaturas.

• **Efeito da concentração:** Na Fig.4.21 observa-se que para  $E = 0$ , o aumento da concentração de CMC vai mudando o comportamento do fluido ER, que deixa de ser newtoniano para  $C = 25\%$  e  $C = 30\%$  em peso. Já para  $E = 3$  kV/mm, o aumento da concentração faz com que o fluido ER tenha um comportamento cada vez mais próximo do comportamento de um fluido de Bingham.

Também foi observado que na ausência de campo elétrico, o aumento da concentração de partículas, além de aumentar a tensão de cisalhamento e a viscosidade da suspensão, provoca uma histerese na curva de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  devido à memória do fluido (Fig.4.22). Sob a ação de  $E$ , as suspensões com concentrações mais baixas também apresentaram essa histerese que, inclusive, é mais acentuada que para fluidos mais concentrados. Isso, como já foi dito, se deve à maior mobilidade que as partículas de suspensões menos concentradas apresentam, o que permite um rearranjo mais rápido das mesmas, fazendo com que mais e mais fibras se formem, aumentando, assim, a tensão de cisalhamento. Com relação ao efeito ER, fluidos com  $C = 25\%$  de CMC se mostraram mais ativos do que aqueles com  $C = 10\%$  de CMC.



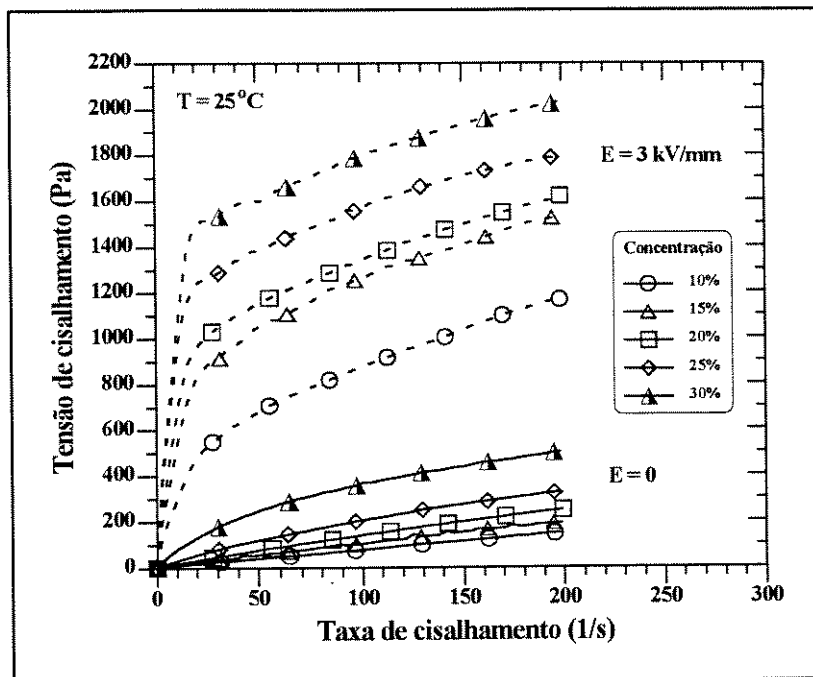


FIG.4.21 - Efeito do campo elétrico e da concentração sobre a curva de  $\tau$

em função de  $\dot{\gamma}$  para suspensões de CMC em fluido de silicone (500 cSt).

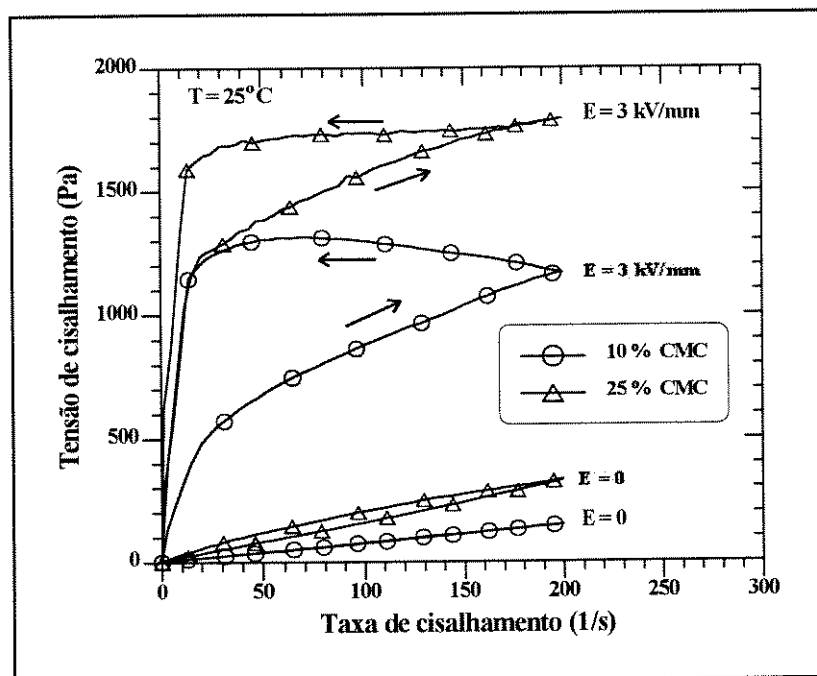


FIG.4.22 - Histerese de fluidos ER para diferentes intensidades de campo elétrico e concentrações de CMC em fluido de silicone (500 cSt).

Pelo gráfico de  $\eta_R$  em função de  $C$  (Fig.4.23), observa-se que existe uma concentração ótima de CMC onde  $\eta_R$  é maximizado, e esta concentração está por volta de 15% em peso de partículas. Existe aí uma saturação do efeito ER à medida que se aumenta a porcentagem de partículas na suspensão. Segundo Block [bloc-88] não somente a proximidade de uma partícula com relação à outra, mas também a separação entre elas, são parâmetros importantes no efeito ER.

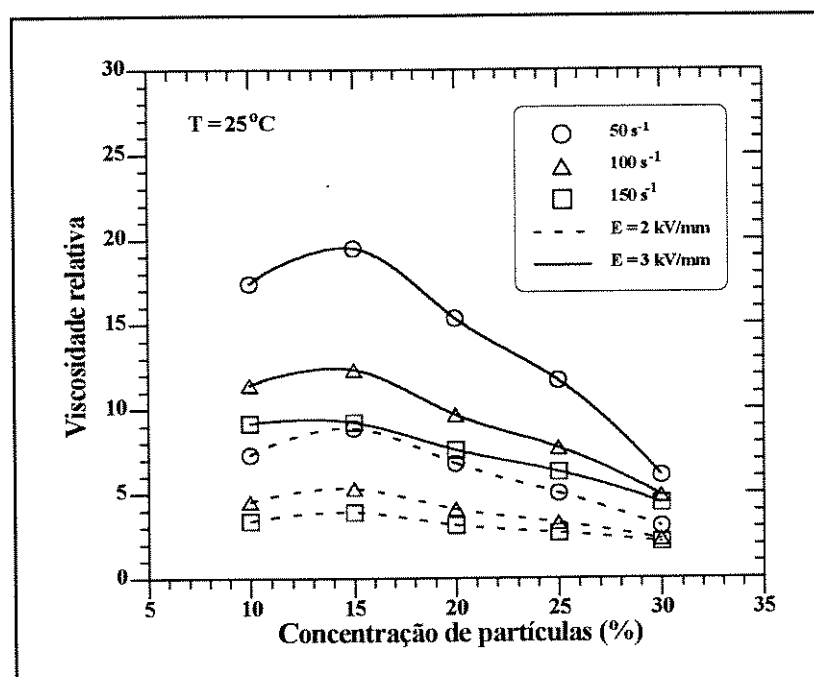


FIG.4.23 - Concentração em função da viscosidade relativa para fluidos à base de CMC em fluido de silicone (500 cSt).

• **Efeito da temperatura:** Aumentando-se a temperatura ( $E = 2$  kV/mm na Fig.4.24), observa-se que os fluidos com CMC têm um aumento na tensão de cisalhamento para um dado valor de  $\dot{\gamma}$ . Nas temperaturas testadas o aumento na força da estrutura fibrosa produzido pelo campo elétrico prevaleceu sobre o decréscimo na viscosidade do fluido-suporte. Provavelmente, se fossem realizados testes a temperaturas mais elevadas, haveria uma temperatura em que a diminuição da viscosidade do fluido de silicone teria um efeito maior que o aumento da força da estrutura fibrosa, provocando, então, uma diminuição em  $\tau$  (como aconteceu com o amido). Estes testes não foram feitos devido ao aumento excessivo da

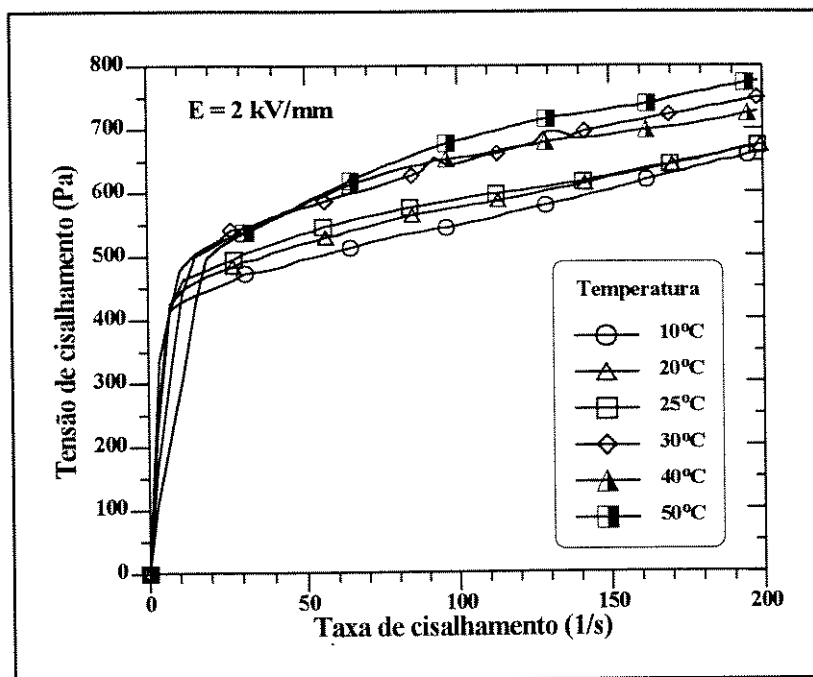


FIG.4.24 - Variação de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$  com a temperatura para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) e  $E = 2 \text{ kV/mm}$ .

corrente elétrica com a temperatura e ao fato de a ruptura dielétrica da suspensão ser atingida cada vez a campos elétricos mais baixos.

• **Variação da Corrente elétrica:** Pela Fig.4.25 observou-se que o aumento da corrente elétrica ocorre com o aumento de  $E$  ou com o aumento da concentração de partículas de CMC. Com relação à viscosidade do fluido-suporte, para  $C = 20\%$  em peso de CMC, o fluido ER que apresentou menor passagem de corrente foi o de 500 cSt. Para as partículas de CMC existe uma histerese no comportamento de  $i$  em função de  $\dot{\gamma}$ . Aumentando-se o campo elétrico, a histerese também aumenta (Fig.4.26). Isso nada mais é do que um reflexo do que acontece com a estrutura do fluido.

#### 4.1.3 Comparação entre fluidos feitos com diferentes partículas

Através da Tab.3.1 pode-se ter uma idéia da atividade ER de fluidos compostos por partículas de amido, sílica gel, CMC e silicato de alumínio. Observa-se que os fluidos ER

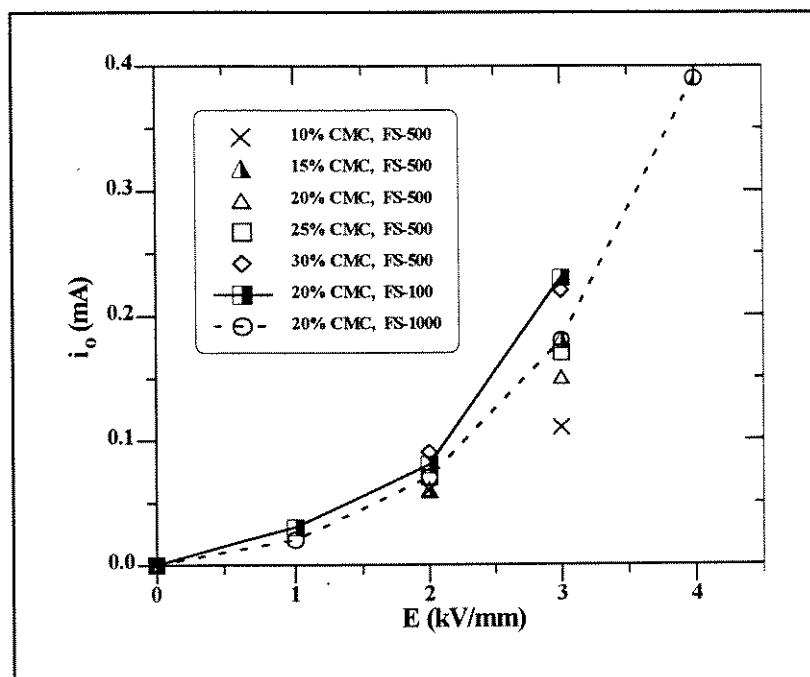


FIG.4.25 - Comportamento da corrente elétrica com o campo para várias concentrações de CMC e diferentes viscosidades de fluido-suporte ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

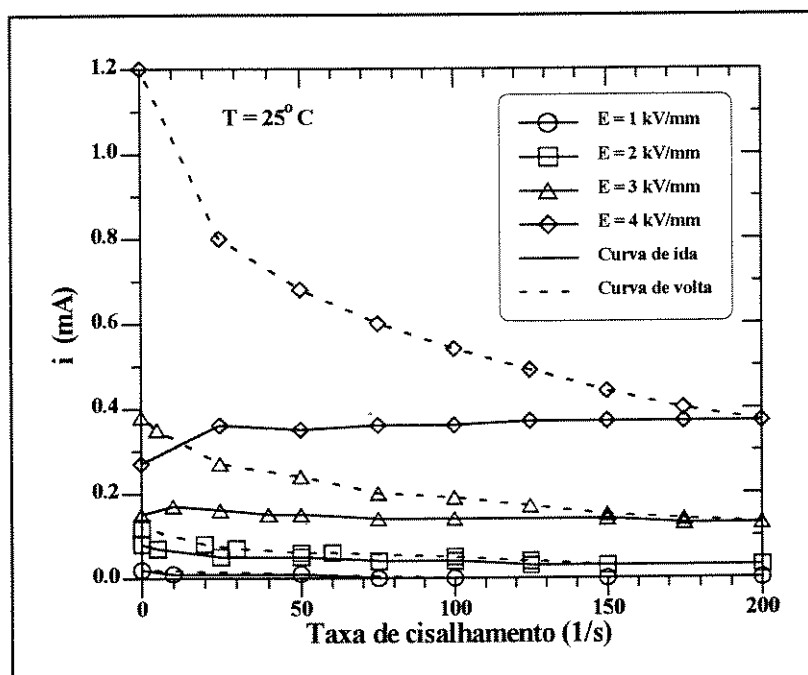


FIG.4.26 - Comportamento da corrente elétrica com a tensão de cisalhamento para fluidos à base de CMC (20% em peso) em fluido de silicone (500 cSt).

compostos por partículas de sílica gel e de silicato de Al têm um efeito eletro-reológico menos intenso que os fluidos com amido ou com CMC. Alguns motivos para essa diferença de atividade ER são:

- as partículas de silicato de Al contêm uma porcentagem de água muito baixa (1,8%);
- as partículas de sílica gel são bem maiores que as demais, dificultando, assim, a movimentação das mesmas no fluido-suporte e, conseqüentemente, diminuindo o efeito ER;
- as partículas de amido e, principalmente, as de CMC têm uma capacidade de polarização maior que as demais, havendo formação de um número maior de fibras e uma atividade ER mais intensa.

Todos os fluidos estudados apresentam um comportamento que pode ser descrito pelo modelo de Newton quando  $E = 0$ , pelo modelo de Bingham para baixos campos elétricos e pelo modelo das potências para campos elétricos mais altos ( $E > 4$  kV/mm).

Somente as suspensões de silicato de alumínio apresentam uma dependência de  $\tau_y$  com a temperatura, enquanto que para os fluidos à base de amido e de CMC é válida a Eq(2.3):  $\tau_y = A E^n$ .

Para os fluidos à base de amido e de CMC, observou-se que a concentração de partículas tem grande influência na viscosidade relativa do fluido ER. Em ambas as suspensões, notou-se a existência de uma concentração ótima onde o efeito eletro-reológico era maximizado. Já para as suspensões de silicato de alumínio não foi detectada uma concentração ótima de partículas, porque só foi possível analisar fluidos com  $C \leq 5\%$  em peso, pois para concentrações mais elevadas o fluido se tornava tão espesso que a realização dos testes era inviabilizada.

Quanto ao efeito da temperatura no comportamento ER, observou-se que para as temperaturas testadas, os fluidos com amido apresentaram a ocorrência de efeitos opostos (diminuição da viscosidade do fluido-suporte com a temperatura e aumento da força da estrutura fibrosa com o campo elétrico). Para o silicato de Al o aumento da força de estrutura fibrosa com  $E$  não foi suficiente para superar a diminuição da viscosidade do fluido de silicone

devido à baixa porcentagem de água contida nas partículas. Quanto ao CMC, a queda da viscosidade do fluido-suporte com T não superou o efeito ER, de modo que a tensão de cisalhamento aumentava continuamente com a temperatura para  $T \leq 50^{\circ}\text{C}$ .

Quanto à corrente elétrica que passava através dos fluidos ER, observou-se que para suspensões de 25% em peso,  $T = 30^{\circ}\text{C}$  e  $E = 1 \text{ kV/mm}$ , os fluidos à base de sílica gel apresentaram corrente variando entre 0,03 a 3 mA, enquanto que no amido ela não foi detectada. Já para o CMC, os maiores níveis de corrente foram de 1,2 mA ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $E = 4 \text{ kV/mm}$  e  $C = 20\%$  em peso). Quanto ao silicato de Al, a máxima corrente elétrica atingida durante os testes foi de 0,01 mA devido à sua fraca atividade ER (baixíssima quantidade de água).

#### 4.2 Sólidos: Ensaios Mecânicos

Em cada um dos ensaios mecânicos realizados com os fluidos ER foram encontrados vários obstáculos. Entre eles estava a dificuldade em se reproduzir os fluidos à base de amido, pois as partículas absorviam quantidades diferentes de água durante o processo de umidificação. Esta absorção dependia do tamanho das partículas e de sua localização no becker (mais próximas da atmosfera úmida ou numa posição mais profunda no frasco). Esta quantidade de água absorvida alterava a formação da estrutura fibrosa e mudava a condução de corrente através das fibras, alterando, assim, a transferência de calor no sistema.

O efeito Joule também era um fator extremamente importante no aumento da temperatura no fluido ER. Durante os testes no reômetro RV-20, o efeito Joule foi minimizado, uma vez que, além de a temperatura da amostra de fluido eletro-reológico estar sendo rigorosamente controlada, o movimento rotatório do reômetro ajudava na homogeneização da amostra, e a quantidade de material era pequena (resultando em uma menor corrente elétrica e menor calor produzido pelo efeito Joule). Nos ensaios de tração, compressão, cisalhamento e fadiga, além de ser difícil controlar a temperatura (temperatura ambiente), o aquecimento da amostra era bem maior que nos testes rotacionais devido à

necessidade de uma maior quantidade de material ER. Além disso, nos ensaios de fadiga, o aquecimento da amostra estava relacionado com a frequência com que se solicitava a amostra. Quanto menor era a frequência, mais tempo o material ER ficava submetido ao efeito Joule e maior era o aquecimento do mesmo; entretanto, o aumento da frequência dificultava o controle de carga na MTS durante o ensaio (ela variava dentro de uma faixa muito maior). Tudo isso alterava a distribuição das partículas na estrutura fibrosa, diferentemente de um metal, o qual apresenta uma estrutura cristalina definida. Desta maneira, a repetibilidade de cada ensaio ficava comprometida. Daí surge a necessidade de se controlar mais eficientemente a temperatura de modo a minimizar as conseqüências provocadas pelo efeito Joule.

Também foi observado que se a mesma amostra de fluido fosse usada em ensaios de tração consecutivos, havia um deslocamento da curva de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$  para valores mais baixos, ou seja, o fluido ER ia perdendo sua força fosse por perda de material que escorria pelas laterais do dispositivo, ou pelo fato de as partículas não conseguirem se rearranjar da mesma maneira que no primeiro ensaio. Entretanto, se após um ensaio de tração a amostra fosse bem homogeneizada antes de se iniciar um novo ensaio, as curvas eram praticamente coincidentes.

Tendo em mente todos estes problemas, os ensaios foram feitos várias vezes até se ter o comportamento médio de cada suspensão. Como a análise estatística das propriedades mecânicas de materiais ER não é um dos objetivos deste trabalho, foi escolhida a amostra de 20% em peso de amido em óleo de silicone (500 cSt) para se fazer o tratamento estatístico dos dados de sua curva de fadiga ( $S_{m\acute{a}x}$ -N). Para os demais ensaios, foram tabelados somente três dos resultados para esta mesma amostra. A seguir são apresentados os resultados e análise dos ensaios de tração, fadiga, compressão e cisalhamento.

#### **4.2.1 Ensaios de Tração**

Os ensaios de tração foram realizados na MTS (Material Testing System), sendo que foram ensaiados dois tipos de materiais eletro-reológicos: fluidos compostos por partículas de

amido e de carboximetilcelulose dispersas em óleo de silicone. O campo elétrico variou de 1 a 4 kV/mm, a temperatura foi a ambiente e as concentrações de fase dispersa foram 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40% em peso. As viscosidade dos óleos de silicone usados foram de 100, 500 e 1000 cSt. A velocidade com que os fluidos foram tracionados foi de 0,02 mm/s.

Nos ensaios de tração há um aspecto importante a ser destacado que é a variação do campo elétrico no decorrer dos mesmos. Durante cada ensaio, a tensão  $V$  aplicada entre os eletrodos era constante; entretanto, o campo elétrico  $E$  ( $=V/D$ ) variava à medida que a distância entre os eletrodos ia aumentando (material era tracionado). Isso poderia ser contornado, aumentando-se a tensão  $V$  à medida que as placas fossem sendo distanciadas. Neste caso, a tensão deveria variar segundo a equação:

$$V = V_0 + 0,02 V_0 t, \quad (4.1)$$

onde  $V_0$  é a tensão no início do teste dada em volts,  $t$  é o tempo dado em segundos, 0.02 mm/s é a velocidade com que o material é tracionado e a distância inicial entre os eletrodos é de 1mm.

Nos ensaios realizados,  $V$  se manteve constante e  $E$  variou segundo a equação:

$$E = \frac{V_0}{1 + 0,02 t} \quad (4.2)$$

Em todos os ensaios realizados não foi observada a formação de vácuo; ao contrário, o que se notou foi a entrada de ar entre as placas de eletrodos à medida que o material ER era tracionado e ia sofrendo o fenômeno de redução de área, semelhante à estrição. Para as amostras menos concentradas, durante a tração havia a formação de caminhos preferenciais percorridos pelo ar, os quais partiam da borda dos eletrodos em direção ao centro da amostra. Já para concentrações maiores, esses caminhos preferenciais eram menos perceptíveis (embora existentes) e não havia vestígios no centro das amostras da ocorrência de vácuo.

A Fig.4.27 mostra como ocorria o fenômeno de redução de área do material ER



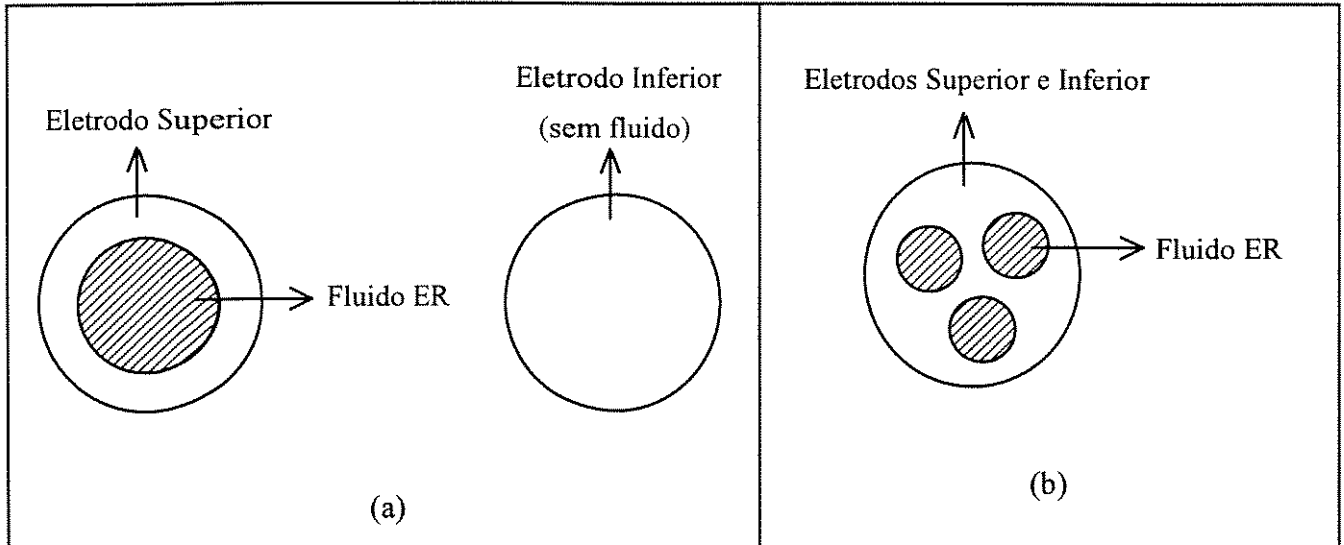


Fig.4.27 - Configuração do fluido ER nos eletrodos inferior e superior após o término do ensaio de tração para amostras: (a) concentradas e/ou submetidas a altos campos elétricos; (b) amostras menos concentradas e/ou sob baixos campos elétricos.

durante os ensaios de tração. A Fig.4.27-(a) corresponde aos fluidos mais concentrados (30 a 40%) e/ou amostras submetidas a campos elétricos elevados (3 a 4 kV/mm); enquanto que a Fig.4.27-(b) diz respeito aos fluidos de menor concentração (10 e 15%) e/ou fluidos submetidos a baixos campos elétricos (1 a 2 kV/mm). Entretanto, a combinação da concentração com o campo elétrico é que vai determinar essa distribuição do material ER nos eletrodos. Destes, o mais importante é a concentração de partículas.

Também é interessante comentar que, durante os ensaios, foram observados a formação e o rompimento das fibras à medida que as amostras eram tracionadas. Mesmo depois de rompidas, elas continuavam alinhadas com o campo elétrico e, somente com a retirada dele é que as fibras se desfaziam e o material começava a escoar da placa superior para a inferior.

#### 4.2.1.1 Fluido à base de amido

Na Fig.4.28 estão os gráficos de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$  para amostras com 20% em peso de amido em fluido de silicone (500 cSt) para várias intensidades de campo elétrico  $E_0$  (campo

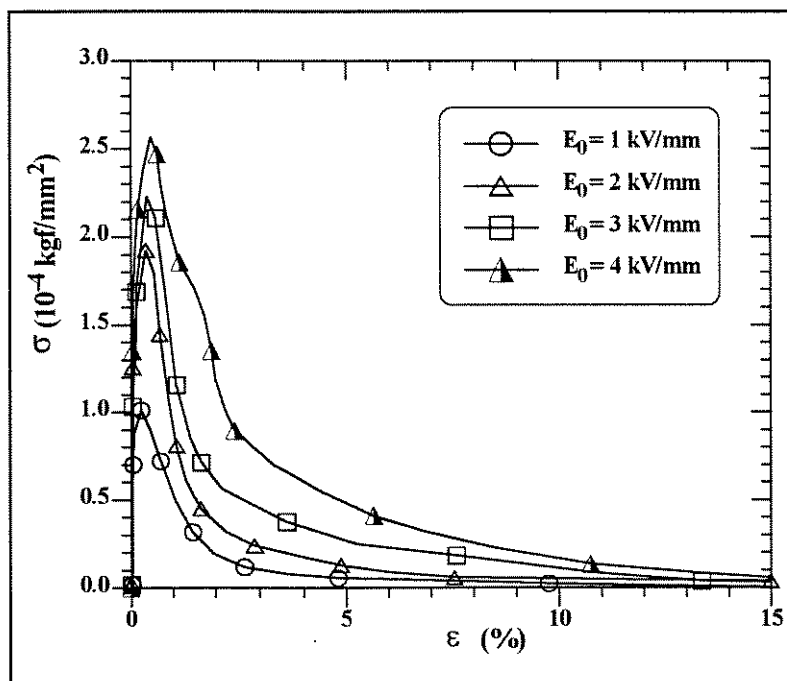


Fig.4.28 - Gráfico da tensão em função de deformação para suspensões a 20% em peso de amido (22,8% de água) em fluido de silicone (500 cSt) para vários campos elétricos e temperatura ambiente.

antes do início de cada ensaio). Observa-se que para elevados valores de  $E$ , o fluido ER se comporta como um material cada vez mais dúctil, sendo que os limites de resistência ( $\sigma_l$ ) e elástico ( $\sigma_{el}$ ) aumentam.

Sabe-se que para baixos campos elétricos, como as partículas estão mais dispersas e, portanto, mais distantes umas das outras, a estrutura em forma de fibras não é tão definida quanto para campos mais elevados. Assim, o material ER é menos dúctil, apresentando uma pequena área sob a curva de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$ . Com o aumento do campo elétrico, a estrutura fibrosa se torna mais definida, sendo formada por colunas (fibras espessas) e fibras estreitas. À medida que a amostra é tracionada, as partículas de cada coluna sofrem um rearranjo de modo que as colunas vão se tornando mais longas e estreitas. Isso faz com que o material suporte uma maior carga para uma mesma deformação, alargando a área sob a curva de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$ . Em outras palavras, o material se torna mais dúctil com o aumento do campo elétrico, e há um aumento no módulo de tenacidade do mesmo. Além disso, pode-se observar através deste gráfico que até o limite de resistência o fluido ER se comporta semelhantemente a um sólido, mas que a partir deste ponto o fluido passa a exibir um comportamento intermediário

entre sólido e líquido, sendo que, à medida que a deformação aumenta, o fluido ER vai perdendo suas características de sólido. Sob o aspecto da estrutura do fluido ER, esta mudança de fase de sólido para líquido ocorre da seguinte maneira: sob a ação do campo elétrico, a estrutura fibrosa é formada de modo a fornecer ao material, características de um sólido. À medida que o fluido ER é tracionado, as partículas constituintes de cada fibra movem-se dentro do material de maneira elástica até que o limite elástico seja atingido. A partir daí, a deformação continua de modo a afastar cada vez mais uma partícula da outra até que seja atingido o limite de resistência do material. Neste ponto, o fluido eletro-reológico começa a ter um comportamento intermediário entre sólido e líquido, sendo que, com o aumento da deformação, as partículas vão ficando cada vez mais distantes entre si, fazendo com que a estrutura em forma de cadeias vá perdendo sua força até que seja destruída.

Nas figuras 4.29 e 4.30 pode-se observar como a variação da viscosidade do fluido de silicone e da concentração de partículas influenciam os resultados finais. Com o aumento da viscosidade do fluido de silicone, existe um aumento do limite de resistência ( $\sigma_r$ ) do material, pois uma viscosidade alta de fluido-suporte tende a manter as partículas unidas, dificultando

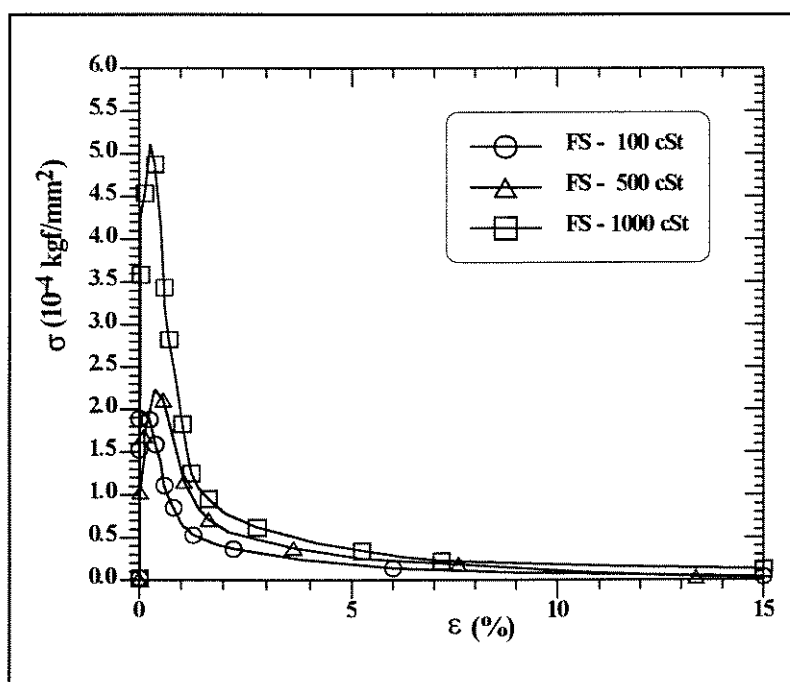


Fig.4.29 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de 20% em peso de amido (22,8% de água) em fluido de silicone de várias viscosidades ( $T = T_{AMB}$  e  $E_0 = 3$  kV/mm) .

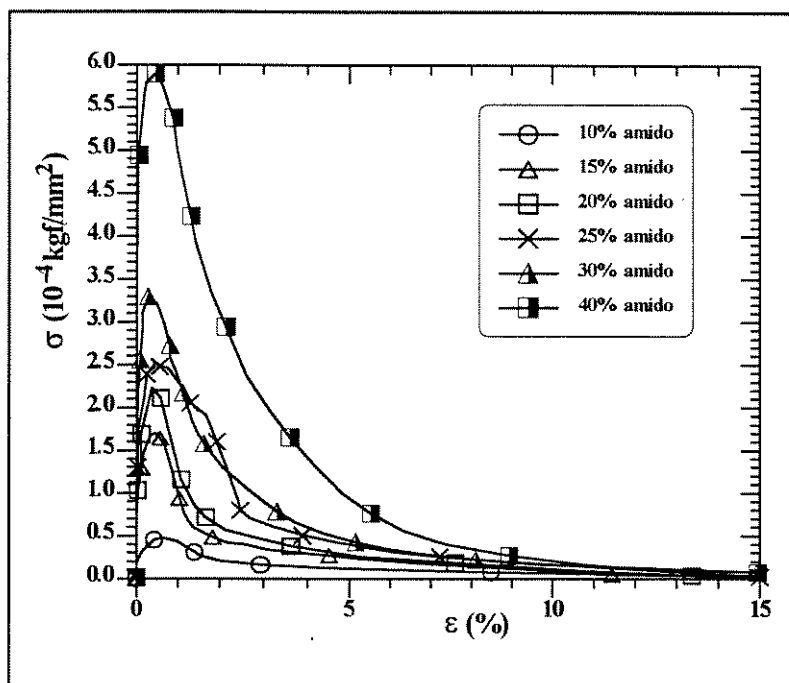


Fig.4.30 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a várias concentrações de amido (22,8% de água) em fluido de silicone (500 cSt), temperatura ambiente e  $E_0 = 3$  kV/mm.

a ruptura das fibras. Somado a isto, o material se torna mais dúctil. O aumento da concentração também provoca um aumento de  $\sigma_t$  (pois a estrutura fibrosa é incrementada) e dá ao material um caráter mais dúctil. Na Fig.4.31 está ilustrado o comportamento de  $\sigma_t$  e  $\sigma_p$  em função da concentração.

Na Tab.4.1 são apresentados os valores dos limites de resistência ( $\sigma_t$ ), de proporcionalidade ( $\sigma_p$ ), elástico ( $\sigma_{el}$ ), a deformação no limite de proporcionalidade ( $\epsilon_p$ ), a deformação no limite de resistência ( $\epsilon_t$ ) e os módulos de elasticidade ( $E_y$ ) e de resiliência ( $U_R$ ). Através dos dados desta tabela, observa-se que o limite de resistência de fluidos ER à base de amido é de  $10^3$  a  $5 \times 10^4$  vezes menor que o do polietileno de baixa densidade (0,71 a 2,14 kgf/mm<sup>2</sup> [hert-89]), e é de 350 a 5000 vezes menor que o da borracha ( $\sigma_t = 0,21$  kgf/mm<sup>2</sup> [vlac-85]). Quanto ao módulo de elasticidade, seus valores são da mesma ordem de grandeza que o da borracha (0,105 kgf/mm<sup>2</sup> [souz-82]) e  $2,7 \times 10^3$  a  $10^5$  vezes menor que o do chumbo (1733 kgf/mm<sup>2</sup> [hert-89]). Pode-se notar que com o aumento do campo elétrico,  $E_y$  tende a aumentar até atingir um valor máximo a partir do qual diminui; isso ocorre para campos elétricos intermediários ( $2 \leq E_0 \leq 3$  kV/mm). Com o aumento da

concentração,  $E_y$  aumenta e depois decrece. Quanto à sua capacidade de absorver energia na zona elástica, esse tipo de fluido apresentou valores entre  $3 \times 10^3$  e  $10^5$  vezes menor que o ferro fundido.

Na Tab.4.2 estão três dos resultados obtidos para uma mesma amostra, mostrando a dispersão que há nos dados.

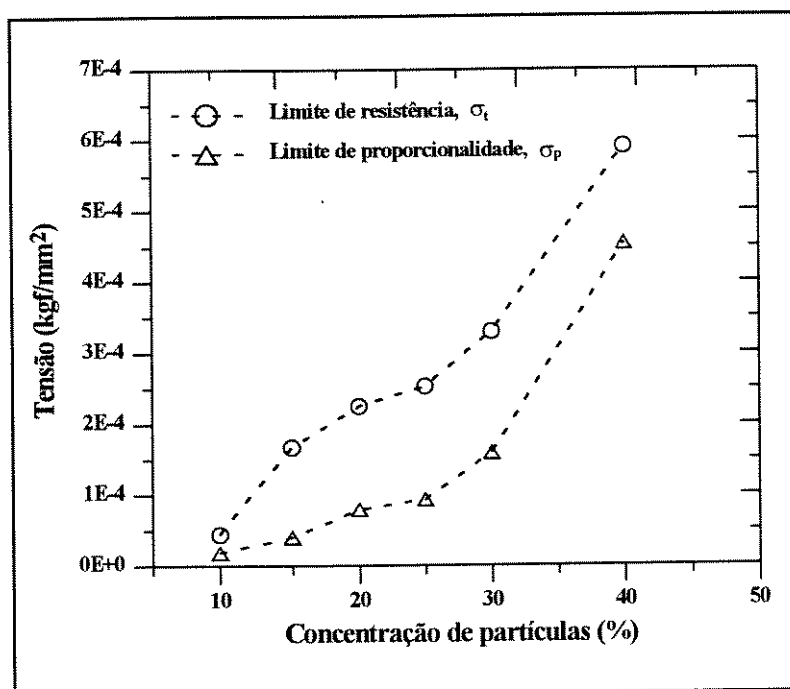


Fig.4.31 - Limites de resistência e de proporcionalidade em função da concentração de amido (FS-500,  $E_0 = 3$  kV/mm).

TAB.4.2 - Resultados dos ensaios de tração para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.

| amostra           | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_t \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_p \times 10^3$ |
|-------------------|------------------|--|--------------------------|
| 20%<br>FS-500 cSt | 3                | 1,41   | 1,25                     |
|                   |                  | 2,11   | 1,25                     |
|                   |                  | 2,25   | 0,25                     |

TAB.4.1 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido em fluido de silicone obtidas através de ensaios de tração.

| amostra     | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_t \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_p \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | * $\sigma_{el} \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_p \times 10^3$ | $\varepsilon_t \times 10^3$ | $E_y$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $U_R \times 10^7$<br>(kgf.mm/mm <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------------|--|--|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 10%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-500 cSt  | 3                | 0,44   | 0,18   | 0,19  | 1,25                        | 5,50                        | 0,014                           | 0,113  |
| 15%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-500 cSt  | 3                | 1,67   | 0,40   | 0,66  | 0,25                        | 4,75                        | 0,160                           | 0,050  |
| 20%         | 1                | 1,06   | 0,62   | 0,62  | 0,25                        | 2,50                        | 0,248                           | 0,078  |
|             | 2                | 1,95   | 0,91   | 0,99  | 0,25                        | 4,50                        | 0,364                           | 0,114  |
|             | 3                | 2,25   | 0,79   | 0,90  | 0,25                        | 3,75                        | 0,316                           | 0,099  |
|             | 4                | 2,60   | 1,15   | 1,41  | 0,50                        | 5,00                        | 0,230                           | 0,288  |
| 25%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-500 cSt  | 3                | 2,53   | 0,93   | 1,45  | 0,50                        | 3,50                        | 0,186                           | 0,233  |
| 30%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-500 cSt  | 3                | 3,30   | 1,59   | 2,38  | 0,25                        | 2,50                        | 0,636                           | 0,199  |
| 40%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-500 cSt  | 3                | 5,91   | 4,54   | 5,31  | 1,25                        | 5,50                        | 0,363                           | 2,838  |
| 20%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-100 cSt  | 3                | 1,94   | 1,16   | 1,79  | 1,00                        | 2,00                        | 0,116                           | 0,580  |
| 20%         |                  |  |  |   |                             |                             |                                 |  |
| FS-1000 cSt | 3                | 5,11   | 2,91   | 4,41  | 0,50                        | 3,25                        | 0,582                           | 0,728  |

$$\sigma_r = Q_r / S_0; \quad G = \sigma_p / \varepsilon_p; \quad U_R = \sigma_p \cdot \varepsilon_p / 2; \quad S_0 = \pi \cdot 85^2 / 4 \text{ mm}^2$$

\*  $\sigma_{el}$  foi obtido através do segundo método de Jonhson [souz-82].

Na Fig.4.32 estão as curvas de  $\sigma$  em função de  $\varepsilon$  para  $E = 0$ , indicando o quanto a adesividade da amostra nos eletrodos influencia os resultados dos ensaios de tração. Através dela, observa-se que para amostras até 30% em peso de partículas, as curvas de adesão não apresentaram picos maiores que 5,5% do valor de  $\sigma_t$  obtidos nos ensaios de tração para  $E_0 = 3$  kV/mm. Já para  $C = 40\%$ , esse valor chega a 8,9%.

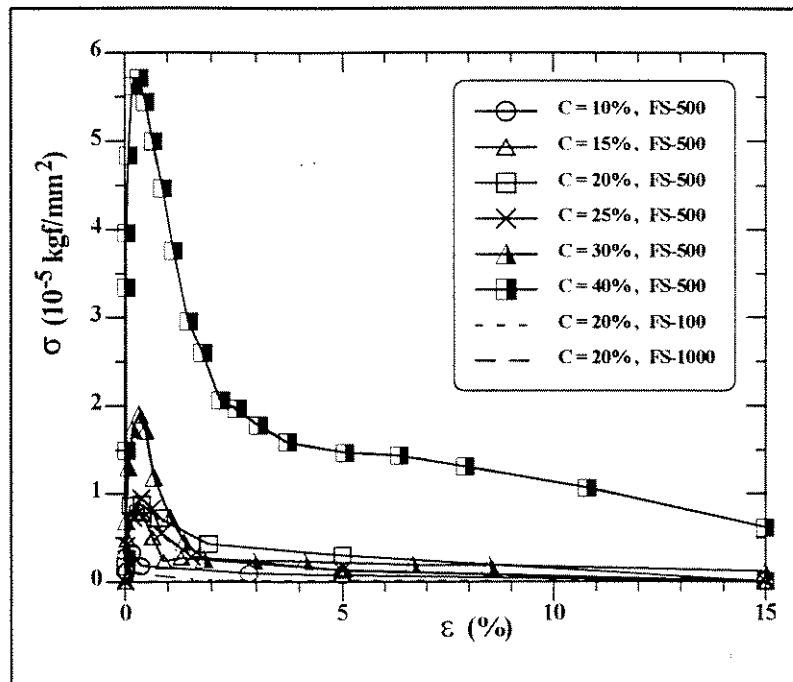


Fig.4.32 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de amido (22,8% de água) em fluido de silicone na temperatura ambiente – verificação do poder de adesão do fluido ER na ausência de campo elétrico.

A Fig.4.33 apresenta a variação da corrente elétrica com a concentração de partículas antes do início dos ensaios de tração para  $E_0 = 3$  kV/mm. Durante os ensaios, observou-se que  $i$  crescia continuamente, mesmo depois de o limite de resistência do material ter sido atingido, e depois diminuía. Todas as amostras apresentaram um valor máximo de corrente elétrica. Notou-se também que a temperatura aumentava, caso a amostra permanecesse muito tempo sob o campo elétrico, devido ao efeito Joule.

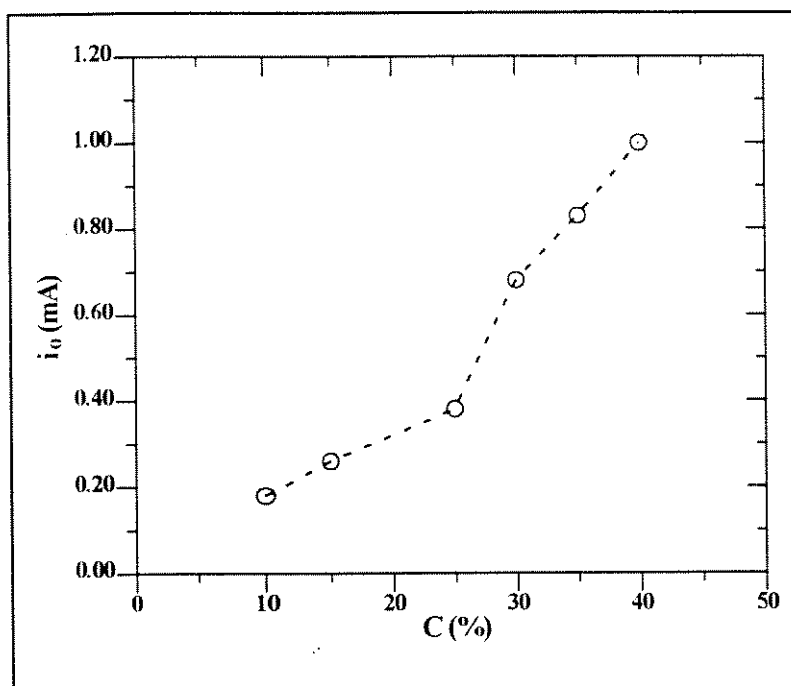


Fig.4.33 - Gráfico da corrente elétrica em função da concentração de partículas de CMC em fluido de silicone (500 cSt) para  $T = T_{AMB}$  e  $E_0 = 3 \text{ kV/mm}$ .

#### 4.2.1.2 Fluido à base de CMC

Na Fig.4.34 estão plotadas as curvas de tensão em função da deformação para as amostras de 20% em peso de CMC para vários campos elétricos. Observa-se que quanto maior for  $E$ , maior é o limite de resistência  $\sigma_t$  (conferir com Tab.4.3) e maior é a área sob a curva; ou seja, o material passa a ter um comportamento mais dúctil, assim como no caso do amido. Após atingido o limite de resistência do material, ele vai perdendo suas características de sólido, passando a ter um comportamento intermediário entre sólido e fluido, de modo que a MTS (máquina de tração) vai registrando tensões cada vez menores para deformações maiores que  $\epsilon_t$  (deformação no limite de resistência).

Com relação à variação da viscosidade do fluido-suporte, concluiu-se que quanto maior o seu valor, maiores são o limite de resistência do material e sua ductilidade (Fig.4.35). Em particular para o caso do fluido à base de fluido de silicone de 100 cSt, o material apresenta uma área sob a curva de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$  menor e bem mais estreita que para os



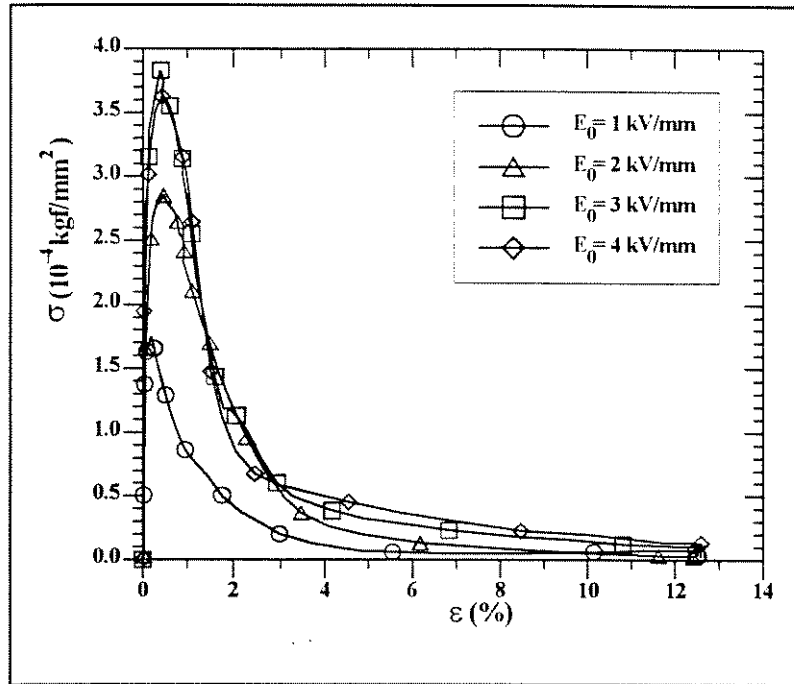


Fig.4.34 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone (500 cSt) e temperatura ambiente.

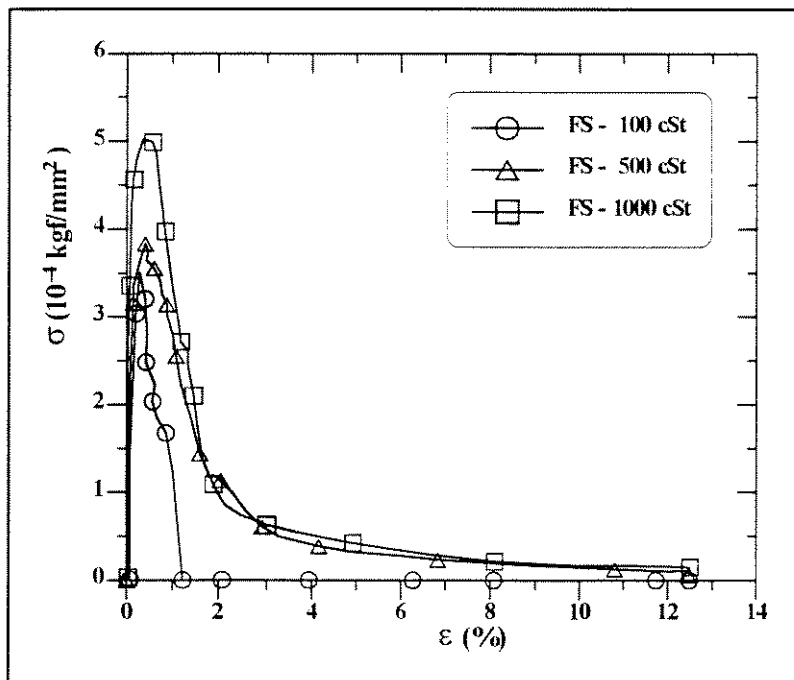


Fig.4.35 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões a 20% em peso de CMC em fluido de silicone de várias viscosidades a temperatura ambiente e  $E_0 = 3$  kV/mm.

demais casos (500 cSt e 1000 cSt), indicando ser um material menos dúctil. Este comportamento era esperado, uma vez que o fluido de silicone de menor viscosidade não oferece tanta resistência à quebra das fibras quanto os de viscosidade maior. Assim, o material com fluido-suporte mais viscoso, além de apresentar maior limite de resistência, tem comportamento mais dúctil que os demais.

O aumento da concentração provocou um aumento no limite de resistência e na ductilidade do material (Fig.4.36). Este tipo de comportamento ocorre porque para baixas concentrações, existe um menor número de fibras entre os eletrodos e que, ao se romperem, não se ligam às fibras intactas por causa da distância entre elas, dando um caráter menos dúctil ao material. Com o aumento da concentração, mais e mais fibras vão se formando de modo que quando uma delas se rompe, suas extremidades podem se ligar a uma outra fibra mais próxima, minimizando o efeito causado pelo rompimento da fibra. Desta forma, o material passa a apresentar um comportamento mais dúctil. Entretanto, para o caso de  $C = 35\%$ , apesar de o limite de resistência ser bem maior que para concentrações mais baixas, a área sob a curva de  $\sigma$  em função de  $\epsilon$  é bem mais estreita. Isso pode ser uma indicação de que, para

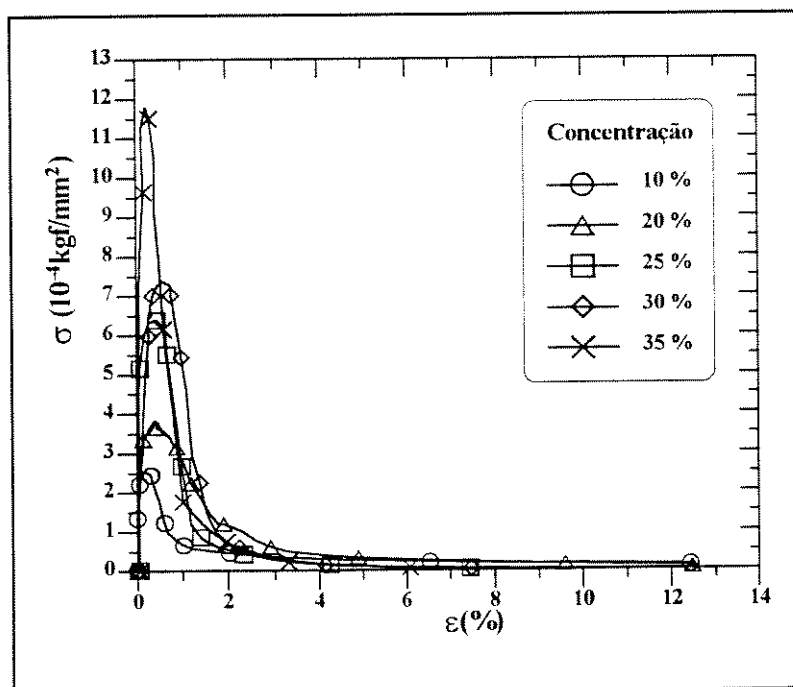


Fig.4.36 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de CMC em fluido de silicone (500 cSt) para  $T=T_{AMB}$  e  $E_0=3 \text{ kV/mm}$ .

concentrações muito altas, este material se torne cada vez menos dúctil. Sendo assim, deve existir uma concentração ótima de partículas para a qual o material apresenta uma ductilidade máxima. Para este caso em particular, esta concentração deve estar entre 30 e 35%.

Também foram ensaiados fluidos com 40% em peso de CMC, entretanto as amostras eram tão pastosas que inviabilizaram os ensaios, pois era impossível distribuí-las no recipiente de maneira uniforme e com uma espessura de 1mm. Somado a isto, está o fato de fluidos ER muito viscosos na ausência de campo elétrico não serem desejados para aplicações práticas.

Na Fig.4.37 tem-se o comportamento de  $\sigma_t$  e  $\sigma_p$  em função da concentração de partículas.

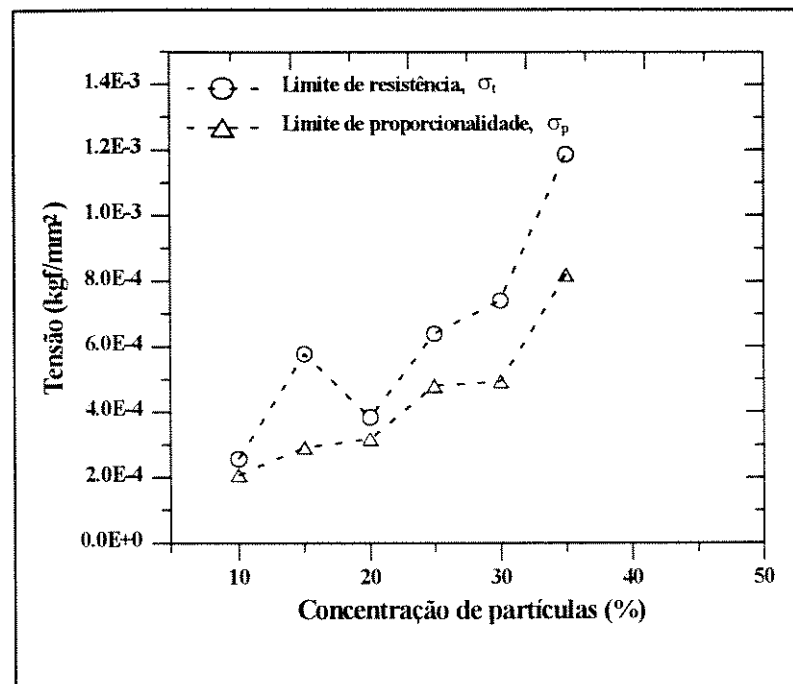


Fig.4.37 - Limites de resistência e de proporcionalidade em função da concentração de CMC (FS-500 e  $E_0 = 3$  kV/mm).

A tabela 4.3 fornece os valores de  $\sigma_t$ , de  $\sigma_p$ , de  $\sigma_{el}$ ,  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_p$ , de  $E_y$  e de  $U_R$ . Como foi visto nas figuras 4.34, 4.35 e 4.36,  $\sigma_t$  aumenta com o campo elétrico, com a concentração de partículas e com a viscosidade do fluido-suporte. Comparando-se os fluidos ER (à base de

CMC) co materiais sólidos, observa-se que os fluidos apresentam  $\sigma_t$  da ordem de 600 a  $10^4$  vezes menor que o valor do polietileno de baixa densidade (0,71 a 2,14 kgf/mm<sup>2</sup> [hert-89]), enquanto que a borracha tem  $\sigma_t$  de 150 a 1600 vezes maior que o de materiais ER

TAB. 4.3 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC em fluido de silicone obtidas através de ensaios de tração.

| amostra               | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_t \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_p \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | * $\sigma_{el} \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_p \times 10^3$ | $\varepsilon_t \times 10^3$ | $E_y$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $U_R \times 10^7$<br>(kgf.mm/mm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|------------------|--|--|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 10%<br>FS-500 cSt     | 3                | 2,56   | 2,07   | 2,16  | 0,50                        | 2,00                        | 0,414                           | 0,52   |
| 15%<br>FS-500 cSt     | 3                | 5,77   | 2,91   | 2,91  | 2,00                        | 3,75                        | 0,146                           | 2,91   |
| 20%<br>FS-500 cSt     | 1                | 1,76   | 1,45   | 1,45  | 1,25                        | 2,00                        | 0,116                           | 0,91   |
|                       | 2                | 2,82   | 2,34   | 2,42  | 1,25                        | 3,25                        | 0,117                           | 1,46   |
|                       | 3                | 3,83   | 3,17   | 3,17  | 2,25                        | 3,75                        | 0,141                           | 3,57   |
|                       | 4                | 3,61   | 2,56   | 2,56  | 2,00                        | 5,00                        | 0,128                           | 2,56   |
| 25%<br>FS-500 cSt     | 3                | 6,39   | 4,80   | 5,33  | 2,00                        | 5,00                        | 0,240                           | 4,80   |
| 30%<br>FS-500 cSt     | 3                | 7,40   | 4,93   | 5,11  | 2,00                        | 6,50                        | 0,247                           | 4,93   |
| 35%<br>FS-500 cSt     | 3                | 11,85  | 8,19   | 10,90   | 1,75                        | 5,00                        | 0,482                           | 7,17   |
| 20%<br>FS-100 cSt     | 3                | 3,57   | 1,37   | 2,03  | 0,50                        | 3,00                        | 0,274                           | 0,34   |
| 20%<br>FS-1000<br>cSt | 3                | 5,04   | 3,90   | 3,90  | 2,00                        | 5,00                        | 0,195                           | 3,90   |

$$\sigma_r = Q_r / S_0; \quad G = \sigma_p / \varepsilon_p; \quad U_R = \sigma_p \cdot \varepsilon_p / 2; \quad S_0 = \pi \cdot 85^2 / 4 \text{ mm}^2$$

\*  $\sigma_{el}$  foi obtido através do segundo método de Jonhson [souz-82].

( $\sigma_t = 0,21 \text{ kgf/mm}^2$  [vlac-85]). Quanto ao módulo de elasticidade ( $E_y$ ), os fluidos ER apresentaram valores comparáveis aos da borracha ( $0,105 \text{ kgf/mm}^2$  [souz-82]); de  $2 \times 10^4$  a  $7 \times 10^4$  menores que o duralumínio ( $7530 \text{ kgf/mm}^2$  [souz-82]) e  $3,6 \times 10^3$  a  $1,5 \times 10^4$  vezes menor que o chumbo ( $1733 \text{ kgf/mm}^2$  [hert-89]). Observa-se que o fluido ER apresenta menores valores de módulo de elasticidade ( $E_y$ ) a concentrações intermediárias (15 a 25%) e valores maiores de  $E_y$  quando submetido a campos elétricos intermediários ( $E_0 = 3 \text{ kV/mm}$ ). Quanto à capacidade de absorver energia quando deformados elasticamente, os fluidos eletro-reológicos apresentaram valores de 98 a  $3 \times 10^4$  vezes menores que o ferro fundido ( $U_R = 0,0007 \text{ kgf.mm/mm}^3$  [souz-82]) e valores  $3 \times 10^5$  a  $8,8 \times 10^6$  menores que a borracha ( $U_R = 0,21 \text{ kgf.mm/mm}^3$ ). É interessante notar que, diferentemente do fluido à base de amido, fluidos à base de CMC apresentaram uma relação de  $U_R$  com a concentração e o campo elétrico. O aumento de ambos aumenta a capacidade do material ER de absorver energia quando deformado elasticamente.

A Tab.4.4 mostra o resultado da dispersão nos ensaios de tração para amostras de 20% em peso de CMC.

TAB.4.4 - Resultados dos ensaios de tração para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.

| amostra           | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_t \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_p \times 10^3$ |
|-------------------|------------------|--|-----------------------------|
| 20%<br>FS-500 cSt | 3                | 2,82   | 1,25                        |
|                   |                  | 3,83   | 3,17                        |
|                   |                  | 4,36   | 2,00                        |

Na Fig.4.38 está o gráfico de  $\sigma$  em função de  $\varepsilon$  para  $E = 0$ ; ou seja, é medido o poder de adesão do fluido eletro-reológico. Para as amostras ensaiadas, não foram observados

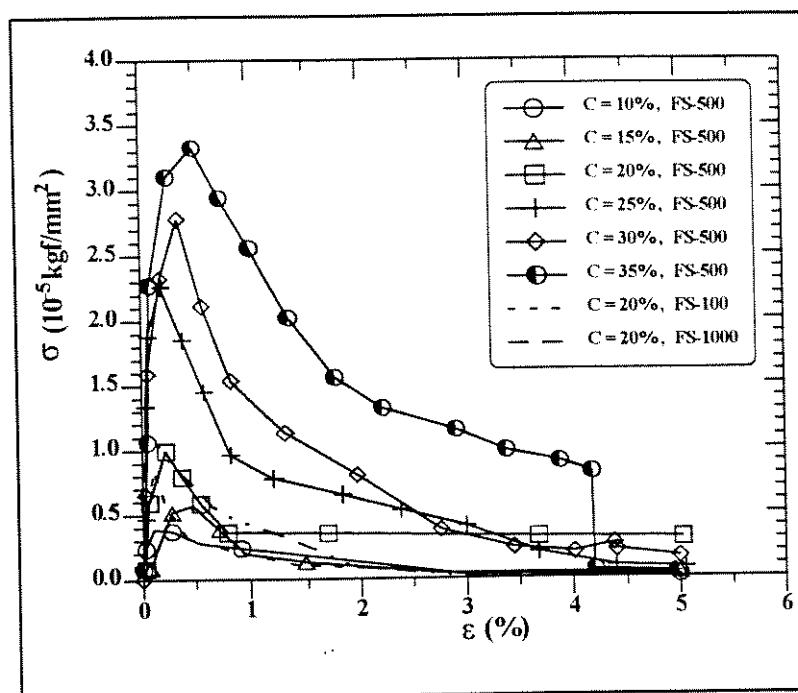


Fig.4.38 - Gráfico da tensão em função da deformação para suspensões de CMC em fluido de silicone na temperatura ambiente- verificação do poder de adesão do fluido ER na ausência de campo elétrico.

picos nas curvas de adesão maiores do que 3,5% do valor de  $\sigma_1$  para a mesma amostra sob campo elétrico de 3 kV/mm. Estes resultados indicam que o poder de adesividade do fluido ER durante os ensaios de tração não foi significativa.

Quanto à corrente elétrica, observou-se que ela aumentava continuamente durante o ensaio de tração (mesmo após atingido o limite de resistência do material), até que um máximo fosse atingido, a partir do qual a corrente começava a decrescer. A Fig.4.39 mostra a variação de  $i$  com a concentração de partículas e do campo elétrico.

#### 4.2.2 Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram os mais importantes ensaios mecânicos realizados com os materiais ER, uma vez que confirmam a teoria de que os fluidos eletro-reológicos se comportam como sólidos quando sob a ação de um campo elétrico.

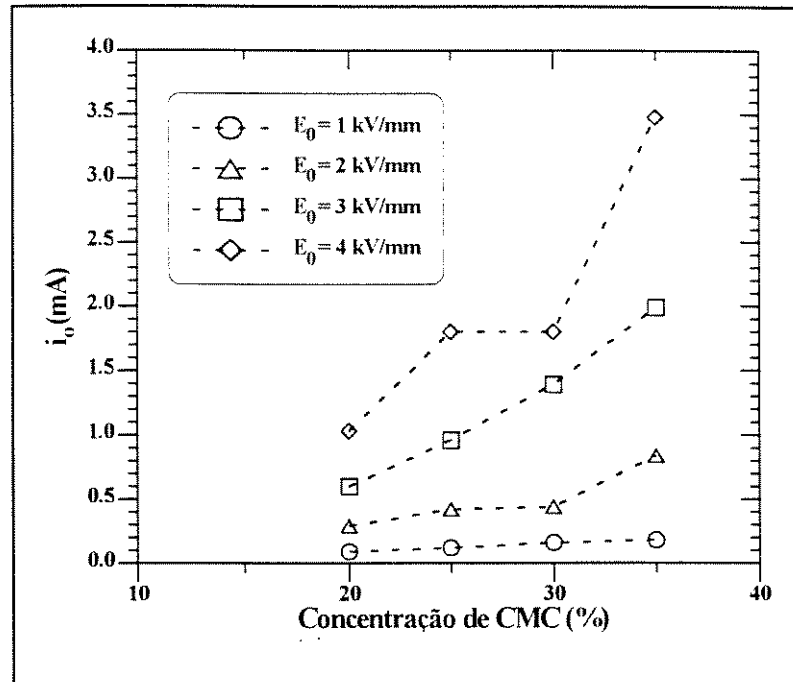


Fig.4.39 - Gráfico da corrente em função da concentração e do campo elétrico imediatamente antes do início dos ensaios de tração ( $T = T_{AMB}$  e fluido-suporte de 500 cSt).

Como já foi comentado anteriormente, os ensaios mecânicos realizados em materiais ER devem ser feitos repetidas vezes a fim de que, após uma análise estatística dos dados, o comportamento deles seja obtido. Neste trabalho, esta análise não foi feita para todas as amostras devido a uma série de limitações quanto ao uso das máquinas de ensaios mecânicos e também por não ser este o objetivo da tese. Apesar disso, vários ensaios foram repetidos algumas vezes para confirmar uma tendência de resultados. Durante os ensaios de fadiga, além dos fatores que normalmente afetariam os resultados (como por exemplo, o aumento da temperatura da amostra durante os ensaios), houve uma dificuldade adicional: a escolha da frequência na qual a amostra deveria ser solicitada. Caso fosse escolhida uma frequência muito baixa, a amostra ficaria exposta a um longo período de ensaio no qual sofreria tração e alívio de carga repetidas vezes de forma que, além do aquecimento produzido pelo efeito Joule (proporcional ao tempo de ensaio), haveria o aquecimento proveniente do atrito entre as moléculas do material. Apesar de se injetar ar na placa superior para diminuir o aquecimento da amostra, a manutenção da temperatura durante os ensaios foi difícil. Assim, com o gradual aumento de  $T$ , o material ER tinha suas propriedades modificadas, comprometendo os resultados finais. Por outro lado, quando o material era ensaiado a uma frequência alta este

problema era minimizado. Entretanto, o controle de carga, que era feito pela MTS, se tornava impraticável devido à grande variação que começava a existir em torno do valor desejado de cargas máxima e mínima. Logo, o critério adotado para escolher a frequência na qual uma determinada amostra seria ensaiada foi a maior frequência de modo a permitir um bom controle de carga na MTS.

Tendo em vista este panorama, excetuando-se uma das amostras, os valores obtidos nestes ensaios foram analisados qualitativamente, já que uma análise quantitativa dependeria de um tratamento estatístico dos dados. O dispositivo utilizado nestes ensaios foi o mesmo que para os ensaios de tração (Fig.3.6). Os ciclos de tensões usados foram iguais aos da Fig. 3.10-(b) onde a carga máxima ( $S_{\max}$ ) era menor que a carga necessária para ruptura do material (obtida através dos ensaios de tração); e a carga mínima ( $S_{\min}$ ) era zero. A frequência escolhida foi de 5 Hz e o campo elétrico contínuo variava durante o ensaio, já que a tensão  $V_0$  era constante e o espaçamento entre os eletrodos variava.

#### 4.2.2.1 Fluido à base de amido

A Fig.4.40 mostra a curva de tensão (ou carga) em função do número de ciclos para amostras de fluidos ER com 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt submetidas a um campo elétrico de 2 kV/mm. Essas amostras foram ensaiadas sob cargas iguais a 80, 50 e 30% do valor da carga correspondente ao limite de resistência obtido nos ensaios de tração<sup>2</sup> (ver Tab.4.1). Através desta figura, pode-se observar que quanto menor for a carga ( $S_{\max}$ ) de solicitação da amostra, maior será o número de ciclos suportado pelo material. Além disso, diminuindo-se  $S_{\max}$ , há um aumento da dispersão dos dados obtidos. A curva cheia da Fig.4.40 representa a curva onde 50% das amostras falham e o modo como ela foi obtida será explicado mais adiante.

A dispersão dos dados foi tratada estatisticamente através da distribuição de Weibull. Para tanto, foi utilizada a norma da ABNT (NBR 6742) de janeiro de 1987, a qual dita o

---

<sup>2</sup> O ideal seria utilizar valores de limite de resistência (ou carga no limite de resistência  $Q_1$ ) após submeter os dados obtidos nos ensaios de tração a uma análise estatística.



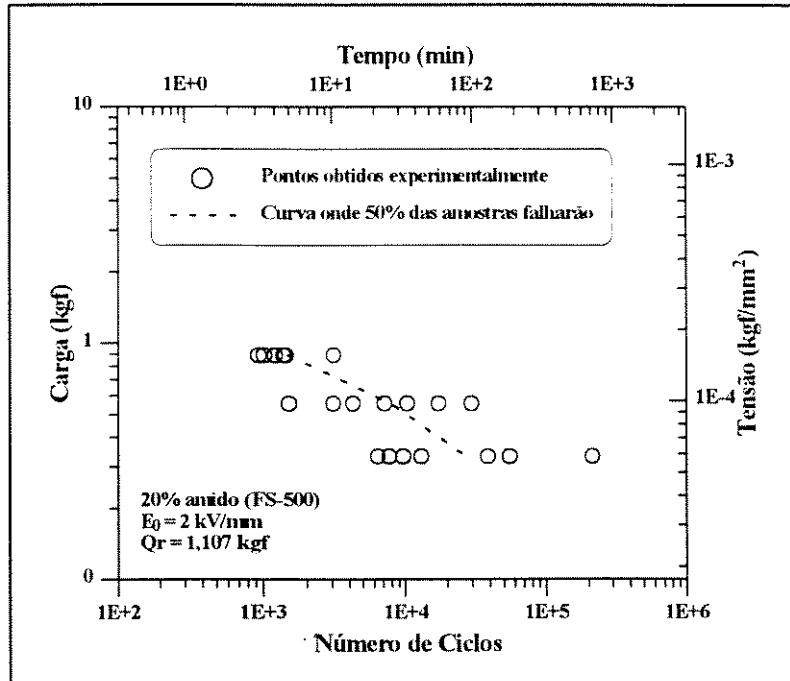


Fig.4.40 - Curva de Wöhler para fluidos ER com 20% em peso de amido (22% de água) em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente e  $E_0 = 2 \text{ kV/mm}$ .

procedimento da utilização da distribuição de Weibull para a interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga. A distribuição de Weibull relaciona as amostras que não falharam ( $p$ ) com a durabilidade por fadiga ( $N$ ):

$$p = \exp\left[-\left(\frac{N}{\theta}\right)^b\right] \quad (4.3)$$

onde  $\theta$  e  $b$  são constantes e  $p$  é um teor percentual das partes que não falharam. Sendo  $F$  o teor das partes que falharam em  $N$  ciclos, tem-se:

$$F = 1 - p \quad (4.4)$$

conseqüentemente,

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\theta}\right)^b\right] \quad (4.5)$$

Tomando-se os logaritmos naturais da Eq.(4.5) , pode-se chegar a:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-F}\right) = b \ln N - b \ln \theta \quad (4.6)$$

que indica uma relação linear entre o logaritmo natural da durabilidade e  $\ln\left(\ln\frac{1}{1-F}\right)$ .

Segundo Jackson [jack-79], em toda análise estatística, o número de amostras testadas tem um efeito direto na confiança que se deposita na mesma. No artigo ele comenta que pelo menos quatro amostras devem ser ensaiadas antes da análise de dados. À medida que mais amostras são ensaiadas, mais confiável é a análise. Neste trabalho, cada uma das três condições (80%, 50% e 30% do limite de resistência) foi repetida pelo menos seis vezes (Tab.4.5), sendo que a distribuição de Weibull foi aplicada para cada uma destas três condições, de modo a se obter  $\theta$  e  $b$ . Esta tabela fornece o número de ciclos  $N$  onde ocorre a falha (ou quebra do material), o grau médio  $F$  (tabelado na norma da ABNT), os valores obtidos através de uma regressão linear para  $b$  e  $\theta$ , o quadrado do coeficiente de correlação calculada para essa regressão, e os valores de  $N_{\text{Weibull}}$  e  $N_{50\%}$ . Observa-se que a amostra de número 20, correspondente a uma carga igual a 30% do limite de resistência à tração, possui um valor estimado para o número de ciclos quando ocorre a falha. Este valor foi obtido da seguinte maneira: a amostra foi ensaiada durante 510 minutos sem que houvesse a ruptura da mesma. O ensaio foi interrompido neste ponto após um número de ciclos de 153000. Através do gráfico da variação da corrente elétrica na amostra com o tempo (Fig.4.41), extrapolou-se o tempo máximo que seria suportado pela amostra sob a carga em questão sem que ela se rompesse. O valor obtido foi de aproximadamente 1000 minutos. A partir deste valor e do tempo em que o ensaio foi interrompido, foi obtido um tempo médio calculado da seguinte maneira:

$$t = \frac{\ln 510 + \ln 1000}{2} = 714 \text{ min } 8 \text{ s}$$

Este tempo corresponde a um número de ciclos igual a 214243 ( $f = 5 \text{ Hz}$ ). A curva média mostrada na Fig.4.40 foi gerada a partir dos valores de  $N_{50\%}$  da Tab.4.5 obtidos

Tab.4.5 - Dados obtidos através da distribuição de Weibull para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga para materiais ER com 20% de amido (22% de água) em fluido de silicone de 500 cSt ( $Q_t = 1.107 \text{ kgf}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $E_0 = 2 \text{ kV/mm}$ ).

| Amostra | % $Q_t$ | Falha, N              | Grau Médio, F (%) | $\theta$ | b     | $\text{cor}^2$ | $N_{\text{Weibull}}^*$ | $N_{50\%}^{**}$ |
|---------|---------|-----------------------|-------------------|----------|-------|----------------|------------------------|-----------------|
| 1       | 80%     | 935                   | 10,910            | 1751     | 2,12  | 0,727          | 633                    | 1473            |
| 2       |         | 1020                  | 26,445            |          |       |                | 1004                   |                 |
| 3       |         | 1205                  | 42,141            |          |       |                | 1318                   |                 |
| 4       |         | 1380                  | 57,859            |          |       |                | 1635                   |                 |
| 5       |         | 1425                  | 73,555            |          |       |                | 2004                   |                 |
| 6       |         | 3090                  | 89,090            |          |       |                | 2550                   |                 |
| 7       | 50%     | 1500                  | 9,428             | 11242    | 1,04  | 0,980          | 1217                   | 7903            |
| 8       |         | 3075                  | 22,849            |          |       |                | 3071                   |                 |
| 9       |         | 4250                  | 36,412            |          |       |                | 5247                   |                 |
| 10      |         | 7125                  | 50,000            |          |       |                | 7903                   |                 |
| 11      |         | 10325                 | 63,588            |          |       |                | 11353                  |                 |
| 12      |         | 17280                 | 77,151            |          |       |                | 16349                  |                 |
| 13      |         | 29645                 | 90,572            |          |       |                | 25685                  |                 |
| 14      | 30%     | 6385                  | 9,428             | 43898    | 0,756 | 0,810          | 2061                   | 27034           |
| 15      |         | 7695                  | 22,849            |          |       |                | 7368                   |                 |
| 16      |         | 9675                  | 36,412            |          |       |                | 15391                  |                 |
| 17      |         | 13008                 | 50,000            |          |       |                | 27034                  |                 |
| 18      |         | 38650                 | 63,588            |          |       |                | 44496                  |                 |
| 19      |         | 55200                 | 77,151            |          |       |                | 73485                  |                 |
| 20      |         | 214243 <sup>***</sup> | 90,572            |          |       |                | 136793                 |                 |

Número de ciclos teórico determinado através da Eq.(4.6) e dos parâmetros obtidos b e  $\theta$ .

\*\* Número de ciclos para o qual 50% das amostras falharão. Este valor é obtido fazendo-se  $F = 0,5$  na Eq.(4.6).

\*\*\* Este valor foi estimado.

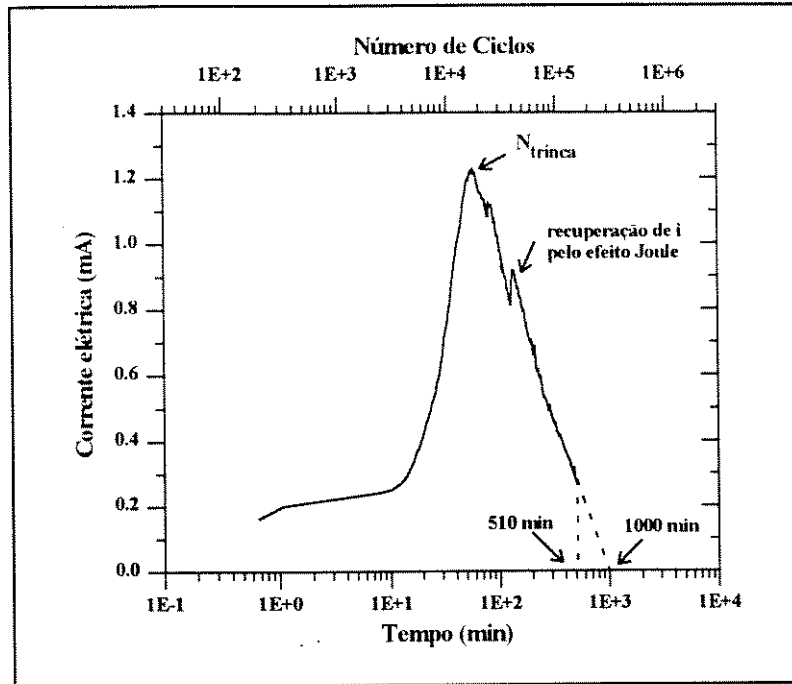


Fig.4.41 - Variação da corrente elétrica da amostra 20 (Tab.4.5) durante o ensaio de fadiga em função do número de ciclos.

através da Eq.(4.6). Para tanto, utilizaram-se os valores determinados para  $\theta$  e  $b$  e fez-se  $F = 0,5$ , obtendo-se a curva de vida onde 50% das amostras falhariam quando submetidas a uma determinada carga.

Os valores de  $\theta$  correspondem ao número de ciclos no qual a falha ocorre para 63,2% das amostras, que é o caso quando  $N = \theta$  na Eq.(4.6). Observa-se que com o aumento da carga com a qual se solicita a amostra,  $\theta$  diminui. Neste tipo de análise, uma das considerações mais importantes a se fazer é o valor da inclinação da reta da Eq.(4.6) [jack-79], ou seja, o valor de  $b$ . Ele determina o formato da distribuição de Weibull. Para  $b = 3,5$ , a distribuição das falhas segue uma distribuição normal. Para valores menores que este, a função densidade de probabilidade fica inclinada para a esquerda, enquanto que para valores maiores, ela se inclina para a direita [rice-85] [jack-79]. Uma inclinação menor que 3,5 indica que existem muitas amostras com vida curta e poucas amostras com vida muito longa para uma determinada condição. De modo geral, esse tipo de curva é normalmente esperado para ensaios de fadiga e curvas de Weibull com  $b \geq 2$  são possíveis nestas aplicações. Os valores de  $b$  obtidos para fluidos ER com 20% de amido (Tab.4.5) indica que, para baixas cargas de solicitação, a distribuição se afasta cada vez mais de uma distribuição normal. Na Fig.4.42 tem-se a função

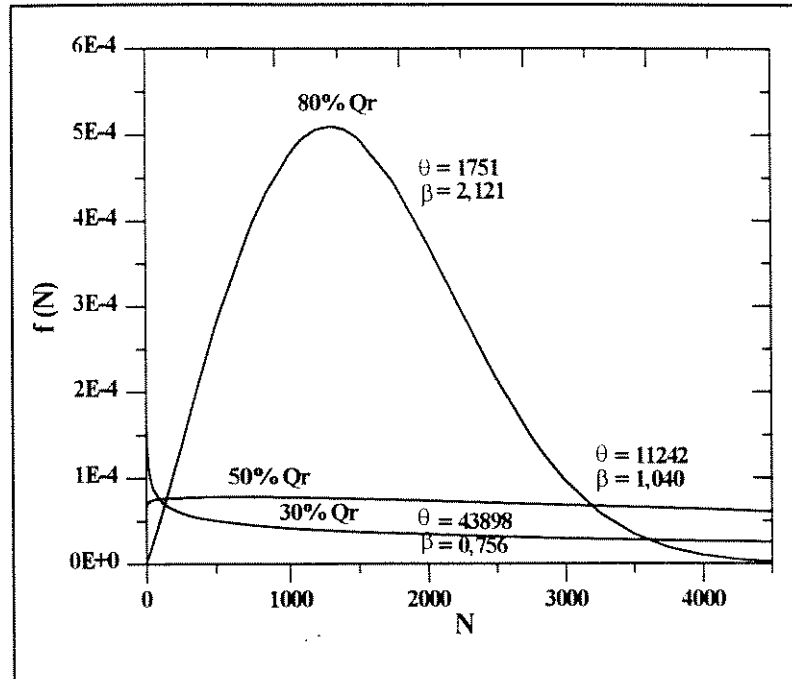


Fig.4.42 - Função densidade de probabilidade de Weibull para materiais ER com 20% de amido em fluido de silicone (500 cSt) sob campo elétrico de 2 kV/mm e à temperatura ambiente.

densidade da probabilidade de Weibull obtida através dos dados de  $\theta$  e  $b$  da Tab.4.5 e da Eq.(4.7):

$$f(N) = \frac{b}{\theta} \left(\frac{N}{\theta}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\theta}\right)^b\right], \quad N > 0 \quad (4.7)$$

Através da Fig.4.42, observa-se que quanto menor for a carga com que se solicita a amostra, menor será o valor de  $b$ , mais inclinada para a esquerda será a curva [rice-85], e menos próxima de uma distribuição normal ela será. Esses resultados indicam que, com a diminuição da carga, há um grande número de amostras com vida curta e poucas amostras com vida longa.

Na tabela 4.6 estão os resultados obtidos para a vida de várias amostras. A Fig. 4.43 mostra a carga de solitação da amostra ou tensão em função do número de ciclos. Observa-se que com o aumento do campo elétrico, além de a amostra com 20% de amido (FS-500)

Tab.4.6 - Vida de materiais ER à base de amido em ensaios de fadiga ( $f = 5$  Hz).

| Amostra              | $E_0$ (kV/mm) | % $Q_t$ | N     |
|----------------------|---------------|---------|-------|
| 20% amido<br>FS-500  | 3             | 80      | 2752  |
|                      |               | 70      | 6670  |
|                      |               |         | 26550 |
|                      |               |         | 29600 |
|                      |               | 50      | 3555  |
|                      |               |         | 11300 |
|                      |               |         | 36445 |
| 30                   | 10710         |         |       |
|                      | 14080         |         |       |
|                      | 45175         |         |       |
| 20                   | 29070         |         |       |
| 30% amido<br>FS-500  | 2             | 70      | 3175  |
|                      |               |         | 4800  |
|                      |               |         | 33210 |
|                      |               | 50      | 3875  |
|                      |               |         | 8470  |
|                      |               |         | 24270 |
| 30                   | 7970          |         |       |
|                      | 41625         |         |       |
|                      | 60185         |         |       |
| 20% amido<br>FS-1000 | 2             | 70      | 75    |
|                      |               |         | 85    |
|                      |               |         | 100   |
|                      |               | 50      | 45    |
|                      |               |         | 95    |
|                      |               |         | 320   |
|                      |               | 30      | 445   |
|                      |               |         | 1495  |
|                      |               |         | 3255  |
|                      | 39890         |         |       |

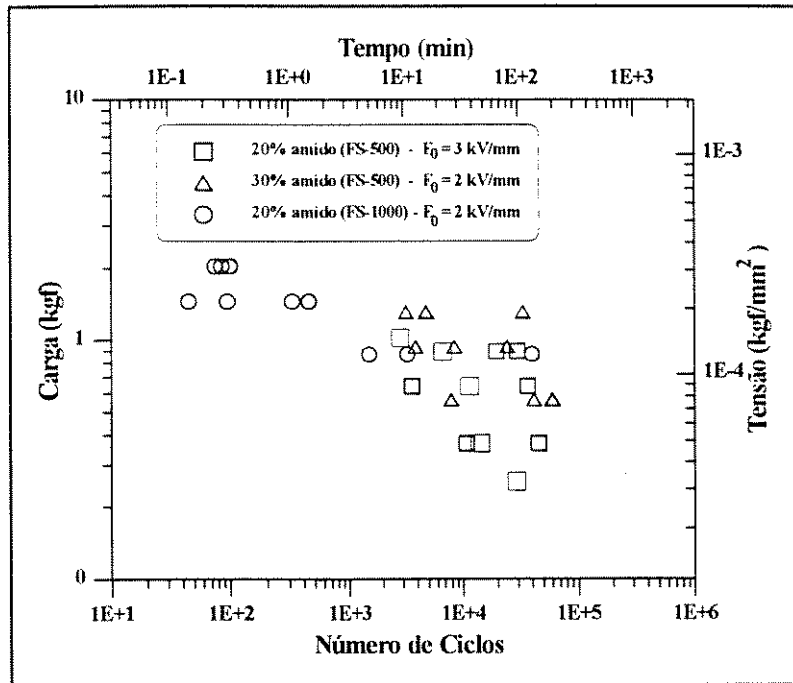


Fig.4.43 - Carga ou tensão em função do tempo e do número de ciclos obtidos em ensaios de fadiga para diferentes materiais ER ( $f = 5$  Hz).

suportar uma carga maior, como foi visto nos ensaios de tração, ela tem uma vida maior (comparar com a Fig.4.40). Isso porque o aumento do campo elétrico aumenta a força da estrutura fibrosa, dando uma maior resistência mecânica ao material. Há também uma indicação de que as amostras apresentem uma maior dispersão nos dados quando se compara os resultados obtidos para cargas mais elevadas. O aumento da concentração e da viscosidade do fluido-suporte produzem o mesmo efeito na amostra que o aumento do campo elétrico; ou seja, faz com que a amostra suporte cargas maiores e que tenha uma vida maior para um mesmo nível de carga. É provável que exista uma carga abaixo da qual o material ER não se rompa, como no caso de metais. Entretanto, não foram ensaiadas amostras a cargas mais baixas devido a limitações da máquina MTS (os ensaios realizados já estavam no limite inferior de confiabilidade da máquina).

Comparando-se os dados obtidos nos ensaios de fadiga para fluidos ER à base de amido com os resultados de fadiga de alguns polímeros (Fig.3.11), observa-se que os fluidos eletro-reológicos apresentam vida da mesma ordem de grandeza que a do polipropileno,

polietileno e politetrafluoretileno.

Quanto à variação da corrente elétrica durante os ensaios (Fig.4.41), observou-se que, para todas as amostras, ela crescia continuamente, atingia um máximo e a partir daí começava a decrescer até chegar a zero quando ocorria a ruptura do material. Em alguns casos, a queda da corrente era brusca, enquanto que em outros ela era mais lenta, sendo que algumas vezes apresentava uma recuperação (tinha um pequeno aumento) devido ao efeito Joule (como mostrado na Fig.4.41). Durante todo o ensaio, dois fatores com efeitos opostos atuavam sobre a corrente:

- o efeito Joule que promovia o aquecimento da amostra e, conseqüentemente provocava um aumento em  $i$ ;
- o surgimento de "trincas" no material ER causado pela ruptura das fibras, diminuindo a corrente.

Esses dois fatores juntos determinavam o aumento ou a diminuição da corrente na amostra. O número de ciclos ( $N_{rup}$ ) a partir do qual a corrente começava a cair foi considerado como o início da quebra do material ER (o que equivaleria ao início de uma trinca em metais). Apesar de, neste ponto, considerar-se que havia o início das "trincas", elas já deveriam estar ocorrendo antes disso. A Tab.4.7 fornece alguns desses valores para diferentes amostras. A análise desses resultados indicou não existir nenhuma relação entre o número de ciclos em que se inicia a trinca ( $N_{trinca}$ ) com o número de ciclos ( $N$ ) quando ocorre a ruptura da amostra.

#### 4.2.2.2 Fluido à base de CMC

Os mesmos ensaios feitos para o amido foram repetidos para os fluidos eletro-reológicos à base de CMC. Todavia, o aquecimento das amostras (devido ao efeito Joule) e conseqüente aumento da corrente elétrica impediram que os ensaios chegassem ao final, com o rompimento das amostras. Isso acontecia porque a corrente ia aumentando até atingir 10 mA, que era a máxima corrente permitida pela fonte de alta tensão. Atingido este valor, o campo elétrico era automaticamente desligado e o ensaio não podia ser concluído. Na Tab.4.8 tem-se os números de ciclos suportado por algumas das amostras ensaiadas até imediatamente antes



Tab.4.7 - Início da "trinca" e ruptura de materiais ER à base de amido

| Amostra                | $E_0$<br>(kV/mm) | % de $Q_t$ | $N_{trinca}$ | N       |
|------------------------|------------------|------------|--------------|---------|
| 20% amido<br>FS - 500  | 2                | 30         | 5400         | 6385    |
|                        |                  | 30         | 3300         | 7695    |
|                        |                  | 30         | 8150         | 9675    |
|                        |                  | 30         | 9770         | 10325   |
|                        |                  | 30         | 18530        | 55200   |
|                        |                  | 50         | 17675        | 214243* |
| 20% amido<br>FS - 500  | 3                | 30         | 9125         | 10710   |
|                        |                  | 50         | 14100        | 29600   |
|                        |                  | 70         | 35275        | 36445   |
| 30% amido<br>FS - 500  | 2                | 30         | 7800         | 7970    |
|                        |                  | 30         | 32450        | 41625   |
|                        |                  | 30         | 48050        | 60185   |
|                        |                  | 50         | 2475         | 3875    |
|                        |                  | 50         | 22650        | 24270   |
| 20% amido<br>FS - 1000 | 2                | 30         | 24875        | 33210   |
|                        |                  | 30         | 37825        | 39890   |

\*Este valor for estimado.

de a fonte ter sido automaticamente desligada. Estes não são dados conclusivos, porém observa-se uma semelhança de comportamento com os fluidos à base de amido; ou seja, com o aumento da concentração e do campo elétrico, há um aumento do número de ciclos N. Para se ter conclusões mais precisas, seria necessário usar uma fonte maior, que permitisse uma maior passagem de corrente elétrica. Assim, os ensaios poderiam ser concluídos até o rompimento das amostras.

Tab.4.8 - Resistência à fadiga de materiais ER à base de CMC.

| Amostra                 | $E_0$<br>(kV/mm) | f<br>(Hz) | N     |
|-------------------------|------------------|-----------|-------|
| 10% CMC<br>FS – 500 cSt | 2                | 9         | 370*  |
| 15% CMC<br>FS – 500 cSt | 2                | 9         | 2430* |
| 20% CMC<br>FS – 500 cSt | 3                | 9         | 3350* |

\* As amostras foram ensaiadas até o número de ciclos N indicado sem se romper. Entretanto, a corrente elétrica ultrapassou o limite máximo permitido pela fonte de alta tensão (10 mA), e os ensaios foram interrompidos.

### 4.2.3 Ensaio de Compressão

Algumas dificuldades surgiram no decorrer dos ensaios de compressão. Dentre elas estão o aumento da temperatura da amostra devido ao efeito Joule e a dispersão dos resultados. A seguir são analisadas amostras à base de amido e de CMC em fluido de silicone; entretanto, antes de se passar para esta análise, é preciso ter-se em mente que o campo elétrico contínuo era variável e que  $E_0$  se refere ao campo antes do início de cada ensaio. Como já foi dito anteriormente, os fluidos ER à base de amido foram ensaiados a uma velocidade de 0,005 mm/s (na máquina de compressão MTS) e os feitos com CMC, a uma velocidade de 0,02 mm/s (na máquina de compressão Syntech 20).

#### 4.2.3.1 Fluido à base de amido

A Fig.4.44 mostra os resultados obtidos para os ensaios de compressão em amostras com 20% em peso de amido (21,5% de água) em fluido de silicone (500 cSt). Durante o ensaio, a amostra foi comprimida a uma velocidade de 0,3 mm/min (0,005 mm/s) até que fosse atingido o limite de resistência da mesma (indicado pelas setas), a partir do qual ela

começava a escoar e a sair pelos dois furos circulares laterais existentes no dispositivo (Fig.4.45). Entretanto, antes de escoar, o material ER sofria uma deformação elástica, não apresentando deformação plástica. O ponto imediatamente anterior ao escoamento da amostra foi considerado o limite de resistência da mesma. Neste tipo de ensaio são obtidos dois dados importantes:  $\sigma_r$  e  $\sigma_p$ , os quais são coincidentes. A Tabela 4.9 mostra esses valores para cada

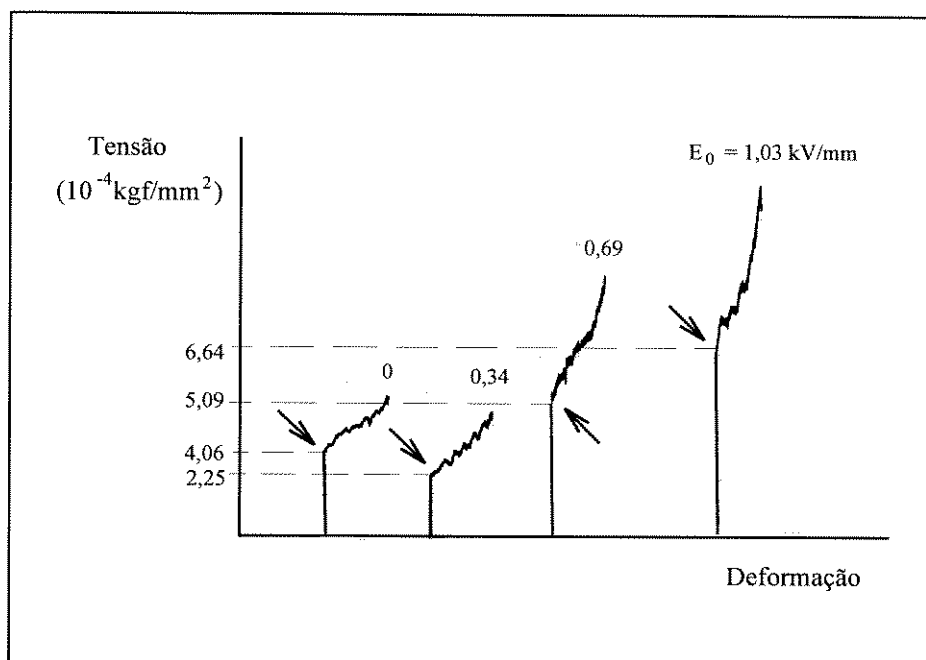


Fig.4.44 - Tensão em função da deformação para amostras com 20% em peso de amido (21,5% de água) em fluido de silicone (500 cSt).

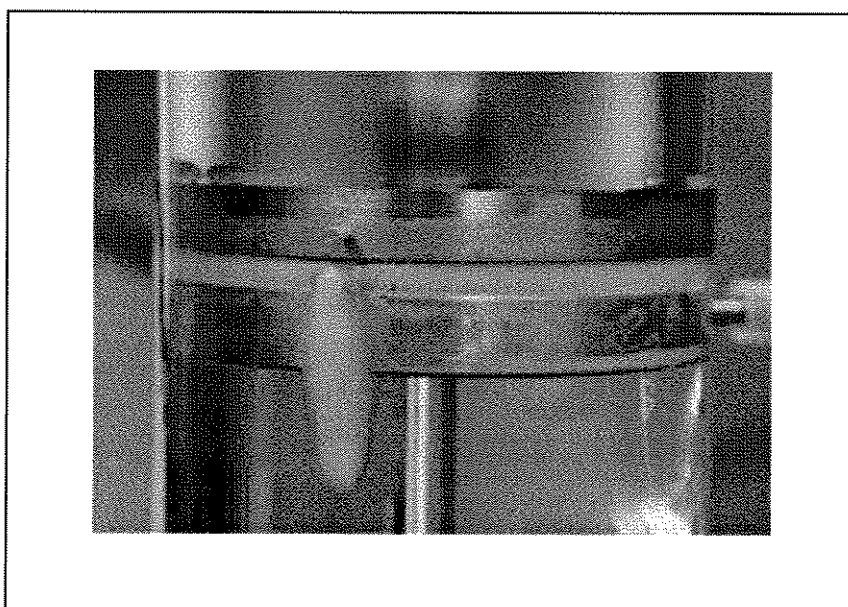


Fig.4.45 - Detalhe da montagem da Fig.3.13 e da formação de fibras durante um ensaio de compressão em fluido ER à base de amido.

Tab.4.9 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido em fluido de silicone (ensaios de compressão).

| amostra            | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_r \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_p \times 10^3$ | $E_y$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $U_R \times 10^7$<br>(kgf.mm/mm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|------------------|--|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 10%<br>FS-500 cSt  | 0                | 1,79   | 3,45                        | 0,052                           | 3,09   |
|                    | 1,03             | 3,64   | 13,07                       | 0,028                           | 23,79  |
|                    | 1,50             | 8,22   | 24,14                       | 0,034                           | 99,22  |
| 15%<br>FS-500 cSt  | 0                | 1,85   | 13,79                       | 0,013                           | 12,76  |
|                    | 1,03             | 5,38   | 8,62                        | 0,062                           | 23,19  |
|                    | 1,50             | 9,64   | 34,48                       | 0,028                           | 166,19   |
| 20%<br>FS-500 cSt  | 0                | 4,06   | 8,60                        | 0,047                           | 17,46  |
|                    | 0,34             | 2,25   | 5,17                        | 0,044                           | 5,82   |
|                    | 0,69             | 5,09   | 6,90                        | 0,074                           | 17,56  |
|                    | 1,03             | 6,64   | 13,79                       | 0,048                           | 3,42   |
|                    | 1,38             | 11,37  | 18,97                       | 0,060                           | 107,84   |
|                    | 1,50             | 14,82  | 34,48                       | 0,043                           | 255,50   |
| 25%<br>FS-500 cSt  | 0                | 7,31   | 34,48                       | 0,021                           | 126,02   |
|                    | 1,03             | 8,70   | 17,24                       | 0,050                           | 74,99  |
| 30%<br>FS-500 cSt  | 0                | 12,99  | 25,86                       | 0,050                           | 167,96   |
|                    | 1,03             | 10,96  | 34,48                       | 0,032                           | 188,95   |
| 35%<br>FS-500 cSt  | 0                | 13,76  | 58,62                       | 0,023                           | 390,41   |
|                    | 1,03             | 17,05  | 31,03                       | 0,037                           | 176,41   |
|                    | 1,50             | 18,17  | 51,72                       | 0,035                           | 469,88   |
| 40%<br>FS-500 cSt  | 0                | 13,22  | 29,31                       | 0,047                           | 201,65   |
|                    | 1,03             | 11,37  | 17,24                       | 0,099                           | 146,97   |
|                    | 1,50             | 30,35  | 68,97                       | 0,044                           | 1046,62  |
| 20%<br>FS-100 cSt  | 0                | 2,76   | 17,24                       | 0,016                           | 23,79  |
|                    | 1,03             | 4,06   | 34,48                       | 0,012                           | 69,99  |
|                    | 1,50             | 6,49   | 25,86                       | 0,025                           | 83,92  |
| 20%<br>FS-1000 cSt | 0                | 5,51   | 17,24                       | 0,032                           | 47,50  |
|                    | 1,03             | 2,52   | 10,34                       | 0,024                           | 13,03  |

$$\sigma_r = Q_r / S_0; \quad G = \sigma_p / \varepsilon_p; \quad U_R = \sigma_p \cdot \varepsilon_p / 2; \quad S_0 = \pi \cdot 56^2 / 4 \text{ mm}^2$$

uma das amostras ensaiadas.

Pela tabela 4.9, observa-se que, em alguns casos,  $\sigma_r$  é maior para  $E_0 = 0$  do que para  $E_0 > 0$ . Isso é facilmente compreendido através da explicação a seguir. Quando o material ER era comprimido, ele tinha a tendência de escapar pelos dois furos laterais do dispositivo de acrílico. Porém havia uma pressão capilar a ser vencida, a qual variava de fluido para fluido (ver Tab.4.9 para  $E_0 = 0$ ). Entretanto, quando o campo elétrico era ligado, observou-se que existia uma queda na pressão mínima para que a mesma escoasse ( $\sigma_r$ ). Sob a ação do campo elétrico, as partículas iniciavam seu alinhamento para a formação da estrutura fibrosa, dando início a uma separação de fases na amostra. Com isso, a porção da amostra que efetivamente escoava era uma porção menos concentrada, pois parte das partículas haviam se movimentado no fluido para formar as correntes. Essa menor concentração produzia uma queda na pressão necessária para fazer com que o material iniciasse seu escoamento. Em contrapartida, o aumento do campo elétrico ia incrementando a estrutura fibrosa de modo a tornar a amostra mais resistente à compressão. Desta maneira, existiam dois efeitos a serem considerados:

- a separação de fases produzida pelo aumento do campo elétrico, a qual provocava uma diminuição no limite de resistência,  $\sigma_r$  ;
- o aumento da força da estrutura fibrosa com o campo elétrico, que aumentava  $\sigma_r$  .

Na Fig.4.46 está plotado o limite de resistência para diferentes campos elétricos em função da concentração de amido. Os resultados obtidos mostraram que com o aumento de  $E_0$ , há um aumento de  $\sigma_r$  . Este mesmo limite aumenta com a concentração de partículas e foi máximo para fluidos com viscosidade do fluido de silicone de 500 cSt. Quanto aos módulos de elasticidade e de resiliência, não se observou nenhuma relação com o campo elétrico ou com a concentração. A Tab.4.10 mostra a dispersão dos dados de amostras de amido com concentração de 20% em peso.

Não foi possível obter-se valores de  $\sigma_r$  para campos mais elevados porque, como o volume de amostra usado era grande, de modo que a corrente elétrica era muito alta, impossibilitando a realização dos ensaios.

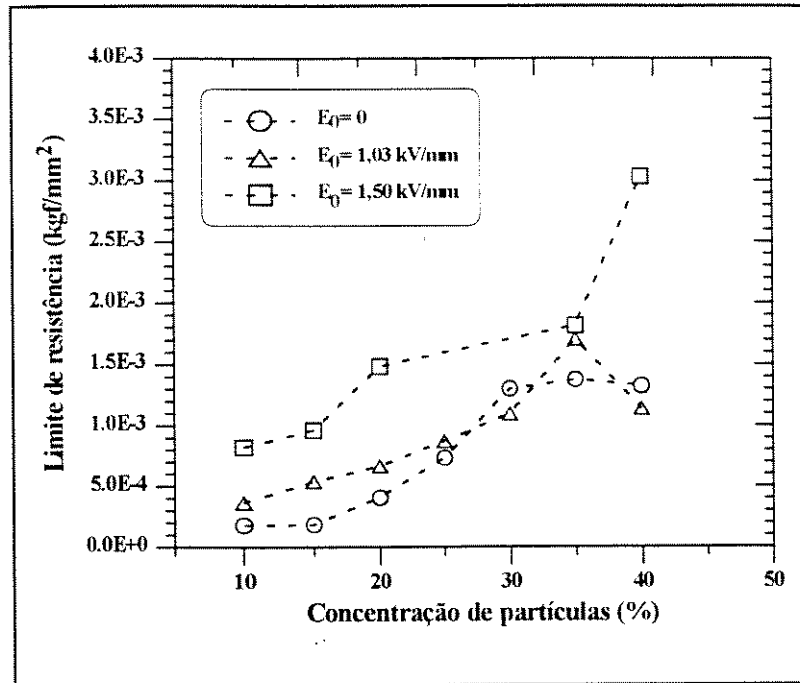


Fig.4.46 -  $\sigma_r$  em função da concentração de amido (FS-500) para diferentes campos elétricos.

TAB.4.10 - Resultados dos ensaios de compressão para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.

| amostra           | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_r \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_p \times 10^3$ |
|-------------------|------------------|--|--------------------------|
| 20%<br>FS-500 cSt | 1,03             | 5,85   | 25,86                    |
|                   |                  | 6,49   | 13,79                    |
|                   |                  | 6,64   | 13,79                    |

#### 4.2.3.2 Fluido à base de CMC

Estes ensaios foram conduzidos a uma velocidade de 0,02 mm/s na máquina Syntech 20 (Computerized Systems for Material Testing) da empresa Bosch. A Tab. 4.11 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão e confirma os resultados obtidos para as

Tab.4.11 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC em fluido de silicone (ensaios de compressão).

| amostra     | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_r \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_p \times 10^3$ | $E_y$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $U_R \times 10^7$<br>(kgf.mm/mm <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------------|--|--------------------------|---------------------------------|--|
| 10%         | 0                | 3,89   | 11,8                     | 0,033                           | 22,95  |
| FS-500 cSt  | 1,03             | 5,88   | 9,06                     | 0,065                           | 26,64  |
| 15%         | 0                | 4,14   | 6,92                     | 0,060                           | 12,38  |
| FS-500 cSt  | 1,03             | 6,96   | 12,82                    | 0,054                           | 44,61  |
| 20%         | 0                | 6,01   | 5,13                     | 0,117                           | 15,42  |
|             | 0,34             | 5,09   | 10,00                    | 0,051                           | 25,45  |
|             | 0,69             | 9,73   | 16,67                    | 0,058                           | 162,20   |
|             | 1,03             | 11,81  | 22,76                    | 0,054                           | 268,80   |
|             | 1,38             | 18,43  | 15,00                    | 0,123                           | 276,45   |
| 25%         | 0                | 7,87   | 12,82                    | 0,061                           | 100,89   |
| FS-500 cSt  | 1,03             | 11,89  | 13,33                    | 0,089                           | 158,49   |
| 30%         | 0                | 12,55  | 10,75                    | 0,117                           | 134,91   |
| FS-500 cSt  | 1,03             | 24,19  | 20,40                    | 0,119                           | 493,48   |
| 20%         | 0                | 7,87   | 13,72                    | 0,057                           | 107,56   |
| FS-100 cSt  | 1,03             | 7,08   | 9,08                     | 0,078                           | 64,29  |
| 20%         | 0                | 2,94   | 9,50                     | 0,031                           | 27,93  |
| FS-1000 cSt | 1,03             | 12,42  | 17,24                    | 0,072                           | 107,06   |

$$\sigma_r = Q_r / S_0; \quad G = \sigma_p / \epsilon_p; \quad U_R = \sigma_p \cdot \epsilon_p / 2; \quad S_0 = \pi \cdot 56^2 / 4 \text{ mm}^2$$

amostras de amido; ou seja,  $\sigma_r$  aumenta com a concentração, com o campo elétrico e foi máximo para fluidos com viscosidade do fluido de silicone de 500 cSt. Na Fig.4.47 está plotado o limite de resistência em função da concentração para  $E_0 = 0$  e  $E_0 = 1,03$  kV/mm. Também foi observado que, para  $C = 20\%$ , o limite de resistência à compressão ( $\sigma_r$ ) diminui quando o campo elétrico é ligado ( $E_0 = 0,34$  kV/mm) e aumenta à medida que a intensidade do campo aumenta. De acordo com a tabela, o material ER tem menor módulo de elasticidade ( $E_y$ ) a campos elétricos entre 0,34 e 1,03 kV/mm e concentração de 15 e 20% em peso. Quanto

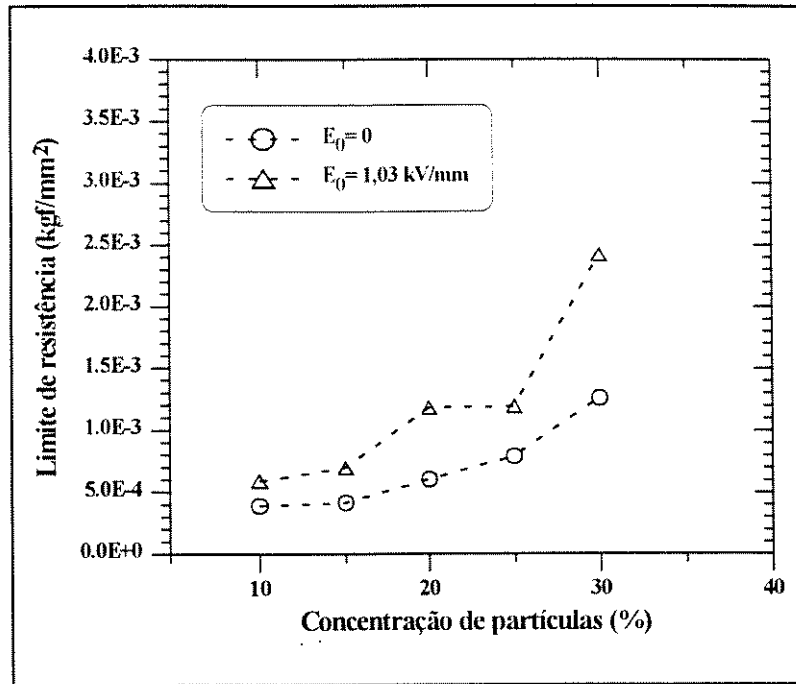


Fig.4.47 -  $\sigma_r$  em função da concentração para fluidos à base de CMC (FS-500).

à capacidade de absorver energia na zona elástica, este tipo de material apresentou valores maiores para concentrações e/ou campos elétricos mais altos. Devido ao aumento excessivo da corrente elétrica, não foi possível ensaiar as amostras a campos mais elevados, pois a fonte de alta tensão desligava automaticamente quando  $i$  atingia 10 mA.

A Tab.4.12 mostra a dispersão dos dados para amostras à base de CMC com 20% em peso de partículas.

TAB.4.12 - Resultados dos ensaios de compressão para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.

| amostra           | $E_0$<br>(kV/mm) | $\sigma_r \times 10^4$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon_p \times 10^3$ |
|-------------------|------------------|--|--------------------------|
| 20%<br>FS-500 cSt | 1,03             | 11,81  | 22,76                    |
|                   |                  | 13,62  | 25,29                    |
|                   |                  | 15,36  | 27,03                    |



#### 4.2.4 Ensaios de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados no dispositivo da Fig.3.16 para fluidos à base de amido e de CMC. Variaram-se a concentração de partículas, a intensidade do campo elétrico e a viscosidade do fluido de silicone. Na Fig.3.17 está a montagem feita em laboratório para esses ensaios e a seguir estão os resultados obtidos e a análise dos dados.

##### 4.2.4.1 Fluido à base de amido

Na Tab.4.13 estão os valores obtidos para a tensão mínima de escoamento estática ( $\tau_e$ ) para várias amostras de fluido ER. Através desta tabela, pode-se observar que com a introdução do campo elétrico, há um aumento da força da estrutura fibrosa e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento aumenta, de modo que a tensão mínima de

Tab.4.13 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de amido obtidas em ensaios de cisalhamento.

| Amostra   | E<br>(kV/mm) | $\tau_e \times 10^6$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------------|--|
| 15% amido | 0            | 1,53   |
| FS - 500  | 1            | 2,55   |
| 20% amido | 0            | 1,97   |
| FS - 500  | 0,5          | 20,24  |
| 25% amido | 0            | 2,55   |
| FS - 500  | 1            | 36,94  |
| 30% amido | 0            | 2,65   |
| FS - 500  | 1            | 55,26  |
| 20% amido | 0            | 2,14   |
| FS - 1000 | 1            | 52,44  |

$$A = \pi \bar{D} L = \pi \cdot 26 \cdot 120 = 9801,8 \text{ mm}^2$$

escoamento estática é maior. Da mesma maneira, o aumento da concentração de partículas e/ou da viscosidade do fluido-suporte provocaram um aumento em  $\tau_e$ . Bullough [bullo89] determinou  $\tau_e$  para fluidos à base de amido em óleo de transformador ( $C = 50\%$ ). Para  $E = 2 \text{ kV/mm}$ , a tensão mínima de escoamento estática foi de aproximadamente  $0,5 \text{ kPa}$  ( $= 50,98 \times 10^{-6} \text{ kgf/mm}^2$ ). Este valor é da mesma ordem de grandeza que os obtidos neste trabalho (Tab. 4.13).

Os valores obtidos para  $\tau_e$  para fluidos ER à base de amido são de  $9 \times 10^3$  a  $1,8 \times 10^6$  vezes menor que para o estanho ( $0,51$  a  $4,59 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]), de  $3,8 \times 10^4$  a  $8 \times 10^5$  vezes menor que para o ABS<sup>3</sup> ( $2,09 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]) e de  $7,5 \times 10^4$  a  $1,6 \times 10^5$  vezes menor que para o nylon 6<sup>3</sup> ( $4,15 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]).

Comparando-se esses resultados com os de tração, observa-se que a tensão  $\tau_e$  é da ordem de quatro a vinte e cinco vezes menor que o limite de resistência à tração para esses fluidos. Com relação aos dados obtidos através dos testes de cisalhamento dinâmico feitos no reômetro RV-20, observou-se que a tensão mínima de escoamento estática é aproximadamente seis vezes maior que a dinâmica  $\tau_y$  (na Fig.4.4,  $\tau_y \approx 60 \text{ Pa} \approx 6 \times 10^{-6} \text{ kgf/mm}^2$  para a amostra com 25% em peso de amido em fluido de silicone de  $980.7 \text{ cSt}$ ,  $E = 1 \text{ kV/mm}$  e temperatura ambiente).

Na Fig.4.48 estão plotados os dados da Tab.4.13. Através dela tem-se uma melhor idéia do comportamento do material ER sob cisalhamento. Para  $E = 0$ , o aumento da tensão mínima de escoamento com a concentração não é muito expressivo. Já para  $E = 1 \text{ kV/mm}$ , o aumento da concentração de partículas altera substancialmente os resultados.

Na Tab.4.14 é mostrada a dispersão dos dados para fluidos com 20% de partículas de amido em fluido de silicone de  $500 \text{ cSt}$ . Para campos elétricos maiores que  $1 \text{ kV/mm}$ , não foi possível determinar os valores de  $\tau_e$  devido à alta corrente elétrica que passava através do fluido ER.

---

<sup>3</sup> Para a determinação de  $\tau_e$  para o ABS e o nylon 6 foi usado o critério de Tresca, onde a tensão de cisalhamento é 50% do valor de limite de resistência à tração [diet-81].

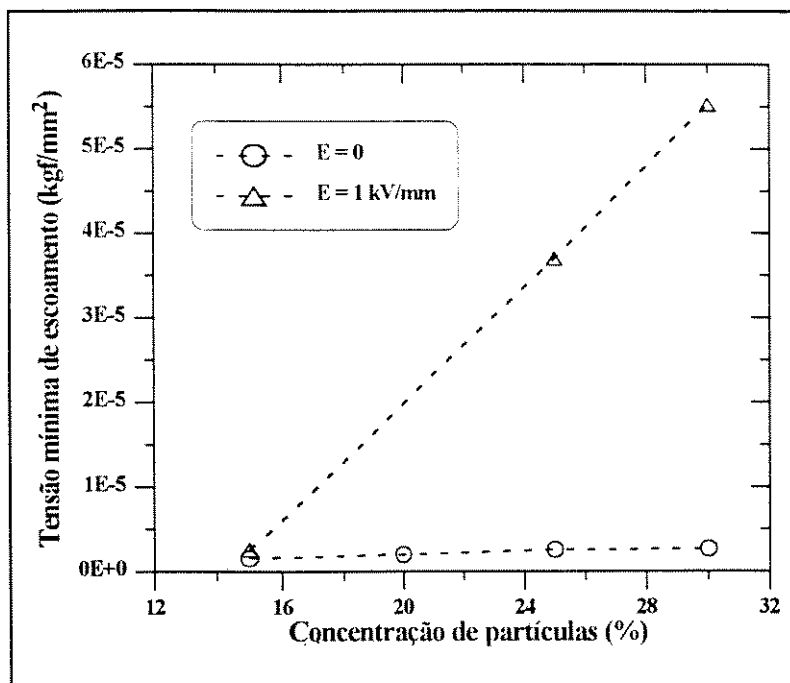


Fig.4.48 - Gráfico de tensão mínima de escoamento em função da concentração de amido (22% de água) em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente.

Tab.4.14 - Resultados dos ensaios de cisalhamento para materiais ER à base de amido em fluido de silicone.

| Amostra   | E<br>(kV/mm) | $\tau_e \times 10^6$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------------|--|
|           |              | 8,51   |
| 20% amido | 0,5          | 20,24  |
| FS - 500  |              | 29,27  |

#### 4.2.4.2 Fluido à base de CMC

Na Tab.4.15 estão os resultados dos ensaios de cisalhamento para amostras à base de CMC. Através desta tabela, observa-se que a introdução do campo elétrico e o aumento da concentração de partículas aumentam o valor da tensão mínima de escoamento ( $\tau_e$ ), com

Tab.4.15 - Propriedades mecânicas de materiais ER à base de CMC obtidas em ensaios de cisalhamento.

| Amostra   | E<br>(kV/mm) | $\tau_e \times 10^6$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------------|--|
| 10% CMC   | 0            | 0,71   |
| FS - 500  | 1            | 22,04  |
| 15% CMC   | 0            | 2,45   |
| FS - 500  | 1            | 37,01  |
| 20% CMC   | 0            | 2,86   |
| FS - 500  | 0,5          | 50,11  |
|           | 1            | 59,81  |
| 25% CMC   | 0            | 3,57   |
| FS - 500  | 1            | 22,45  |
| 20% CMC   | 0            | 0,82   |
| FS - 100  | 1            | 21,02  |
| 20% CMC   | 0            | 3,06   |
| FS - 1000 | 1            | 26,53  |

$$A = \pi \bar{D} L = \pi \cdot 26 \cdot 120 = 9801,8 \text{ mm}^2$$

exceção da amostra com 25% que apresentou uma diminuição em  $\tau$ . Com respeito à viscosidade do fluido-suporte, notou-se que sem campo elétrico, o aumento de  $\tau$  é diretamente proporcional ao aumento da viscosidade do fluido de silicone. Entretanto, para  $E = 1 \text{ kV/mm}$ , a amostra com fluido-suporte com viscosidade de 500 cSt apresentou o maior resultado de  $\tau_e$ .

Os valores obtidos para  $\tau_e$  para fluidos ER à base de CMC são de  $8,5 \times 10^3$  a  $2,1 \times 10^5$  vezes menor que para o estanho ( $0,51$  a  $4,59 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]), de  $3,5 \times 10^4$  a  $9,9 \times 10^4$  vezes menor que para o ABS ( $2,09 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]) e de  $6,9 \times 10^4$  a  $1,9 \times 10^5$  vezes menor que o nylon 6 ( $4,15 \text{ kgf/mm}^2$  [guid-90]).

Comparando-se estes resultados com os de tração, notou-se que a tensão mínima de escoamento é de três a treze vezes menor que o limite de resistência à tração. Porém, para a amostra de 20% em peso de CMC,  $\tau_e$  é seis vezes e meia maior que  $\tau_y$ , obtido em testes rotacionais (na Fig.4.20,  $\tau_y \approx 90 \text{ Pa} \approx 9,2 \times 10^{-6} \text{ kgf/mm}^2$  para a amostra com 20% em peso de CMC em fluido de silicone de 500 cSt,  $E = 1 \text{ kV/mm}$  e temperatura ambiente).

Na Fig.4.49 estão plotados os dados da tabela 4.15 para amostras à base de CMC a várias concentrações. Nela observa-se o grande aumento da tensão mínima de escoamento quando o campo elétrico é ligado e a existência de uma concentração ótima onde o efeito ER é máximo. Apesar da queda observada em  $\tau$  para  $C = 25\%$ , o efeito eletro-reológico ainda é grande. É interessante notar que nos testes rotacionais a concentração ótima para fluidos ER à base de CMC foi de 15%. Fluidos eletro-reológicos com concentrações superiores a 25% não foram ensaiados devido à alta viscosidade da suspensão e à dificuldade da saída de ar entre os eletrodos antes do início do ensaio.

Na Tab.4.16 estão os resultados obtidos para vários ensaios de cisalhamento para amostras com 20% de CMC, mostrando a dispersão dos dados.

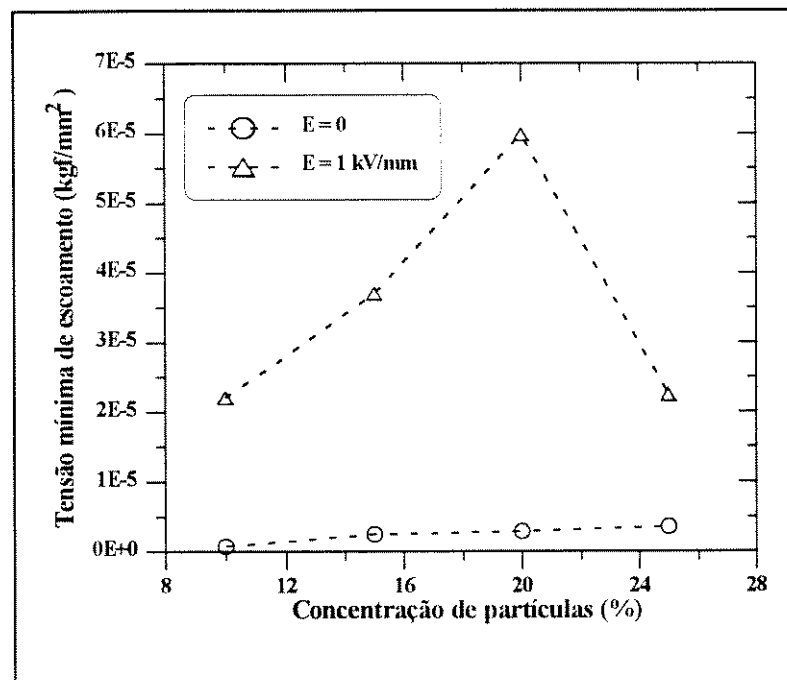


Fig.4.49 - Gráfico de tensão mínima de escoamento em função da concentração de CMC em fluido de silicone (500 cSt) à temperatura ambiente.

Tab.4.16 - Resultados dos ensaios de cisalhamento para materiais ER à base de CMC em fluido de silicone.

| Amostra               | E<br>(kV/mm) | $\tau_e \times 10^6$<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|--------------|--|
| 20% amido<br>FS - 500 | 0,5          | 46,91  |
|                       |              | 50,11  |
|                       |              | 50,53  |
|                       |              | 52,00  |

Não foram ensaiadas amostras sob campos elétricos maiores que 1 kV/mm devido à alta intensidade de corrente que passava pelo fluido ER.

### 4.3 Embreagem ER

Como ilustração, foi montada uma embreagem conforme a Fig.3.20 e foi determinado o torque total da mesma. Na tabela 4.17 estão os dados obtidos para fluidos ER com 15% de partículas em fluido de silicone de 100 cSt para os testes estático e dinâmico. Através desta tabela observa-se que com o aumento do campo elétrico, há um aumento do torque estático, sendo que este é maior para a amostra à base de CMC. Isso se deve ao aumento da força da estrutura fibrosa com o campo E e com o tipo de partícula.

Com relação ao torque dinâmico, verificou-se que a aceleração angular do motor era desprezível ( $\alpha \approx 0$ ), e que as velocidades angulares  $\omega_1$  e  $\omega_2$  eram praticamente iguais. Tendo em vista que a aceleração era praticamente zero, e que a maior influência no torque dinâmico vem da aceleração, pode-se dizer que o torque total no eixo da embreagem era igual ao torque estático, já que o torque dinâmico pode ser considerado desprezível.

Durante os testes dinâmicos, foram adicionadas massas ao disco D da Fig.3.18 sem que

houvesse alteração na velocidade angular  $\omega_2$ , até que para uma determinada massa o sistema parava ( $\omega_2 = 0$ ). Na Tab.4.17 estão listadas essas massas para cada uma das condições estudadas. Observa-se que com o aumento do campo elétrico, o sistema suporta uma massa maior, antes que  $\omega_2$  caia a zero. Isso é devido ao aumento da força da estrutura fibrosa que passa a transmitir o torque do motor (1,45 N.m) de uma maneira mais eficiente, apesar de o torque dinâmico ser praticamente zero.

Desta maneira, pode-se dizer que o torque total da embreagem ER aumenta com o campo elétrico e é maior para fluidos à base de CMC.

Tab. 4.17 - Torque estático da embreagem da Fig.3.18 para FER com 15% de partículas em fluido de silicone de 100 cSt.

| Amostra             | E<br>(kV/mm) | Teste Estático |                | Teste Dinâmico |                | Torque Total<br>(N.m) |
|---------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
|                     |              | massa (g)      | $T_E$<br>(N.m) | massa (g)      | $T_D$<br>(N.m) |                       |
| 15% amido<br>FS-100 | 0,5          | 2,1            | 0,002          | 79,2           | ~ 0            | 0,002                 |
|                     | 0,8          | 6,3            | 0,05           | -              | ~ 0            | 0,05                  |
|                     | 1            | 8,4            | 0,006          | -              | ~ 0            | 0,006                 |
| 15% CMC<br>FS-100   | 0,5          | 71,2           | 0,053          | 271,9          | ~ 0            | 0,053                 |
|                     | 0,8          | 85,9           | 0,064          | 353,4          | ~ 0            | 0,064                 |

## Capítulo 5

### Conclusões

Neste trabalho foram estudados dois tipos de materiais eletro-reológicos: materiais compostos por partículas de amido hidratado suspensas em fluido de silicone e partículas de CMC em fluido de silicone. Foram determinadas as propriedades mecânicas e reológicas destes materiais variando-se a concentração de partículas (10 a 40% em peso), viscosidade do fluido-suporte (100, 500 e 1000 cSt), intensidade do campo elétrico (0 a 4 kV/mm) e temperatura (10 a 50°C para determinação das propriedades reológicas e temperatura ambiente para a caracterização das propriedades mecânicas). As conclusões deste trabalho foram divididas em três tópicos que estão a seguir.

#### 5.1 Propriedades Mecânicas

Com respeito aos dispositivos usados nos ensaios mecânicos, pode-se dizer que todos podem ser aperfeiçoados. Dentre eles, o que merece maior atenção neste sentido é o dispositivo utilizado nos ensaios de compressão. O número de furos para a saída do fluido ER, por exemplo, pode ser aumentado, diminuindo a influência da pressão capilar nos resultados finais.

Com relação às propriedades mecânicas dos dois materiais estudados, pode-se afirmar que:



- os fluidos à base de CMC apresentaram níveis mais altos de resistência mecânica que os fluidos com amido nos ensaios de tração, compressão e cisalhamento;
- existe uma dispersão nos dados de tração (~ 20%), compressão (~ 10%), fadiga e cisalhamento (~ 50% para o amido e ~ 5% para o CMC), que deve ser tratada estatisticamente;
- fluidos ER são mais resistentes à compressão, depois à tração e por último ao cisalhamento.

Quanto aos resultados obtidos através dos **ensaios de tração**, pode-se dizer que:

- os fluidos ER apresentam deformação elástica seguida de deformação plástica antes da ruptura, seguindo o comportamento padrão que se verifica nos metais dúcteis;
- com o aumento do campo elétrico, o material ER se torna mais dúctil;
- a ruptura de materiais ER é marcada pelo limite de resistência  $\sigma_t$  : até esse valor a amostra se comporta como um sólido e depois de atingido  $\sigma_t$  , o material passa a exibir um comportamento intermediário entre líquido e sólido;
- aumentando-se a viscosidade do fluido-suporte e/ou a concentração de partículas, há um aumento de  $\sigma_t$  e o material se torna mais dúctil. Entretanto, para fluidos com 35% de CMC, o material é menos dúctil, indicando a possível existência de uma concentração ótima onde a ductilidade é máxima;
- fluidos à base de amido possuem maior módulo de elasticidade ( $E_y$ ) para  $2 \leq E \leq 3$  kV/mm, e fluidos à base de CMC apresentam maior  $E_y$  para  $E = 3$  kV/mm;
- para fluidos com amido, parece que existe uma concentração entre 20 e 30% onde  $E_y$  é máximo, enquanto que fluidos com CMC possuem menor módulo de elasticidade para  $15 \leq C \leq 20\%$ ;
- a elasticidade de fluidos ER sob campo elétrico é da mesma ordem de grandeza que a da borracha;
- o aumento do campo elétrico e da concentração aumentam a capacidade ( $U_r$ ) do material ER à base de CMC de absorver energia quando deformado elasticamente. Já os materiais com amido não apresentam nenhuma relação entre o campo elétrico  $E$ , a concentração  $C$  e  $U_r$  ;

- durante os ensaios de tração, a corrente elétrica tem um valor máximo que ocorre logo depois de atingido o limite de resistência do material;
- para ambos os fluidos ER utilizados, o aumento da concentração provoca um aumento na corrente elétrica  $i$ .

Quanto aos **ensaios de fadiga**, pode-se afirmar que para os fluidos à base de amido:

- quanto menor a carga de solitação da amostra, maior é o número de ciclos suportado por ela e maior é a dispersão dos dados;
- é possível tratar estatisticamente os dados de vida de fluidos ER por meio da distribuição de Weibull;
- os resultados obtidos para amostras com 20% de amido mostraram que, com a diminuição da carga de solitação, há um grande número de amostras com vida curta e poucas amostras com vida longa (ou seja, há uma diminuição do módulo de Weibull,  $b$ );
- aumentando-se o campo elétrico e/ou a concentração e/ou a viscosidade do fluido-suporte, aumenta-se a vida da amostra;
- há indícios de que exista uma tensão mínima abaixo da qual o material ER não se rompa, como acontece com aços e ligas de titânio;
- os fluidos ER têm vida da mesma ordem de grandeza que a de alguns polímeros como polipropileno, polietileno e politetrafluoretileno;
- há fortes indicações de que a variação da corrente elétrica durante os ensaios está associada à variação da estrutura do material ER (ruptura das fibras);
- durante todo o ensaio de fadiga, existem dois fatores que atuam sobre a corrente e que têm efeitos opostos: (a) o efeito Joule que promove o aquecimento da amostra e o aumento da corrente e (b) o surgimento de "trincas" no material ER causado pela ruptura das fibras que diminui a corrente;

Com relação aos **ensaios de compressão**, pode-se afirmar que:

- os materiais ER se deformam elasticamente antes de escoar;

- os limites de resistência (início do escoamento) e de proporcionalidade são coincidentes;
- com o aumento do campo elétrico e/ou da concentração de partículas há um aumento no limite de resistência  $\sigma_r$ ;
- $\sigma_r$  foi máximo para materiais com fluido de silicone com viscosidade de 500 cSt;
- quanto aos fluidos à base de amido não foi observada nenhuma relação entre o campo elétrico e a concentração com os módulos de elasticidade ( $E_y$ ) e de resiliência. Porém, para os fluidos com CMC, notou-se que eles apresentam menor  $E_y$  para  $0,34 \leq E \leq 1,03$  kV/mm e  $15 \leq C \leq 20\%$ , e sua capacidade de absorver energia na zona elástica cresce para concentrações e/ou campos elétricos mais altos.

A partir dos resultados obtidos com os **ensaios de cisalhamento**, pode-se dizer que:

- a introdução do campo elétrico provoca um aumento na tensão mínima de escoamento estática  $\tau_e$ .
- para o fluido com amido,  $\tau_e$  também, aumenta com a concentração e com a viscosidade do fluido-suporte. Já para fluidos com CMC, isso só ocorre na ausência de campo elétrico; para  $E = 1$  kV/mm,  $\tau_e$  é máximo para fluido-suporte com viscosidade de 500 cSt e concentração de partículas próxima de 20%
- a tensão mínima de escoamento estática (obtida através de ensaios mecânicos) é bem maior que a tensão mínima de escoamento dinâmica (obtida em testes rotacionais);
- quando  $E = 1$  kV/mm, o aumento de  $\tau_e$  com o aumento da concentração é muito maior do que quando  $E = 0$ .

## 5.2 Propriedades Reológicas

Com relação às propriedades reológicas dos materiais à base de amido e de CMC, determinadas em testes rotacionais, pode-se afirmar que:

- o fluido à base de CMC tem maior efeito ER que aquele à base de amido hidratado;
- na ausência de campo elétrico, os fluidos ER se comportam como um fluido newtoniano. Com o aumento do campo elétrico, o fluido passa a ter um comportamento que pode ser aproximado pelo de um fluido de Bingham ( $E \leq 2 \text{ kV/mm}$ ). A partir daí, o aumento de  $E$  faz com que o modelo de Bingham não mais descreva de forma satisfatória o comportamento desses fluidos;
- a viscosidade aparente dos fluidos decresce com o aumento da taxa de cisalhamento e aumenta com o aumento do campo elétrico desde que o dielétrico não seja rompido;
- a tensão mínima de escoamento  $\tau_y$  (obtida pela extrapolação da região reta da curva da tensão de cisalhamento  $\tau$  em função da taxa de cisalhamento  $\dot{\gamma}$  até  $\dot{\gamma} = 0$ ) aumenta com  $E$  e independe da temperatura;
- existe uma histerese em fluidos eletro-reológicos à base de amido e de CMC quando submetidos a um campo elétrico, que é proveniente da reconstrução das fibras destruídas pelo cisalhamento a partir de uma estrutura fibrosa já formada (curva de volta do gráfico de  $\tau$  em função de  $\dot{\gamma}$ ) contra uma estrutura ainda por se formar (curva de ida);
- a histerese aumenta com o aumento do campo elétrico e é influenciada pela viscosidade do fluido-suporte;
- existe uma concentração ótima de partículas onde o efeito ER é maximizado ( $C \approx 25\%$  para fluidos à base de amido e  $C \approx 15\%$  para aqueles com CMC);
- para o caso do CMC, o simples aumento na concentração de partículas provoca uma histerese no comportamento do fluido, não somente na presença de campo elétrico como em sua ausência; o mesmo não foi observado para o amido;
- fluidos ER submetidos a um campo elétrico e a um aumento de temperatura ficam sujeitos a dois efeitos que são opostos: o decréscimo da viscosidade do fluido-suporte e o aumento da força da estrutura fibrosa. Dependendo da intensidade de  $E$  e de  $T$ , esses fatores terão uma influência maior ou menor no sistema;
- o aumento de  $E$  não tem influência significativa no tempo de resposta de fluidos com amido na escala de tempo analisada;

- contrariando o que diz a literatura, nem sempre o cisalhamento atrapalha a formação de fibras. Isso só ocorre quando a taxa de cisalhamento varia com o tempo; caso contrário, o cisalhamento pode até colaborar com o efeito ER dependendo de condições como concentração, campo elétrico, temperatura e viscosidade do fluido-suporte;
- a passagem de corrente elétrica através de fluidos ER é muito pequena, aumenta com o aumento do campo elétrico, da concentração, da temperatura, e aumenta com a diminuição da taxa de cisalhamento;
- a corrente que passa através dos fluidos de CMC é maior que nos fluidos à base de amido.

### **5.3 Embreagem ER**

Quanto à utilização de fluidos ER em embreagens, pode-se afirmar que fluidos à base de CMC apresentam melhor transmissão de torque quando comparados com fluidos com amido hidratado.

## Capítulo 6

### Sugestões para Próximos Trabalhos

A eletro-reologia é multidisciplinar e oferece uma grande variedade de assuntos ainda por serem explorados. Como continuação deste trabalho, há várias possibilidades de pesquisa, e elas foram agrupadas nos seguintes tópicos:

#### **Propriedades Mecânicas:**

- fazer um tratamento estatístico das propriedades mecânicas, já que existe uma dispersão dos resultados;
- verificar a existência de um limite de fadiga  $S_e$  para diferentes materiais ER;
- mudar a geometria dos dispositivos de ensaios de tração, compressão, fadiga e cisalhamento utilizados neste trabalho, verificando sua influência nas propriedades mecânicas de fluidos ER.

#### **Variação da Temperatura:**

- analisar quantitativamente a influência do efeito Joule nos resultados obtidos em ensaios mecânicos, a fim de verificar a confiabilidade de resultados de ensaios onde não existe um controle eficiente da temperatura.

#### **Estrutura Fibrosa:**

- estudar os mecanismos de ruptura do material ER (início de "trincas" e sua propagação) durante ensaios mecânicos em função da concentração de partículas e da intensidade do campo elétrico. Este estudo poderia consistir, inclusive, da

filmagem do material ER durante os ensaios.

### **Propriedades de Materiais ER:**

- estabelecer correlações entre as propriedades obtidas para fluidos ER em testes oscilatórios com as obtidas em ensaios mecânicos, especialmente, fadiga;
- analisar a variação das propriedades elétricas (condutividade) e térmicas de materiais ER durante ensaios mecânicos.

### **Controle:**

- estudar a resposta transiente elétrica e mecânica de materiais ER em ensaios mecânicos. Este estudo seria de muita valia, pois muitos dispositivos ER precisam estar sujeitos não somente a deformações altamente instáveis como também a contínuas e, freqüentemente, rápidas variações de campo elétrico para controle semi-ativo.

Além das possibilidades de pesquisa apresentadas acima, existem muitas outras que não são uma continuação deste trabalho propriamente dito, mas que merecem ser citadas:

### **Compatibilidade com outros Materiais:**

- estudar a compatibilidade (atrito, abrasão, corrosão, etc.) de fluidos ER com os materiais com os quais estarão em contato, inclusive com os eletrodos.

### **Propriedades de Materiais ER:**

- verificar como ocorre o envelhecimento do fluido ER;
- estudar o comportamento do fluido ER durante cisalhamento a altas e baixas temperaturas por longos períodos de tempo;
- estudar a complexa reologia de fluidos ER sob campo elétrico, a fim de modelar com precisão as características não-lineares dos mesmos;
- correlacionar as propriedades mecânicas, elétricas, etc. dos materiais que compõem o fluido ER com os campos  $E_{c1}$  e  $E_{c2}$  quando se inicia a transição de fases de líquido para sólido.

**Polarização:**

- estudar o mecanismo de transferência de cargas elétricas, a polarização das partículas e o comportamento das superfícies envolvidas.

**Cinética:**

- estudar a cinética de solidificação de fluidos eletro-reológicos.

**Dispositivos Mecânicos:**

- analisar a influência do formato e do tamanho das partículas no efeito ER em dispositivos mecânicos;
- desenvolver dispositivos mecânicos que utilizem fluidos ER e sistemas de controle eficientes envolvendo redes neurais e lógica nebulosa.

**Novos Fluidos:**

- estudar novas formulações para fluidos ER, considerando seu desempenho, propriedades elétricas, mecânicas, etc. sem deixar de lado seu impacto sobre o meio ambiente.

**Aspecto Econômico:**

- Estimar a economia de energia com a utilização de fluidos ER em dispositivos mecânicos.

Apesar de vários pesquisadores no mundo estarem investigando sobre a eletro-reologia, ainda há muito o que se fazer. Esta é uma área muito aplicada da engenharia e qualquer pesquisa feita sobre o assunto não pode perder de vista seu objetivo central: a aplicação tecnológica de fluidos eletro-reológicos.



## BIBLIOGRAFIA

[abuj-95] Abu-Jdayil, B. and Brunn, P.O.; "Effects of Nonuniform Electric Field on Slit Flow of an Electrorheological Fluid", **Journal of Rheology**, **39** (6), 1327–1341 (1995).

[adri-88] Adriani, P.M. and Gast, A.P.; "A Microscopic Model of Electrorheology", **Physics of Fluids**, **31** (10), 2757–2768, October (1988).

[ahn-94] Ahn, K.H., Klingenberg, D.J.; "Relaxation of Polydisperse Electrorheological Suspensions", **Journal of Rheology**, **38**(3), 713–741 (1992).

[atki-91] Atkin, R.J.; "Solutions of the Constitutive Equations for the Flow of an Electrorheological Fluid in Radial Configurations", **Journal of Rheology**, **35**, 1441–1461 (1991).

[auto-93] Anonymous Automotive Industry Source - site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[baye-96] Catálogo de Fluidos ER da Bayer (Rheobay® TP AI 3565\* e Rheobay® TP AI 3566\*) (1996).

[bare-89] Bares, J.E. and Carlson, J.D.; "Electrorheological Fluid Design: An Overview", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 93–114 (1989).

[barn-89] Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K.; **An Introduction to Rheology**, Elsevier Science Publishers B.V. (1989).

[bhad-89] Bhadra, D.K., Harder, C.R. and Thompson, W.B.; "Electroviscous Damping for Landing Aircraft", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 402–408 (1989).

[bloc-87] Block, H. and Kelly, J.P.; "Materials and Mechanisms in Electro-rheology", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 1–26 (1987).

[bloc-88] Block, H. and Kelly, J.P.; "Electro-rheology", **Journal of Physics D: Applied Physics** **21**, 1661–1667 (1988).

[bloc-90] Block, H., Kelly, J.P., Qin, A. and Watson, T.; "Materials and Mechanisms in Electro-rheology", **Langmuir** (6) 6–14 (1990).

[bloc-92] Block, H.; "Electrorheological Fluids", **Chemtech**, 368–373, June (1992).

[bois-95] Boissy, C., Atten, P. and Foulc, J.-N.; "On a Negative Electrorheological Effect", **Journal of Electrostatics**, **35**, 13–20 (1995).

[bomb-96] Bombarb, A.J.F.; "Fluidos Eletroreológicos: Suspensões de PVA em Óleo de Milho", **Tese de Mestrado** apresentada no Instituto de Química da UNICAMP, Agosto (1996).

[bonn-89] Bonnecaze, R.T. and Brady, J.F.; "Dynamic Simulation of a Suspension of Dielectric Particles Forming an Electrorheological Fluid", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 27–40 (1989).

[bonn-92] Bonnecaze, R.T. and Brady, J.F.; "Yield Stresses in Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, **36**, 73–115 (1992).

[bonne-92] Bonnecaze, R.T. and Brady, J.F.; "Dynamic Simulation of an Electrorheological Fluid", **Journal of Chemical Physics**, **96** (3), 2183–2202, 1 Feb. (1992).

[boss-93] Bossis, G.; "France - Research on ER Fluids in France", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assesment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[boyl-93] Boyle, F.P.; site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assesment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[broo-86] Brooks, D., Goodwin, J., Hjelm, C., Marshall, L. and Zukoski, C.; "Visco-Elastic Studies on an Electro-Rheological Fluid", **Colloids and Surfaces**, 18, 293–312 (1986).

[broo-87] Brooks, D. A.; "Electrorheological Fluids in Couette Flow", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 63–80 (1987).

[broo-89] Brooks, D.; "Fluids Get Tough", **Physics World**, 2, 35–38 (1989).

[brook-89] Brooks, D.A.; "Devices Using Electro-rheological Fluids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 371–401 (1989).

[broo-94] Brooks, D.; "Applicability of Simplified Expressions for Design with Electro-Rheological Fluids", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 76–81 (1994).

[bull-87] Bullough, W.A., Peel, D.J. and Firoozian, R.; "Characteristics and other Considerations for Electrorheological Fluids", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 99–114 (1987).

[bull-89] Bullough, W.A.; "Miscellaneous Electro-Rheological Phenomena, Part I", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 115–123 (1989).

[bullo-89] Bullough, W.A.; "Miscellaneous Electro-Rheological Phenomena, Part II", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 124–140 (1989).

[carl-88] Carlson, J.D.; **U.S. Patent 4,772,407** (1988).

[carl-89] Carlson, J.D. and Duclos, T.G.; "ER Fluid Clutches and Brakes – Fluid Property and Mechanical Design Considerations", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 353–370 (1989).

[cecc-94] Ceccio, S.L., Wineman, A.S.; "Influence of Orientation of Electric Field on Shear Flow of Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, **38**(3), 453–463 (1992).

[chen-91] Chen, Y., Sprecher, A.F. and Conrad, H.; "Electrostatic Particle-Particle Interactions in Electrorheological Fluids", **Journal of Applied Physics** **70** (11) 6796–6803 (1991).

[chen-92] Chen, T., Zitter, R.N. and Tao, R.; "Laser Diffraction Determination of the Crystalline Structure of an Electrorheological Fluid", **Physical Review Letters** **68** (16) 2555–2558 (1992).

[chen-89] Chenguan, W.; "The Prospect of Engineering Applications of the Electro-Rheological Technique in China", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 349–352 (1989).

[choi-94] Choi, S.B., Park, Y.K.; "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-rheological Fluid", **Journal of Sound and Vibration**, **172**(3), 428–432 (1994).

[choiy-94] Choi, Y., Sprecher, A.F. and Conrad, H.; "Response of Electrorheological Fluid-Filled Laminate Composites to Forced Vibration", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 1–6 (1994).

[coll-93] Collins, E.A.; "Who's Who in ER Research and Development", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[colv-89] Colvin, D.P. and Carlson, D.J.; "Control of a Fall-Safe Tether Using an ER-Fluid Brake", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 426–436 (1989).

[conr-87] Conrad, H., Shamala, A.R. and Sprecher, A.F.; "Characteristics of Silica/Silicone Oil Electrorheological Fluid at Small Strains and Strain Rates", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 47–62 (1987).

[conr-89] Conrad, H., Fisher, M. and Sprecher, A.F.; "Characterization of the Structure of a Model Electrorheological Fluid Employing Stereology", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad. H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 63-81 (1989).

[conra-89] Conrad, H., Chen, Y. and Sprecher, A.F.; "Electrorheology of Suspensions of Zeolite Particles in Silicone Oil", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 252-264 (1989).

[conr-91] Conrad, H. and Sprecher, A.F.; "Characteristics and Mechanisms of Electrorheological Fluids", **Journal of Statistical Physics** V 64, N 5/6, 1073-1091 (1991).

[conra-91] Conrad, H., Sprecher, A.F., Choi, Y. and Chen, Y.; "The Temperature Dependence of the Electrical Properties and Strength of Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, 35, 1393-1410 (1991).

[conr-93] Conrad, H.; teleconference with Dr. Hans Conrad published in **Electrorheological (ER) Fluids - A Research Needs Assessment - Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[conr-95] Conrad, H., Li, Y. and Chen, Y.; "The Temperature Dependence of the Electrorheology and Related Properties of Corn Starch/Corn Oil Suspensions", **Journal of Rheology**, 39, (5), 1041-1057 (1995).

[coul-89] Coulter, J.P. and Duclos, T.G.; "Applications of Electrorheological Materials in Vibration Control", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 300-325 (1989).

[coul-94] Coulter, J.P., Weis, K.D. and Carlson, F.D.; "Engineering Applications of Electrorheological Materials", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 64-75 (1994).

[davi-92] Davis, L.C.; "Ground State of an Electrorheological Fluid", **Physical Review A** 46 (2) R719-R721 (1992).

[davis-92] Davis, L.C.; "Polarization Forces and Conductivity Effects in Electrorheological Fluids", **Journal of Applied Physics** 72 (4) 1334–1340 (1992).

[davisl-92] Davis, L.C.; "Finite-element Analysis of Particle-particle Forces in Electrorheological Fluids", **Applied Physics Letters**, 60(3), 319–321 (1992).

[davi-93] Davis, L.C.; "The Metal-Particle/Insulating Oil System: An Ideal Electrorheological Fluid", **Journal of Applied Physics** 73 (2) 15 January, 680–683 (1993).

[diet-81] Dieter, G.E.; "**Metalurgia Mecânica**", 2ª edição, Editora Guanabara Koogan S.A (1981).

[dima-92] Dimarogonas, A., Kollias, A.; "Smart Rotors", in **Proc. International Conference on Rotating Machine Dynamics**, edited by Michael J. Goodwin, Hotel des Bains, Venice, April 28–30 (1992).

[dow-93] Dow Chemical Company - site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[ducl-88] Duclos, T.G., Acker, D.N. and Carlson, J.D.; "Fluids that Thicken Electrically", reprinted from **Machine Design** (1988).

[duclo-88] Duclos, T.G.; "Electrorheological Fluids and Devices", reprinted from **Automotive Engineering**, V 96, N 12, 45–48 (1988).

[fili-90] Filisko, F.E. and Radzilowski, L.H.; "An Intrinsic Mechanism for the Activity of Alumino-Silicate Bases Electrorheological Materials", **Journal of Rheology**, 34, 539–552 (1990).

[fili-92] Filisko, F.E.; "Electrorheological Materials: Smart Materials of the Future", **Chemistry & Industry**, 370–373, 18 May (1992).

[fili-93] Filisko, F.E.; "Materials Aspects of ER Fluids", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[**filis-93**] Filisko, F.E.; "Four Companies in Japan", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[**ford-93**] Ford Motor Company - site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[**foul-92**] Foulc, J., Félici, N. et Atten, P.; "Interpretación de l'effect Électrorhéologique", **Comptes Rendus de L'Academie des Science Paris; Serie II: Mecanique-physique chemie- Sciences de la Terre et de l'Univers**, **314**, 1279–1283 (1992).

[**foul-94**] Foulc, J.-N., Atten, P. and Félici, N.; "Macroscopic Model of Interaction Between Particles in an Electrorheological Fluid", **Journal of Electrostatics.**, **33**, 103–112 (1994).

[**frie-92**] Friedberg, R.; "Energy of an Electrorheological Solid Calculated with Inclusion of Higher Multipoles", **Physical Review B** **46** (10), 6582–6585 (1992).

[**froo-89**] Froot, D.G.; "Preliminary Measurements of I-V Characteristics in Starch Based ER Fluids" in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 265–286 (1989).

[**gamo-91**] Gamota, D.R. and Filisko, F.E.; "Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Materials: Moderate Frequencies", **Journal of Rheology**, **35** (3), 399–425 (1991).

[**gamot-91**] Gamota, D.R. and Filisko, F.E.; "High Frequency Dynamic Mechanical Study of Aluminisilicate Electrorheological Materials", **Journal of Rheology**, **35** (7), 1411–1425 (1991).

[**gamo-93**] Gamota, D.R., Wineman, A.S. and Filisko, F.E.; "Fourier Transform Analysis: Nonlinear Dynamic Response of an Electrorheological Material", **Journal of Rheology**, **37** (5), 919–933 (1993).

[**gast-89**] Gast, A. and Zukoski, C.F.; "Electrorheological Fluids as Colloidal Suspensions", **Advances in Colloid and Interface Science**, **30**, 153–202 (1989).

[gind-95] Ginder, J.M. and Ceccio. S.L.; "The Effect of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, 39(1), 211–234 (1995).

[gold-90] Goldstein, G.; "Electrorheological Fluids: Applications Begin to Gel", **Mechanical Engineering**, 48–52, Oct. (1990).

[good-93] Goodwin, J.W.; "Rheological Characterization of ER Fluids", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[goodw-93] Goodwin, J.W.; "Steric Forces", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[goodwi-93] Goodwin, J.W.; "Activities in ER Fluids in the United Kingdom", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[gow-90] Gow, C.J. and Zukoski IV, C.F.; "The Electrorheological Properties of Polyaniline Suspensions ", **Journal of Colloid Interface Science**, 136(1), 175–188 (1990).

[guid-90] "Guide to Selecting Engineered Materials", **Advanced Materials & Processes**, 137, Issue 6, 19–26, ASM, June (1991).

[haiq-94] Haiqing, G., King, L.M. and Cher, T.B.; "Influence of a Locally Applied Electro-Rheological Fluid Layer on Vibration of a Simple Cantilever Beam", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 101–106 (1994).

[hals-90] Halsey, T.C. and Toor, W.; "Structure of Electrorheological Fluids", **Physical Review Letters**, V 65, N 22, 2820–2823 (1990).

[hals-92] Halsey, T.C.; "Rheology of Electrorheological Fluids", **Physical Review Letters**, V 68, N 10, 1519–1522 (1992).

[halse-92] Halsey, T.C.; "Electrorheological Fluids" **Science** V 258, 30 October, 761-766 (1992).



[hals-93] Halsey, T.C. and Martin, J.E.; "Electrorheological Fluids", **Scientific American**, October, 58–64 (1993).

[hart-91] Hartsock, D.L., Novak, R.F. and Chaundy, G.J.; "ER Fluid Requirements for Automotive Devices", **Journal of Rheology**, **35**, 1305–1326 (1991).

[hill-91] Hill, J.C. and van Steenkiste, T.H.; "Response Times of Electrorheological Fluids", **Journal of Applied Physics** **70**, (3), 1 August, 1207–1211 (1991).

[hert-89] Hertzberg, R.; **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, 1989.

[hoss-94] Hosseini-Sianaki, A., Firoozian R., Peel, D.J. And Bullough, W.A.; "Comparative Methods for the Derivation of In Flow Electrical Characteristics of Electro-Rheological Fluids", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 7–15 (1994).

[hoss-95] Hosseini-Sianaki, A., Varley, C.J., Taylor, P.M., Lacey, D. and Malins, C.; "Comparison of Electrorheological Fluids based on Silicone Oil and Liquid Crystalline Materials", **J. Mater. Chem.**, **5**(11), 1853–1856 (1995).

[hunt-94] Hunter, L.W., Mark, F.F., Kitchin, D.A., Feinstein, M.R., Kuespert, D.R. and Donohue, M.D.; "Optical Effects of Electro-Rheological Fluids", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 82–85 (1994).

[inou-89] Inoue, A.; "Study of a New Electrorheological Fluid", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 176–183 (1989).

[inou-96] Inoue, A. and Maniwa, S.; "Electrorheological Behavior of Two Thermotropic and Lyotropic Liquid Crystalline Polymers", **Journal of Applied Polymer Science**, **59**, 797–802 (1996).

[inou-89] Inoue, A.; "Study of an New Electrorheological Fluid", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 176–183 (1989).

[jack-79] Jackson, L.L.; "Simple Way to Predict Product Reliability", **Machine Design**, 74–78, August (1979).

[jagg-89] Jaggi, N.K., Woestman, J.T. and Tao, R.; "Possible Phase Transition in Electrorheological Fluids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 53–62 (1989).

[jagg-91] Jaggi, N.K.; "Structure and Dynamics of a Dense Dipolar System in Electric Field and Their Relevance to Electrorheological Fluids", **Journal of Statistical Physics** 64 (5/6), 1093–1102, (1991).

[john-94] Johnson, A.R., Makin, J., Bullough, W.A., Firoozian, R. And Hosseini-Sianaki, A.; "Fluid Durability in a High Speed Electro-Rheological Clutch", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 113–118 (1994).

[jone-89] Jones, T.B.; "Orientation of Particle Chains in a AC Electric Field", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 14–26 (1989).

[jord-89] Jordan, T.C. and Shaw, M.T.; "Electrorheology", in **IEEE Transactions on Electrorheological Insulation**, V 24, N 5, 849–878 (1989).

[jorda-89] Jordan, T.C. and Shaw, M.T.; "Structure in Electrorheological Fluids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 231–251 (1989).

[jord-92] Jordan, T.C. and Shaw, M.T.; "Viscoelastic Response of Electrorheological Fluids. II Field Strength and Strain Dependence", **Journal of Rheology**, 36, 441–463 (1992).

[juvi-91] Juvinal, R.C. and Marshek, K.M.; "**Fundamentals of Machine Component Design**", 2nd edition, p. 758 (1991).

[kinl-83] Kinloch, A.J. and Young, R.J.; **Fracture Behaviour of Polymers**, 2<sup>nd</sup> edition, Elsevier Applied Science Publishers LTD, 197–211 (1983).

[klas-67] Klass, D.L. and Martinek, T.W.; "Electroviscous Fluids. I. Rheological Properties", **Journal of Applied Physics**, 38, 67–74 (1967).

- [klass-67] Klass, D.L. and Martinek, T.W.; "Electroviscous Fluids. II. Electrical Properties", **Journal of Applied Physics**, **38**, 75–80 (1967).
- [klin-90] Klingenberg, D.J., van Swol, F. and Zukoski, C.F.; "Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions", **Langmuir**, **6**, 15–24 (1990).
- [klin-91] Klingenberg, D.J., van Swol, F. and Zukoski, C.F.; "The Small Shear Rate Response of Electrorheological Suspensions. I. Simulation in the Point-Dipole Limit", **Journal of Chemical Physics**, **94**, (9), 6160–6169 (1991).
- [kling-91] Klingenberg, D.J., van Swol, F. and Zukoski, C.F.; "The Small Shear Rate Response of Electrorheological Suspensions. II. Extension Beyond the Point-Dipole Limit", **Journal of Chemical Physics**, **94**, (9), 6170–6178 (1991).
- [klinge-91] Klingenberg, D.J., Dierking, D. and Zukoski, C.F.; "Stress-transfer Mechanics in Electrorheological Suspensions", **Journal of Chemical Society Faraday Transactions**, **87**(3), 425–430 (1991).
- [klin-95] Klingenberg, D.J., Pakdel, P., Kim, Y.D., Belongia, B.M. and Kim, S.; "Protein-Enhanced Electrorheological Fluids", **Industrial Engineering Chemical Research**, **34**, 3303–3306 (1995).
- [koji-94] Kojima, Y., Matsuoka, T. and Takahashi, H.; "Electrorheological Properties of Suspensions of Diphenyldiacetylene Annealed Under Elevated Pressure", **Journal of Applied Polymer Science**, **53**, 1393–1396 (1994).
- [koll-94] Kollias, A. And Dimarogonas, A.D.; "Properties of Zeolite- and Cornstarch-Based Electrorheological Fluids at High Shear Strain Rates", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 86–93 (1994).
- [kord-89] Kordonsky, V.I. and Shulman, Z.P.; "Physical Properties of Magnetizable Structure – Reversible Media", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 437–444 (1989).
- [kord-91] Kordonsky, V.I., Korobko, E.V. and Lazareva, T.G.; "Electrorheological Polymer-Based Suspensions", **Journal of Rheology**, **35**, 1427–1439 (1991).

[koro-87] Korobko, E.V. and Shulman, Z.P.; "Attenuation of Vibrations of Mechanical Systems by a Damper with Electrorheological Liquid", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 115–141 (1987).

[koro-89] Korobko, E.V. and Shulman, Z.P.; "Viscoelastic Behaviour of Electrorheological Fluids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 3–13 (1989).

[koro-93] Korobko, E.V.; "The State of the Art of Electrorheology Studies in the Former USSR", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[koro-94] Korobko, E.V.; "Some Aspects of Electrorheology", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 16–29 (1994).

[kray-89] Kraynik, A.M.; "Panel Discussion – ER Fluid Standards: Comments on ER Fluid Rheology", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 445–454 (1989).

[kray-93] Kraynik, A.M.; "Modeling and Simulation of ER Fluids", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[krie-93] Krieger, I.M.; "The University of Grenoble", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[krieg-93] Krieger, I.M.; "Germany: Bayer AG, Leverkusen, FRG", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[kulk-93] Kulkarni, V.G.; report on telephone contact published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[kura-94] Kuramoto, N., Yamazaki, M., Nagai, K., Koyama, K., Tanaka, K., Yatsuzuka, K. and Higashiyama, Y.; "Electrorheological Property of a Polyaniline-coated Silica Suspension", **Thin Solid Films**, **239**, 169–171 (1994).

[lema-92] Lemaire, E., Bossis, G. and Grasselli, Y.; "Rheological Behavior of Electrorheological Fluids", **Langmuir**, **8**(12), 2957–2961 (1992).

[lema-95] Lemaire, E., Meunier, A., Bossis, G., Liu, J., Felt, D., Bashtovoi, P. and Matoussevitch, N.; "Influence of the Particle Size on the Rheology of Magnetorheological Fluids", **Journal of Rheology**, **39**, (5), 1011–1020 (1995).

[ling-89] Lingard, S.; "Tribological Aspects of Electro-Rheological Fluid Behaviour with Respect to Non-Polar Base Liquids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 158–175 (1989).

[ling-91] Lingard, S., Bullough, W.A. and Ho, L.S.; "Hydrodynamic Pressure Generation with an Electrorheological Fluid", **Wear**, **142**, 373–381 (1990).

[lord-93] Lord Corporation Corporate Research Labs - site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[lou-93] Lou, Z. and Ervin, R.D.; "The Influence of Viscometer Dynamics on the Characterization of an Electrorheological Fluid Under Sinusoidal Electric Excitation", **Journal of Rheology**, **37**, 55–70 (1993).

[lou-94] Lou, Z., Ervin, R.D. and Filisko, F.E.; "A Preliminary Parametric Study of Electrorheological Dampers", **Transactions of the ASME**, **116**, 570–576, Sep. (1994).

[maka-89] Makatum, V.N. and Vorobev, D.N.; "Electrorheological Effect (ERE) in the Dielectric Fluid Organic Semiconductor System", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 184–190 (1989).

[**marg-89**] Margolis, D.L. and Vahdati, N.; "The Control of Damping in Distributed Systems Using ER-Fluids" in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 326–348 (1989).

[**mart-92**] Martin, J.E., Odinek, J. and Halsey, T.C.; "Evolution of Structure in a Quiescent Electrorheological Fluid", **Physical Review Letters**, **69**, (10), 1524–1527 (1992).

[**mart-95**] Martin, J.E. and Odinek, J.; "A Light-Scattering Study of the Nonlinear Dynamics of Electrorheological Fluids in Oscillatory Shear", **Journal of Rheology**, **39** (5), 995–1009 (1995).

[**mcle-91**] McLeish, T.C.B.; "Viscoelastic Response of Electrorheological Fluids. I. Frequency Dependence", **Journal of Rheology**, **35**, 427–448 (1991).

[**melc-93**] Melconian, S.; **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**, 10<sup>o</sup> edição, Livros Érica Editora Ltda (1993).

[**melr-93**] Melrose, J.R. and Heyes D.M.; "Simulations of Electrorheological and Particle Mixture Suspensions: Agglomerate and Layer Structures", **Journal of Chemical Physics**, **98**(7), 5873–5886 (1993).

[**mend-96**] Mendes, E.S.; "Propriedades Eletroreológicas de Suspensões de Sulfato de Hidrazina-Lítio em Óleo de Silicone", **Tese de Doutorado** apresentada na Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, Fevereiro (1996).

[**metz-93**] Metzner, A.B.; "Fluid Mechanics", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[**moke-92**] Mokeyev, A.A., Korobko, E.V. and Vedernikova, L.G.; "Structural Viscosity of Electrorheological Fluids", **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, **42**, 213–230 (1992).

[**monk-91**] Monkman, G.J.; "Addition of Solid Structures to Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, **35**, 1385–1392 (1991).

[**mori-93**] Morishita, S. and Ura, T.; "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and Adaptive Neural-Net Controller", reprinted from **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, V4, July, 366-372 (1993).

[**moris-93**] Morishita, S., Nakano, K. and Kimura, Y.; "Electroviscous Effect of Nematic Liquid Crystals", **Tribology International**, 26 (6), 399-403 (1993).

[**morish-93**] Morishita, S. and Ura, T.; "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neural-net Controller", **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 4, 366-372, July (1992).

[**mori-94**] Morishita, S. And Ura, T.; "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neural-Net Controller", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 94-100 (1994).

[**oppe-89**] Oppermann, G., Penners, G., Schulze, M., Marquardt, G., Flindt, R. and Naumann, T.H.; "Applications of Electroviscous Fluid as Movement Sensor Control Devices in Active Vibration Dampers", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 287-299 (1989).

[**otsu-91**] Otsubo, Y.; "Electrorheological Properties of Barium Titanate Suspensions under Oscillatory Shear", **Colloids and Surfaces**, 58, 73-86 (1991).

[**otsub-91**] Otsubo, Y., Sekine, M. and Katayama, S.; "Effect of Surface Modification of Colloidal Silica on the Electrorheology of Suspensions", **Journal of Colloid Interface Science**, 146(2), 395-404 (1991).

[**otsu-92**] Otsubo, Y., Sekine, M. and Katayama, S.; "Effect of Adsorbed Water on the Electrorheology of Silica Suspensions", **Journal of Colloid Interface Science**, 150 (2), 324-330 (1992).

[**otsu-94**] Otsubo, Y., Edamura, K.; "Creep Behavior of Electrorheological Fluids", **Journal of Rheology**, 38(6), 1721-1733 (1994).

[**peel-89**] Peel, D.J. and Bullough, W.A.; "Miscellaneous Electro-Rheological Phenomena, Part III" in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 141-157 (1989).

[peel-94] Peel, D.J. and Bullough, W.A.; "Prediction of Electro-rheological Valve Performance in Steady Flow", **Journal of Mechanical Engineering Science, Part C**, **208**, 253–266 (1994).

[peel1-94] Peel, D.J. and Bullough, W.A.; "Effect of Flow Rate, Excitation Level and Solid Content on the Time Response in an Electro-Rheological Valve", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 53–63 (1994).

[pete-89] Petek, N.K., Goudie, R.J. and Boyle, F.P.; "Actively Controlled Damping in Electrorheological Fluid-Filled Engine Mounts", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 409–418 (1989).

[pomp-96] Pompeo Neto, L.B.; "Notas sobre Viscoelasticidade", apostila em preparação para comunicação interna.

[powe-95] Powell, J.A.; "Application of a Nonlinear Phenomenological Model to the Oscillatory Behavior of ER Materials", **Journal of Rheology**, **39**, (5), 1075–1094 (1995).

[raja-94] Rajagopal, K.R., Yalamanchili, R.C. and Wineman, A.S.; "Modeling Electro-rheological Materials Through Mixture Theory", **International Journal of Engineering Science**, **32** (3), 481–500 (1994).

[reit-93] Reithmeier, E. and Leitmann, G.; "Semiaktive Regelung zur Amplitudenunterdrückung von Schwingungs-systemen unter Einsatz Elektrorheologischer Flüssigkeiten", **Archive of Applied Mechanics**, **63**, 130–149 (1993).

[reit-82] Reitz, J.R., Milford, F.J. and Christy, R.W.; "**Fundamentos da Teoria Eletromagnética**", Ed. Campus, 3ª edição, Rio de Janeiro (1982).

[rice-85] Rice, R.C.; "**Metals Handbook**", Ninth Edition, Mechanical Testing ASM, V.8, 632–635 (1985).

[rose-95] Rosensweig, R.E.; "On Magnetorheology and Electrorheological as States of Unsymetric Stress", **Journal of Rheology**, **39**(1), 179–192 (1995).



[see-92] See, H. and Doi, M.; "Shear Resistance of Electrorheological Fluids under Time-Varying Electric Fields", **Journal of Rheology**, **36**, 1143–1163 (1992).

[seed-89] Seed, M., Hobson, G.S. and Tozer, R.C.; "Macroscopic Behaviour of ER Fluid", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 214–230 (1989).

[shig-93] Shiga, T., Ohta, T., Hirose, Y., Okada, A., Kurauchi, T.; "Electroviscoelastic Effect of Polymeric Composites consisting of Polyelectrolyte Particles and Polymer Gel", **Journal of Materials Science** **28**, 1293–1299 (1993).

[shig-95] Shiga, T., Okada, A. and Kurauchi, T.; "Electroviscoelastic Effect of Doped Poly(3-hexylthiophene)", **Journal of Materials Science Letters**, **14**, 514–515 (1995).

[shul-89] Shulman, Z.P. and Matsepuro, A.D.; "Structural Changes in Electrorheological Fluids", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 207–213 (1989).

[shulm-89] Shulman, Z.P., Korobko, E.V. and Yanovskii, Yu.G.; "The Mechanism of the Viscoelastic Behaviour of Electrorheological Suspensions", **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, **33**, 181–196 (1989).

[smit-87] Smith, K.L. and Fuller, G.G.; "Kinetics of Electric Field Induced Structure in Dense Suspensions", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 27–46 (1987).

[souz-82] Souza, S.A.; "Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos", Ed. Edgard Blücher Ltda, 5<sup>a</sup> ed. (1982).

[spre-89] Sprecher, A.F., Chen, Y. and Conrad, H.; "Measurements of Forces Between Particles in a Model ER Fluid", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 82–92 (1989).

[spro-94] Sproston, J.L., Stanway, R., Williams, E.W. and Rigby, S.; "The Electrorheological Automotive Engine Mount", **Journal of Electrostatics**, **32**, 253–259 (1994).

[spur-94] Spurk, J.H. and Huang, Z.: "Electrorheological Material under Oscillatory Shear", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 107–112 (1994).

[stan-83] Stangroom, J.E.; "Electrorheological Fluids", **Phys. Tech.**, **14**, 290–296 (1983).

[stan-87] Stangroom, J.E.; "The Measurements of the Speed of Response of ER Fluids", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 81–98 (1987).

[stan-89] Stangroom, J.E.; "The Bingham Plastic Model of ER Fluids and its Implications", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 199–206 (1989).

[stang-89] Stangroom, J.E.; "Tension Control Using ER Fluids – A Case Study", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 419–425 (1989).

[stan-91] Stangroom, J.E.; "Basic Consideration in Flowing Electrorheological Fluids", **Journal of Statistical Physics**, **64**, (5/6), 1059–1073 (1991).

[stanw-87] Stanway, R. and Sproston, J.L.; "Experimental Study of and Electrorheological Shock Absorber", in **Proc. First International Symposium on Electrorheological Fluids**, Conrad, H., Sprecher, A.F. and Carlson, J.D., eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 115–141 (1987).

[stur-95] Sturk, M., Wu, X.M. and Wong, J.Y.; "Development and Evaluation of a High voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers", **Vehicle System Dynamics**, **24**, 101–121 (1995).

[tada-93] Tada, H., Saito, Y., Hirata, M., Hyodo, M. and Kawahara, H.; "A Novel Switchable Glazing Formed by Electrically Induced Chains of Suspensions", **Journal of Applied Physics**, **73**, (2), 15 January, 489–493 (1993).

[tang-95] Tang, X., Wu, C. and Conrad, H.; "On the Conductivity Model for the Electrorheological Effect", **Journal of Rheology**, **39**, (5), 1059–1073 (1995).

[**tao-91**] Tao, R. and Sun, J.M.; "Three-Dimensional Structure of Induced Electrorheological Solid", **Physical Review Letters**, **67**, (3), 398–401 (1991).

[**tao1-91**] Tao, R. and Sun, J.M.; "Ground State of Electrorheological Fluids from Monte Carlo Simulations", **Physical Review A**, **44** (10), R6181–R6184 (1991).

[**tao-93**] Tao, R.; "Electric-field-induced Phase Transition in Electrorheological Fluids", **Physical Review E**, **47** (1), 423–426 (1993).

[**tayl-93**] Taylor, P.L.; "Cooperative Aspects of ER Phenomena", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[**thur-91**] Thurston, G.B. and Gaertner, E.B.; "Viscoelasticity of Electrorheological Fluids During Oscillatory Flow in a Rectangular Channel", **Journal of Rheology**, **35**, 1327–1343 (1991).

[**toor-93**] Toor, W.R.; "Structure Formation in Electrorheological Fluids", **Journal of Colloid Interface Science**, **156**, 335–349 (1993).

[**treas-91**] Treasurer, U.Y., Filisko, F.E. and Radzilowski, L.H.; "Polyelectrolytes as Inclusions in Electrorheologically Active Materials: Effect of Chemical Characteristics on ER Activity", **Journal of Rheology**, **35**, 1051–1068 (1991).

[**tse-95**] Tse, K.-L. and Shine, A.D.; "Two-Dimensional Modeling of the Electrorheological Behavior of Liquid Crystalline Polymer Solutions", **Journal of Rheology**, **39**, (5), 1021–1040 (1995).

[**ueji-72**] Uejima, H.; "Dielectric Mechanism and Rheological Properties of Electro-Fluids", **Japanese Journal Applied Physics**, **11**, 319–326 (1972).

[**veas-87**] Veasey, D. and Woodruff, A.; "Who's Who in ER Fluids", **BTG Magazine** – prospect issue 1, 14–21, winter 1987–1988.

[**ven-93**] Ven, T. van de; "Comparisons Between Electro-Optical and Electrorheological Effects", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[ven1-93] Ven, T. van de; "Stability of Electrorheological Fluids", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[viei-93] Vieira, S.L. e Arruda, A.C.F.; "Caracterização de Materiais Eletro-Reológicos", **Anais do I Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, Madri, Espanha (1993).

[viei-94] Vieira, S.L. e Arruda, A.C.F.; "Estudos Dinâmicos de Materiais Eletro-Reológicos – I", **Anais do III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste**, Belém, PA (1994).

[viei-94] Vieira, S.L. e Arruda, A.C.F.; "Características Reológicas de Suspensões ER compostas por Silicato de Alumínio e Amido de Batata", **Anais do VI Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica**, Santiago, Chile (1994).

[viei-96] Vieira, S.L. e Arruda, A.C.F.; "Propriedades Mecânicas de Materiais ER", **Anais do IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste**, 111–116, Recife, PE (1996).

[viei-96] Vieira, S.L. e Arruda, A.C.F.; "Propriedades Mecânicas de Fluidos Eletro-Reológicos à base de Amido e Óleo de Silicone", artigo a ser publicado nos **Anais do VII Congresso Nacional de Ingeniería Mecánica**, Valdivia, Chile (2 a 5 de outubro de 1996).

[wang-89] Wang, K.C., Mclay, R. and Carey, G.F.; "ER Fluid Modelling", in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 41–52 (1989).

[wang-94] Wang, K.W., Kim, Y.S. and Shea, D.B.; "Structural Vibration Control Via Electrorheological-fluid-based Actuators with Adaptive Viscous and Frictional Damping", **Journal of Sound and Vibration**, **177** (2), 227–237 (1994).

[weis-94] Weis, K.D., Carlson, J.D. and Coulter, J.P.; "Material Aspects of Electrorheological Systems", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 30–52 (1994).

[whit-89] Whittle, M.; "Modelling Two-Phase Fluids", **Physics World**, **2**, 39–42 (1989).

[whit-90] Whittle, M.; "Computer Simulation of an Electrorheological Fluid", **Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics** **37**, 233–263 (1990).

[whit-93] White, L.R.; site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[whit-94] Whittle, M., Firoozian, R., Peel, D.J. and Bullough, W.A.; "Decomposition of the Pressure Response in an ER Valve Control System", **Advances in Intelligent Material Systems and Structures**, vol.2, Technomic Publishing, 119–125 (1994).

[whit-95] Whittle, M., Firoozian, R., Peel, D.J. and Bullough, W.A.; "Electrorheological Relaxation Times Derived From Pressure Response Experiments in the Flow Mode", **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, **57**, 1–25 (1995).

[whit-95] Whittle, M., Atkin, R.J. and Bullough, W.A.; "Fluid Dynamic Limitations on the Performance of an Electrorheological Clutch", **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, **57**, 61–81 (1995).

[wils-93] Wilson, J.R.; "ER Fluid Devices and Energy Savings", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[wins-49] Winslow, W.M.; "Induced Fibrillation of Suspensions", **J. Applied Physics**, **20**, 1137–1140 (1949).

[wiss-93] Wissbrun, K.; "Potential Application of Liquid Crystals as ER Fluids", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[wissb-93] Wissbrun, K.; "Long Term Stability of ER Fluid Devices", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[woes-93] Woestman, J.T.; "Stick-slip Response in Electrorheological Fluids", **Physical Review E**, **47** (4), 2942–2945 (1993).

[wong-89] Wong, W. and Shaw, M.T.; "The Role of Water in Electrorheological Fluids" in **Proc. Second International Symposium on Electrorheological Fluids**, Carlson, J.D., Sprecher, A. F. and Conrad, H. eds., NCSU Engr. Publ. Raleigh, NC, 191–198 (1989).

[wong-93] Wong, J.Y., Wu, X.M., Sturk, M. and Bortolotto, C.; "On the Applications of Electro-rheological Fluids to the Development of Semi-active Suspension Systems For Ground Vehicles", **Transactions of the ASME.**, 17 (4B), 789–800 (1993).

[xerox-93] Xerox Research Laboratory - site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[xie-95] Xie, H.-Q., Guan, J.-G. and Guo, J.-S.; "Direct Synthesis of Electrorheological Suspension Containing Salt of Poly(methacrylic acid) and its Electrorheological Effect", **Journal of Applied Polymer Science**, 58, 951–956 (1995).

[xu-91] Xu, Y. and Liang, R.; "Electrorheological Properties of Semiconducting Polymer-Based Suspensions", **Journal of Rheology**, 35, 1355–1373 (1991).

[xu-93] Xu, Y.; "The Peoples Republic of China - ER Research Progress in China", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[yang-92] Yang, I. and Shine, A.D.; "Electrorheology of an Nematic Poly(n-hexyl isocyanate) Solution", **Journal of Rheology**, 36, 1079–1104 (1992).

[yats-95] Yatsuzuka, K., Miura, K., Kuramoto, N. and Asano, K.; "Observation of the Electrorheological Effect of Silicone Oil/Polymer Particles Suspension", **IEEE Transactions on Industry Applications.**, 31(3), 457–463 (1995).

[yeag-93] Yeager, E.B.; site visit report published in **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

[yen-91] Yen, W.S. and Achorn, P.J.; "A Study of the Dynamic Behavior of an Electrorheological Fluid", **Journal of Rheology**, 35, 1375–1384 (1991).

[zuko-93] Zukoski, C.F.; "Mechanics of ER Effects", **Electrorheological (ER) Fluids – A Research Needs Assessment – Final Report**", prepared for U.S. Dep. Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis, Washington, D.C., May (1993).

## APÊNDICE A

### A.1 Conceito de Viscoelasticidade

A palavra “viscoelástico” significa a existência simultânea de propriedades elásticas e viscosas em um material. É razoável assumir que todos os materiais reais sejam viscoelásticos, ou seja, que em todos os materiais ambas as propriedades (viscosas e elásticas) coexistam, sendo que a resposta particular de uma amostra em um dado experimento dependa da escala de tempo do experimento em relação ao tempo de relaxação do material. Assim, se o experimento for relativamente lento, uma amostra poderá parecer mais viscosa que elástica, enquanto que se ele for relativamente rápido, ela parecerá mais elástica do que viscosa.

A teoria do desenvolvimento matemático da viscoelasticidade linear está baseada no princípio da superposição de fenômenos elásticos e viscosos. Nela as equações são lineares e os coeficientes das diferenciais em relação ao tempo são constantes (parâmetros do material), não podendo variar com  $\gamma$  ou  $\dot{\gamma}$ . Abaixo tem-se a forma geral da equação diferencial para a viscoelasticidade linear:

$$\left(1 + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial t} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \alpha_n \frac{\partial^n}{\partial t^n}\right) \tau = \left(\beta_0 + \beta_1 \frac{\partial}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + \beta_m \frac{\partial^m}{\partial t^m}\right) \gamma \quad (\text{A.1})$$

onde  $n = m$  ou  $n = (m-1)$ .

A seguir são considerados alguns casos especiais da Eq.(A.1) e os modelos mecânicos análogos a eles estão representados na Fig.A.1.



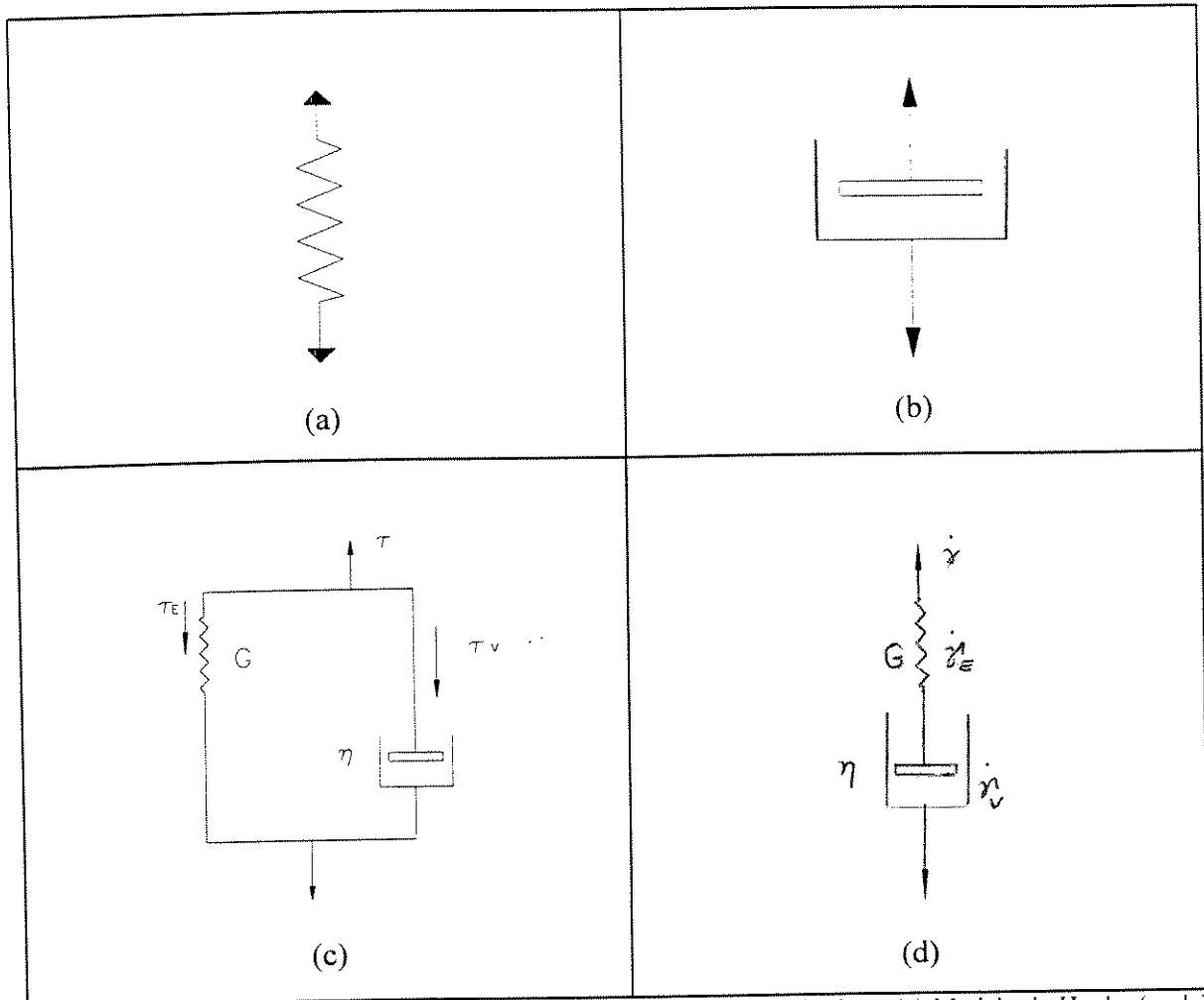


Fig.A.1 - Representações diagramáticas do comportamento ideal reológico: (a) Modelo de Hooke (mola); (b) Modelo de Newton (amortecedor); e modelos mais simples de viscoelasticidade linear; (c) Modelo de Kelvin/Voigt; (d) Modelo de Maxwell.

### A.1.1 Comportamento Puramente Elástico (Modelo de Hooke)

Assumindo-se que  $\beta_0$  seja o único parâmetro diferente de zero na Eq.(A.1), tem-se que:

$$\tau = \beta_0 \dot{\gamma} = G \dot{\gamma} \quad (A.2)$$

que é a equação da elasticidade linear hookeana (ou seja, comportamento sólido linear) com  $\beta_0$  como o módulo de rigidez elástica de cisalhamento ( $G$ ). Neste tipo de modelo, o material tem um comportamento elástico ideal, onde:

- a força requerida para deformar o sistema depende da deformação,  $\gamma$ .
- toda a energia empregada é armazenada, podendo ser recuperada:

Um material puramente elástico comporta-se como uma mola (representada nas figuras A.1-a e A.2) que volta à posição original após cessada a força causadora da deformação.

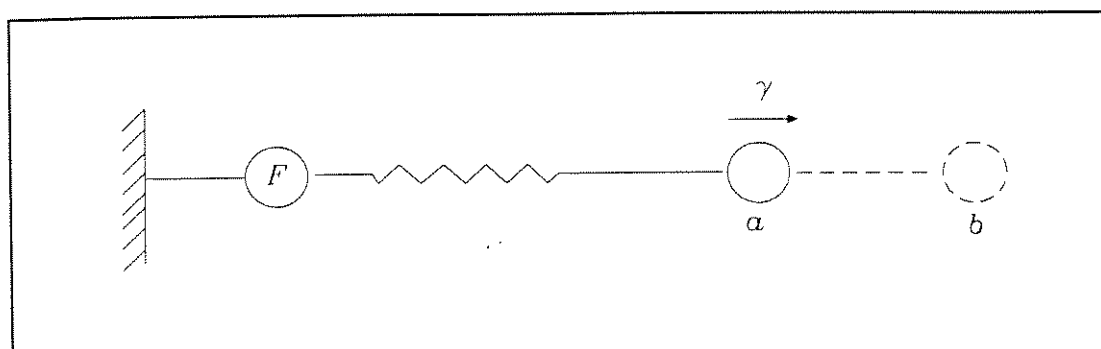


Fig.A.2 - Modelo de Hooke (elástico ideal).

### A.1.2 Comportamento Puramente Viscoso (Modelo de Newton)

Se, ao invés de  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  for o único parâmetro não-nulo na Eq.(A.1), tem-se que:

$$\tau = \beta_1 \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \beta_1 \dot{\gamma} \quad (\text{A.3})$$

A Eq.(A.3) representa o escoamento viscoso newtoniano, sendo que  $\beta_1$  é o coeficiente de viscosidade. Neste tipo de fluido observa-se que:

- a força para deformar o sistema depende da velocidade de deformação, mas é independente do grau de deformação.
- a energia aplicada ao sistema é totalmente perdida na forma de calor;

Este tipo de fluido é representado nas figuras A.1-b e A.3 onde, havendo uma deformação do sistema do ponto  $a$  até o ponto  $b$ , ele não volta à posição original  $a$  depois de cessada a deformação, já que toda a energia é perdida sob a forma de calor. Em outras

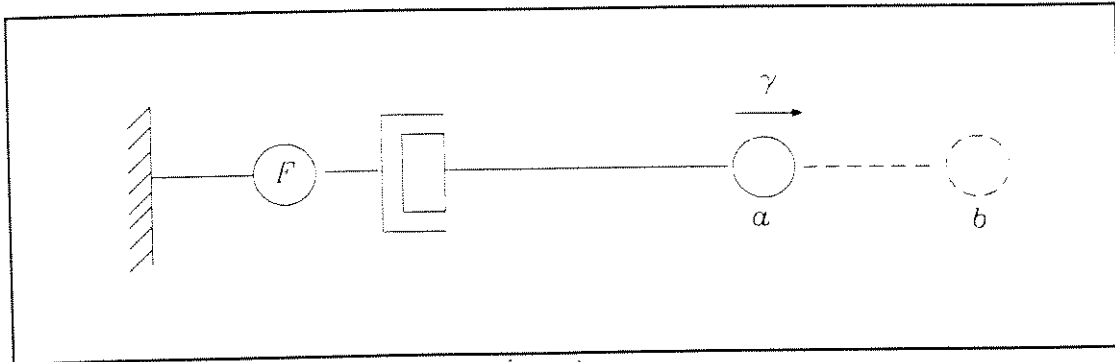


Fig.A.3 - Modelo de Newton (puramente viscoso).

palavras, ocorre um processo irreversível.

### A.1.3 Comportamento Viscoelástico (Modelos de Kelvin/Voigt e de Maxwell)

Para se caracterizar o comportamento viscoelástico de uma substância, os dois modelos anteriores podem ser associados das mais diversas formas. As configurações mais conhecidas são as de Kelvin/Voigt e de Maxwell.

- **Modelo de Kelvin/Voigt:** Se  $\beta_0 (= G)$  e  $\beta_1 (= \eta)$  forem ambos não-nulos e os demais parâmetros da Eq.(A.1) forem iguais a zero, tem-se:

$$\tau = G \gamma + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{A.4})$$

que é um dos modelos mais simples da viscoelasticidade. Este modelo nada mais é do que o resultado da associação em paralelo dos modelos de Hooke e Newton (Fig.A.1-c). Neste caso, a deformação da mola e do amortecedor são iguais em todo o tempo.

- **Modelo de Maxwell:** Um outro modelo pode ser obtido através da Eq.(A.1) fazendo-se  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  serem os únicos parâmetros não-nulos. Assim,

$$\tau + t_M \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{A.5})$$

onde  $\alpha_1 = t_M = \eta/G$  ( $t_M$  é o tempo característico do material) e  $\beta_1 = \eta$ . Este modelo difere do modelo de Kelvin pela associação em série da mola e do amortecedor (Fig.A.1-d). Aqui, as deformações (ou as taxas de deformação) se somam.

## A.2 Princípios de Medidas de Viscoelasticidade

Tracionar o sistema mola/amortecedor (modelo de Maxwell, Fig.A.1-d) a uma distância infinita é um método impossível para se medir a viscoelasticidade. Uma solução melhor é manter o sistema sob a ação de uma deformação oscilatória. Na Fig.A.4, ao se girar o disco, uma deformação oscilante é gerada na extremidade do modelo mola/amortecedor. Através de um sensor pode-se medir a tensão de cisalhamento no sistema:  $\tau = F/A$ . Como já foi visto anteriormente, os sistemas elástico ideal e puramente viscoso reagem de forma diferente: a força requerida para deformar um material elástico ideal depende da deformação, enquanto que para uma substância puramente viscosa ela é função da velocidade de deformação.

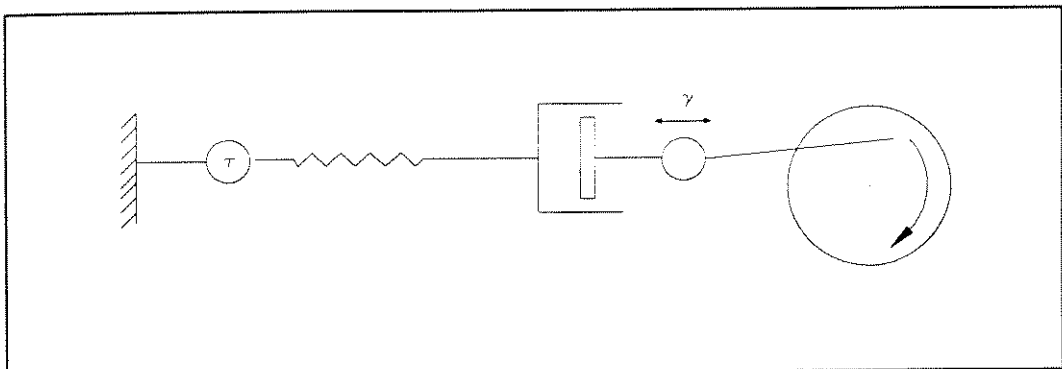


Fig.A.4 - Modelo de Maxwell sob condições dinâmicas.

Na Fig.A.5 estão representados os modelos de Hooke (elástico ideal) e de Newton (puramente viscoso) sob condições dinâmicas. Nela estão representadas a deformação e a

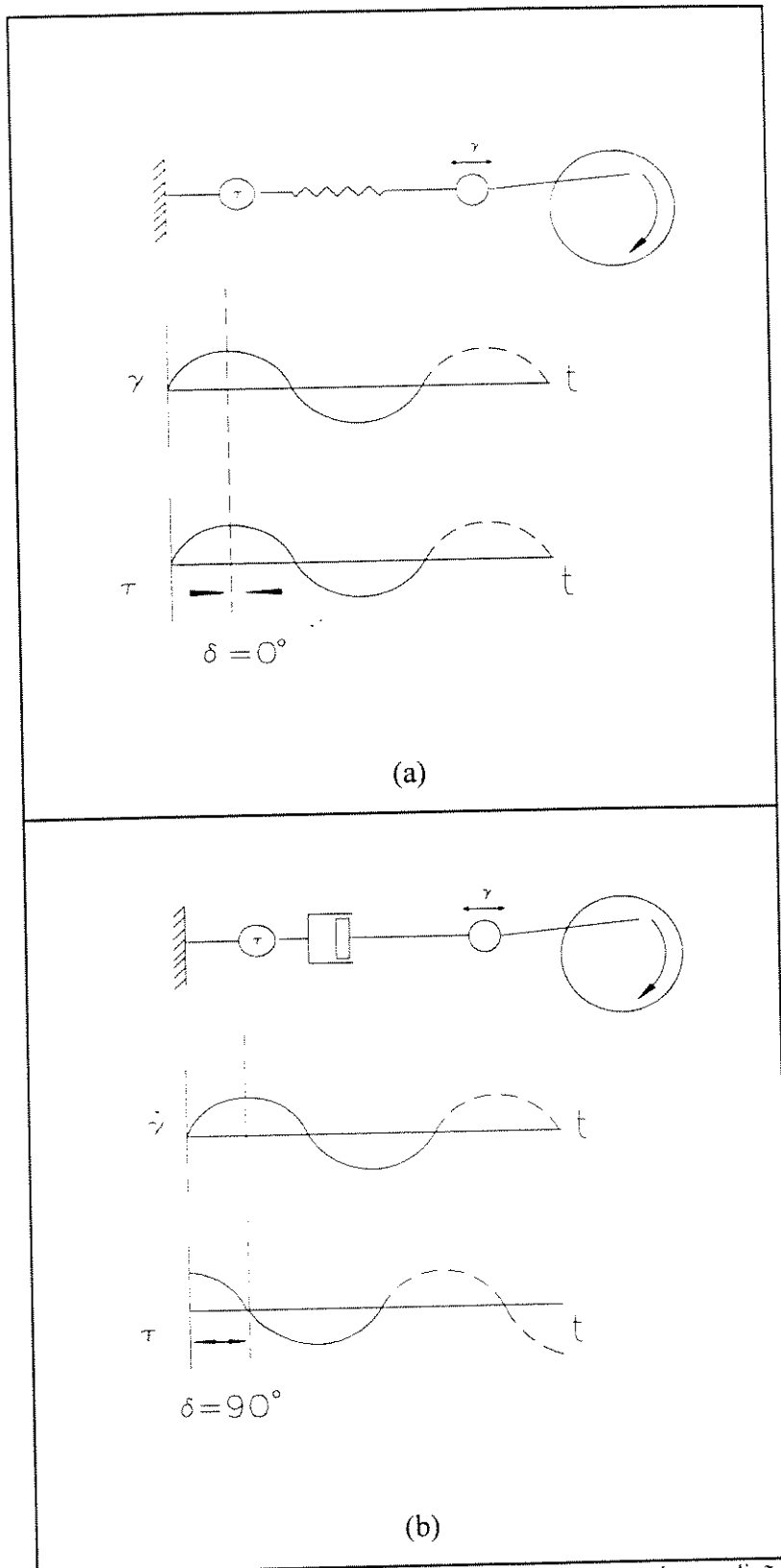


Fig.A.5 - Modelos de (a) Hooke e (b) Newton sob condições dinâmicas.

tensão de cisalhamento em função do tempo. Como foi dito anteriormente, para o modelo de Hooke  $\tau = \tau(\gamma)$ ; neste caso, a tensão e a deformação estão em fase, ou seja,  $\delta = 0^\circ$  (Fig.A.5-a). A Fig.A.5-b mostra o modelo de Newton sob condições dinâmicas. Neste modelo, a tensão e a taxa de deformação estão fora de fase ( $\delta = 90^\circ$ ), como se verá mais a seguir através das equações A.6 e A.7.

As substâncias reais têm um comportamento intermediário entre esses dois extremos e são denominadas substâncias viscoelásticas. Toda substância viscoelástica apresenta  $0^\circ < \delta < 90^\circ$ , logo,  $\delta$  é uma medida da viscoelasticidade da mesma. Quanto mais próximo de  $0^\circ$  for  $\delta$ , mais elástico é o material. De igual maneira, quando  $\delta \rightarrow 90^\circ$ , mais viscoso é o mesmo.

### **A.3 Modelos de Instrumentos para Medida de Viscoelasticidade**

Na Fig.A.6-a tem-se um modelo de pratos paralelos modificado para um modelo dinâmico. A deformação  $\gamma$ , assim como a tensão de cisalhamento  $\tau$  são registradas e a diferença de fases pode ser determinada através das curvas. Se os pratos paralelos forem dobrados até formarem um sistema de cilindros coaxiais, tem-se um novo tipo de medidor (Fig.A.6-b). Com esse sistema gera-se uma deformação oscilatória com o cilindro externo e medem-se as respostas de torque com o cilindro interno. Neste caso, a deformação é função da amplitude de deformação e do espaço entre os cilindros, enquanto que a tensão depende da medida de torque e da área superficial do cilindro interno. Tanto  $\gamma$  quanto  $\tau$  podem ser calculados a partir desses parâmetros.

### **A.4 Formulação para Fluidos Viscoelásticos**

Em ensaios dinâmicos, a deformação oscilatória  $\gamma(t)$ , à qual o material é submetido, deve ser de pequena amplitude ( $\gamma_0$ ) a fim de se permanecer no intervalo em que ela é linear

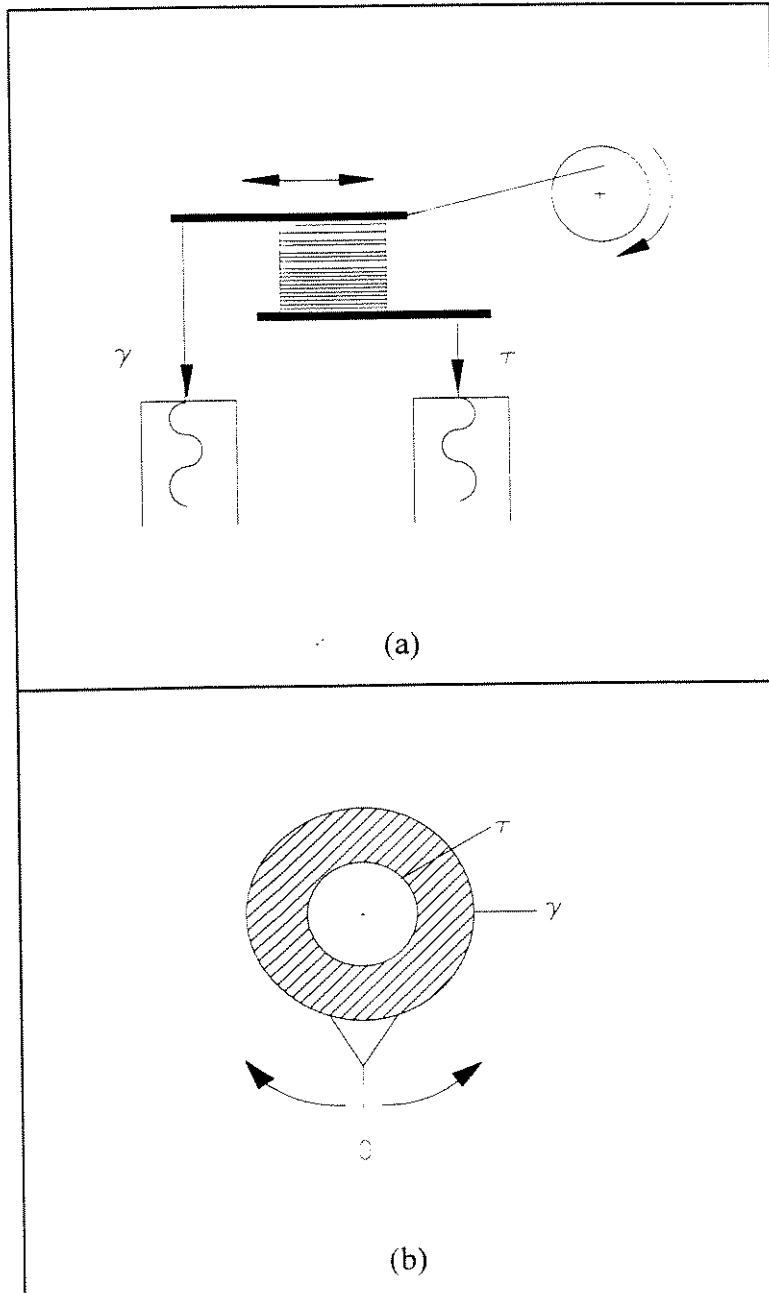


Fig.A.6 - Modelos de instrumentos para medida de viscoelasticidade.

com a tensão de cisalhamento. Sabe-se que estes dois sinais podem estar em fase ou fora de fase dependendo do comportamento viscoelástico do material medido. Quando o material é submetido a uma deformação oscilatória, é válida a equação:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) = \gamma_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{A.6})$$

A taxa de deformação correspondente é obtida diferenciando-se a Eq.(A.6) com respeito ao tempo e é dada por: .

$$\dot{\gamma}(t) = \omega \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{\gamma}(t) = \omega \gamma_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{A.8})$$

Comparando-se a Eq.(A.8) com a Eq.(A.6), observa-se que, a menos de uma diferença de fase de  $\pi/2$ ,  $\dot{\gamma} = \omega \gamma$ , o que resulta na Eq.(A.9):

$$\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A.9})$$

Por sua vez o material, no regime permanente, responde com uma tensão de cisalhamento  $\tau^*(t)$  também oscilante, de mesma frequência  $\omega$ , porém com atraso de fase em relação a  $\dot{\gamma}(t)$  da seguinte forma:

$$\tau^*(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{A.10})$$

onde  $\delta$  é o ângulo de fase e  $\tau_0$  é a amplitude de tensão.

Existem duas maneiras de se analisar os materiais viscoelásticos:

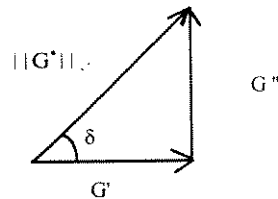
- a) A primeira considera que o material é um sólido viscoelástico que também apresenta um comportamento viscoso. Deste modo, a equação para o sólido de Hooke pode ser generalizada (Eq.A.11) substituindo-se o módulo de rigidez pelo módulo complexo  $G^*$ , o qual encerra em si todas as informações sobre as propriedades viscoelásticas do material: as componentes elásticas, viscosas, bem como a diferença de fase entre a tensão e a deformação (Eq.A.12).



$$\tau^*(t) = G^* \dot{\gamma}(t) \quad (\text{A.11})$$

$$G^* = G' + i G'' \quad (\text{A.12})$$

$G'$  (módulo de elasticidade ou de armazenamento) é uma medida da rigidez do material e está relacionada com a energia armazenada e recuperada pelo material em cada ciclo: enquanto que  $G''$  (módulo de perda) está relacionado com a energia perdida como calor no material em cada ciclo. Esta relação pode ser visualizada abaixo:



A magnitude de  $G^*$  e os módulos de elasticidade e de perda podem ser calculados por:

$$|G^*| = \tau_0 / \gamma_0 \quad (\text{A.13})$$

$$G' = |G^*| \cos(\delta) \quad (\text{A.14})$$

$$G'' = |G^*| \sin(\delta) \quad (\text{A.15})$$

Assim, a tangente do ângulo de fase pode ser calculada por:  $\text{tg } \delta = G'' / G'$

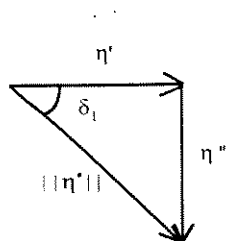
b) Outra maneira de se tratar um material viscoelástico é considerá-lo como um fluido newtoniano com características elásticas (fluido viscoelástico). Assim, a equação de Newton pode, também, ser generalizada:

$$\tau^*(t) = \eta^* \dot{\gamma}(t) \quad (\text{A.16})$$

onde  $\eta^*$  é o coeficiente de viscosidade complexa que pode ser desmembrado em duas partes: uma real representada pela viscosidade dinâmica,  $\eta'$ , que está relacionada com a dissipação de energia no ciclo (contribuição viscosa), e outra parte imaginária, representada pela elasticidade,  $\eta''$ , a qual está relacionada com a contribuição elástica (armazenamento de energia). Assim,  $\eta^*$  pode ser escrita como:

$$\eta^* = \eta' - i\eta'' \quad (\text{A.17})$$

O diagrama abaixo ilustra a Eq.(2.19). Note que  $\delta \neq \delta_1$ .



A magnitude de  $\eta^*$ ,  $\eta'$  e  $\eta''$  podem ser calculados por:

$$|\eta^*| = \tau_0 / \dot{\gamma}_0 \quad (\text{A.18})$$

$$\eta' = |\eta^*| \cos(\delta_1) \quad (\text{A.19})$$

$$\eta'' = |\eta^*| \sin(\delta_1) \quad (\text{A.20})$$

Na realidade, estes dois enfoques para um material viscoelástico (sólido com características viscosas e líquido com comportamento elástico) são modos diferentes de se analisar o mesmo fenômeno. Logo, as Eqs.(A.11) e (A.16) podem ser igualadas:

$$\tau^*(t) = G^* \gamma(t) = \eta^* \dot{\gamma}(t) \quad (\text{A.21})$$

<sup>1</sup> O sinal negativo da Eq.(A.17) foi colocado a fim de que as equações (A.24) e (A.25) tenham sentido físico

$$(G' + iG'')\gamma(t) = (\eta' - i\eta'')i\omega\gamma(t) \quad (\text{A.22})$$

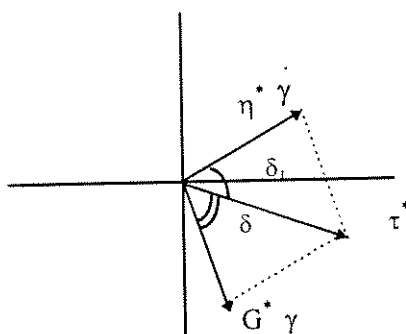
$$G' + iG'' = i\omega\eta' + \omega\eta'' \quad (\text{A.23})$$

Logo,

$$G' = \omega\eta'' \quad (\text{A.24})$$

$$G'' = \omega\eta' \quad (\text{A.25})$$

O diagrama a seguir ilustra a igualdade da Eq.(A.21). Através dele pode-se observar que existem dois domínios nos quais pode-se trabalhar: o domínio da deformação e o domínio da taxa de deformação. Os ângulos de fase obtidos em cada um destes domínios são diferentes. Caso os testes realizados com o material viscoelástico estiverem sendo feitos no domínio da deformação, os valores obtidos são  $\tau^*$ ,  $\dot{\gamma}$  e  $\delta$ . A partir destes valores podem-se calcular  $G^* (= \tau^*/\dot{\gamma})$ ,  $G' (= G^* \cos(\delta))$ ,  $G'' (= G^* \sin(\delta))$ ,  $\eta' (= G''/\omega)$ ,  $\eta'' (= G'/\omega)$ ,  $\eta^* (= \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2})$  e  $\delta_1 (= \arctg\left(\frac{\eta''}{\eta'}\right) = \frac{\pi}{2} - \delta)$ . Neste caso, se  $\delta \rightarrow 0$ , o material é mais elástico do que viscoso; e se  $\delta \rightarrow 90^\circ$ , ele é mais viscoso que elástico.



Entretanto, caso o material seja testado no domínio da taxa de deformação, os valores que se obtêm são  $\tau^*$ ,  $\dot{\gamma}$  e  $\delta_1$ . As demais variáveis podem ser calculadas. Aqui, se o ângulo de fase  $\delta_1 \rightarrow 0$ , o material é mais viscoso do que elástico; e se  $\delta_1 \rightarrow 90^\circ$ , ele apresenta

comportamento mais elástico que viscoso.

No caso do Reômetro RV-20 da Haake, os resultados são obtidos no domínio da deformação. Logo, o ângulo de fase é  $\delta$ .

Além da teoria acima descrita, é bom ter-se em mente algumas outras coisas. Quando a amplitude de deformação ( $\gamma_0$ ) e a frequência se tornam muito pequenas, um fluido viscoelástico começa a se comportar como um fluido newtoniano. Neste caso, a viscosidade dinâmica se aproxima da viscosidade obtida através de um cisalhamento não-oscilatório

quando  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , ou seja,  $\lim_{\omega \rightarrow 0} \eta' = \eta^0$ ,  $\lim_{\omega \rightarrow 0} \delta = 90^\circ$ ,  $\lim_{\omega \rightarrow 0} G' = 0$ .

## APÊNDICE B

### B.1 Analogia de Fluidos ER com Células Elétricas

Fluidos ER colocados entre dois eletrodos e submetidos a uma tensão de cisalhamento podem ser comparados com uma célula elétrica (Fig.B.1). Sob a ação de um campo elétrico, o fluido ER oferece uma certa resistência à passagem de corrente elétrica que, por sua vez, é função da taxa de cisalhamento. Do mesmo modo que para a célula elétrica, existe um determinado ponto de operação em que a impedância do fluido ER se iguala à resistência interna do gerador, fazendo com que a potência lançada pelo mesmo seja máxima. Ou seja, existe uma determinada taxa de cisalhamento que permite uma máxima transferência de potência (MTP).

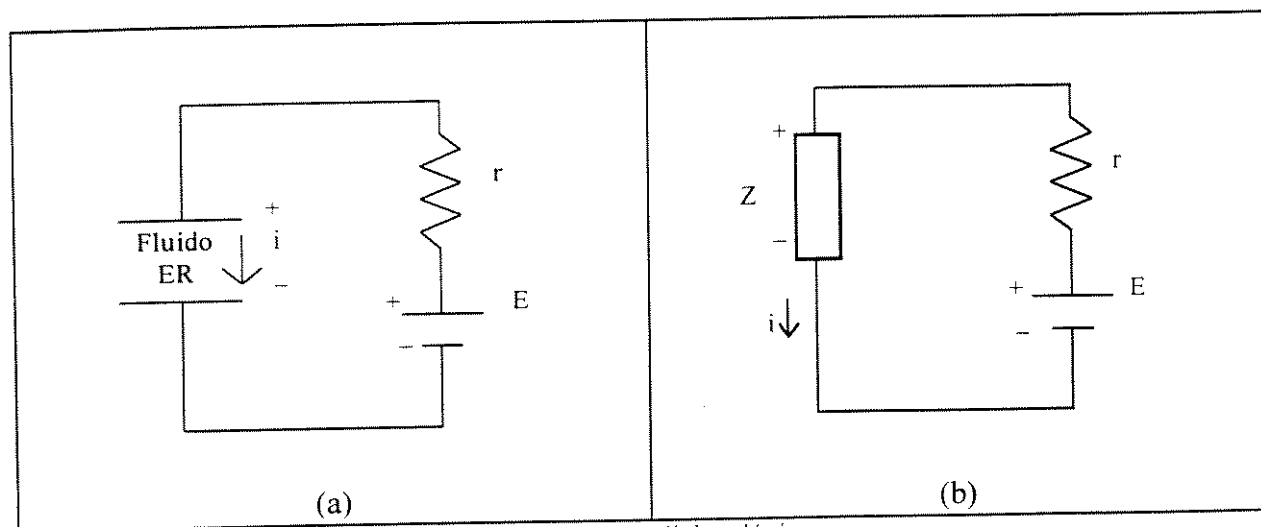


Fig. B.1 - Comparação entre sistemas com fluidos ER e células elétricas.

## APÊNDICE C

### C.1 Dielétricos

Na literatura, existem pesquisadores que afirmam que os Fluidos ER, quando submetidos a um campo elétrico, apresentam características de uma pequena célula elétrica (Fig.B.1). Pode-se ver que a impedância do sistema, assim como a corrente elétrica, são função da frequência do campo elétrico ( $f$ ). Quando  $f \rightarrow 0$  (campo contínuo), a corrente elétrica que passa pelo capacitor é mínima; enquanto que à medida que a frequência aumenta, a corrente cresce (Fig.C.1). Para o caso de campo cc, pode-se calcular a constante dielétrica do capacitor, que é dada por:

$$k_0 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (\text{C.1})$$

onde  $\varepsilon$  e  $\varepsilon_0$  são as permissividades do dielétrico e do vácuo, respectivamente. Porém, para campo alternado, a constante dielétrica é função da frequência, podendo ser separada em uma parte real e outra imaginária:

$$k = k' + i k'' \quad (\text{C.2})$$

onde:

$$k' = \frac{k_0 - 1}{1 + (2\pi f t_R)^2} \quad (\text{C.3})$$

$$k'' = \frac{(k_0 - 1) 2\pi f t_R}{1 + (2\pi f t_R)^2} \quad (\text{C.4})$$

sendo  $t_R$ , o tempo de relaxação. O gráfico de  $(k' - 1)$  e  $k''$  em função da frequência estão representados na Fig.C.2. Através dela, pode-se observar que acima de  $1/t_R$  a relaxação não pode acompanhar o campo elétrico aplicado. Qualquer informação adicional pode ser obtida na referência [reit-82].

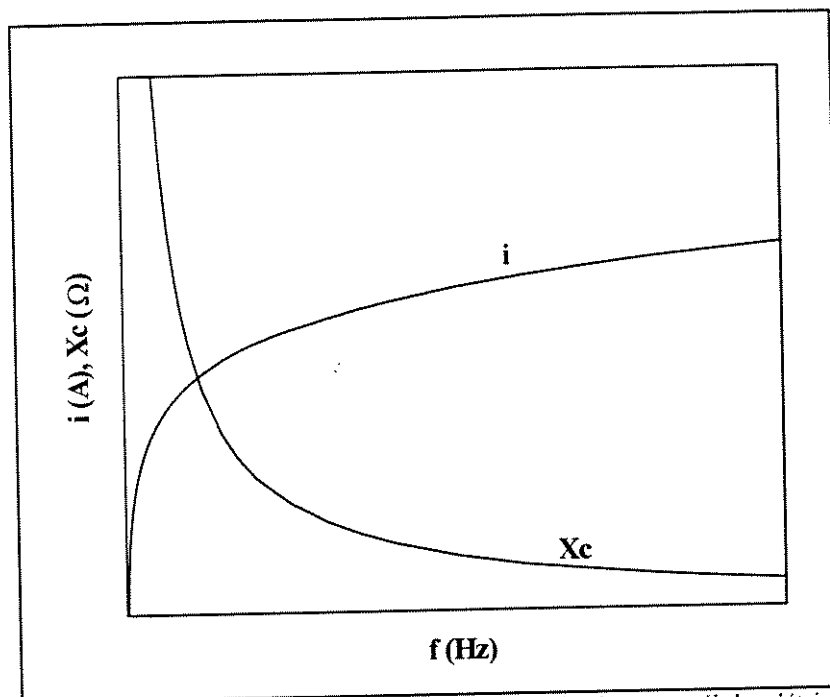


Fig.C.1 - Variação da corrente e da impedância de uma célula elétrica com a frequência.

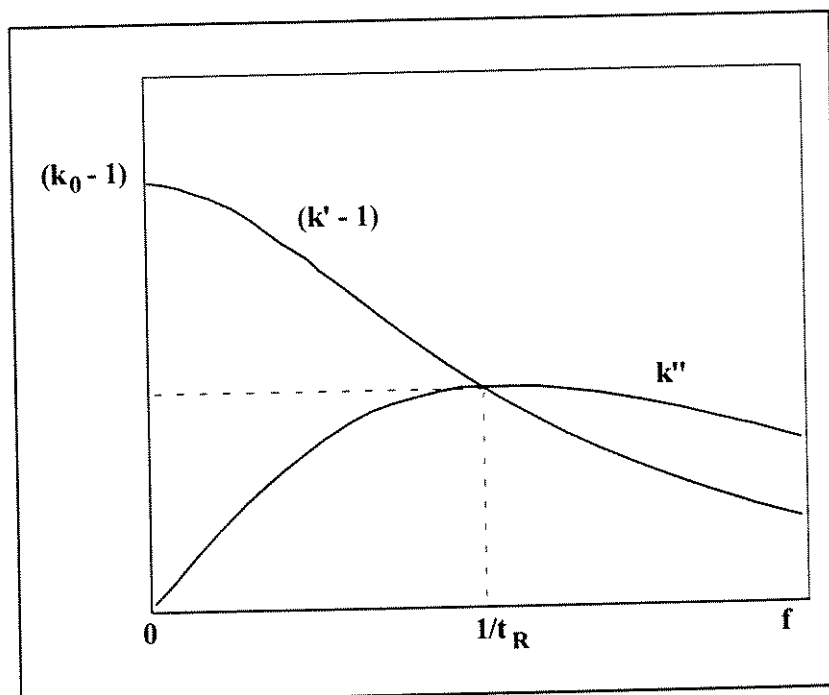


Fig.C.2 - Constantes dielétricas como funções da frequência - [reit-82].