



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – ENGENHARIA DE PROCESSOS

**PROPRIEDADES ELETROREOLÓGICAS DE SUSPENSÕES DE
SULFATO DE HIDRAZINA-LÍTIO
EM ÓLEO DE SILICONE**

AUTORA: ELISABETE SCOLIN MENDES

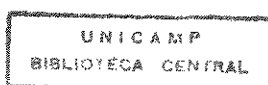
ORIENTADOR: Prof. Dr. CESAR COSTAPINTO SANTANA

Tese de Doutorado submetida à Comissão de Pós-
Graduação da Faculdade de Engenharia Química como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título
de DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA

Fevereiro/1996

Campinas - São Paulo

Brasil



DE	BC
AMADA:	Amo
Ex.	
BC/37582	
229199	
☐ 0 ☒	
RB 11,00	
01105199	
0	

1-00122865-8

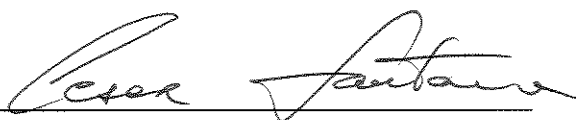
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M522p Mendes, Elisabete Scolin
 Propriedades eletroreológicas de suspensões de sulfato
 de hidrazina-lítio em óleos de silicone / Elisabete Scolin
 Mendes.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

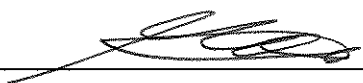
 Orientador: Cesar Costapinto Santana.
 Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
 Faculdade de Engenharia Química.

 1. Reologia. 2. Campos elétricos. 3. Suspensão
 (Química). I. Santana, Cesar Costapinto. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.
 III. Título.

Tese defendida e aprovada, em 28 de fevereiro de 1996, pela banca constituída pelos professores.



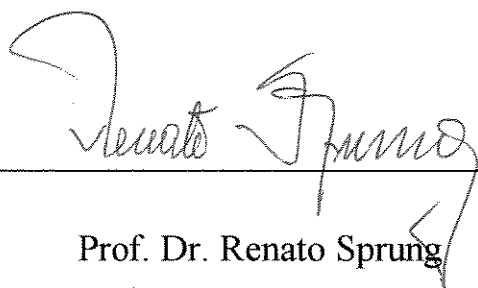
Prof. Dr. César Costapinto Santana



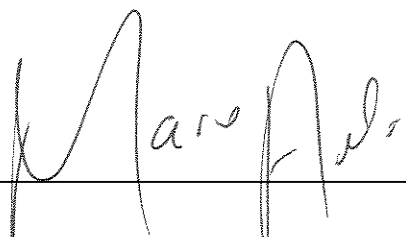
Prof. Dr. Oswaldo Baptista Duarte Filho



Prof. Dr. Antônio Celso Fonseca Arruda



Prof. Dr. Renato Sprung



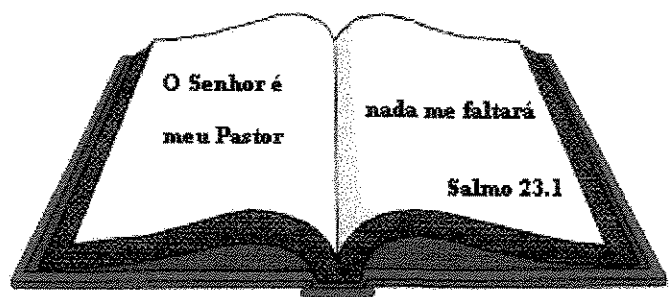
Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

Esta versão corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química, defendida por Elisabete Scolin Mendes, e aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de fevereiro de 1996.

A handwritten signature in black ink, reading "Cesar Costapinto Santana". The signature is fluid and cursive, with the first name "Cesar" being more prominent and the last name "Santana" written in a more compact, stylized manner.

Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana

Orientador



À meus pais

OLVER e MARIA

À meu esposo

CARLOS ROBERTO

À meus filhos

CARLA MARIA e

OLVER MANOEL

AGRADECIMENTOS

À DEUS acima de tudo e por tudo.

Ao Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana por todos estes anos (graduação, mestrado, doutorado) de acompanhamento com paciência, atenção e solicitude.

Ao Sr. Luiz Benedicto Pompeo Neto pelas discussões técnicas, críticas e sugestões que contribuíram em muito na execução deste trabalho'

Ao Departamento de Engenharia Química de Maringá por minha liberação.

Ao Departamento de Engenharia Química de S. Carlos pelas análises granulométricas realizadas

À todos os amigos que contribuíram na realização deste trabalho.

À CAPES e FINEP pelo auxílio financeiro.

ÍNDICE GERAL

	PÁG.
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABELAS.....	xxvii
NOMENCLATURA.....	xxviii
RESUMO.....	xxxi
ABSTRACT.....	xxxii
1.- INTRODUÇÃO.....	1
1.1- Motivação à pesquisa.....	1
1.2- Objetivo deste trabalho.....	4
2.- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1- Características reológicas.....	5
2.1.1- Equipamentos experimentais.....	5
2.1.2- Modos de operação.....	5
2.1.3- Efeito do campo elétrico na tensão limite de escoamento de Bingham.....	8
2.1.4- Efeito da temperatura na tensão. limite de escoamento de Bingham.....	8
2.1.5- Efeito da composição na tensão limite de escoamento de Bingham.....	9
2.1.6- Propriedades viscoelásticas.....	10
2.2- Características elétricas.....	10
2.2.1- Densidade de corrente.....	11
2.2.2- Constantes dielétricas.....	11
2.3- Estrutura do fluido eletroreológico.....	12
2.3.1- Estrutura estática.....	13
2.3.2- Estrutura dinâmica.....	17
2.4- Mecanismos.....	17

2.4.1- Teoria.....	17
2.4.2- Aplicação para comportamento reológico.....	22
3.- MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1- Síntese do sólido.....	25
3.2- Caracterização das partículas sólidas.....	25
3.3- Preparo das amostras.....	30
3.4- Aparelhagem utilizada.....	31
3.5- Procedimento experimental.....	33
4.- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
4.1- Comportamento reológico das suspensões.....	38
4.2- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação na intensidade de campo elétrico.....	40
4.3- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação na temperatura.....	42
4.4- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação na fração em peso de sólidos.....	43
4.5- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação no tamanho das partículas.....	43
4.6- Comportamento dos dados obtidos para a viscosidade aparente de Bingham das suspensões em função do parâmetro adimensional número de Mason.....	44
5.- CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	50
5.1- Conclusões.....	50
5.2- Sugestões.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

APÊNDICE A56

APÊNDICE B110

APÊNDICE C128

APÊNDICE D146

APÊNDICE E164

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁG
1.1- Comportamento de um fluido ER: a- sem aplicação do campo elétrico; b- com aplicação do campo elétrico; c- com aplicação do campo elétrico e força cisalhante (F).....	2
2.1- Comportamento esquemático da tensão de cisalhamento versus taxa de deformação observado em uma célula de Couette para fluidos ER. São apresentados os vários termos usados para descrever o comportamento reológico dos fluidos eletroreológicos.....	7
2.2- Efeito da temperatura na tensão limite de escoamento como uma função do campo elétrico para um fluido eletroreológico consistindo de 34% em peso de partículas de zeólita em; óleo de silicone.....	9
2.3- Desenvolvimento da estrutura em correntes ou fibras, no modelo de fluido eletroreológico formado por contas de vidro de diâmetro $27\mu\text{m}$ e 0,2 fração em volume em óleo de silicone de viscosidade cinemática 50 cSt e densidade relativa 0,96 com o aumento no campo elétrico. Eletrodos estão no topo e base de cada fotografia.....	15
2.4- Parâmetros estereológicos usados para caracterizar a estrutura do modelo de fluido eletroreológico e os efeitos do campo elétrico e fração de área das contas de vidro em alguns destes parâmetros.....	16
2.5- a- Esquema de uma célula de cisalhamento empregada para observar a estrutura do modelo do fluido eletroreológico constituído por contas de vidro de $27\mu\text{m}$ em óleo de silicone sob cisalhamento dinâmico, b- perfil de velocidades observado com campo, c- estrutura observada com campo.....	19
2.6- Dois fenômenos que aumentam a tensão limite de escoamento (τ_0): 1- Pontes de água; 2- Polarização de partículas. Ilustração do segundo mecanismo em uma partícula de sílica resultante da presença de filme de água adsorvido.....	20

2.7- Três meios pelos quais as partículas podem polarizar-se: 1- condutividade global, 2- Condutância nasuperfície e 3- Distorção da camada dupla.....	21
3.1- Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra n°1.....	27
3.2- Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra n°2.....	28
3.3- Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra n°3.....	29
3.4- Sistema básico de medida - Reômetro rotatório do tipo Couette, com sistema sensor de cilindros e com controle da intensidade de campo elétrico.....	32
3.5- Gráficos e ajuste dos dados apresentados pelo equipamento Haake.....	37
4.1- Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone a temperatura de 20°C. Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais a equação teórica eo desvio médio relativo (DMR).....	45
4.2- Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone a temperatura de 40°C. Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais a equação teórica eo desvio médio relativo (DMR).....	46
4.3- Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone a temperatura de 60°C. Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais a equação teórica eo desvio médio relativo (DMR).....	47
4.4- Valores de A em função do diâmetro das partículas.....	49

A.1- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	56
A.2- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	57
A.3- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	58
A.4- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	59
A.5- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	60
A.6- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	61

A.7- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	62
A.8- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	63
A.9- Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	64
A.10-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20° C.....	65
A.11-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40° C.....	66
A.12-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60° C.....	67

A.13-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20° C.....	68
A.14-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40° C.....	69
A.15-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60° C.....	70
A.16-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20° C.....	71
A.17-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40° C.....	72
A.18-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60° C.....	73

A.19-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20° C.....	74
A.20-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40° C.....	75
A.21-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60° C.....	76
A.22-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20° C.....	77
A.23-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40° C.....	78
A.24-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60° C.....	79

A.25-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20° C.....	80
A.26-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40° C.....	81
A.27-Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60° C.....	82
A.28- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	83
A.29- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	84
A.30- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	85

A.31- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	86
A.32- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	87
A.33- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	88
A.34- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20° C.....	89
A.35- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40° C.....	90
A.36- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60° C.....	91

A.37- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20° C.....	92
A.38- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40° C.....	93
A.39- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 200 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60° C.....	94
A.40- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20° C.....	95
A.41- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40° C.....	96
A.42- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60° C.....	97

A.49- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20° C.....	104
A.50- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40° C.....	105
A.51- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 350 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60° C.....	106
A.52- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20° C.....	107
A.53- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40° C.....	108
A.54- Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de 1000 cSt tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60° C.....	109

B.1- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....110

B.2- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....111

B.3- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....112

B.4- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....113

B.5- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....114

B.6- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....115

- B.7- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....116
- B.8- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....117
- B.9- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....118
- B.10- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....119
- B.11- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....120
- B.12- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....121

- B.13- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....122
- B.14- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....123
- B.15- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....124
- B.16- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....125
- B.17- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina – lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....126
- B.18- Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....127

C.1-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	128
C.2-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....	129
C.3-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	130
C.4-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	131
C.5-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....	132
C.6-	Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	133

- C.7- Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....134
- C.8- Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....135
- C.9- Tensão limite de escoamento Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....136
- C.10- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....137
- C.11- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....138
- C.12- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....139

- C.13- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....140
- C.14- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....141
- C.15- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....142
- C.16- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....143
- C.17- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partícula. Concentração em peso de sólidos de 30%.....144
- C.18- Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....145

D.1- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....146

D.2- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....147

D.3- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....148

D.4- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....149

D.5- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....150

D.6- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....151

- D.7- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....152
- D.8- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....153
- D.9- Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....154
- D.10-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....155
- D.11-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....156
- D.12-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas...157
- D.13-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a

intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas...	158
D.14-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....	159
D.15-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas....	160
D.16-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....	161
D.17-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....	162
D.18-Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.....	163
E.1- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	164
E.2- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em	

peso de sólidos de 30%.....	165
E.3- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	166
E.4- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	167
E.5- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....	168
E.6- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	169
E.7- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	170
E.8- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em	

peso de sólidos de 30%.....	171
E.9- Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	172
E.10-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	173
E.11-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....	174
E.12-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	175
E.13-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	176
E.14-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos	

de 30%.....	177
E.15-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	178
E.16-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.....	179
E.17-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.....	180
E.18-Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina- lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.....	181

ÍNDICE DE TABELAS

	PÁG.
1.1- Características gerais de um fluido eletroreológico.....	2
3.1- Peneiramentos realizados.....	26
3.2- Comparação entre os diâmetros das partículas obtidos pelo peneiramento e pelo equipamento GALAI.....	26
3.3- Dados da distribuição em volume (faixas) obtidos pelo equipamento GALAI para a amostra n°1.....	27
3.4- Dados da distribuição em volume (faixas) obtidos pelo equipamento GALAI para a amostra n°2.....	28
3.5- Dados da distribuição em volume (faixas) obtidos pelo equipamento GALAI para a amostra n°3.....	29
3.6- Especificação das amostras utilizadas.....	30
3.7- Viscosidade dinâmicas dos óleos de silicone.....	31
3.8- Dados de saída apresentados pelo equipamento Haake ($\dot{\gamma}$ crescente).....	35
3.9- Dados de saída apresentados pelo equipamento Haake ($\dot{\gamma}$ decrescente).....	36
4.1- Suspensões apresentadas na literatura (20) e uma suspensão deste trabalho.....	41
4.2- Comparação entre os dados das suspensões da tabela 1.1.....	42
4.3- Valores dos desvios médios relativos de $(\eta_a)_B / \eta_f$ entre os dados obtidos experimentalmente e os obtidos pela equação de ajuste.....	49

NOMENCLATURA

A—.....	parâmetro eq. 4.4
A_A—.....	fração de área das partículas
A_E—.....	parâmetro da eq. 2.4
A_E^*—.....	parâmetro da eq. 2.5
a—.....	raio da partícula sólida.....(m)
a'—.....	parâmetro dos modelos reológicos
B—.....	parâmetro da eq. 2.2
b—.....	parâmetro da eq 2.3
b'—.....	parâmetro dos modelos reológicos
D—.....	parâmetro da eq 2.3
C—.....	parâmetro das eqs. 2.14 e 2.15
D—.....	parâmetro da eq 2.3
D_e—.....	diâmetro externo do cilindro.....(m)
D_i—.....	diâmetro interno do cilindro.....(m)
DP—.....	diâmetro externo das partículas.....(m)
E—.....	intensidade de campo elétrico.....(V/m)
F—.....	força entre dipolos.....(N)
f—.....	frequência.....(s ⁻¹)
f_m—.....	frequência de ressonância.....(s ⁻¹)
F_{max}—.....	força máxima entre dipolos.....(N)
F'—.....	parâmetro da eq. 2.4
G'—.....	módulo de elasticidade.....(N/m ²)
G''—.....	módulo de perda.....(N/m ²)
h—.....	altura do cilindro interno.....(m)

j—.....	densidade de corrente.....	(A/m ²)
K—.....	constante dielétrica do meio	
K'—.....	parte real da constante dielétrica	
K''—.....	parte imaginária da constante dielétrica	
K_f—.....	constante dielétrica do fluido base	
K_p—.....	constante dielétrica das partículas	
L—.....	espaçamento entre os eletrodos.....	(m)
M—.....	parâmetro da eq. 2.2	
m—.....	parâmetro da eq 2.2	
n—.....	índice de comportamento do fluido	
n'—.....	parâmetro da eq 2.1	
p—.....	momento de dipolo.....	(Cm)
q—.....	parâmetro da eq 2.5	
R—.....	distância que separa os dipolos.....	(m)
R'—.....	constante universal dos gases.....	J/(kg-K)
R_e—.....	raio do cilindro externo.....	(m)
R_i—.....	raio do cilindro interno.....	(m)
T—.....	temperatura.....	(K)
$x_c(\perp)$—.....	espessura de uma corrente.....	(m)

Letras Gregas

α—.....	parâmetro das eqs.2.14a e 2.15a	
β—.....	coeficiente de dipolo	
ϵ—.....	permissividade do meio.....	(C ² s ² /m ⁻³ kg)
ϵ_0—.....	permissividade do vacuo.....	(C ² s ² /m ⁻³ kg)
ϵ_f—.....	permissividade do fluido base.....	(C ² s ² /m ⁻³ kg)

ε_p—.....	permissividade das partículas.....	$(C^2s^2/m^{-3}kg)$
ε''—.....	perda dielétrica	
ϕ—.....	fração em peso de sólidos	
$\dot{\gamma}$—.....	taxa de deformação.....	(s^{-1})
η—.....	viscosidade dinâmica.....	(Ns/m^2)
η_a—.....	viscosidade aparente.....	(Ns/m^2)
$(\eta_a)_B$—.....	viscosidade aparente de Bingham.....	(Ns/m^2)
η_B—.....	viscosidade de Bingham.....	(Ns/m^2)
η_f—.....	viscosidade do fluido base.....	(Ns/m^2)
η_i—.....	viscosidade instantânea.....	(Ns/m^2)
η_o—.....	viscosidade newtoniana.....	(Ns/m^2)
η_R—.....	viscosidade relativa	
η^*—.....	eletroviscosidade.....	$(Ns/m^2)^2$
φ—.....	fração em volume das partículas	
$\lambda_c(\perp)$—.....	espaço entre duas correntes.....	(m)
$\lambda_c(\parallel)$—.....	espaço livre médio entre a interseção das cadeias.....	(m)
ν—.....	viscosidade cinemática.....	(m^2/s)
θ—.....	ângulo em círculo trigonométrico.....	(rad)
σ—.....	torque.....	(Nm)
τ—.....	tensão de cisalhamento.....	(N/m^2)
τ_o—.....	tensão limite de escoamento de Bingham.....	(N/m^2)
$\tau_{o,d}$—.....	tensão limite de escoamento dinâmica.....	(N/m^2)
$\tau_{o,s}$—.....	tensão limite de escoamento estática.....	(N/m^2)
$\Omega_{1,2}$—.....	grau de orientação das partículas	
ω—.....	velocidade angular.....	(s^{-1})
ψ—.....	condutividade.....	$(ohm.m)^{-1}$

RESUMO

Fluidos eletroreológicos (ER) são substâncias que mudam suas propriedades óticas, elétricas, volumétricas, acústicas e mecânicas na presença de um campo elétrico externo. Estes fluidos são formados por partículas finas de materiais orgânicos ou inorgânicos em líquidos dielétricos e têm grande aplicação na indústria automobilística, indústria hidráulica, indústria de autômatos, aeronáutica, medicina e como fluidos de vedação. Sob a influência do campo elétrico, as partículas destes fluidos se alinham, formam uma estrutura de filamento na direção do campo, a qual resiste ao escoamento do fluido ER.

Neste trabalho sintetizou-se o sólido sulfato de hidrazina-lítio e analisou-se as características elétricas e reológicas da suspensão eletroreológica sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone. Os resultados experimentais foram obtidos para os diversos parâmetros: temperatura (20, 40, 60 graus Celsius), intensidade de campo elétrico (0 até 7 kilovolts por milímetro), diâmetro de partículas (menores que 37, 62,5 e 89,5 microns), fração em peso de sólidos (20, 30, 35 por cento em peso), viscosidade cinemática do óleo de silicone (200, 350 e 1000 centiStokes).

As propriedades reológicas das diferentes suspensões foram determinadas em um reômetro rotatório Haake modelo RV20 com um sistema de medida CV20ER equipado com uma fonte de alta tensão. As suspensões estudadas exibiram fortes variações de suas características reológicas de fluido não newtoniano sob ação do campo elétrico, de acordo com fenômeno reportado na literatura. O ajuste dos dados reológicos foi bem representado pelo modelo de fluido de Bingham, permitindo o estudo dos parâmetros tensão limite de escoamento e viscosidade plástica em função das variáveis: intensidade de campo elétrico, concentração de sólidos, temperatura da suspensão e tamanho de partículas. A faixa de taxas de deformação estudada foi de 0 a 300 s⁻¹.

Os parâmetros reológicos associados à intensidade de campo elétrico foram correlacionados através do grupo adimensional de Mason, que fornece a relação entre as forças viscosas e forças de polarização.

ABSTRACT

Eletro-rheological fluids (ER) are substances that have their optical, electrical, volumetric, acoustic and mechanic properties altered when in presence of an external electrical field. These fluids are composed by fine particles of organic and inorganic material in di-electrical liquids and have a large application in the automotive industry, hydraulic industry, robots industry, aeronautic, medicine and as seal fluid. Under the influence of an electrical field, the particles of these fluids are lined up, generating a structure aligned in the field direction. This structure reduces the ER fluid flowing capacity.

In this work, lithium hydrazinium sulfate solid was synthesised. The electrical and rheological characteristics of the eletro-rheological suspension of the lithium hidrazinium sulfate in silicone oil were analysed. Experimental results were obtained for the following parameters: temperature (20, 40, 60 degrees Celsius), electrical field intensity (from 0 to 7 kilovolts per milimetre), particles diameters (smaller than 37,62.5 and 89.5 micra), solid weight percent (20,30,35 percent in weight), silicone oil kinematic viscosity (200, 350 and 1000 centiStokes).

The rheological properties of the different suspensions were determined in a rotatory rheometer Haake model RV20 with a measurement system CV20ER, including a high power supply. The analysed suspensions showed strong variations of their non-Newtonian rheological characteristics under the electrical field, according to what was reported in the previous literature. The rheological data were well adjusted according to the Bingham fluid model. This fact allowed the investigation of the yield stress and plastic viscosity dependence on the electrical field, intensity, solid concentration, suspension temperature and particle size. The shear rate range analysed ranged from 0 to 300s^{-1} .

The rheological parameters, coupled with electrical field intensity, were correlated through the Mason dimensionless group, that represents the relationship between viscous and polarisation forces.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- Motivação à pesquisa

O fenômeno eletroreológico (ER) foi descoberto por WINSLOW (1,2) na década de 40 e muitas vezes é expresso por efeito Winslow. Inicialmente os fluidos com este comportamento eram conhecidos como eletroviscosos devido à aparente mudança na sua viscosidade. Hoje após anos de estudo, muitos trabalhos apresentam uma revisão do assunto e as preocupações atuais (3-6).

Um fluido eletroreológico é uma substância que muda suas propriedades óticas, elétricas, volumétricas, acústicas e mecânicas na presença de um campo elétrico. Dependendo da intensidade do campo elétrico aplicado, o fluido ER pode escoar livremente como água, lentamente como mel ou solidificar como gelatina. Pode mudar de um estado para outro reversivelmente em tempos da ordem de milisegundos. Sob a ação deste campo elétrico as partículas se alinham, formam uma estrutura de filamento na direção do campo, a qual resiste ao escoamento do fluido ER (7,42), como pode ser visto na figura 1.1.

Os fluidos ER são formados por partículas finas de materiais orgânicos como as resinas trocadoras de íons (8), tensoativos com grupos metálicos (9) e celulose microcristalina (10) ou materiais inorgânicos como a sílica, titânio, esferas de vidro (13,34), e outros óxidos metálicos (11-14) suspensas em líquidos dielétricos como óleo de silicone, óleo mineral, querosene e hidrocarbonetos halogenados. Muitas destas suspensões requerem a adição de pequenas quantidades de água para produzir uma boa resposta, entretanto a água aumenta a condutividade e restringe a faixa de temperatura de trabalho, prejudicando o desempenho global. Na tabela 1.1 são apresentadas as

características gerais do fluido base, partículas e suspensões ER.

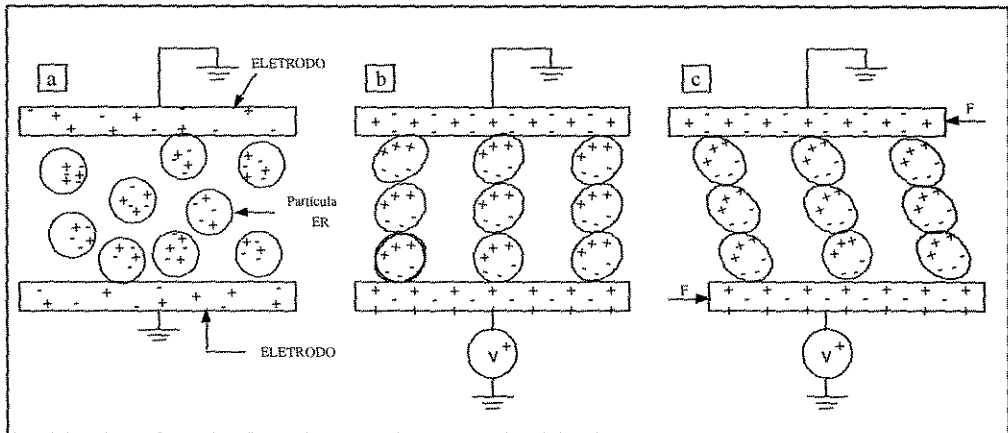


Figura 1.1: Comportamento de um fluido ER: a- sem aplicação do campo elétrico; b- com aplicação do campo elétrico; c- com aplicação do campo elétrico e força cisalhante (F).

De DUCLOS et al. (42).

Tabela 1.1 - Características gerais de um fluido eletroreológico

PROPRIEDADES DO FLUIDO BASE	
Constante dielétrica relativa	2-15
Condutividade em campos fracos	$10^{-7} - 10^{-13}$ mho/m
Massa específica	0,6-2,0 g/cm ³
Viscosidade	0,01-10 Pa.s
PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS	
Constante dielétrica relativa	2-40
Tamanho	0,1-100 μ
Forma	aprox. esférica
PROPRIEDADES DA SUSPENSÃO	
Intensidades típicas de campo	0,5-2 kV/mm
Viscosidade em campo nulo	0,1-10 Pa.s
Fração em volume	0,05-0,50
Condutividade	$10^{-6} - 10^{-13}$ mho/m

Os fluidos eletroreológicos têm fascinado cientistas não somente por suas propriedades físicas mas também por sua complexidade. As partículas se organizam em uma grande variedade de estruturas desde um extremo no escoamento livre, onde as partículas se movem independentes umas das outras,

até o outro extremo quando o fluido se solidifica, onde as partículas juntas e unidas formam finas correntes e grossas colunas visíveis a olho nu.

Desde sua descoberta o fenômeno eletroreológico é considerado como tendo um grande potencial de aplicação. Os campos de aplicação são:

1- Indústria Automobilística: Usando a técnica eletroreológica, pesquisadores estão estudando novos tipos de componentes, necessários aos automóveis, como por exemplo: embreagem, suspensão com amortecimento controlável, freio com torque de frenagem controlável ou pára-choque. As características destes componentes devem ser: alto desempenho, mínimo desgaste e quebra, longo tempo de serviço, simplicidade de fabricação, baixo custo, facilidade de controle com um sinal eletrônico de microcomputador, alta sensibilidade e resposta rápida.

2- Indústria Hidráulica: As válvulas para controle de pressão e taxa de escoamento usando a técnica eletroreológica podem tomar lugar de várias das usadas atualmente. As características das novas válvulas devem incluir: estrutura simples, partes não móveis, baixo custo, baixo desgaste e quebra, longo tempo de serviço e devem ser facilmente controladas pelo uso de um sinal eletrônico.

3- Campo de fluidos de vedação: Engenheiros estão desenvolvendo novos projetos de vedação rotacional com controle elétrico usando a técnica eletroreológica, em substituição a borrachas e fluidos de vedação magnética.

4- Indústria de autômatos: Estudos estão sendo feitos no projeto e produção de juntas flexíveis, as quais são pequenas em volume e rápidas na resposta. Estas juntas trabalham melhor do que as que são usadas hoje, cujo controle é elétrico-hidráulico.

5- Aeronáutica: Muito importante é a aplicação da técnica eletroreológica no amortecimento da aterrissagem de aviões e na eliminação da frequência ressonante que aparece nos helicópteros devido à vibração.

6- Medicina: Equipamentos de fisioterapia usando a técnica eletroreológica já estão sendo desenvolvidos pela Triangle Research and Development Corporation (TRDC).

1.2- Objetivo deste trabalho

O trabalho de desenvolvimento de novas formulações de suspensões ER e suas aplicações técnicas, requer estudos para que sejam melhor caracterizadas e suas propriedades melhor entendidas, não somente propriedades eletroreológicas particulares mas também o seu comportamento reológico geral ou seja a curva reológica do material com os parâmetros .

A primeira geração de fluidos ER desenvolvida por WINSLOW (1,2) era mantida úmida por exposição ao ar úmido e continha partículas de sílica. Alguns anos depois STANGROOM (3) e um grupo da Inglaterra desenvolveram uma segunda geração de fluidos, menos abrasivos e com partículas de polímeros mas ainda contendo água. O novo caminho, é criar uma terceira geração de fluidos livres de água e com partículas pequenas altamente polarizáveis.

Com isto em mente decidiu-se estudar as características elétricas e reológicas de um fluido ER de terceira geração: partículas de sulfato de hidrazina-lítio dispersas em óleo de silicone na presença ou não de um agente estabilizador (15), em uma célula de Couette ou reômetro rotatório: - dois cilindros concêntricos separados por um espaço estreito preenchido com o fluido, sendo que o sistema de sensor foi designado para atuar como eletrodo quando aplicado um campo elétrico.

Obtendo-se as curvas reológicas e a partir dos dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação serão apresentados os parâmetros do modelo reológico que melhor descrevem este comportamento.

Visando complementar os estudos anteriores deste fluido ER serão obtidas as variações da curva reológica com:

1-campo elétrico: 0-7kV/mm

2-temperatura: 20⁰C, 40⁰C, 60⁰C

3-concentração de sólidos: 20, 30, 35% em peso

4-viscosidade do fluido base: 200, 350, 1000cSt

5-diâmetro de partícula: <37, 62,5, 89,5µm

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Características reológicas

2.1.1- Equipamentos experimentais

O comportamento reológico de um fluido ER deve ser medido como uma função da tensão de cisalhamento (τ) e do campo elétrico (E). Na ausência de um campo elétrico ($E=0$) o fluido se comporta como uma dispersão comum. Este estudo pode ser realizado em geometrias viscosimétricas do tipo extrusão, onde o escoamento se dá segundo a lei de Poiseuille ou seja o fluido ER é movido a pressão em dutos de seções transversais retangulares, ânnulos ou capilares e do tipo rotacional onde os elementos de medida usados consistem de cone-placa, placas paralelas ou cilindros concêntricos.

Na reometria de fluidos ER é necessário um campo elétrico (E) bem definido e para uma dada velocidade angular (ω) a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) deve ser bem definida e constante. Pela não uniformidade do campo elétrico nos reômetros capilares e cone-placa (especialmente no vértice do cone) e pela não uniformidade na tensão de cisalhamento nos reômetros placa-placa (a taxa de deformação aumenta linearmente com a distância dos eixos) eles são evitados. Os reômetros mais comumente empregados são aqueles na geometria de dutos (16) e de cilindros concêntricos rotacionais (8,11).

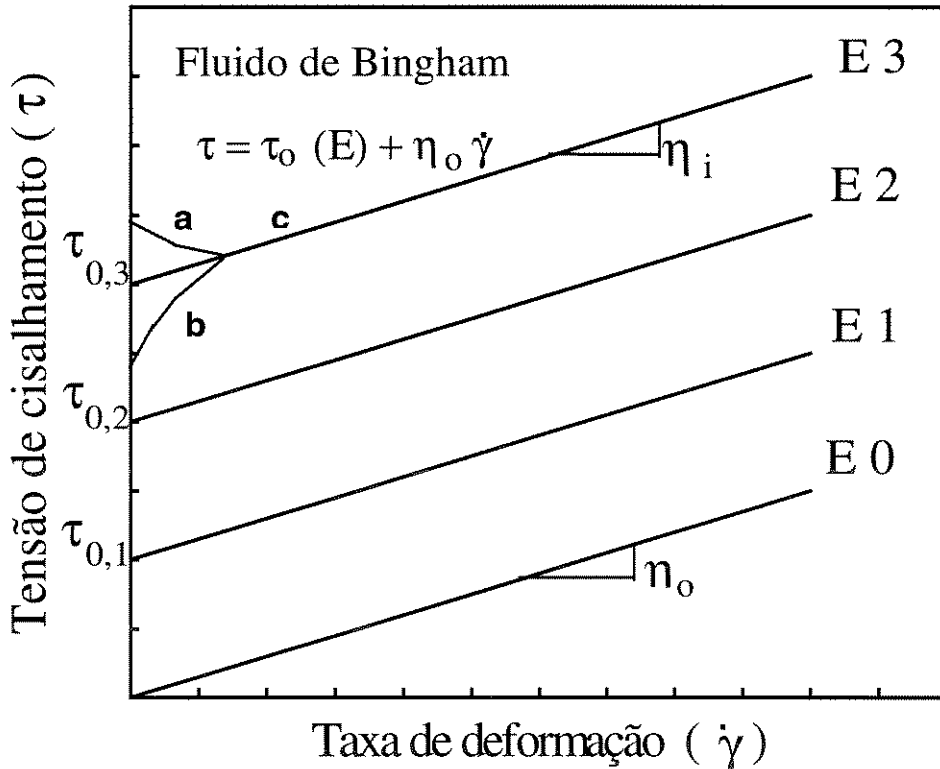
2.1.2- Modos de operação

Segundo GOODWIN (17) nos viscosímetros rotacionais estão

disponíveis dois modos de operação: 1- Sistema Couette onde um instrumento de deformação controlada rotaciona o elemento (sendo preferido o cilindro externo para estabilidade do escoamento) e a tensão é calculada pelo torque (σ) no outro cilindro, que por sua vez é derivado da deflexão de uma mola calibrada; 2- Sistema Searle onde um instrumento de tensão controlada usa um motor “drag-cup” para aplicar um torque em um elemento, que é universalmente o cilindro interno e o movimento deste elemento é monitorado. Nos dois sistemas os dois elementos (cilindro interno e externo) atuam como eletrodos quando aplicado um campo elétrico. Com os dois tipos de instrumentos acima se obtém a chamada curva do escoamento ou reograma do fluido, que é um gráfico da tensão de cisalhamento versus taxa de deformação e, sendo o fluido ER, tem ainda como parâmetro o campo elétrico. A tensão limite de escoamento pode ser obtida por aproximação como na figura 2.1. Nesta figura vemos que o comportamento descrito é o de um fluido Newtoniano para campo elétrico igual a zero ($E=0$) e fluido de Bingham para os demais. Temos também os vários termos empregados ao descrever o comportamento de um fluido ER.

O modelo plástico de Bingham reconhece que a propriedade de um material ER em que geralmente se observa mudança com o aumento no campo elétrico é a tensão limite de escoamento. A tensão limite de escoamento dinâmica ($\tau_{o,d}$) em um material ER que segue o modelo de Bingham pode ser definida como o intercepto (taxa de deformação nula) da reta ajustada por regressão linear e daqui para frente será chamada de tensão limite de escoamento de Bingham. A tensão limite de escoamento estática ($\tau_{o,s}$) é definida como a tensão necessária para iniciar o escoamento independentemente do modelo de Bingham descrever acuradamente ou não o comportamento do material. Naturalmente a viscosidade plástica de um material no regime após o limite de escoamento é exatamente indicada pela inclinação da reta ajustada por regressão linear na análise. Alguns cientistas (4) observaram que a tensão limite de cisalhamento estática é maior que a dinâmica e a razão deste fenômeno que é conhecido como atrito estático não

está completamente entendida; o que se sabe é que é altamente dependente do tamanho e forma da partícula, do campo elétrico e da história do escoamento do material. Muitos pesquisadores têm considerado as tensões iguais como visto na figura 2.1.



a e b curvas experimentais

c ajuste dos dados experimentais pelo modelo de Bingham

$\eta_0 = \tau / \dot{\gamma} \quad (E=0) = \text{Viscosidade Newtoniana}$

$\eta_i = d\tau / d\dot{\gamma} = \text{Viscosidade Instantânea}$

$\eta_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (E>0) = \text{Viscosidade Aparente}$

$\eta_R = \eta_a / \eta_0 = \text{Viscosidade Relativa}$

$\eta^* = \eta_a \cdot \eta_0 = \text{Eletroviscosidade}$

Figura 2.1: Comportamento esquemático da tensão de cisalhamento versus taxa de deformação observado em uma célula de Couette para fluidos ER. São apresentados os vários termos usados para descrever o comportamento reológico dos fluidos eletroreológicos. De CONRAD et al. (39).

Os dois parâmetros mais significativos usados ao se projetar dispositivos eletro-ativos onde as propriedades do escoamento ou propriedades após o limite de escoamento são essenciais, são a viscosidade e as tensões induzidas pelo campo elétrico (18-20).

2.1.3 - Efeito do campo elétrico na tensão limite de escoamento de Bingham

O efeito do campo elétrico em τ_o é descrito pela equação 2.1, onde M e n' são dependentes do campo e do fluido.

$$\tau_o = M.E^{n'} \quad (2.1)$$

Os valores de n' estão entre 1,0 e 2,5 dependendo da magnitude ou faixa de intensidade de campo considerado. O valor mais comum numa grande faixa de valores do campo é 2,0 (1,2,8,11,21-25); $n' = 1,0$ ocorre para altos valores de campo e $n' > 2,0$ para baixos valores de campo.

Nos fluidos ER aquosos a tensão mínima de escoamento permanece relativamente constante ou apresenta um pequeno decréscimo quando a frequência do campo elétrico (f) é aumentada de 0 para 10^3 Hz, depois disso cai rapidamente. Em alguns casos como o fluido ER formado por partículas de zeólita em óleo de silicone (28), ocorre um aumento de τ_o com a frequência, passando por um máximo. Nos sistemas anidros onde os fluidos contêm partículas de metal recobertas por polímeros, um aumento em τ_o ocorre quando a frequência é aumentada (29).

Recentemente KLINGENBERG et al. (46) estudaram o aumento da polarização das partículas e a consequente elevação do parâmetro τ_o , com a adição de proteínas.

2.1.4 - Efeito da temperatura na tensão limite de escoamento de Bingham

Temos na figura 2.2 um exemplo do efeito da temperatura (T) na tensão limite de escoamento de Bingham num fluido ER (34% de partículas de zeólita em óleo de silicone (41)). Inicialmente há um aumento de τ_0 com T , passa por um máximo e então decresce. Este tipo de comportamento é característico de fluidos ER aquosos.

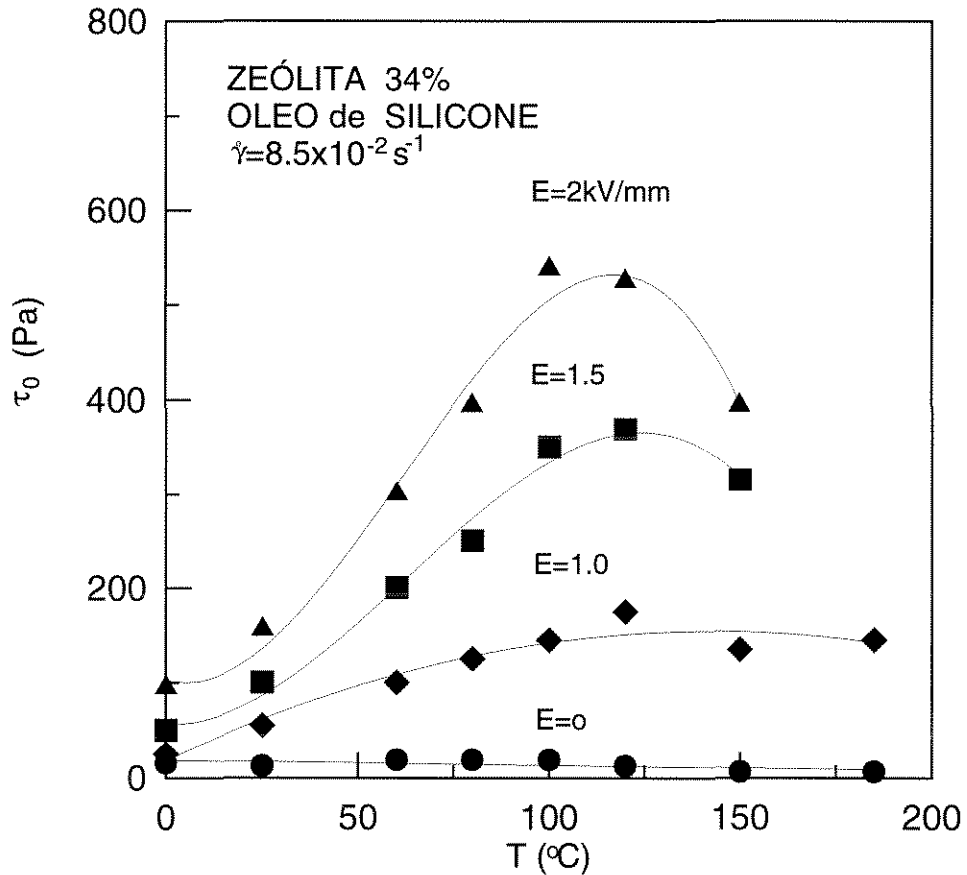


Figura 2.2: Efeito da temperatura na tensão limite de escoamento como uma função do campo elétrico para um fluido eletroreológico consistindo de 34% em peso de partículas de zeólita em óleo de silicone.

De CONRAD et al. (41).

2.1.5 - Efeito da composição na tensão limite de escoamento de Bingham

A tensão limite de escoamento de Bingham (τ_0) dos fluidos ER geralmente aumenta com a fração em volume das partículas (ϕ). Entretanto além

de uma determinada concentração o efeito pode estabilizar ou mesmo decrescer(8). O aumento inicial em τ_o com φ é da forma descrita pela equação 2.2, onde B é uma constante e m varia de 2/3 até 3/2 (11,13,26).

$$\tau_o = B.\varphi^m \quad (2.2)$$

Muitos fluidos necessitam ter água adsorvida nas partículas para apresentarem características ER (1,8,11,13,27). O comportamento destes sistemas com o aumento da água é similar ao efeito de φ . Um aumento na quantidade de água adsorvida, primeiro ocasiona um aumento em τ_o mas então o efeito estabiliza e finalmente pode ocorrer um decréscimo em τ_o (8,41).

2.1.6- Propriedades viscoelásticas

Poucos são os dados das propriedades viscoelásticas dos fluidos ER encontrados na literatura (6,23,30,45). KOROBKO e SHULMAN (45), encontraram que o logaritmo do módulo de elasticidade (G') e o módulo de perda (G'') para suspensões de diatomito em óleo de transformador aumentam de forma parabólica com o aumento do campo. Os módulos de elasticidade e de perda caracterizam o fluido ER quanto a elasticidade e perdas por dissipação. As maiores mudanças nos módulos G' e G'' ocorrem entre os valores de campo elétrico de 0 até 5 kV/mm.

2.2 - Características elétricas

O conhecimento das características elétricas dos fluidos ER é importante do ponto de vista científico e tecnológico. Do ponto de vista científico temos informações necessárias para identificar os mecanismos de operação, e do ponto de vista tecnológico temos informações sobre a potência requerida, controle e ligação (comutação).

2.2.1 - Densidade de corrente

Para que as operações envolvendo fluidos ER sejam eficientes, a densidade de corrente (j) deve ser da ordem de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Durante testes estáticos, j deve permanecer relativamente constante (41) ou decrescer com a deformação(40). A variação de j com o campo elétrico é dada pela equação 2.3, onde os valores de D e b dependem do sistema ER e da magnitude de E ; b varia de 1 a 5.

$$j = D.E^b \quad (2.3)$$

Para o sistema de partículas de zeólita em óleo de silicone (41) foi observado que j aumenta com a temperatura (acima de 100°C) de acordo com a equação 2.4, onde A_E varia com o campo elétrico segundo a expressão $4 \times 10^4 (\text{A}/\text{cm}^2) / E^5 (\text{kV}/\text{mm})^5$ e F é uma constante igual a 16,8. Para este fluido ER a tensão limite de escoamento varia com j de acordo com a equação 2.5, onde A_E^* é uma função do campo elétrico ($A_E^* = 1.56 \times 10^3 (\text{Pa}/(\text{A}/\text{cm}^2)^{1/5} / E (\text{kV}/\text{mm}))$) e $q=1/5$.

$$j = A_E \cdot e^{-F/R \cdot T} \quad (2.4)$$

$$\tau_o = A_E^* \cdot j^q \quad (2.5)$$

2.2.2- Constantes dielétricas

Tendo como objetivo elucidar o mecanismo do fenômeno eletroreológico, foram realizadas medidas dielétricas no escoamento destes fluidos, bem como estudos das respostas reológicas. As respostas dielétricas (4) como uma função da frequência (f) e da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) foram medidas e

estes dados processados em termos de permissividade relativa (K) e perda dielétrica (ϵ''). A permissividade (ϵ) se relaciona com a constante dielétrica (K) através da expressão $K = \epsilon/\epsilon_0$ onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo.

Normalmente para baixas taxas de deformação a permissividade relativa ou constante dielétrica, decresce continuamente com a frequência. Com o aumento na taxa de deformação, um pico pode ocorrer na curva refletindo ressonância (31). Para partículas esféricas, a frequência na qual ocorre ressonância (f_m), varia com a taxa de deformação segundo a equação 2.6.

$$f_m = \frac{\dot{\gamma}}{4\pi} \quad (2.6)$$

A propriedade perda dielétrica ϵ'' passa através de um máximo em alguma frequência intermediária, e este valor depende do sistema de fluido eletroreológico (31).

Segundo alguns pesquisadores (8,12,26), a permissividade do meio de um fluido ER é dada pela equação 2.7

$$\epsilon = \epsilon_p \phi(1 - \phi) \cdot \epsilon_f \quad (2.7)$$

onde ϵ_p - permissividade das partículas

ϵ_f - permissividade do fluido base

ϕ - fração em volume de partículas

KLASS e MARTINEK (12) pesquisando o fluido ER constituído de partículas de sílica a 0,38 de fração de volume em fluido naftênico e com um surfactante não iônico, verificaram que ϵ e ϵ'' tendem a aumentar com o aumento de temperatura.

2.3 Estrutura do fluido eletroreológico

WINSLOW (2) apresentou em seu trabalho que quando sobre um fluido ER é aplicado um campo elétrico, as partículas se alinham ao longo da direção do campo em uma estrutura na forma de corrente ou fibrosa. Ele atribui o aumento de resistência do fluido, à força requerida para ruptura das correntes ou fibras. Praticamente todos os fluidos ER exibem esta característica de estrutura na forma de corrente ou fibrosa.

Tem sido empregado o microscópio ótico e as propriedades óticas para caracterizar essas estruturas do fluido ER (22,33).

CONRAD et al. (13,34) tem estudado contas de vidro em óleo de silicone que é um modelo de fluido eletroreológico empregando o microscópio ótico. A estrutura foi investigada sob duas condições: estática (sem cisalhamento) e dinâmica (durante o cisalhamento).

2.3.1- Estrutura estática

Um modelo de fluido ER (34) constituído de contas de vidro, diâmetro de $27\text{ }\mu\text{m}$ e 0,2 fração em volume, em óleo de silicone 50 cSt desenvolveu uma estrutura em forma de corrente quando aumentado o campo elétrico como pode ser visto na figura 2.3. Para pequenos campos elétricos as partículas começam a agrupar-se, com uma tendência a alinhar-se ao longo do campo. Estes agrupamentos aumentam com o campo elétrico até que para $E = 0,5\text{ kV/mm}$ as primeiras correntes se formam através do espaço entre os eletrodos. Com o aumento do campo elétrico ocorre um aumento no número e na espessura das correntes. Na figura 2.4 temos listados os parâmetros estereológicos pertencentes à estrutura do modelo reológico para o qual foram medidos. Os parâmetros: $\lambda_c(\perp)$ o espaço entre duas correntes, $x_c(\perp)$ a espessura de uma corrente e $\lambda_c(\parallel)$ o espaço livre médio entre a interseção das cadeias, estão mostrados na figura 2.4.a. A figura 2.4.b mostra que o grau de orientação das partículas $\Omega_{1,2}$ aumenta rapidamente com o campo elétrico até perto de 1 kV/mm , mantendo-se constante

daí para frente. Para altos valores de campo ($>1\text{kV/mm}$) $\Omega_{1,2}$ sofre uma pequena diminuição quando a fração de área (A_A) das contas de vidro aumenta. Na figura 2.4.c é visto que para campos elétricos entre 0,5 e 3 kV/mm, as variáveis $\lambda_c(\perp)$, $\lambda_c(\parallel)$ e $x_c(\perp)$ dependem sensivelmente da fração de contas de vidro, e não do campo elétrico. Desde que a formação de correntes estão completas somente para $E \geq 0,5\text{kV/mm}$, estes parâmetros só podem ser determinados a partir deste valor crítico. Dizem os autores (34) que vale mencionar que o aspecto principal da estrutura desenvolveu-se rapidamente e por algum tempo depois disto os ajustamentos e movimentos das contas de vidro ainda ocorreram, e ainda mais que com os olhos não foi possível observar-se este fenômeno.

SMITH e FRILLER (33) estudaram a estrutura de suspensões compostas por esferas de sílica de diâmetro $49\mu\text{m}$ e $130\mu\text{m}$ em ciclohexano, medindo a birrefringência e dicromatismo como um função do tempo de aplicação e magnitude do campo elétrico. O tempo para se obter 50% do valor da birrefringência ou do dicromatismo no estado estacionário decresce com o campo elétrico, é 0,1s para $E=1\text{kV/mm}$ e 0,05s para $E=4\text{kV/mm}$. Os valores no estado estacionário aumentam rapidamente com o campo até 1kV/mm e depois muito pouco variam. Este comportamento é semelhante ao da variável $\Omega_{1,2}$ no fluido contas de vidro de diâmetro $27\mu\text{m}$ em óleo de silicone(34). Estudos realizados em um microscópio ótico mostraram um comportamento similar ao das contas de vidro para as partículas de sílica. Através das propriedades óticas medidas os autores (33) concluíram que o grau de orientação das partículas de sílica decresceu quando a fração de volume foi aumentada.

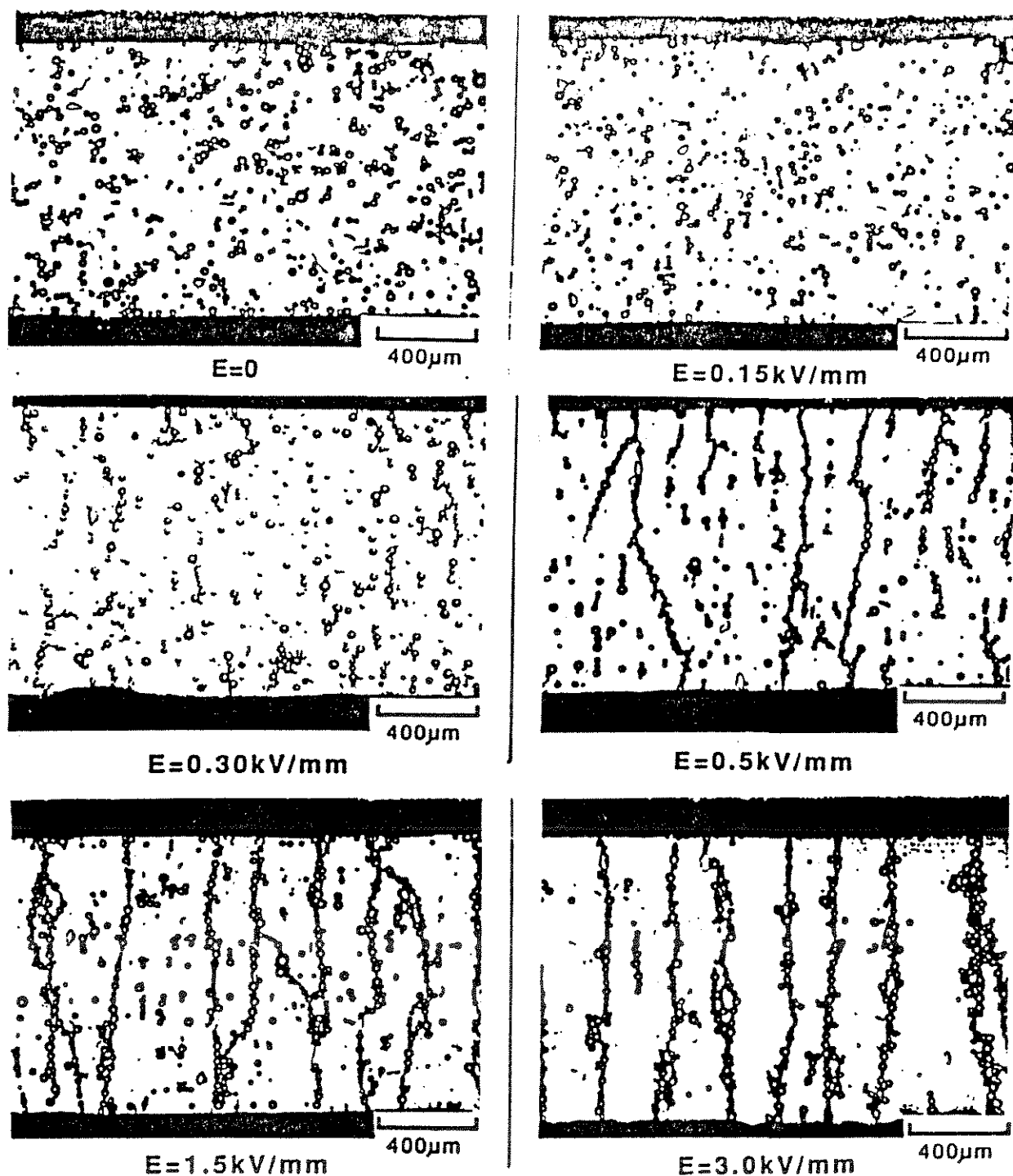


Figura 2.3 : Desenvolvimento da estrutura em corrente ou fibras, no modelo de fluido eletroreológico formado por contas de vidro de diâmetro $27\mu\text{m}$ e 0,2 fração em volume em óleo de silicone de viscosidade cinemática 50cSt e densidade relativa 0,96, com o aumento no campo elétrico. Eletrodos estão no topo e fundo de cada fotografia. De CONRAD et al. (34).

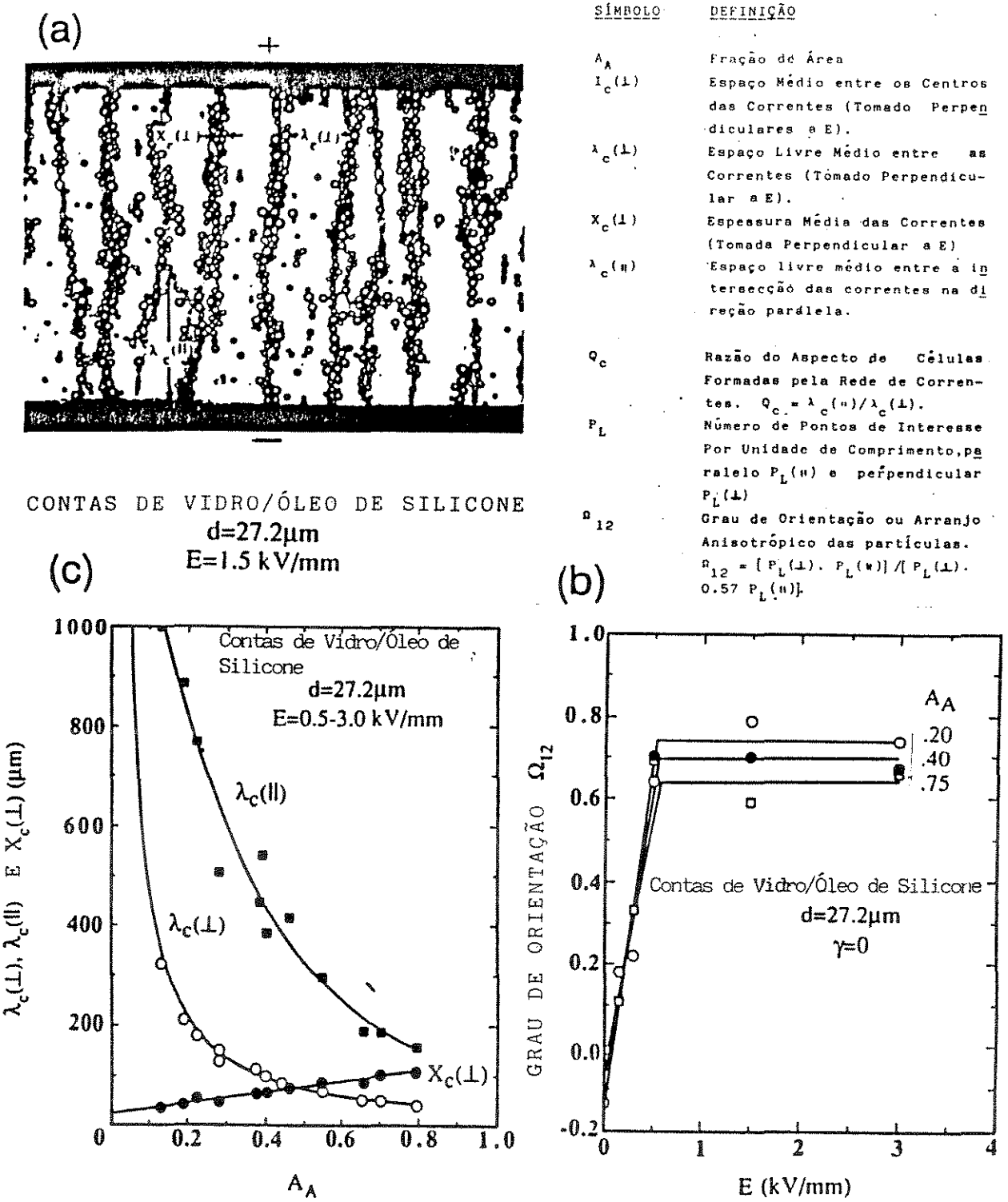


Figura 2.4: Parâmetros estereológicos usados para caracterizar a estrutura do modelo de fluido eletroreológico e os efeitos do campo elétrico e fração de área das contas de vidro em alguns destes parâmetros. De CONRAD et al.(34).

2.3.2 - Estrutura dinâmica

Poucos são os pesquisadores que têm estudado a estrutura dos fluidos ER durante o cisalhamento. SPRECHER et al. (13) estudaram uma suspensão de contas de vidro de 27 μm em óleo de silicone numa célula cujo esquema é mostrado na figura 2.5a. Os resultados são apresentados na figura 2.5b, onde temos o perfil de velocidade e na figura 2.5c onde temos a estrutura. Para pequenos valores de campo elétrico e taxa de deformação ($\dot{\gamma} \leq 1 \text{ s}^{-1}$) as correntes se rompem e refazem-se continuamente mantendo uma estrutura fibrosa homogênea no vão entre os eletrodos. Com um aumento no campo elétrico, desenvolve-se uma região livre de fibras no centro do vão. Se o campo elétrico usado for alto (1-2 kV/mm), ocasionalmente ocorre um efeito eletrodinâmico que destrói a estrutura fibrosa, o qual entretanto é corrigido se o cisalhamento cessar. Para altas taxas de deformação ($\dot{\gamma} \geq 1 \text{ s}^{-1}$) o movimento do fluido é mais turbulento e a formação da região sem fibras não fica bem definida. Frequentemente a turbulência destrói a estrutura fibrosa completamente.

2.4 - Mecanismos

2.4.1 - Teoria

Dois fenômenos básicos são propostos para explicar o aumento na tensão limite de escoamento dos fluidos ER, a saber: construindo ponte de água (figura 2.6.1) e polarização de partículas (figura 2.6.2). No fenômeno de construção de ponte assume-se que moléculas de água associadas aos íons móveis estão dentro dos poros das partículas. Quando aplicado o campo elétrico, os íons móveis movimentam-se em direção a uma outra partícula carregando a água consigo, a qual forma uma ponte com uma partícula adjacente. A tensão interfacial entre a água e o fluido suporte do fluido ER fornece então uma fonte

de resistência ao cisalhamento. Maiores detalhes deste mecanismo são dados na literatura pelo pesquisador STANGROOM(3).

Com base no fenômeno de polarização de partículas, dois mecanismos têm sido propostos: I - atração de Coulomb ou força de polarização entre partículas, a qual conduz para uma estrutura em forma de corrente; II - alinhamento de dipolo. O desalinhamento com respeito ao campo do dipolo se deve à rotação criada na partícula pelo escoamento do fluido.

Alguns dos meios pelos quais as partículas podem ser polarizadas são mostrados na figura 2.7. A polarização pode ocorrer pelo alinhamento dos dipolos permanentes como existe por exemplo no imã. A força F entre os dipolos tem sido calculada pela equação 2.8 para o caso de dois dipolos em um campo elétrico uniforme, separados por uma distância R muito maior que seu raio a

$$F = \left[\frac{6}{4\pi\epsilon_f} \right] \cdot \frac{p^2}{R^4} \quad (2.8)$$

onde ϵ_f é a permissividade do fluido base e p é o momento do dipolo dado por:

$$p = 4\pi\epsilon_o a^3 E K_f \left(\frac{K_p - K_f}{K_p + 2K_f} \right) \quad (2.9)$$

onde ϵ_o é a permissividade do vácuo e $K = \epsilon / \epsilon_o$ é a permissividade total relativa, os subscritos p e f referem-se a partícula e fluido base respectivamente. Combinando as equações 2.8 e 2.9 e reconhecendo que $K = K' + iK''$, onde $K'' = \psi / \omega$ (ψ é a condutividade e ω é igual a $2\pi f$, onde f é a frequência) obtém-se:

$$F = \frac{24\pi a^6 \epsilon_o E^2}{R^4} K_f \left(\frac{(K'_p - K_f)^2 + (\psi_p / \omega)^2}{(K'_p + 2K_f)^2 + (\psi_p / \omega)^2} \right) \quad (2.10)$$

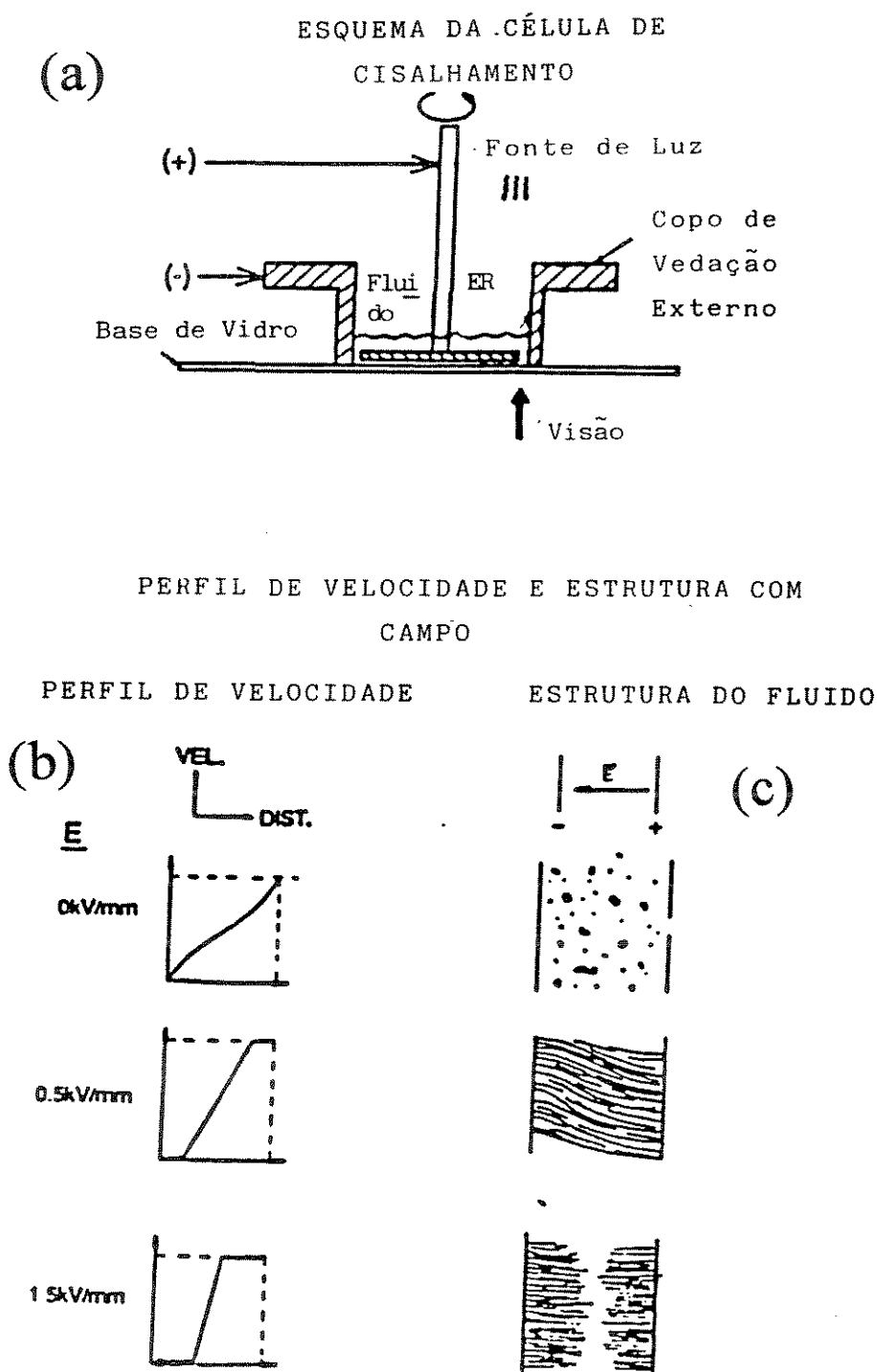


Figura 2.5: a- Esquema de uma célula de cisalhamento empregada para observar a estrutura do modelo do fluido eletrorelógico constituído por contas de vidro de $27\mu\text{m}$ em óleo de silicone sob cisalhamento dinâmico, b- perfil de velocidades observado com campo, c- estrutura observada com campo.
De SPRECHER et al.(13).

1. PONTES DE ÁGUA. Stangroom (3)



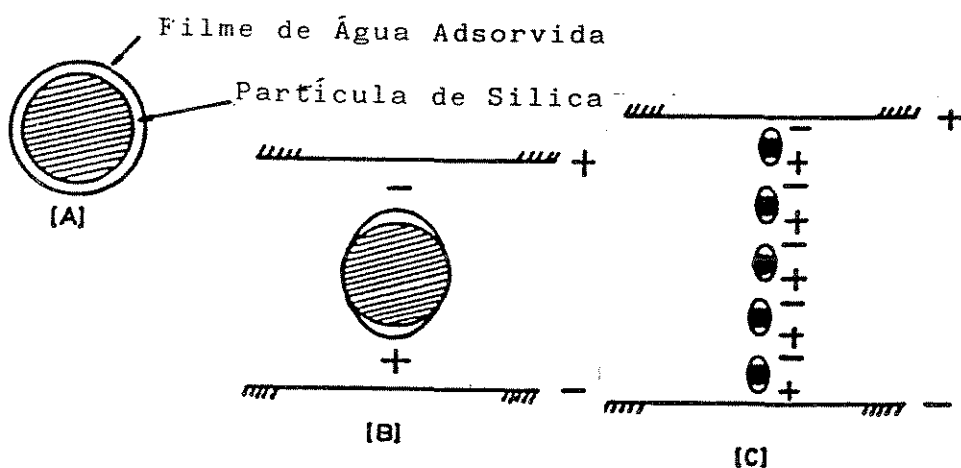
a - normal



b - sob tensão

2. POLARIZAÇÃO DE PARTÍCULAS MECANISMOS PARA EFEITO E.R.

I. (Atração de Coulomb



II. Alinhamento de Dipolo

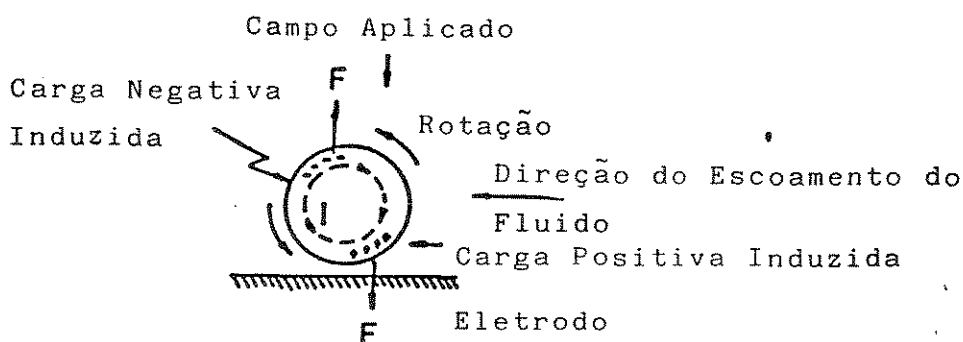


Figura 2.6: Dois fenômenos que aumentam a tensão limite de escoamento (τ_0):
1- Pontes de água; 2- Polarização de partículas. Ilustração do segundo mecanismo em uma partícula de sílica resultante da presença de filme de água adsorvido.
De STANGROOM (3) e PHILLIPS (35).

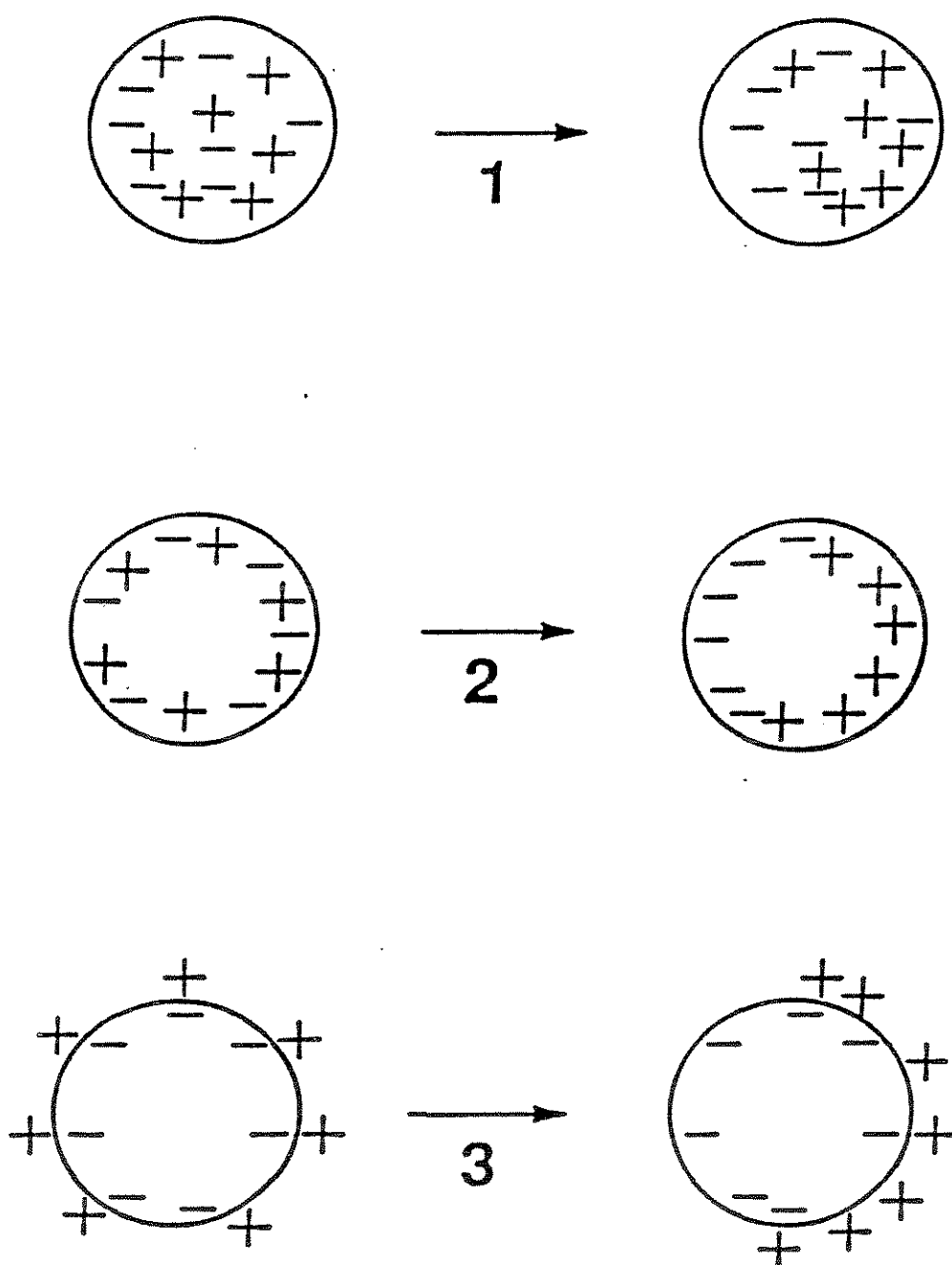


Figura 2.7: Três meios pelos quais as partículas podem polarizar-se: 1-Condutividade global, 2-Condutância na superfície e 3-Distorção de camada dupla.
De BLOCK e KELLEY (31).

O valor de F dado pela equação 2.10 é para partículas alinhadas na direção do campo aplicado. Considerando o ângulo θ com respeito ao campo aplicado, foi encontrado que F é máximo e atrativo quando $\theta = 0$, isto é, quando as partículas estão alinhadas na direção do campo e repulsivo quando $\theta = 90^\circ$, isto é quando as partículas estão alinhadas perpendicularmente ao campo.

CONRAD et al. (36) mediram a força requerida para deformar e quebrar as correntes formadas pelas partículas contas de vidro no óleo de silicone, e compararam com a força obtida através da equação 2.10. Chegaram à conclusão que a força para ruptura da corrente de partículas varia com E^2 o que está de acordo com a equação 2.10, mas o momento do dipolo medido teve ordem de magnitude maior que o predito pela equação 2.9. Além disso, encontraram que o momento do dipolo varia com o tamanho da partícula não como na equação 2.9 onde é proporcional a a^3 , mas sim varia simplesmente com a desde que $R=a$ na corrente (28). A discrepância entre os valores do momento de dipolo resulta do fato de que a teoria está baseada em dois pontos do dipolo espaçados amplamente no campo elétrico uniforme, enquanto que as medidas são feitas em uma corrente de partículas contactada. Os estudos realizados por SPRECHER (28) dão suporte para esta conclusão.

BLOCK et al. (31) estudaram a variação da constante dielétrica (permissividade relativa) com a frequência e isto serviu de apoio ao mecanismo de alinhamento do dipolo.

2.4.2 - Aplicação para comportamento reológico

É de se esperar que a tensão limite de escoamento seja proporcional à força requerida para ruptura da estrutura das correntes e então de acordo com a equação 2.10 τ_0 seja proporcional a E^2 , o que é frequentemente observado. KLINGENBERG e ZUKOSKI (37) desenvolveram a expressão (2.11) para a tensão limite de escoamento, onde $F_{\text{máx.}}$ é a força restabeecedora máxima; L é o

espaçamento dos eletrodos; $\theta_{\max}$. é o ângulo entre a linha centro das partículas e o campo elétrico para o qual ocorre rompimento da corrente.

$$\tau_o = 18\phi F_{\max} \left[1 - \frac{\sqrt{16\pi}}{\left[\frac{L}{a} \right] \tan g \theta_{\max} \phi^{1/2}} \right] \quad (2.11)$$

Houve concordância razoável entre os dados de MARSHALL et al. (26) e a equação 2.11.

CONRAD e SPRECHER (39) estudaram o comportamento reológico partindo do princípio que o fluido ER obedece o modelo de Bingham, cuja equação é

$$\tau = \tau_o + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

em que η_B é a viscosidade da suspensão ER segundo Bingham. Dividiram ambos os lados da equação 2.12 por $\dot{\gamma}$ e obtiveram:

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + \eta_B \quad (2.13)$$

Consideram $\tau_o = CF$ onde C é uma constante e F é dada pela equação 2.10 e dividiram ambos os lados da equação 2.13 por :

a- η_B e obtiveram:

$$\frac{(\eta_a)_B}{\eta_B} = \left[\frac{24\pi Ca^6 \epsilon_o E^2 K_f \beta^2}{\dot{\gamma} \eta_B R^4} \right] + 1 \quad (2.14)$$

b- η_f e obtiveram:

$$\frac{(\eta_a)_B}{\eta_f} = \left(\frac{24\pi Ca^6 \epsilon_o E^2 K_f \beta^2}{\dot{\gamma} \eta_f R^4} \right) + \frac{\eta_B}{\eta_f} \quad (2.15)$$

em que $\beta = (K_p - K_f) / (K_p + 2K_f)$, η_f é a viscosidade do fluido base e $(\eta_a)_B$ é a viscosidade aparente segundo modelo de Bingham

As equações 2.14 e 2.15 ficam reduzidas a

$$\frac{(\eta_a)_B}{\eta_B} = \frac{\alpha}{Mn} + 1 \quad (2.14a)$$

e

$$\frac{(\eta_a)_B}{\eta_f} = \frac{\alpha}{Mn} + \frac{\eta_B}{\eta_f} \quad (2.15a)$$

onde $\alpha = 24\pi Ca^6 K_f / 2R^4$ e $Mn = \dot{\gamma} \eta_f / 2\varepsilon_0 E^2 \beta^2$.

Notaram que se $\eta_B = \eta_f$, as equações 2.14a e 2.15a são essencialmente equivalentes e plotando-se em log-log $(\eta_a)_B / \eta_f$ versus $\dot{\gamma}$ obtem-se uma curva com inclinação inicial -1 e que aproxima-se assintoticamente de 1 para altas taxas de deformação, isto é, para grandes valores de Mn.

Segundo MARSHALL et al (26) Mn é chamado de número de Mason, e dá a razão entre a força do escoamento viscoso e a força de polarização. Estes pesquisadores correlacionaram os efeitos de $\dot{\gamma}$, E, T e ϕ no comportamento de um fluido ER constituído de partículas de polimetacrilato de lítio em óleo de hidrocarboneto clorado.

O conceito do número de Mason foi empregado por BANNECAZE et al. (38) nos estudos de simulação de um fluido ER. A simulação foi realizada com um fluido composto por partículas dielétricas esféricas em um fluido newtoniano, submetido a um escoamento cisalhante com um campo elétrico ortogonal. Os resultados obtidos por simulação para velocidade relativa versus Mn como uma função do campo elétrico, estão em conformidade com os obtidos experimentalmente por MARSHALL et al. (26).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Síntese do sólido

O sulfato de hidrazina-lítio foi sintetizado usando o método de CARLSON (15), onde o carbonato de lítio se combina com o sulfato de hidrazina dando o sulfato de hidrazina-lítio, água e liberando dióxido de carbono segundo a reação:



Na prática o pó de sulfato de hidrazina é primeiro parcialmente dissolvido em água destilada, em seguida adiciona-se lentamente o pó de carbonato de lítio e mais água destilada, misturando-se muito bem. Enquanto a reação se processa, bolhas de dióxido de carbono são liberadas. Quando a reação está completa o produto é levado à estufa para evaporar a água. Os cristais de sulfato de hidrazina-lítio resultantes são moídos, secos e armazenados em estufa a 115°C para prevenir que não exista água adsorvida. Para moer os cristais foi utilizado um moinho de bolas para laboratório do tipo KM1.

3.2- Caracterização das partículas sólidas

Inicialmente foi realizada uma caracterização grosseira das partículas através do peneiramento em um conjunto padrão de peneiras conforme tabela 3.1. Por simplicidade utilizou-se os valores de diâmetro médio de peneira (<37µm, 62,5µm e 89,5µm) como rótulo dos gráficos a serem apresentados no Capítulo 4.

Tabela 3.1- Peneiramentos realizados

ABNT	ABERTURA DA PENEIRA EM mm	DIÂMETRO DO SÓLIDO RETIDO EM mm
1º PENEIRAMENTO		
100	0,149	>0,1490
170	0,088	0,1185
400	0,037	0,0625
fundo		<0,037
2º PENEIRAMENTO		
150	0,105	>0,105
200	0,074	0,0895
fundo		<0,074

Posteriormente uma caracterização mais detalhada das partículas sólidas foi realizada no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos com utilização do equipamento GALAI. Faz-se na tabela 3.2 uma comparação entre os diâmetros das partículas obtidos pelo peneiramento e pelo equipamento GALAI, observa-se que eles são próximos.

Tabela 3.2- Comparação entre os diâmetros das partículas obtidos pelo peneiramento e pelo equipamento GALAI

	DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS (µm)	
	PENEIRAMENTO	GALAI
amostra nº1	< 37	18,95
amostra nº2	62,5	62,64
amostra nº3	89,5	89,18

Nessas determinações os resultados são da distribuição em volume, representam a média de cinco análises e estão apresentados nas tabelas 3.3 a 3.5 e nas figuras 3.1 a 3.3.

Tabela 3.3- Dados de distribuição em volume (faixas) dados pelo equipamento GALAI para a amostra nº1 .

		CUMULATIVO	
FAIXA (µm)	LOCAL (%)	ABAIXO (%)	ACIMA (%)
0,0 - 1,0	0,07	0,07	99,93
1,0 - 2,0	0,18	0,26	99,74
2,0 - 3,0	0,75	1,01	98,99
3,0 - 4,0	2,09	3,09	96,91
4,0 - 5,0	4,05	7,14	92,86
5,0 - 6,0	4,76	11,90	88,10
6,0 - 7,0	9,60	16,74	83,26
7,0 - 8,0	3,25	19,99	80,01
8,0 - 9,0	2,65	22,64	77,36
9,0 - 10,0	2,81	25,45	74,55
10,0 - 15,0	17,49	42,94	57,06
15,0 - 20,0	16,40	59,34	40,66
20,0 - 25,0	15,27	74,60	25,40
25,0 - 30,0	9,59	84,19	15,81
30,0 - 35,0	5,52	89,71	10,29
35,0 - 40,0	3,61	93,33	6,67
40,0 - 45,0	3,17	96,50	3,50
45,0 - 50,0	1,88	98,38	1,62
50,0 - 60,0	1,41	99,80	0,20
60,0 - 70,0	0,20	100,00	0,00

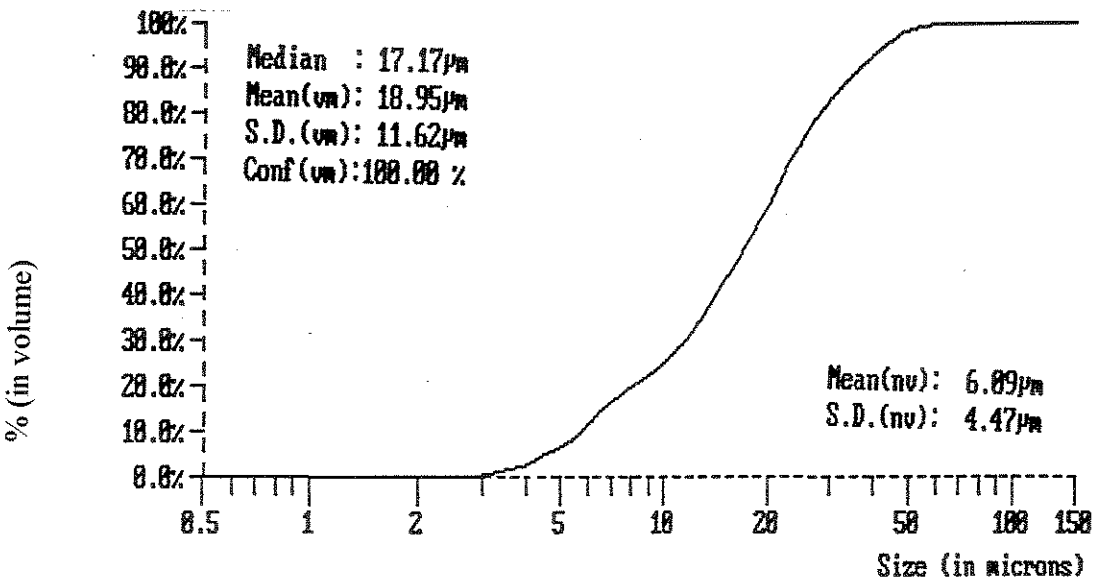


Figura 3.1: Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra nº1 .

Tabela 3.4- Dados de distribuição em volume (faixas) dados pelo equipamento GALAI para a amostra n°2 .

		CUMULATIVO	
FAIXA (μm)	LOCAL (%)	ABAIXO (%)	ACIMA (%)
0,0 - 3,0	0,08	0,08	99,92
3,0 - 4,0	0,05	0,08	99,92
4,0 - 5,0	0,18	0,26	99,74
5,0 - 6,0	0,39	0,64	99,36
6,0 - 7,0	0,34	0,99	99,01
7,0 - 8,0	0,24	1,23	98,77
8,0 - 9,0	0,20	1,44	98,57
9,0 - 10,0	0,12	1,56	98,44
10,0 - 20,0	0,14	1,70	98,30
20,0 - 30,0	2,44	4,13	95,87
30,0 - 40,0	5,15	9,29	90,71
40,0 - 50,0	11,66	20,96	79,04
50,0 - 60,0	17,19	38,15	61,85
60,0 - 70,0	16,77	54,92	45,08
70,0 - 80,0	12,10	67,02	32,98
80,0 - 90,0	8,64	75,67	24,33
90,0 - 100,0	7,06	82,72	17,28
100,0 - 120,0	4,91	87,63	12,37
120,0 - 150,0	6,75	94,38	5,62
	5,62	100,00	0,00

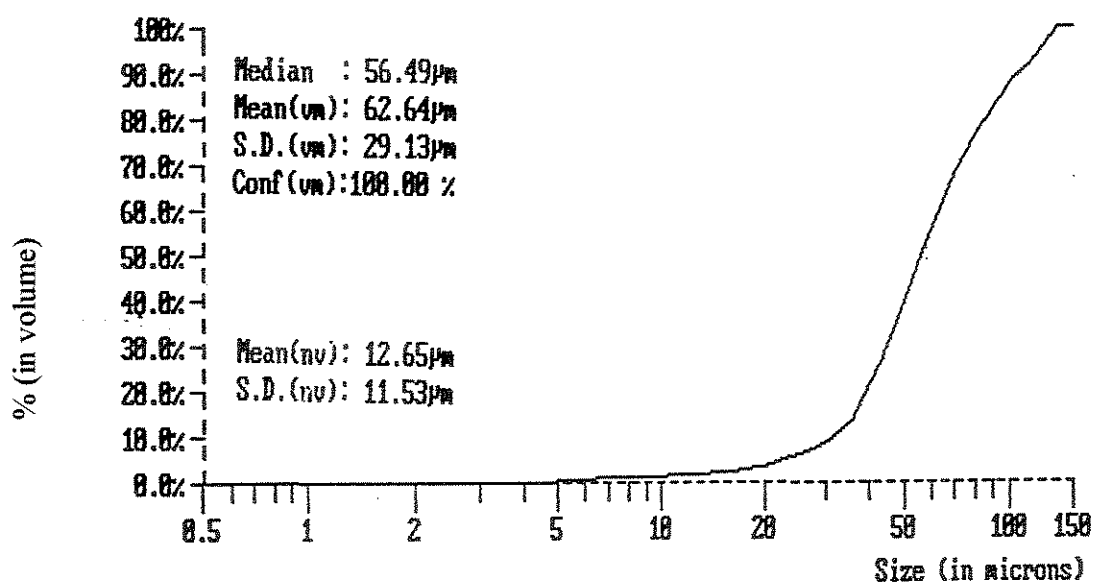


Figura 3.2: Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra n°2 .

Tabela 3.5- Dados de distribuição em volume (faixas) dados pelo equipamento GALAI para a amostra nº3.

		CUMULATIVO	
FAIXA (µm)	LOCAL (%)	ABAIXO (%)	ACIMA (%)
0,0 - 10,0	3,43	3,43	96,57
10,0 - 20,0	3,31	6,74	93,26
20,0 - 30,0	3,60	10,35	89,65
30,0 - 40,0	4,45	14,80	85,20
40,0 - 50,0	5,57	20,37	79,63
50,0 - 60,0	4,67	25,04	74,96
60,0 - 70,0	7,01	32,06	67,94
70,0 - 80,0	7,04	39,10	60,90
80,0 - 90,0	3,93	43,02	56,98
90,0 - 100,0	8,01	51,03	48,97
100,0 - 105,0	5,62	56,65	43,35
105,0 - 110,0	4,60	61,25	38,75
110,0 - 115,0	5,47	66,71	33,29
115,0 - 120,0	4,90	71,61	28,39
120,0 - 125,0	5,65	77,27	22,73
125,0 - 130,0	8,51	85,78	14,22
130,0 - 135,0	4,93	90,71	9,29
135,0 - 140,0	4,32	95,02	4,98
140,0 - 145,0	3,32	98,35	1,65
145,0 - 150,0	1,65	100,00	0,00

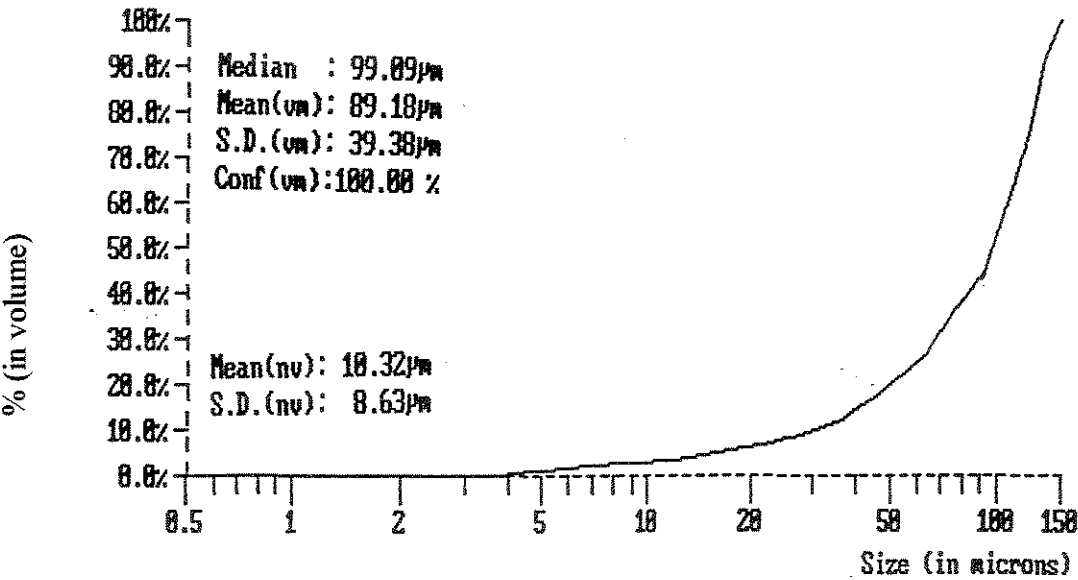


Figura 3.3: Gráfico da probabilidade de distribuição em volume apresentado pelo equipamento GALAI para a amostra nº3.

3.3- Preparo das amostras

Preparamos as amostras por mistura de pó de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone. Realizamos combinações entre três diâmetros de partículas ($<37\mu\text{m}$ 62,5 μm , 89,5 μm), três viscosidades cinemáticas do óleo de silicone (200cSt, 350cSt, 1000cSt) e três quantidades de sólido (20%, 30% e 35% em peso) o que gerou 27 amostras, como pode ser visto na tabela 3.6.

Tabela 3.6- Especificação das amostras utilizadas

	DP (μm)	v (cSt)	ϕ (%p/p)
amostra nº1	<37	200	20
amostra nº2	<37	350	20
amostra nº3	<37	1000	20
amostra nº4	<37	200	30
amostra nº5	<37	350	30
amostra nº6	<37	1000	30
amostra nº7	<37	200	35
amostra nº8	<37	350	35
amostra nº9	<37	1000	35
amostra nº10	62,5	200	20
amostra nº11	62,5	350	20
amostra nº12	62,5	1000	20
amostra nº13	62,5	200	30
amostra nº14	62,5	350	30
amostra nº15	62,5	1000	30
amostra nº16	62,5	200	35
amostra nº17	62,5	350	35
amostra nº18	62,5	1000	35
amostra nº19	89,5	200	20
amostra nº20	89,5	350	20
amostra nº21	89,5	1000	20
amostra nº22	89,5	200	30
amostra nº23	89,5	350	30
amostra nº24	89,5	1000	30
amostra nº25	89,5	200	35
amostra nº26	89,5	350	35
amostra nº27	89,5	1000	35

Realizamos vários ensaios com o óleo de silicone: 1- Em um picnômetro de 11,87cm³, a uma temperatura de 21,5°C, o mesmo apresentou uma massa específica (ρ) de 0,971g/cm³. 2- No reômetro marca HAAKE, modelo RV20, sistema de medida CV20, com controle de temperatura realizado por um banho de recirculação, o óleo de silicone se comportou como fluido Newtoniano ($\tau = \eta_o \dot{\gamma}$) e as viscosidades dinâmicas em Pa.s obtidas estão relacionadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7- Viscosidade dinâmica dos óleos de silicone

VISCOSIDADE CINEMÁTICA	VISCOSIDADE DINÂMICA		
	(Pa.s)		
	20°C	40°C	60°C
(cSt)			
200	0,2279	0,1650	0,1199
350	0,3974	0,2887	0,2038
1000	1,070	0,7690	0,5420

Cada amostra foi testada a três temperaturas (20°C, 40°C, 60°C) e a cada temperatura foi variado o campo elétrico de 0kV/mm até no máximo 7kV/mm. Nem todas as amostras atingiram o campo elétrico máximo, algumas romperam antes, ou seja, romperam ao atingir sua rigidez dielétrica (ruptura dielétrica). Nas amostras com diâmetro de partícula maior (DP = 89,5µm), foi adicionado o estabilizador BAYSILONE na proporção de 10% do sólido, para evitar a formação de precipitado.

3.4- Aparelhagem utilizada

Utilizou-se um viscosímetro da marca HAAKE, modelo RV20, combinado com o sistema de medida CV20ER e uma fonte de alta tensão, tudo acoplado a um computador IBM com softwares fornecidos pela HAAKE para realização das medidas experimentais e posterior manipulação dos resultados obtidos. Um esquema deste sistema de medida pode ser visto na figura 3.4.

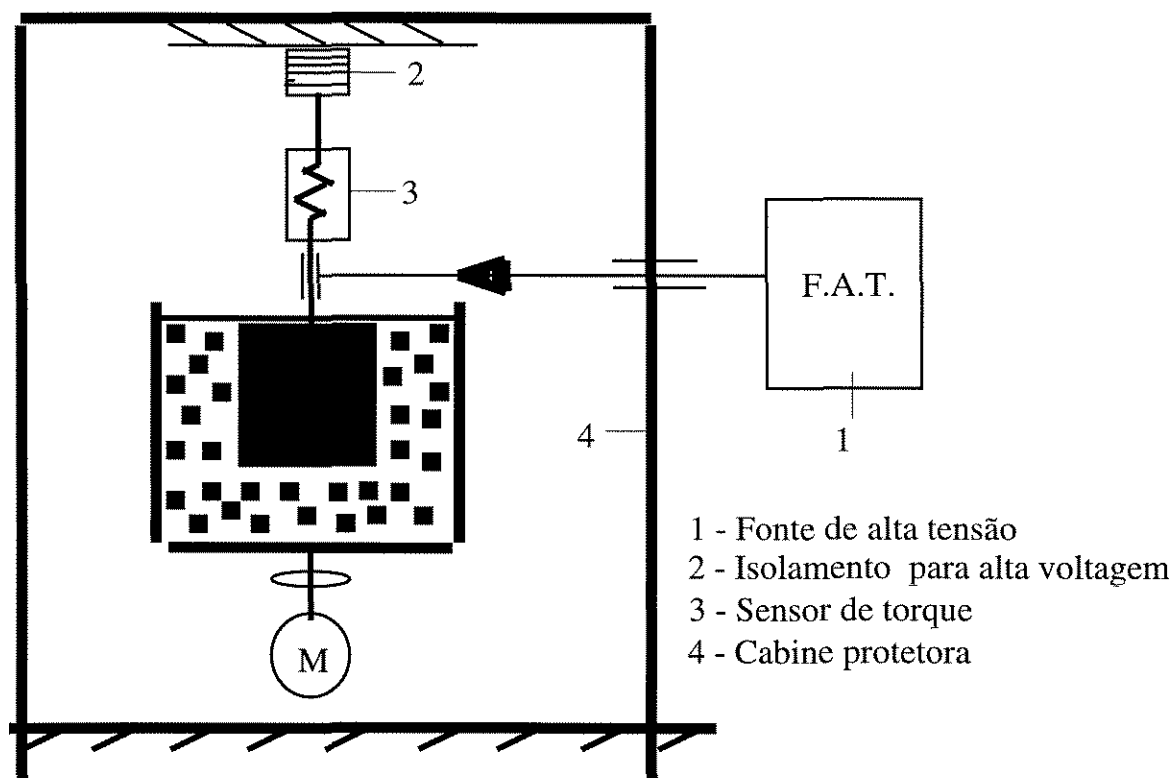


Figura 3.4: Sistema básico de medida - Reômetro rotatório do tipo Couette, com sistema sensor de cilindros concêntricos e com controle da intensidade de campo elétrico.

Para as medidas eletroreológicas foi utilizado no viscosímetro rotatório um sistema sensor constituído de cilindros concêntricos de aço inoxidável, tendo o cilindro interno diâmetro (D_i) de 13,91mm e comprimento de 10,8mm e o cilindro externo diâmetro (D_e) de 15,0mm. O espaço entre os cilindros externo e interno ("gap") é de 0,545mm e deverá ser preenchido pela amostra. Este sistema de sensor foi designado para atuar como eletrodos quando aplicado um campo elétrico. A fonte de alta tensão - corrente contínua - fornece voltagens de até 12500 volts. Os operadores que trabalham com este reômetro tem garantia de absoluta proteção para estas altas voltagens pois todos os elementos carregados do sistema de medida são isolados eletricamente e esta proteção é suplementada por um sistema de segurança adicional na forma de uma cabine que envolve todo o reômetro. O fornecimento de energia elétrica é automaticamente interrompido ao abrir-se a porta da cabine de proteção.

O viscosímetro rotacional é do tipo Couette ou seja, o cilindro externo gira a uma velocidade definida, isto força a amostra existente no espaço entre os cilindros a escoar, a resistência ao cisalhamento da amostra transmite um torque ao cilindro interno, o que o força a girar também. Este torque é medido pela intensidade de torque contrário necessário para manter o cilindro interno parado.

O controle de temperatura é feito através de um banho de recirculação da marca Haake (RC20), que mantém a temperatura constante no cilindro externo do reômetro.

3.5- Procedimento experimental

Após a amostra descansar no mínimo por 6 horas, introduziu-se uma alíquota de $0,6\text{cm}^3$ no espaço entre os cilindros. Escolheu-se para as corridas uma variação para a taxa de deformação de 0s^{-1} até 300s^{-1} (velocidade do cilindro externo), isto num espaço de tempo de 2 minutos e tomando 30 pontos neste intervalo. A corrida compunha-se de duas partes: 1- a tensão de cisalhamento foi obtida com o aumento na taxa de deformação de 0s^{-1} até 300s^{-1} 2- a tensão de cisalhamento foi obtida com a diminuição da taxa de deformação de 300s^{-1} até 0s^{-1} . Para cada amostra na temperatura fixa mantida pelo banho termostático e na voltagem fixa mantida pela fonte elétrica foram obtidos valores médios para a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento correspondente. No total foram realizadas 81 corridas.

A partir dos valores medidos para a tensão de cisalhamento e velocidade angular, a taxa de deformação é calculada pela equação desenvolvida por KRIEGER e MARON (47) truncada após o terceiro termo:

$$\dot{\gamma}_r = \frac{\omega}{\ln \frac{R_e}{R_i}} \left[1 + \ln \frac{R_e}{R_i} \frac{d \ln \omega}{d \ln \tau_r} + \frac{1}{3} \left(\ln \frac{R_e}{R_i} \frac{d \ln \omega}{d \ln \tau_r} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

No mesmo equipamento a tensão de cisalhamento é calculada por:

$$\tau_r = \left[\frac{1}{2\pi \cdot h \cdot r^2} \right] \cdot \sigma \quad (3.3)$$

onde: R_i = raio do cilindro interno (cm)

R_e = raio do cilindro externo (cm)

ω = velocidade angular do cilindro (s^{-1})

h = altura do cilindro interno (cm)

σ = torque a ser medido (N.cm)

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1})

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

A viscosidade aparente é dada por:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

O software do equipamento HAAKE envia para a impressora o valor das variáveis desejadas na forma de tabelas e gráficos tal como nas tabelas 3.8 e 3.9 e na figura 3.5. Além disso, usando o método dos mínimos quadrados calcula os coeficientes e o fator de correlação (R^2) que varia de 0 a 1, para os 10 modelos que seguem:

1 - Newton	$\tau = \eta_o \dot{\gamma}$
2 - Bingham	$\tau = \tau_o + \eta_o \dot{\gamma}$
3 - Ostwald	$\tau = a' (\dot{\gamma})^n$
4 - Herschel Bulkley	$\tau = \tau_o + a' (\dot{\gamma})^n$
5 - Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_o} + \sqrt{\eta_o \dot{\gamma}}$
6 - Linear	$\tau = a' + b' \dot{\gamma}$
7 - Inverso do linear	$\tau = 1 / (a' + b' \dot{\gamma})$
8 - Exponencial	$\tau = a' e^{b' \dot{\gamma}}$
9 - Hiperbólico	$\tau = a' + b' / \dot{\gamma}$
10- Logarítmico	$\tau = a' + b' \ln \dot{\gamma}$

Tabela 3.8- Dados de saída apresentados pelo equipamento Haake ($\dot{\gamma}$ crescente)

Date : 23.Jan 1996 Testdate : 8.Nov 1994
 Substance : SHL, 1.25kV, 20%, 1000cst, Dp
 Test number : 04
 Operator : bete
 Sensor : ZA15 Meas. system : CV20C
 %Tau : 100% %D : 100%
 Factor A : 30.000 Factor M : 3.000 Gap : 0.000 mm
 Data stored in file B:\33HL1220.ROT

Segment number 1 of type 'Tau/D' is defined as :

D from 0.000 to 300.0 1/s in 2.00 min at 20.0°C.

Area is 158600 Pa/s

30 steps are defined, 30 are actually present.

Apparent viscosity:

Eta(min)=2.800 Eta(max)=105.0 Eta ϕ =7.962 s(n-1)=18.48

True viscosity:

Eta(min)=1.879 Eta(max)=5.834 Eta ϕ =2.688 s(n-1)=1.250

Point	Tau[Pa]	D[1/s]	Eta[Pas]	Eta(t)[Pas]	Temp[°C]
1	3.079	0.029	105.000	5.834	20.0
2	120.800	9.081	13.300	5.834	20.0
3	197.600	20.590	9.594	4.836	20.0
4	243.500	28.890	8.428	4.836	20.0
5	292.300	40.320	7.248	4.140	20.0
6	330.900	50.590	6.541	4.140	20.0
7	361.200	60.360	5.984	3.690	20.0
8	390.500	72.040	5.421	3.049	20.0
9	414.000	81.870	5.057	2.671	20.0
10	436.000	91.590	4.760	2.443	20.0
11	457.500	103.200	4.432	2.270	20.0
12	479.000	113.300	4.228	2.153	20.0
13	499.500	123.100	4.057	2.074	20.0
14	519.100	132.800	3.907	2.035	20.0
15	544.500	144.400	3.770	1.999	20.0
16	562.100	154.300	3.642	1.979	20.0
17	581.100	164.200	3.540	1.962	20.0
18	602.200	173.900	3.462	1.943	20.0
19	622.700	185.600	3.355	1.915	20.0
20	642.700	195.400	3.289	1.913	20.0
21	660.800	205.400	3.217	1.892	20.0
22	682.800	217.000	3.147	1.891	20.0
23	700.900	226.700	3.091	1.896	20.0
24	718.000	236.600	3.035	1.879	20.0
25	736.600	246.600	2.987	1.890	20.0
26	760.000	258.100	2.945	1.881	20.0
27	778.600	268.000	2.905	1.890	20.0
28	797.200	277.800	2.870	1.891	20.0
29	819.600	289.400	2.832	1.902	20.0
30	837.700	299.200	2.800	1.909	20.0

Tabela 3.9- Dados de saída apresentados pelo equipamento Haake
($\dot{\gamma}$ decrescente)

Segment number 2 of type 'Tau/D' is defined as :
D from 300.0 to 0.000 1/s in 2.00 min at 20.0°C.
Area is 155600 Pa/s
30 steps are defined, 30 are actually present.

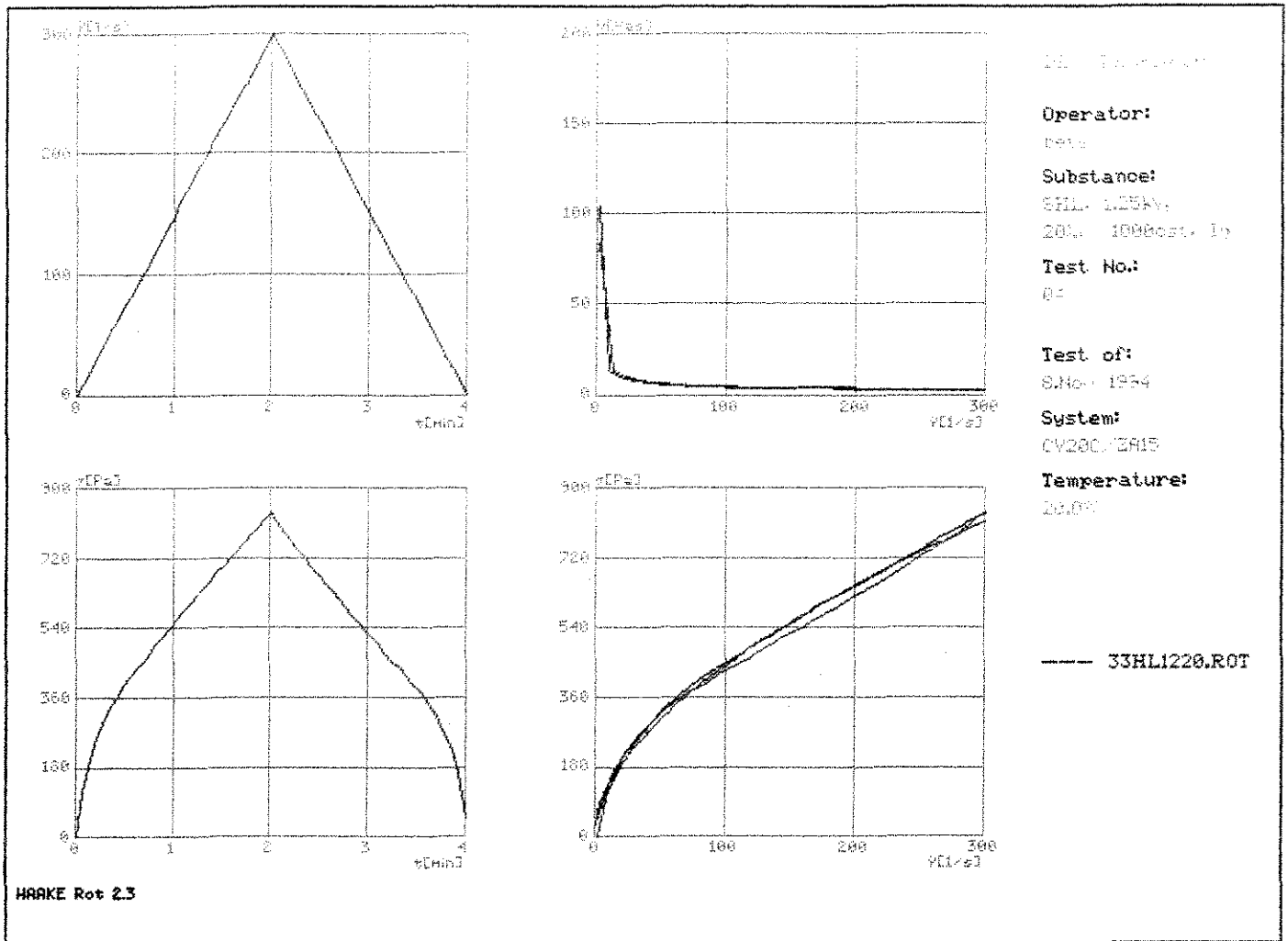
Apparent viscosity:

Eta(min)=2.797 Eta(max)=84.20 Eta ϕ =7.151 s(n-1)=14.76

True viscosity:

Eta(min)=1.920 Eta(max)=4.771 Eta ϕ =2.410 s(n-1)=0.7040

Point	Tau[Pa]	D[1/s]	Eta[Pas]	Eta(t)[Pas]	Temp[°C]
1	838.700	299.900	2.797	2.251	20.0
2	814.800	290.900	2.801	2.251	20.0
3	787.400	279.400	2.818	2.188	20.0
4	764.900	269.600	2.838	2.188	20.0
5	743.900	259.600	2.866	2.140	20.0
6	722.900	249.600	2.896	2.140	20.0
7	699.400	238.200	2.936	2.108	20.0
8	678.900	228.200	2.975	2.048	20.0
9	659.300	218.400	3.019	2.012	20.0
10	636.400	206.800	3.077	1.979	20.0
11	616.800	197.100	3.130	1.967	20.0
12	596.300	187.000	3.188	1.950	20.0
13	577.200	177.200	3.257	1.943	20.0
14	557.700	165.700	3.366	1.923	20.0
15	539.100	155.700	3.462	1.920	20.0
16	520.000	145.900	3.563	1.928	20.0
17	500.000	136.100	3.675	1.921	20.0
18	477.500	124.600	3.833	1.931	20.0
19	458.000	114.700	3.994	1.955	20.0
20	440.900	104.700	4.211	2.031	20.0
21	418.900	93.260	4.492	2.124	20.0
22	396.400	83.330	4.757	2.294	20.0
23	378.300	73.510	5.146	2.546	20.0
24	359.200	63.540	5.654	3.121	20.0
25	331.900	52.100	6.370	2.738	20.0
26	301.600	42.130	7.158	3.469	20.0
27	266.000	31.570	8.426	3.037	20.0
28	222.800	22.140	10.070	3.982	20.0
29	164.200	12.100	13.570	3.444	20.0
30	53.910	0.640	84.200	4.771	20.0



Newton	: $\tau = \text{Eta} * D$	$R^2=0.01$	Eta=3.482
Bingham	: $\tau = \tau_0 + \text{Eta} * D$	$R^2=0.96$	$\tau_0=183.4$ Eta=2.259
Ostwald	: $\tau = a * D^n$	$R^2=0.98$	a=36.63 n=0.5449
H.-Bulkley	: $\tau = \tau_0 + a * D^n$	$R^2=0.99$	a=28.46 n=0.5804 $\tau_0=33.82$
Casson	: $\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\text{Eta} * D}$	$R^2=0.96$	$\tau_0=68.42$ Eta=1.481
Linear	: $Y = a + b * X$	$R^2=0.96$	a=183.4 b=2.259
Inv. linear:	$Y = 1 / (a + b * X)$	$R^2=0.06$	a=0.0253 b=-116.2E-06
Exponential:	$Y = a * \text{EXP}(b * X)$	$R^2=0.49$	a=168.0 b=0.006441
Hyperbolic	: $Y = a + b / X$	$R^2=0.12$	a=531.8 b=-16.23
Logarithmic:	$Y = a + b * \text{LN}(X)$	$R^2=0.70$	a=-4.991 b=115.4

Optimum :
H.-Bulkley : $\tau = \tau_0 + a * D^n$ $R^2=0.99$ a=28.46 n=0.5804 $\tau_0=33.82$

Figura 3.5: Gráficos e ajuste dos dados apresentados pelo equipamento Haake

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1- Comportamento reológico das suspensões

Nas curvas reológicas a serem apresentadas é importante observar-se que o “software” do equipamento HAAKE fornece a média aritmética das tensões de cisalhamento para cada taxa de deformação crescente e decrescente.

Mostra-se graficamente no Apêndice A através das figuras A.1 a A.27 as curvas de escoamento e nas figuras A.28 a A.54 as curvas de viscosidade aparente. As curvas de escoamento relacionam a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) e as curvas de viscosidade aparente, relacionam a viscosidade aparente (η_a) com a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). Esses resultados experimentais definem o comportamento reológico das suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone para os diversos parâmetros, -temperatura (T) - intensidade de campo elétrico (E) -diâmetro de partículas (DP) -fração em peso de sólidos (ϕ) e -viscosidade cinemática do óleo de silicone (ν). Excetuando-se a intensidade de campo elétrico para o qual foi possível a variação em até 14 níveis diferentes, as outras variáveis foram analisadas em três diferentes níveis.

As principais observações acerca das figuras citadas são as seguintes:

1- Para $E=0$ as suspensões comportam-se como fluido Newtoniano e à medida que E aumenta o comportamento é de um fluido que possui tensão mínima de escoamento e em geral um comportamento linear após essa tensão mínima. Na literatura de fluidos não newtonianos esses fluidos são denominados de fluidos com comportamento plástico, sendo o modelo normalmente adotado para a sua descrição ($E > 0$) o denominado modelo de fluido de Bingham, cuja equação é:

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} \quad (4.1)$$

em que τ_0 = tensão limite de escoamento de Bingham

η_B = viscosidade de Bingham

Analísaram-se os coeficientes de correlação obtidos nos ajustes dos dados experimentais e identificou-se o modelo de fluido de Bingham como adequado à representação destes. Essa escolha baseou-se na simplicidade desse modelo de fluido não newtoniano, que apresenta apenas dois parâmetros e no fato de que os valores dos coeficientes de correlação para o ajuste dos dados que não apresentam histerese apresentarem-se sempre superiores a 0,90. Para valores elevados da intensidade de campo elétrico, na qual a histerese é verificada, observou-se que os ajustes pelo modelo de fluido de Bingham possuem qualidade inferior à dos dados sem histerese, com coeficientes de correlação da ordem de 0,70. Manteve-se o modelo de Bingham para efeito de comparação e por terem ainda coeficientes de correlação superiores aos de outros modelos clássicos a dois parâmetros apresentados no “software” do equipamento Haake, como visto no Capítulo 3. Nas curvas reológicas onde a histerese é importante, o procedimento de valores médios indicou um melhor ajuste na maioria dos casos para o modelo de Herschel Bulkley. No entanto devido à maior complexidade desse modelo que apresenta três parâmetros, não realizou-se uma análise mais aprofundada sobre o correlacionamento dos parâmetros desse modelo.

Outra vantagem do uso do modelo de fluido de Bingham é que a literatura sobre fluidos eletroreológicos (1,2,8,11,21-25) faz uso extensivo desse modelo no correlacionamento dos dados experimentais. A escolha desse modelo no presente trabalho permite portanto uma comparação mais efetiva entre os resultados dos diversos autores.

2- A viscosidade aparente decresce rapidamente com o aumento da taxa de deformação até valores de $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ e tende a um valor constante no intervalo de $\dot{\gamma}$ entre 100 s^{-1} e 300 s^{-1} .

3- As curvas reológicas apresentam o fenômeno reopético (acréscimo

de viscosidade aparente com relação à duração da taxa de deformação) nas intensidades de campo elétrico 0,92 kV/mm e 1.83 kV/mm. Por outro lado, têm-se o comportamento tixotrópico (diminuição da viscosidade aparente com relação à duração da taxa de deformação) para $E > 2.29$ kV/mm.

4- Em todos os experimentos realizados com as suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone, observou-se que o fenômeno da histerese aumenta com o aumento de E .

Durante todos os testes realizados, observou-se que a intensidade de corrente foi baixa não ultrapassando o valor de 0,05 mA e que sempre aumentava com o aumento na intensidade de campo elétrico. Essa característica das suspensões estudadas é importante nas aplicações das mesmas tendo em vista o baixo consumo de potência.

4.2- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação na intensidade de campo elétrico

Têm-se no Apêndice B, figuras B.1 a B.9, a variação da tensão de escoamento de Bingham correlacionados com a intensidade de campo elétrico ao quadrado em função dos diversos parâmetros - T , D_p , ϕ , v . Esse tipo de correlacionamento já foi apontado por diversos autores (1,2,8 e 11), facilitando a interpolação de resultados em função da intensidade de campo elétrico.

Nas figuras B.10 a B.18, do Apêndice B, mostra-se as variações do parâmetro viscosidade de Bingham com a intensidade de campo elétrico ao quadrado para as suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone. Essas variações estão indicadas em função dos diversos parâmetros - T , D_p , ϕ , v .

Observa-se a partir desses resultados que:

1- A tensão de escoamento de Bingham das suspensões estudadas pode ser correlacionada com o quadrado da intensidade de campo elétrico.

2- para diâmetros de partículas menores que 37×10^{-3} mm a viscosidade de Bingham varia muito pouco com a intensidade de campo elétrico ao quadrado.

mas a medida que o mesmo aumenta a variação torna-se significativa.

É importante observar-se que o comportamento não linear de τ_o com o quadrado da intensidade de campo elétrico só pode ser verificado para valores elevados de E ($E > 4\text{kV/mm}$). Poucos trabalhos na literatura (20) conseguiram atingir valores tão elevados de E e portanto sugerem apenas a variação linear de τ_o com E^2 . Considera-se portanto que essa verificação é uma das contribuições do presente trabalho de pesquisa.

WEISS, CARLSON e COULTER (20) apresentaram dados da tensão limite de escoamento variando com o campo elétrico($\tau_o \times E$) para diversas suspensões. Na tabela 4.1 apresentam-se estas suspensões e uma do nosso trabalho.

Tabela 4.1- Suspensões apresentadas na literatura (20) e uma suspensão deste trabalho

Nº	FASE DISPERSA	FLUIDO BASE	QUANTIDADE DE FASE DISPERSA (p/p)
1	álcool polivinílico	óleo de vaselina	35%
2	sílica	óleo de silicone	3.16%
3	zeólita	óleo de silicone	34%
4	areia - alifática	óleo de silicone	50%
5	polieletrólito	óleo	
6	sulfato de hidrazina-lítio	óleo de silicone	35%

Na tabela 4.2 comparam-se os dados da tensão limite de escoamento mínima e máxima com as respectivas intensidades de campo elétrico para as suspensões da tabela 4.1.

Tabela 4.2- Comparação entre os dados das suspensões da tabela 4.1

Nº-	E mín. (kV/mm)	E máx. (kV/mm)	τ_o mín. (Pa)	τ_o máx. (Pa)
1	1	3	10	50
2	0,5	2	10	40
3	1	2	50	220
4	1	4	300	1240
5	1	2,5	800	4060
6	0,92	6,88	14	1863

4.3- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação da temperatura

Para as três temperaturas analisadas experimentalmente, obtiveram-se os resultados apresentados no Apêndice C, nas figuras C.1 a C.9 para a tensão limite de escoamento e nas figuras C.10 a C.18 para a viscosidade de Bingham. Sobre os resultados pode-se inferir o seguinte:

1- Ocorre um aumento linear da tensão limite de escoamento (τ_o) com a temperatura para intensidades de campo elétrico mais elevadas (maiores que 3,21 kV/mm) e diâmetros maiores ($DP=89.5\mu m$).

2- A variação da tensão limite de escoamento (τ_o) com a temperatura para intensidades de campo menores que 3,21 kV/mm é pouco perceptível.

3- O parâmetro viscosidade de Bingham (η_B) de todas as suspensões analisadas decresceu com o aumento da temperatura..

As observações acima estão de acordo com os resultados de Conrad et al. (41) para suspensões de zeólita em óleo de silicone. Não foi possível, por limitações do equipamento utilizado, a investigação do efeito de temperaturas mais elevadas que 60 °C.

4.4- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação da fração em peso de sólidos

A partir dos gráficos apresentados no Apêndice D, nas figuras D.1 a D.9 verifica-se que os maiores efeitos de aumento da tensão mínima de escoamento com a fração em peso de sólidos ocorrem para o diâmetro intermediário de partículas ($DP = 62,5 \mu m$). Para os outros dois diâmetros de partículas analisados o efeito da concentração de partículas é pouco pronunciado.

Apresentam-se nos gráficos do Apêndice D., nas figuras D.10 a D.18 a relação entre a viscosidade de Bingham (η_B) e a fração em peso. Observa-se que para diâmetros de partículas menores que $37 \mu m$ η_B aumenta com o aumento de ϕ , para os outros diâmetros de partículas estudados, até a intensidade de campo elétrico de $2,29 kV/mm$, não há muita influência de ϕ em η_B , mas a medida que a intensidade de campo elétrico aumenta, η_B sofre variações não uniformes ora aumenta com ϕ ora diminui com ϕ .

4.5- Comportamento dos dados obtidos para a tensão limite de escoamento e viscosidade de Bingham com a variação do tamanho das partículas

No Apêndice E, nas figuras E.1 a E.9 têm-se os gráficos da variação da tensão limite de escoamento com os diâmetros das partículas para os diversos parâmetros - T, E, ϕ e v. Pode-se observar que de maneira geral a tensão limite de escoamento sofre pouca variação com os diâmetros das partículas. O efeito dos diâmetros das partículas na tensão limite de escoamento torna-se significativo a medida que: 1- a fração em peso aumenta, 2- a temperatura aumenta independente mente da viscosidade dos óleos de silicone.

No Apêndice E, nas figuras E.10 a E.18 têm-se os gráficos da variação da viscosidade de Bingham com os diâmetros das partículas para os diversos parâmetros - T, E, ϕ e v.

4.6- Comportamento dos dados obtidos para a viscosidade aparente de Bingham das suspensões em função do parâmetro adimensional número de Mason

Nos gráficos das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam-se o correlacionamento da viscosidade aparente de Bingham $(\eta_a)_B$ dada por:

$$(\eta_a)_B = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + \eta_B \quad (4.2)$$

com o grupamento adimensional Número de Mason (Mn) dado por:

$$Mn = \frac{\eta_f \dot{\gamma}}{2\epsilon_o \beta^2 E^2} \quad (4.3)$$

Este grupamento já foi apresentado no Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) e contém uma relação entre as forças viscosas e de polarização.

Na equação 4.3 tem-se que η_f é a viscosidade do fluido base, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, E é a intensidade do campo elétrico, ϵ_o é a permissividade do vácuo e tem o valor de $8.854 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^2 \text{ C}^2$ e β é o coeficiente de dipolo da partícula e é igual a $(K_p - K_f)/(K_p + 2K_f)$ sendo K_p (ϵ_p / ϵ_o) a permissividade total relativa ou constante dielétrica da partícula e K_f (ϵ_f / ϵ_o) a permissividade total relativa ou constante dielétrica do fluido base. A constante dielétrica da partícula do sólido sulfato de hidrazina-lítio foi determinada por SCHMIDT et al (43) e é dada por $K = K' + iK''$, sendo $K' = 1.8 \times 10^3$ e $K'' = 2 \times 10^3$. CONRAD et al. (44) encontraram que para o óleo de silicone a constante dielétrica é igual a 2,5.

Segundo GAST e ZUKOSKI (6) o coeficiente de dipolo das partículas é uma medida da polarização da partícula em um campo elétrico externo. Se a partícula tem uma constante dielétrica igual à do fluido base, pode polarizar-se na mesma extensão que o fluido base resultando em nenhum acúmulo de cargas polarizadas em sua superfície, isto é $K_p/K_f = 1$ e $\beta = 0$. Se por outro lado $K_p/K_f \neq 1$

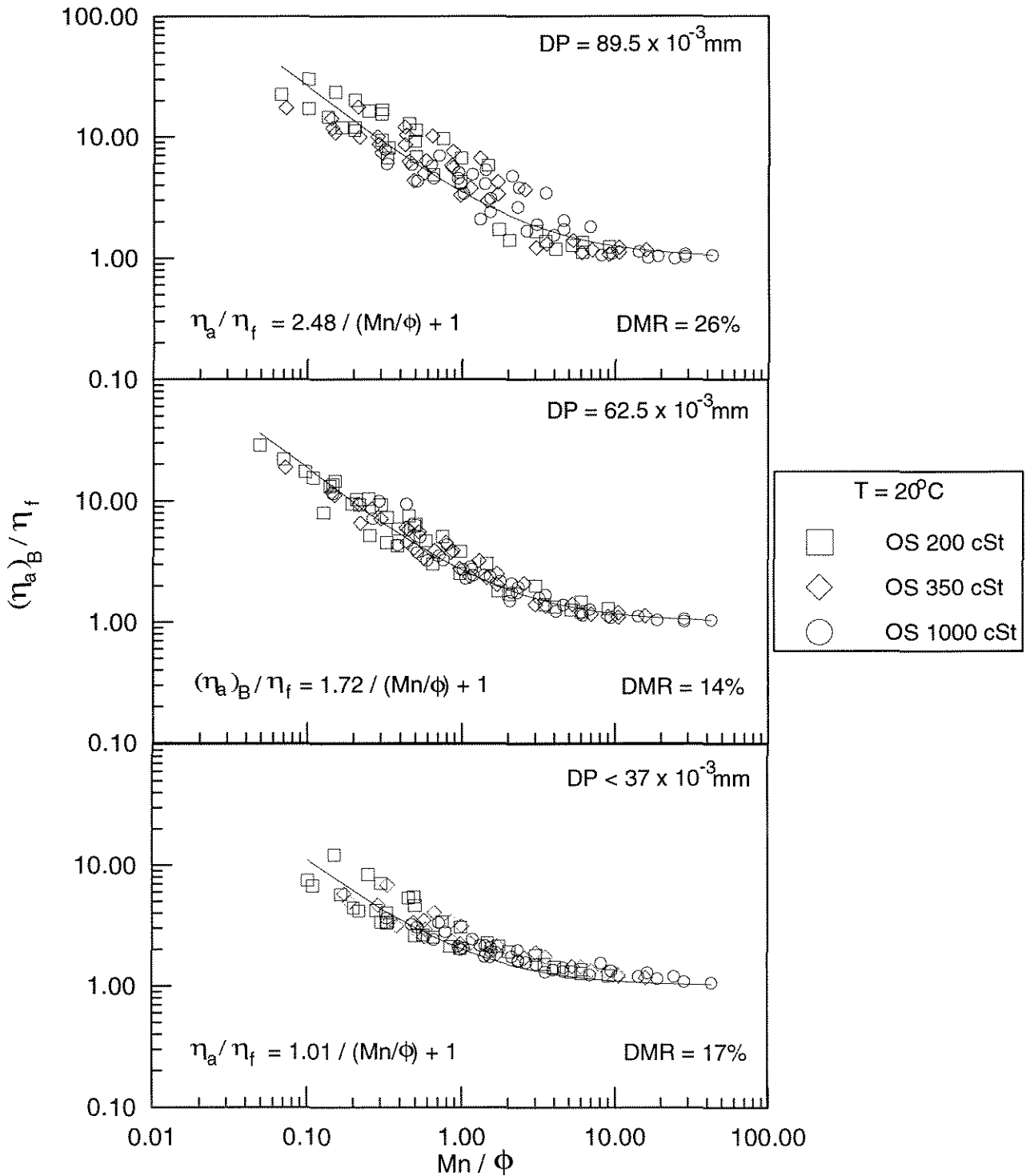


Figura 4.1 : Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do Número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone à temperatura de 20°C . Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais à equação teórica e o desvio médio relativo (DMR).

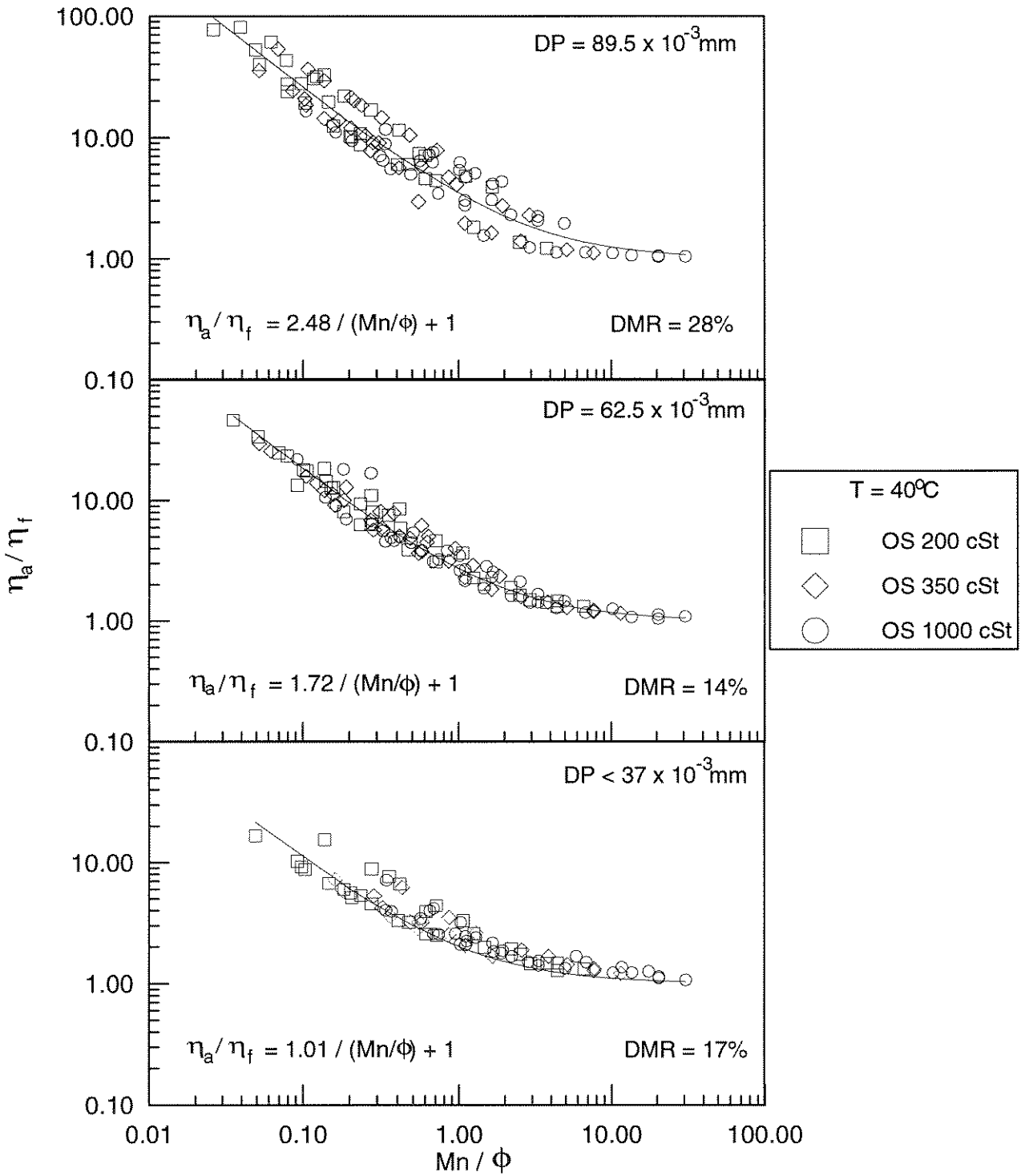


Figura 4.2 : Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do Número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone à temperatura de 40°C . Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais à equação teórica e o desvio médio relativo (DMR).

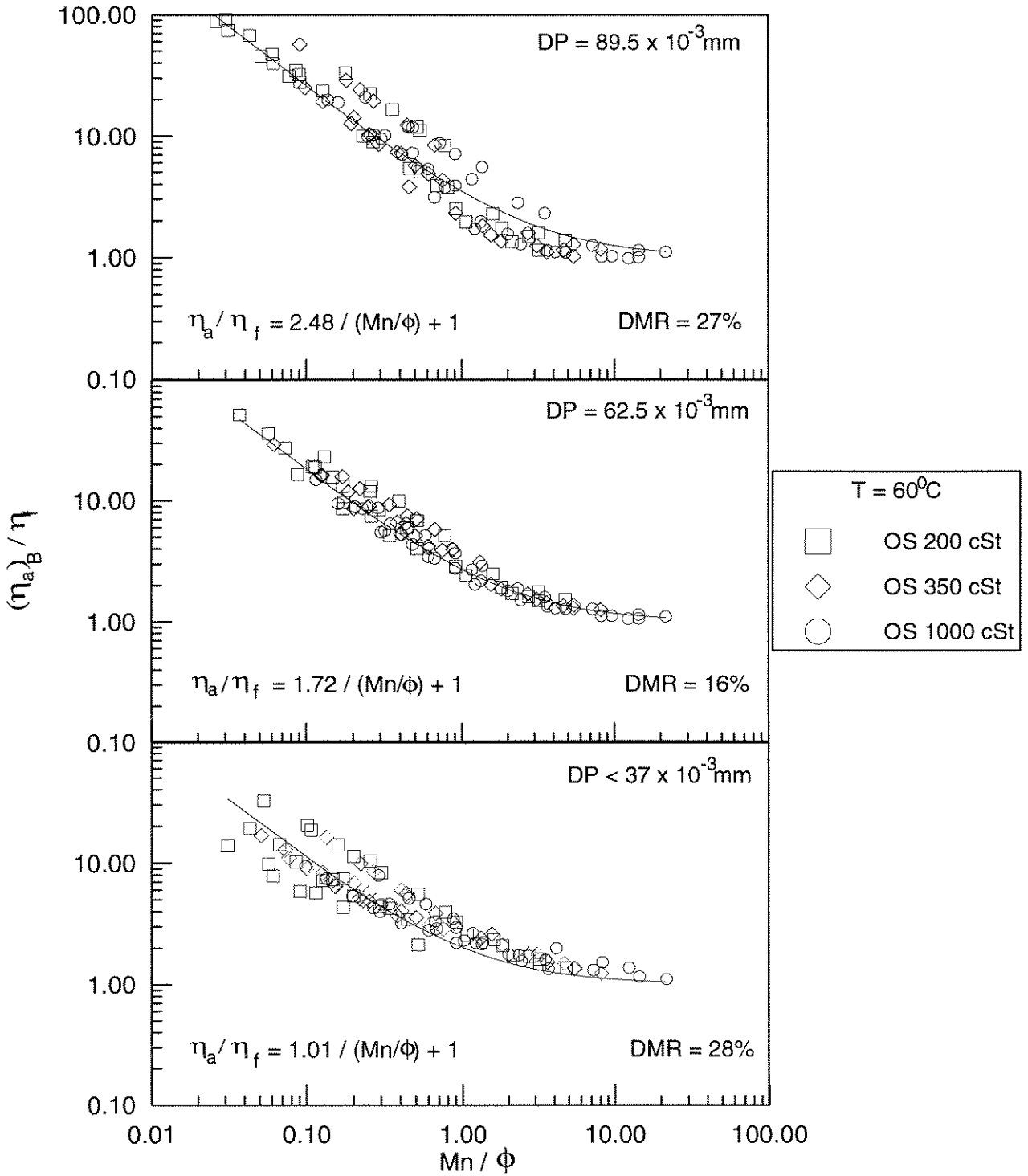


Figura 4.3 : Viscosidade aparente de Bingham dividida pela viscosidade do fluido base em função do Número de Mason dividido pela fração em peso de sólidos, para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone à temperatura de 60°C . Também é mostrado o ajuste dos pontos experimentais à equação teórica e o desvio médio relativo (DMR).

as diferentes habilidades dos dois materiais para polarização permite uma separação de cargas na superfície da partícula e esta adquire um momento de dipolo. Dois importantes limites podem então ser considerados: a- $K_p/K_f \ll 1$, $\beta = -1/2$, b- $K_p/K_f \gg 1$, $\beta = 1$. No nosso caso como pode-se observar $\beta = 1$.

A ordenada desses gráficos está na forma adimensional, dividindo-se a viscosidade aparente de Bingham $(\eta_a)_B$ pela viscosidade do fluido base (η_f) . e na abscissa temos o grupamento adimensional Mason (Mn) dividido pela fração em peso do sólido (ϕ).

Utilizou-se o “software Table curve” do pacote “Sigma plot” para o ajuste dos dados experimentais nos gráficos mostrados nas figuras 4.1 4.2, 4.3. Verificou-se que os dados podem ser descritos por uma equação geral do tipo :

$$\frac{(\eta_a)_B}{\eta_f} = \frac{A}{Mn / \phi} + 1 \quad (4.4)$$

Uma observação importante sobre o parâmetro adimensional A é que o mesmo é constante na faixa de taxas de deformação de 0 a 300 s^{-1} para as temperaturas de 20°C , 40°C e 60°C e para os três fluidos base utilizados (viscosidades cinemáticas de 200, 350 e 1000 centistokes), variando apenas com o diâmetro de partículas. Os valores de A em função de DP estão mostrados graficamente na figura 4.130.

Obteve-se o desvio médio relativo (DMR) de $(\eta_a)_B / \eta_f$ entre os dados experimentais e calculados através das equações de ajuste mostrados na tabela 4.3, utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{DMR \%} = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \text{ABS} \left(\frac{Y_{i \text{ exp.}} - Y_{i \text{ cal.}}}{Y_{i \text{ exp.}}} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Na tabela 4.3 mostram-se também os valores obtidos para o desvio médio relativo

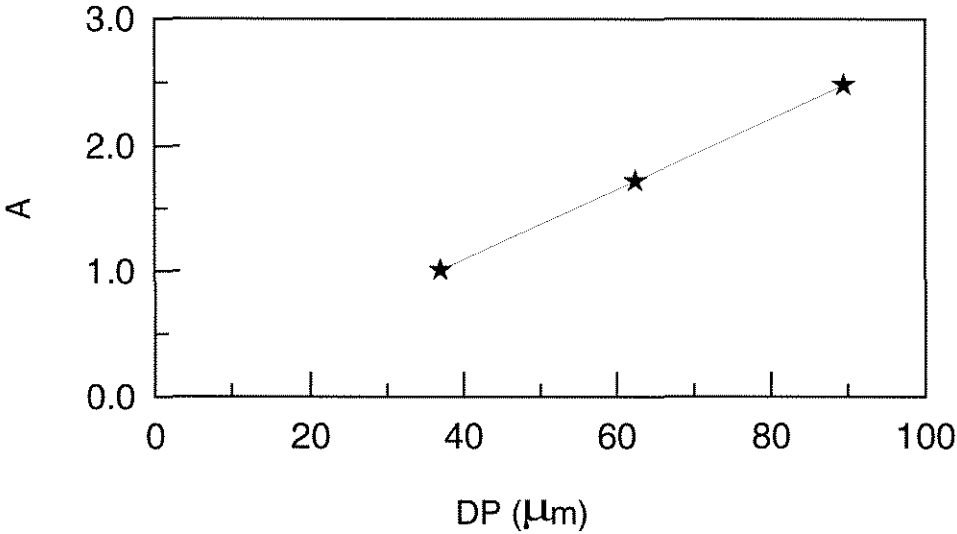


Figura 4.4 : Valores de A em função do diâmetro das partículas

Tabela 4.3: Valores dos desvios médios relativos de $(\eta_a)_B / \eta_f$ entre os dados obtidos experimentalmente e os obtidos pela equação de ajuste

DP (μm)	T (°C)	EQUAÇÕES DE AJUSTE	DMR (%)
<37	20	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.01/(Mn/\phi)+1$	17
62,5	20	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.72/(Mn/\phi)+1$	14
89,5	20	$(\eta_a)_B/\eta_f = 2.48/(Mn/\phi)+1$	26
<37	40	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.01/(Mn/\phi)+1$	17
62,5	40	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.72/(Mn/\phi)+1$	14
89,5	40	$(\eta_a)_B/\eta_f = 2.48/(Mn/\phi)+1$	26
<37	60	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.01/(Mn/\phi)+1$	28
62,5	60	$(\eta_a)_B/\eta_f = 1.72/(Mn/\phi)+1$	16
89,5	60	$(\eta_a)_B/\eta_f = 2.48/(Mn/\phi)+1$	27

Esse tipo de correlacionamento é bastante útil pela sua generalidade, permitindo a previsão da viscosidade aparente de Bingham das suspensões estudadas em uma ampla faixa de variáveis.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1- Conclusões

O trabalho de pesquisa que deu origem à presente tese de doutorado tem características pioneiras no nosso país, abrindo algumas perspectivas para a utilização do fenômeno eletroreológico.

As principais conclusões obtidas a partir dos capítulos apresentados anteriormente são as seguintes:

- As suspensões de partículas de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone exibem forte comportamento eletroreológico sob intensidade de campo elétrico de até 7kV/mm.
- Durante todos os testes realizados a intensidade de corrente foi baixa não ultrapassando o valor de 0,05 mA. Esta característica das suspensões estudadas é importante nas aplicações das mesmas tendo em vista o baixo consumo de potência.
- Os dados obtidos com estas suspensões podem ser ajustados pelo modelo de Bingham numa larga faixa de taxas de deformação (5 a 300s^{-1}) e com tensões limite de escoamento de até 2000Pa.
- Os parâmetros reológicos de Bingham podem ser correlacionados com o quadrado da intensidade de campo elétrico, temperatura fração em peso de sólidos, e diâmetros das partículas.
- De uma maneira geral as suspensões de partículas de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone cujo diâmetro de partículas era $37\mu\text{m}$ e $62,5\mu\text{m}$ apresentaram comportamento mais uniforme dos parâmetros reológicos

de Bingham com as diversas variáveis estudadas. As partículas de diâmetro maior ($89,5\mu\text{m}$) atingiram intensidades de campo elétrico mais altas e consequentemente tensões limite de escoamento mais altas. Essa não uniformidade é provavelmente devido a sedimentação das partículas no fluido.

- Foram obtidas correlações adimensionais para a viscosidade aparente de Bingham em função do número de Mason que relaciona as forças viscosas e de polarização.

5.2- Sugestões

Para dar continuidade ao presente trabalho, ficam as seguintes sugestões:

- Nos gráficos de viscosidade aparente versus taxa de deformação mostrados no Capítulo 4, algumas suspensões apresentaram características pseudoplásticas, interessante seria que estudos mais aprofundados fossem realizados nesse sentido.

- Os dados apresentados para a variação dos parâmetros de Bingham com o quadrado da intensidade de campo elétrico, temperatura fração em peso de sólidos, e diâmetros das partículas poderão ser justificados por tratamento matemático.

- O aumento da tensão limite de escoamento de Bingham através da adição de proteínas às suspensões como mostra KLINGENBERG et al. (46) indica uma nova vertente de pesquisa a ser explorada em futuros trabalhos nessa área..

BIBLIOGRAFIA

1. WINSLOW, W.M. *U.S. Patent* N^o 2,417,850, 1947.
2. WINSLOW, W.M. *Journal Applied Physics* **20**: 1137, 1949.
3. STANGROON, J.E. *Physics Technol.* **14**: 290, 1983.
4. BLOCK, H.; KELLY, J.P. *Journal Physics D: Appl. Phys.* **21**: 1661, 1988.
5. GAST, A.P.; ZUKOSKI, C.F. *Adv. Colloid Interface Sci.* **30**: 153, 1989.
6. JORDON, T.C.; SHAW, M.T. *IEEE Trans. Eletrical Insulation* **24**: 849, 1989.
7. HALSEY, T.C.; MARTIN, J.E. *Scientific American* : 58, 1993.
8. UEJIMA, H. *Japanese Journal Appl. Physics* **11**: 319, 1972.
9. KOVGANICH, N.YA.; DEINEGA, YU.; KURILENKO, O. D. *Akad. Nauk Ukr. SSR* 259, 1968
10. SUGIMOTO, N. *Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers* **20**: 1476, 1977.
11. KLASS, D.L.; MARTINEK, T.W. *Journal Appl. Physics* **38**: 67, 1967
12. KLASS, D.L.; MARTINEK, T.W. *Journal Appl. Physics* **38**: 75, 1967
13. SPRECHER, A.F.; CARLSON, J.D.; CONRAD, H. *Mat. Science Engr.* **95**: 187, 1987.
14. DEINEGA, YU.F.; VINOGRADOY, G.V. *Rheologica Acta* **23**: 636, 1984.
15. CARLSON, J.D. *U.S. Patent* N^o 4,772,407, 1988.
16. THURSTON, G.B.; GAERTNER, E.B. *Journal of Rheology* **35**: 1327, 1991.
17. GOODWIN, J.W. In: KRIEGER, I.M. et al. *Research Needs Assessment Rport on Electrorheological (ER) Fluids*. U.S. Departament of Energy, 1983. Cap.5.6.

18. DUCLOS, T.G. *SAE Technical paper series 881134*. Schenectady N.Y., Society of Automotive Engineers, 1988. 5pp.
19. HARTSOCK, D.L.; NOVAK, R.F.; CHAUNDY, G.J. *Journal of Rheology* **35**: 1305, 1991.
20. WEISS, K.D.; CARLSON, J.D.; COULTER, J.P. In: MELVYN A. KOHUDIC, ed. *Advances in Intelligent Material Systems and Structures - volume 2: Advances in Electrorheological Fluids*. Lancaster, Technomic Publishing Company. p 30.
21. ZUKOSKI, C.F.; GOODWIN, J.W. *IEEE IECON'86* : 9, 1986.
22. JORDON, T.C.; SHAW, M.T. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 231.
23. BROOKS, D.; GOODWIN, J.; HJELM, C.; MARSHALL, L.; ZUKOSKI, C. *Colloids Surface* **18**: 293, 1986.
24. BROOKS, D.A. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 371.
25. BROOKS, D.A. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 1st Int. Symp. Electrorheological Fluids*. Raleigh - NC, NCSU Engr. Publ., 1989. p. 63.
26. MARSHALL, L.; GOODWIN, J.W.; ZUKOSKI, C.F. *Journal Chem. Soc., Farady Trans.* **85**: 2785, 1989.
27. FILISKO, F.E.; RADZILOWSKI, L.H. *Journal of Rheology* **34**: 539, 1990.
28. SPRECHER, A.F.; CHEN, Y.; CONRAD, H. *unpublished* NCSU 1990.
29. INOUE, A. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 176.
30. JORDON, T.C.; SHAW, M. T. Paper N° 44B. *Annual Meeting A. I. Chem. Engrs.*, Dec. 1988.

31. BLOCK, H.; KELLEY, J.P. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 1st Int. Symp. Electrorheological Fluids*. Raleigh - NC, NCSU Engr. Publ., 1989. p. 1.
32. OPPERMAN, G.; PENNERS, G.; SCHULZE, M.; MARQUARDT, G.; FINDT, R. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 287.
33. SMITH, K.L.; FULLER, G.G. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 1st Int. Symp. Electrorheological Fluids*. Raleigh - NC, NCSU Engr. Publ., 1989. p. 27.
34. CONRAD, H.; FISHER, M.; SPRECHER, A.F. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 63.
35. PHILLIPS, R.W. *Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress*. 1969 (D. Engr. Thesis, Univ. Calif. Berkeley).
36. SPRECHER, A.F.; CHEN, Y.; CONRAD, H. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p. 82.
37. KLINGENBERG, D.J.; ZUKOSKI, C.F. *Langmuir* **6**: 15, 1990.
38. BONNECAZE, R.T.; BRADY, J.F. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p.27.
39. CONRAD, H.; SPRECHER, A.F. *unpublished* NCSU 1990.
40. CONRAD, H; SHAMALA, A.R.;SPRECHER, A.F. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 1st Int. Symp. Electrorheological Fluids*. Raleigh - NC, NCSU Engr. Publ., 1989. p. 47.
41. CONRAD, H.; CHEN, Y.; SPRECHER, A.F., . In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H. eds. *Proc. 2nd Int. Conf.*

- Electrorheological Fluids*. Lancaster - Basel, Technomic Publ. Co., 1990. p.252.
42. DUCLOS, T.G.; ACKER, D.N.; CARLSON, J.D. *Machine Design* **60**: 42, 1988.
 43. SCHMIDT, V.H.; DRUMHELLER, J.E.; HOWELL, F.L. *Physical Review B* **4**: 4582, 1971.
 44. CONRAD, H.; SPRECHER, A.F.; CHOI, Y.; CHEN, Y. *Journal of Rheology* **35**: 1393, 1991.
 45. KOROBKO,E.V.; SHULMAN,Z.P. In: CARLSON, J.D.; SPRECHER, A.F.; CONRAD, H., eds. *Proc. 1st Int. Symp. Electrorheological Fluids*. Raleigh - NC, NCSU Engr. Publ., 1989. p. 115
 46. KLINGENBERG,D.J.; PAKDEL, P.; KIM, Y.D.; BELONGIA, B.M.; KIM, S. *Ind. Eng. Chem. Res.* **34**: 3303, 1995.
 47. KRIEGER, I.M.; MARON, S. M. *Journal Appl. Phys.* **25**: 72, 1954.

APÊNDICE A

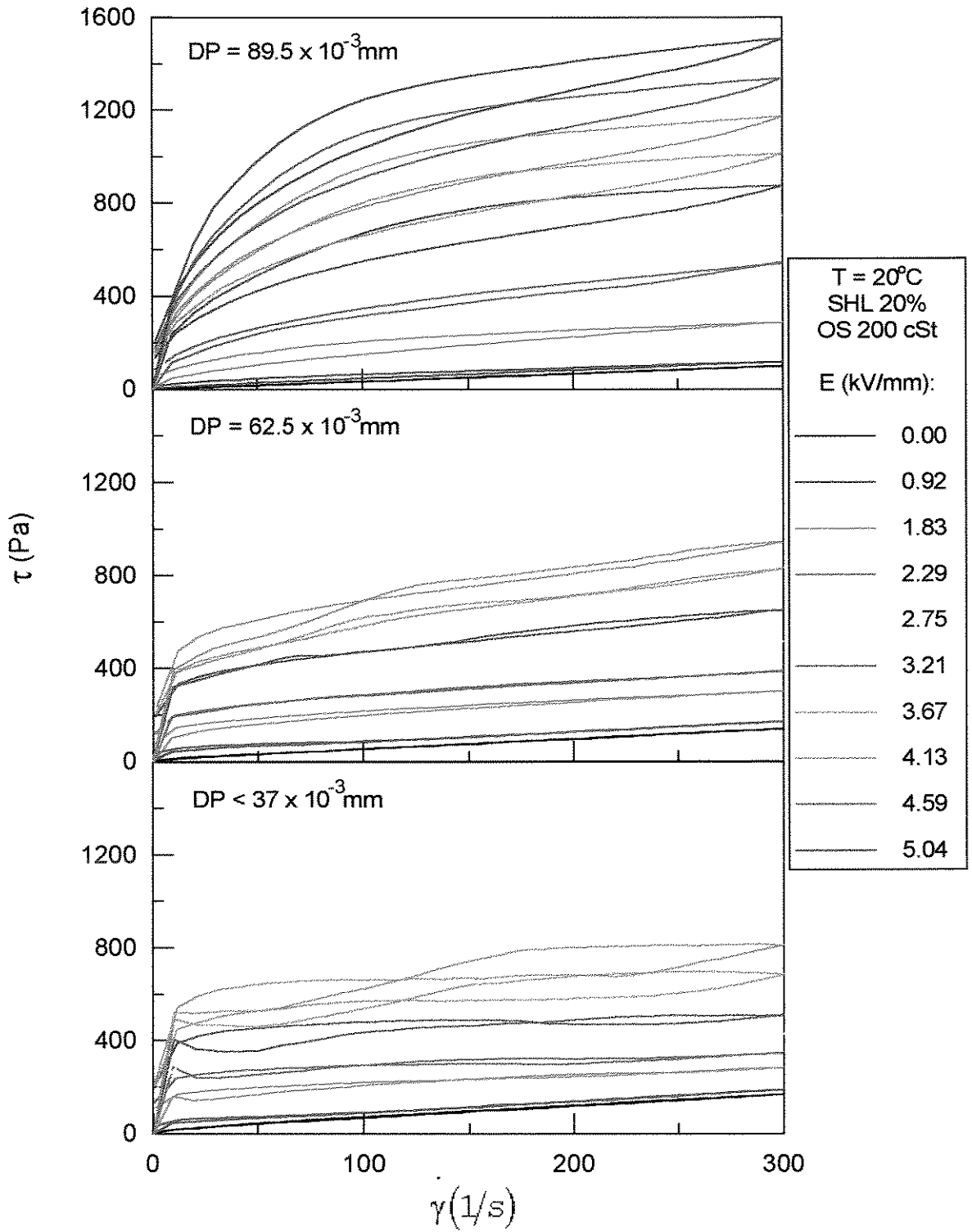


Figura A.1 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C .

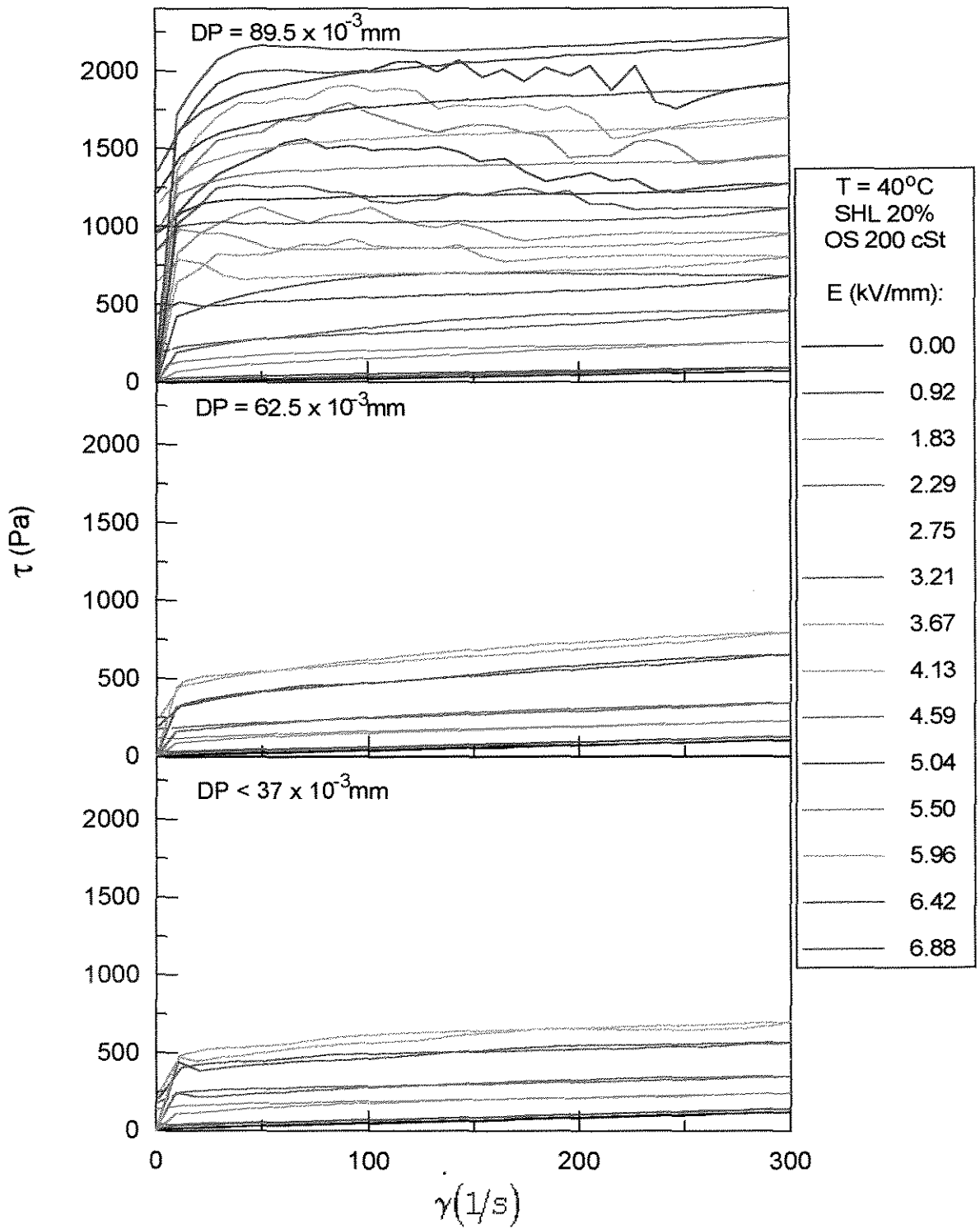


Figura A. 2: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40 °C.

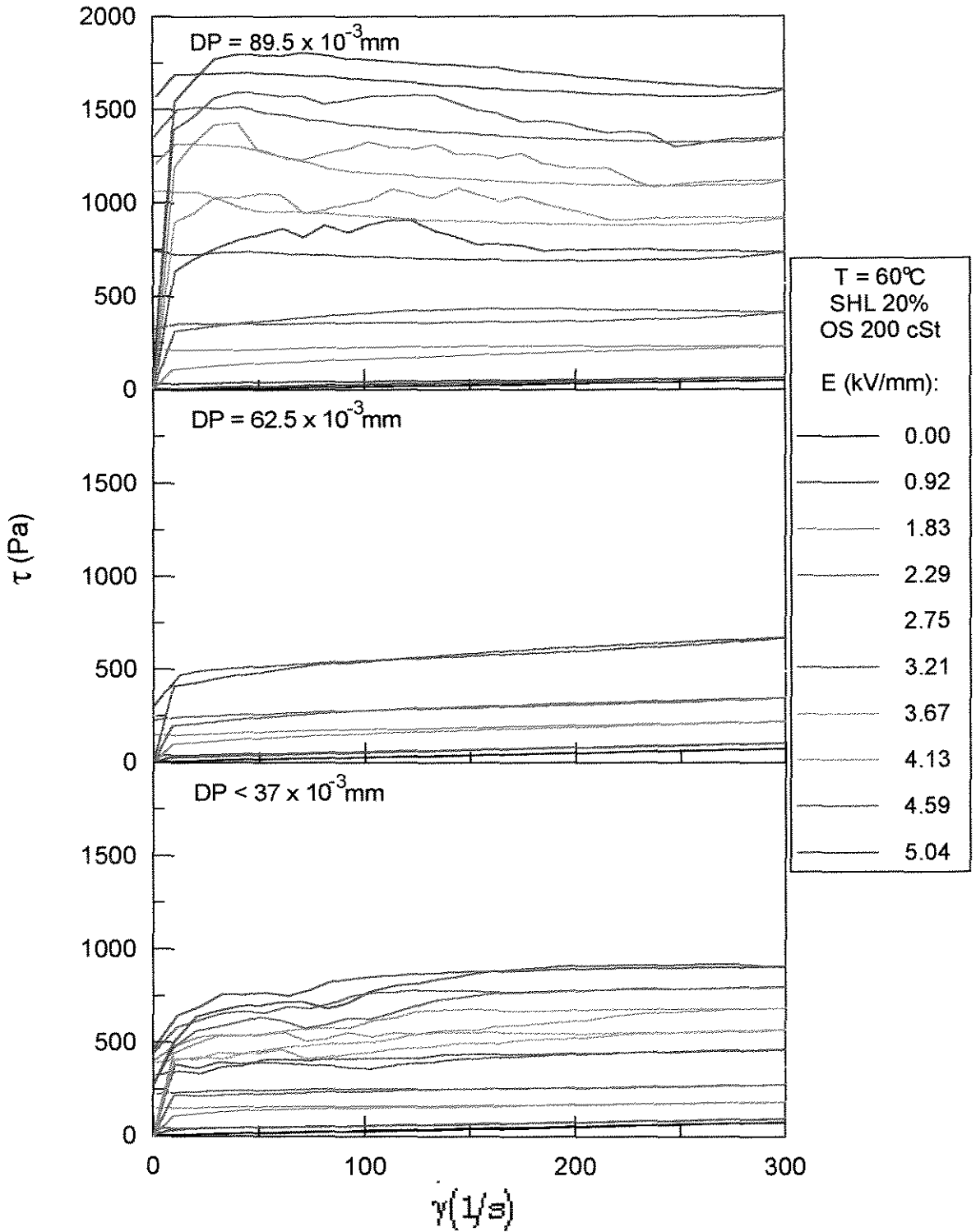


Figura A. 3 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60°C.

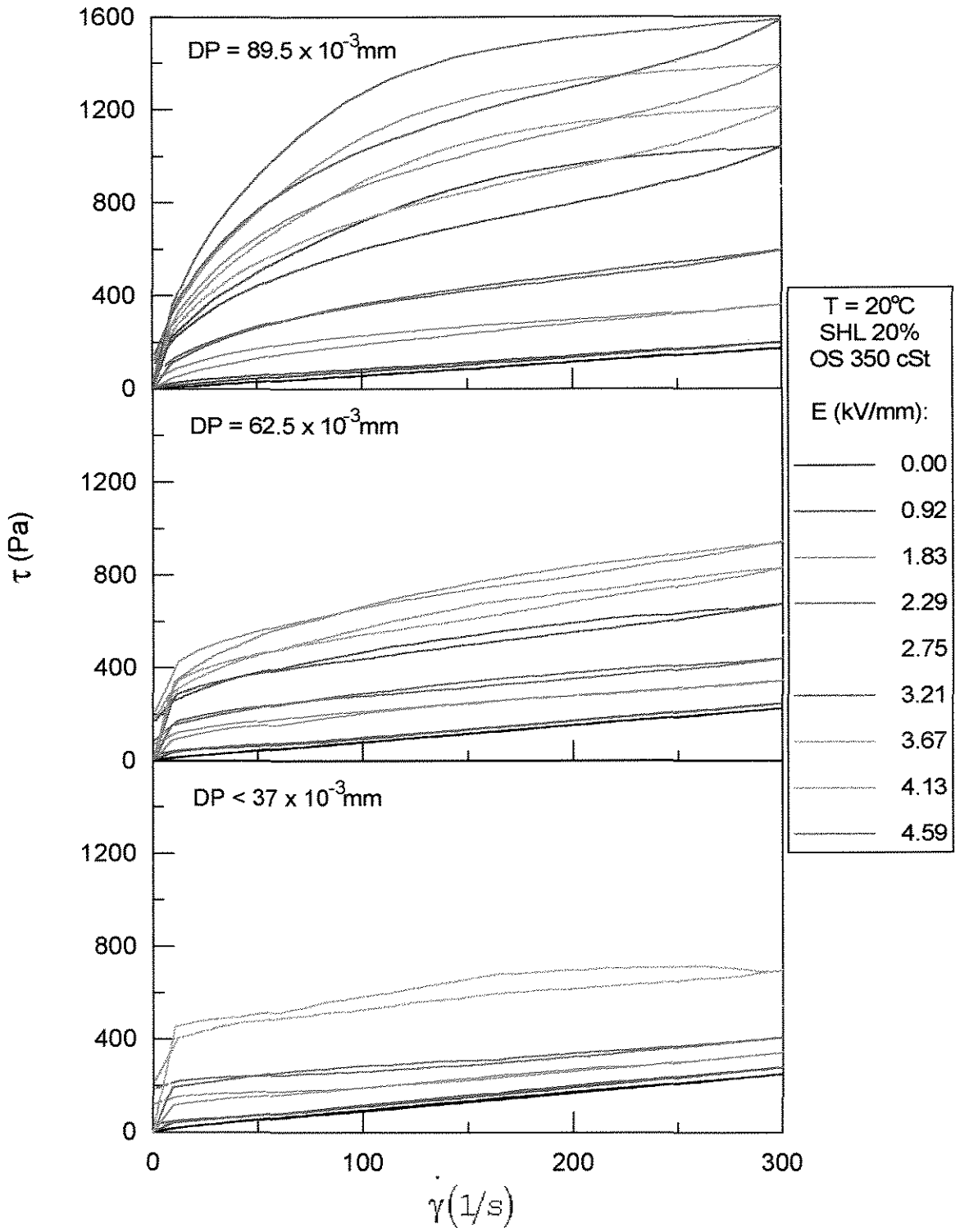


Figura A. 4 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C.

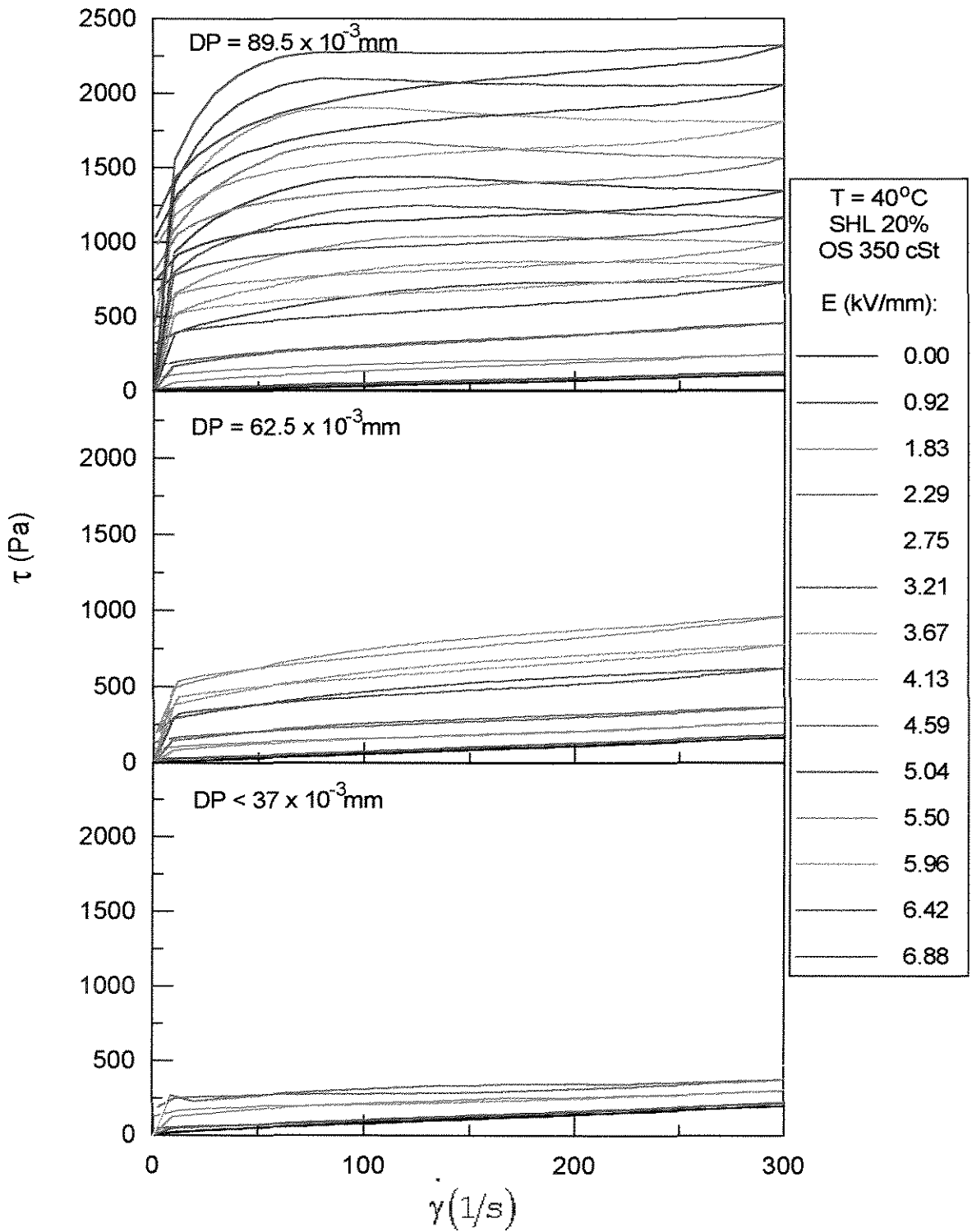


Figura A. 5 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40°C.

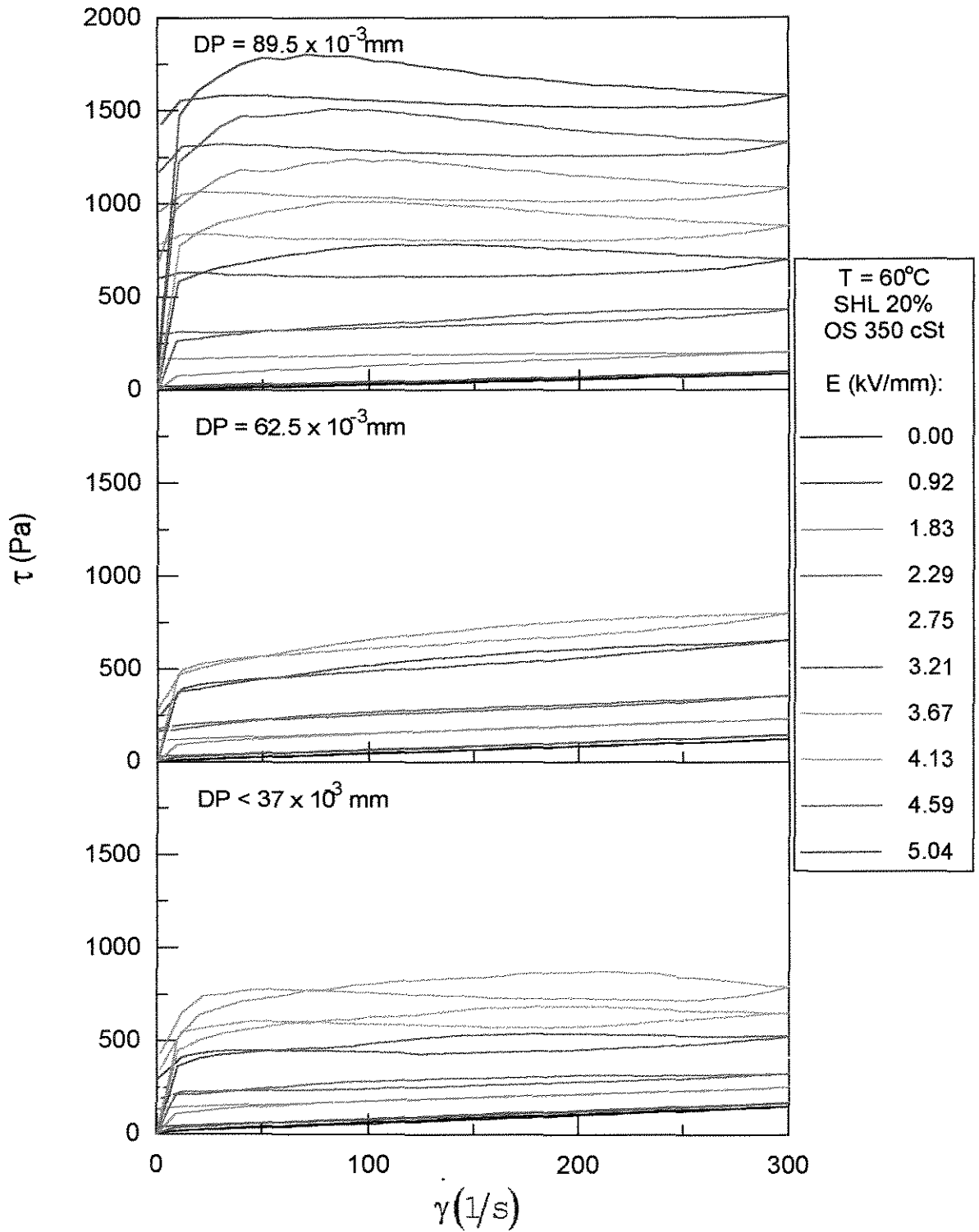


Figura A. 6 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60°C.

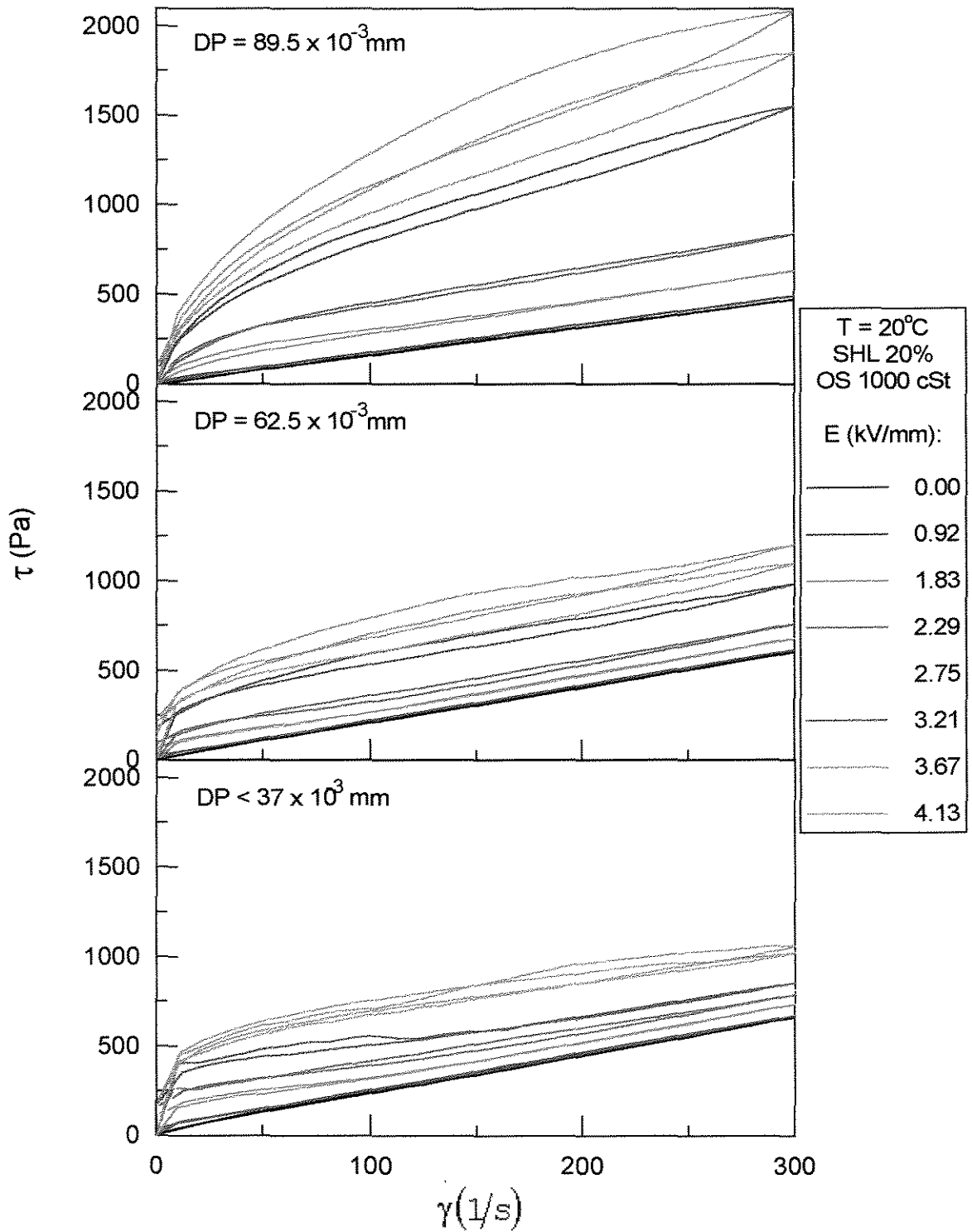


Figura A. 7 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C.

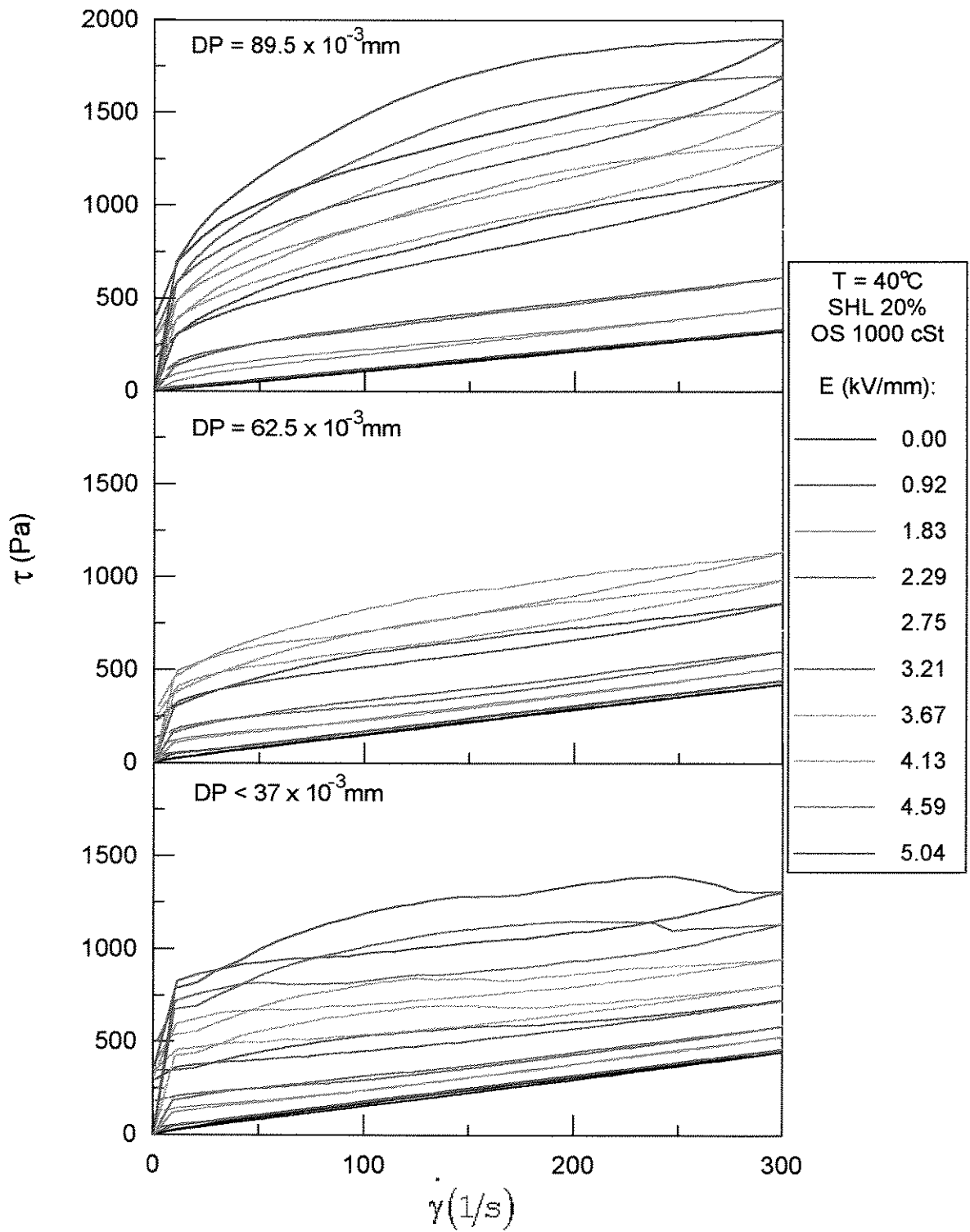


Figura A. 8: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40°C .

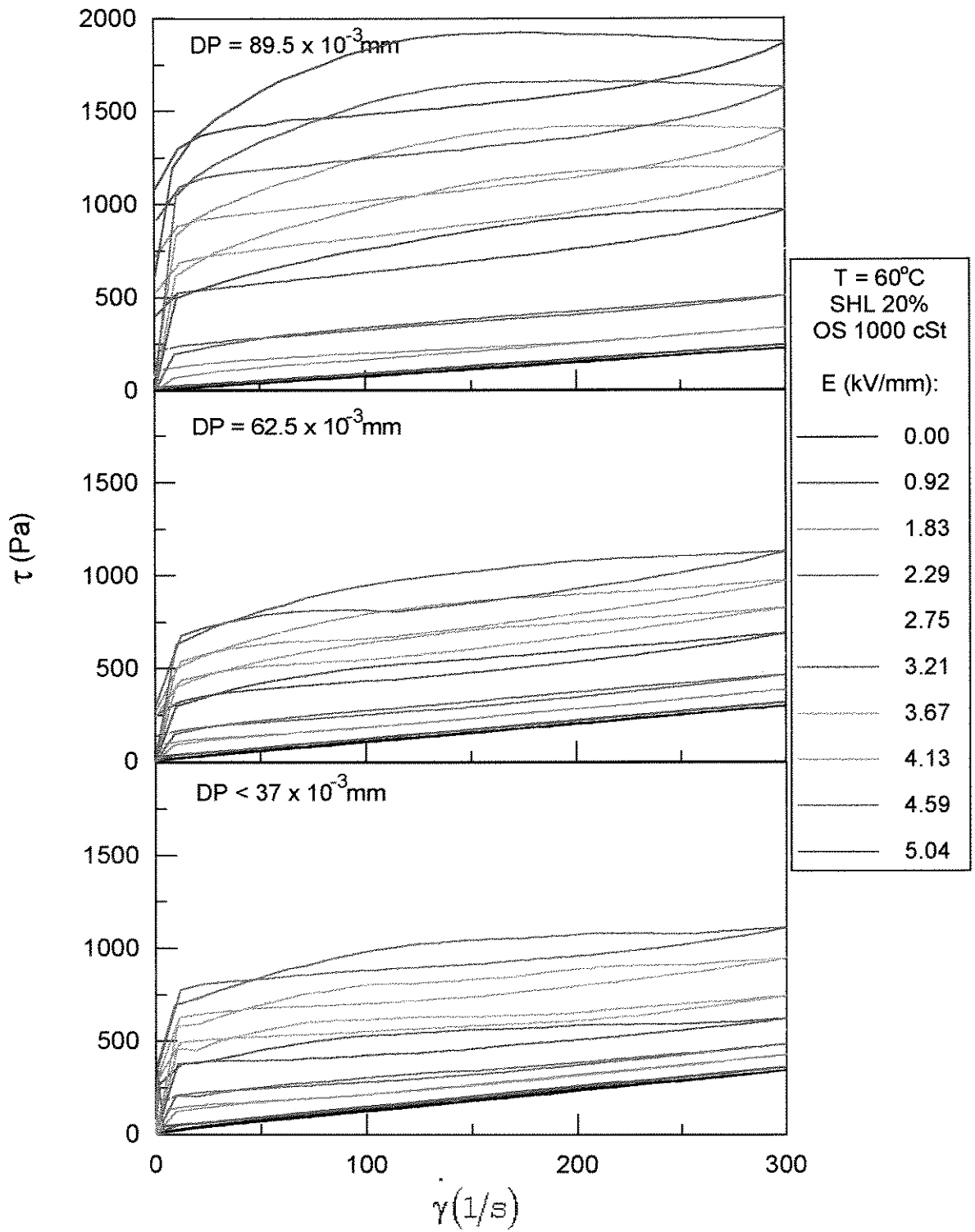


Figura A. 9 : Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60°C.

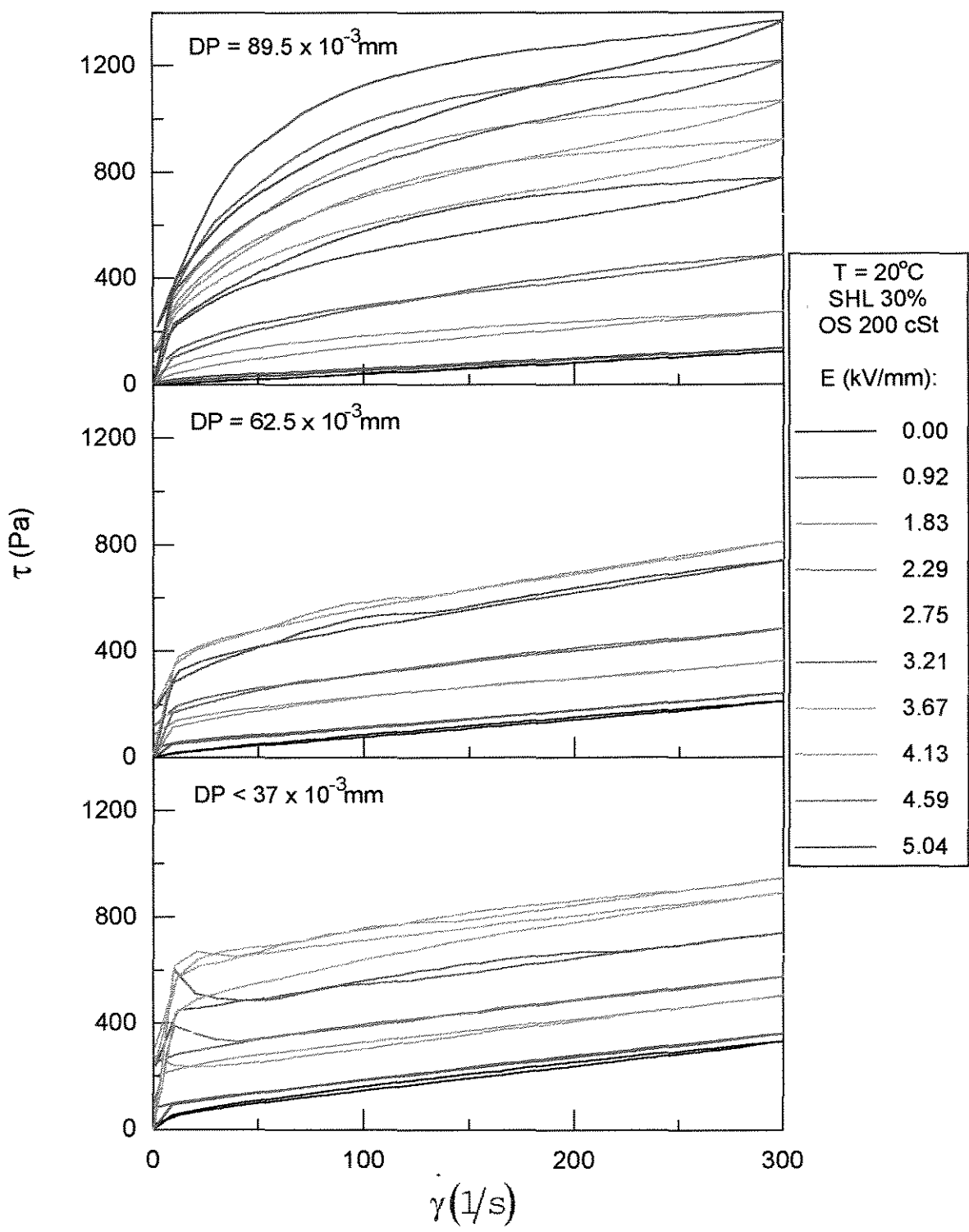


Figura A.10: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C.

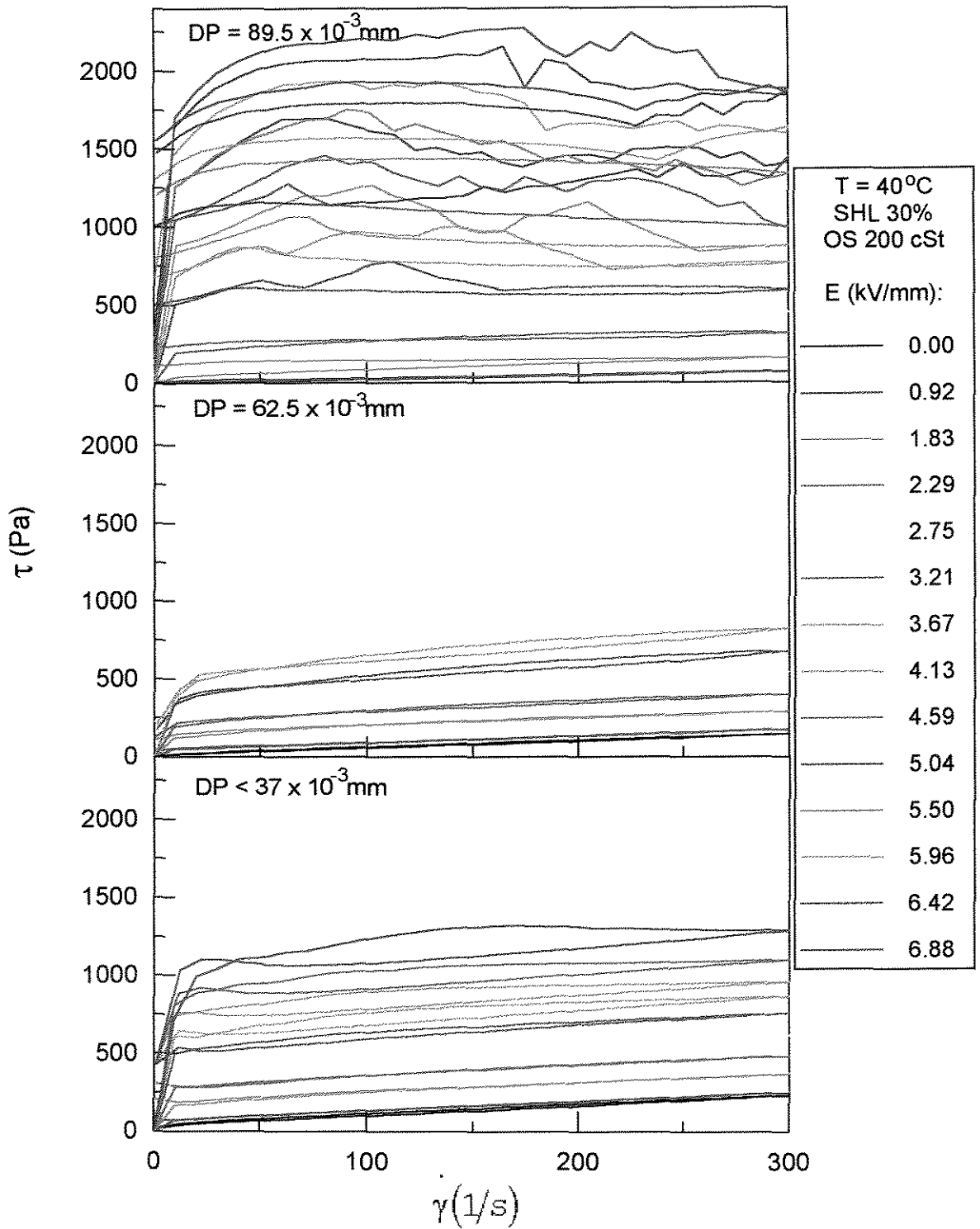


Figura A.11: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C.

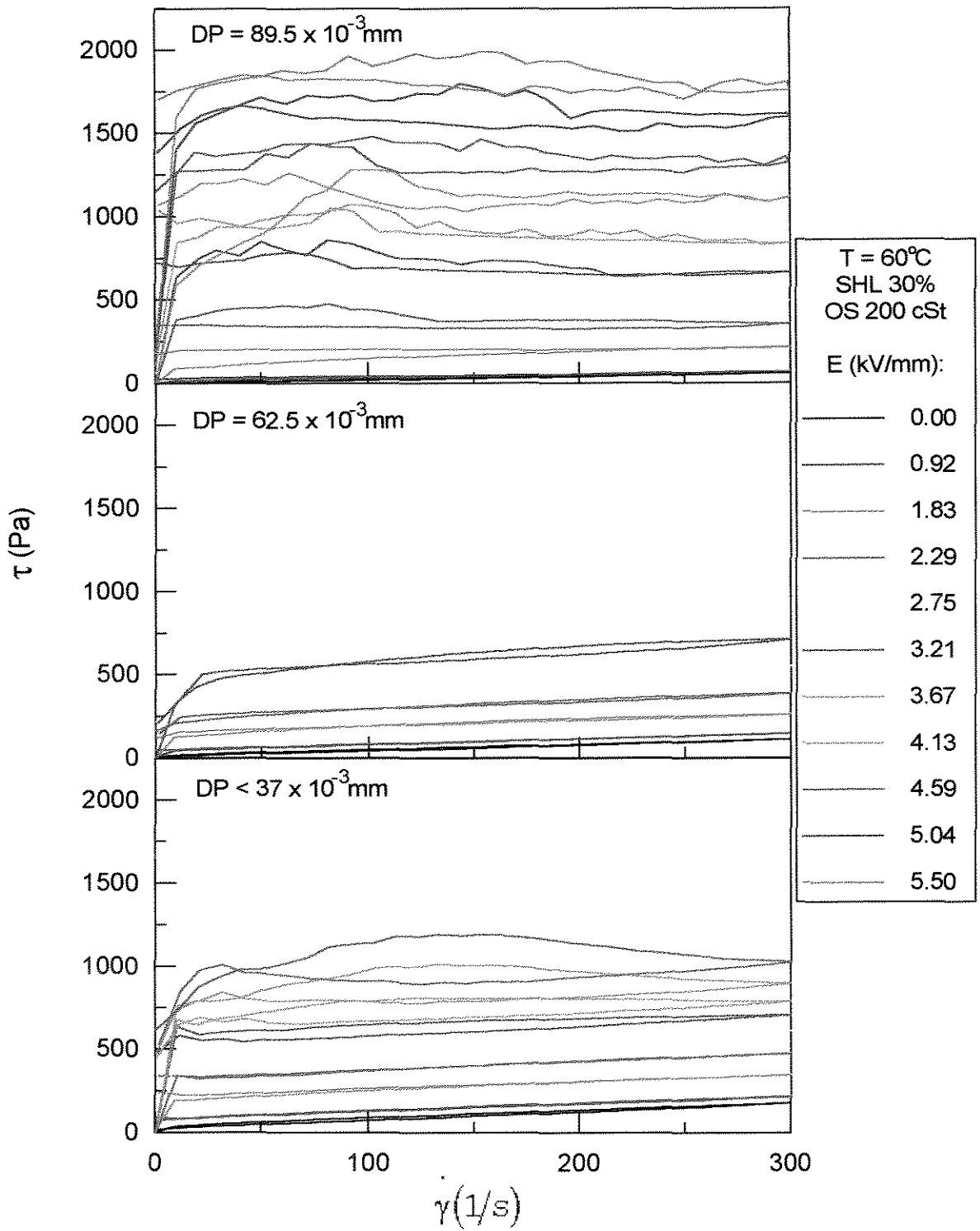


Figura A.12: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C.

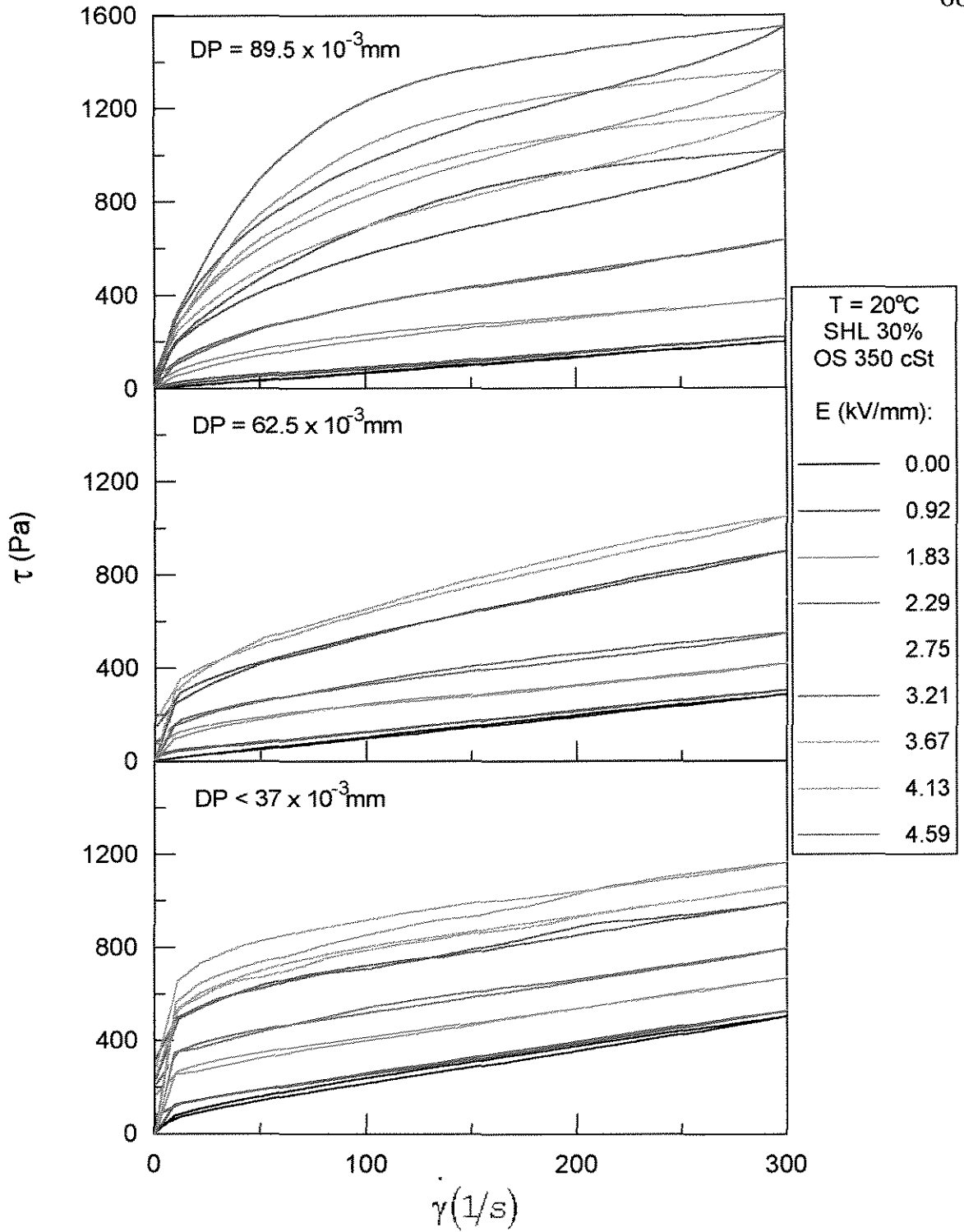


Figura A.13: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C .

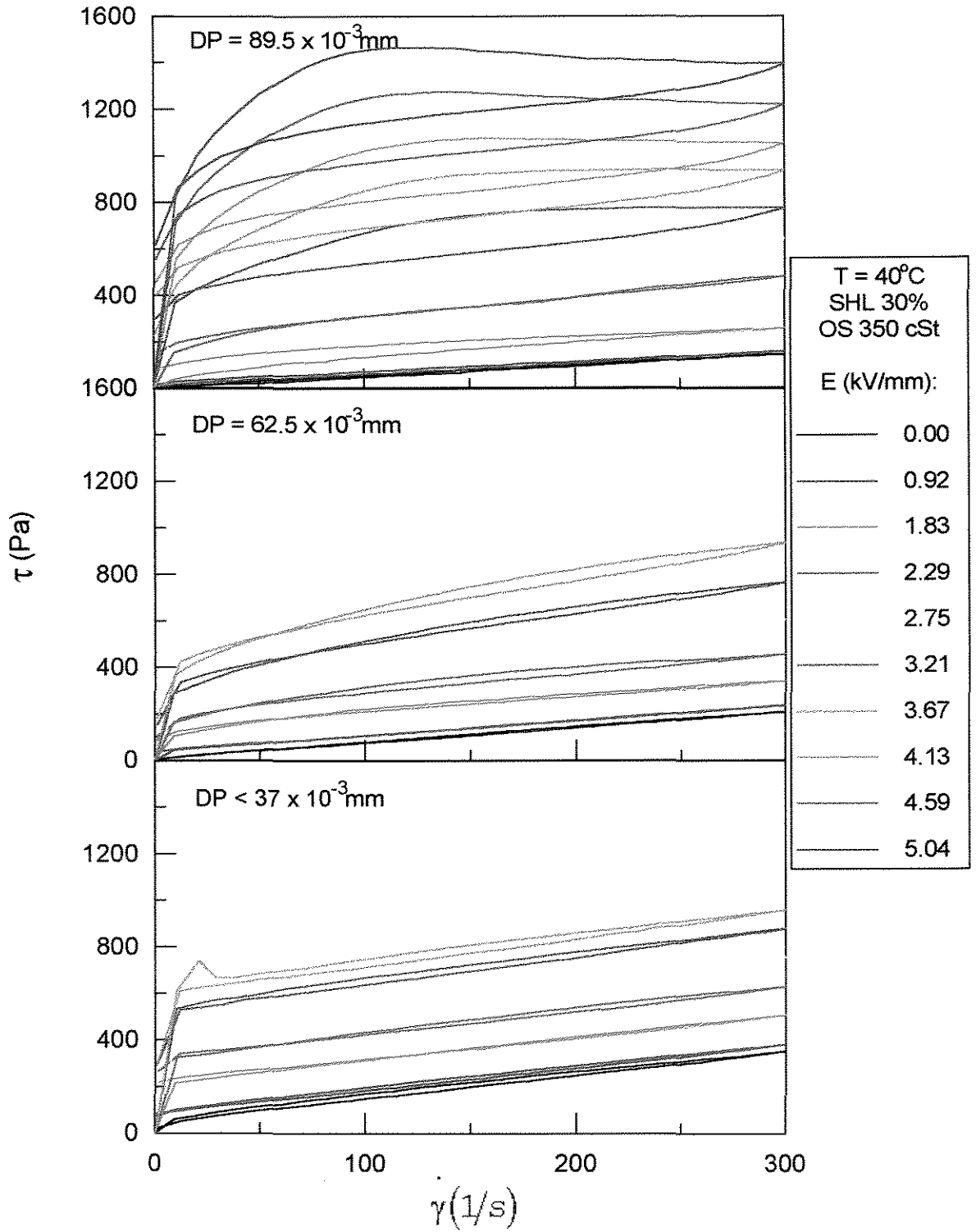


Figura A.14: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C.

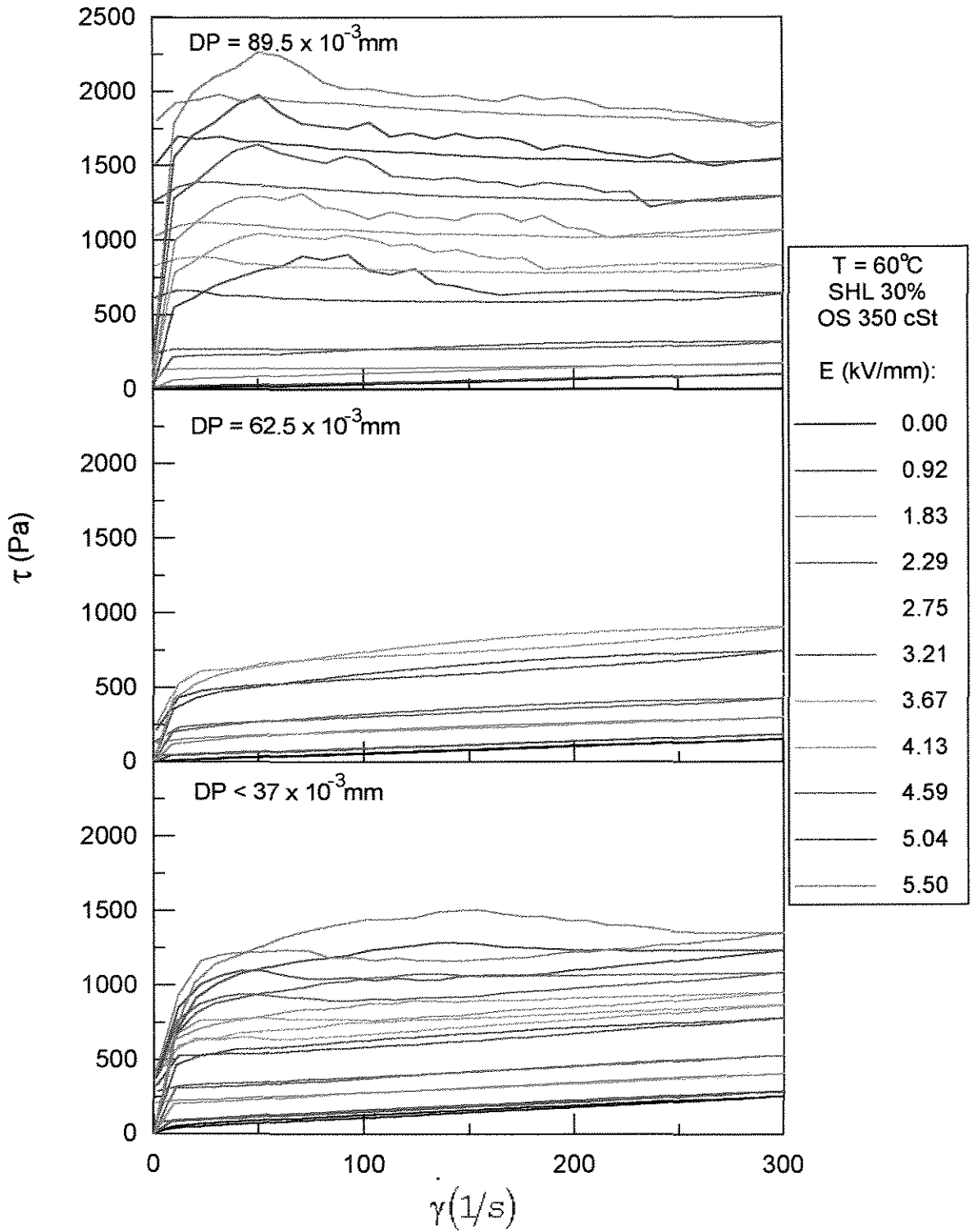


Figura A.15: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C.

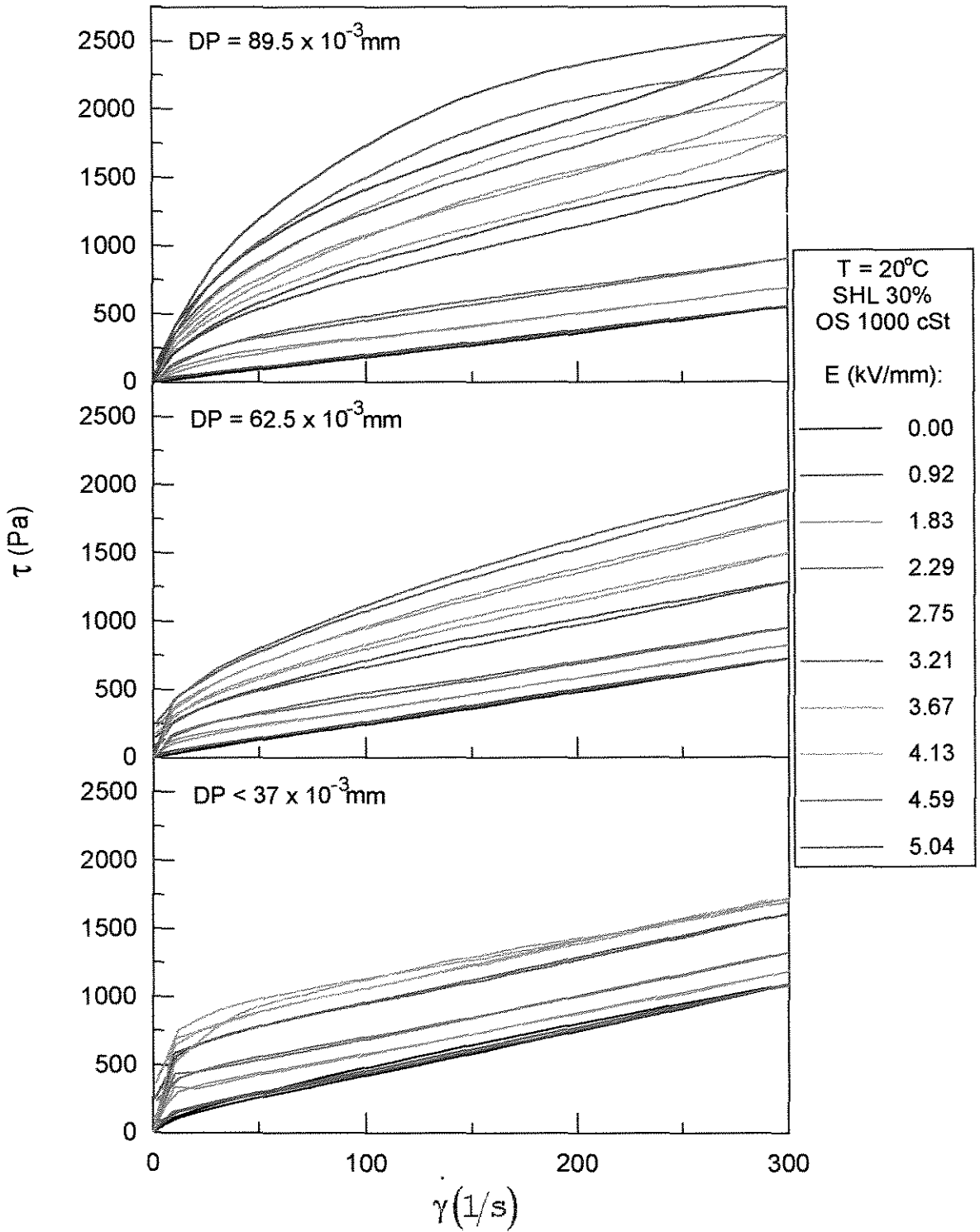


Figura A.16: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C .

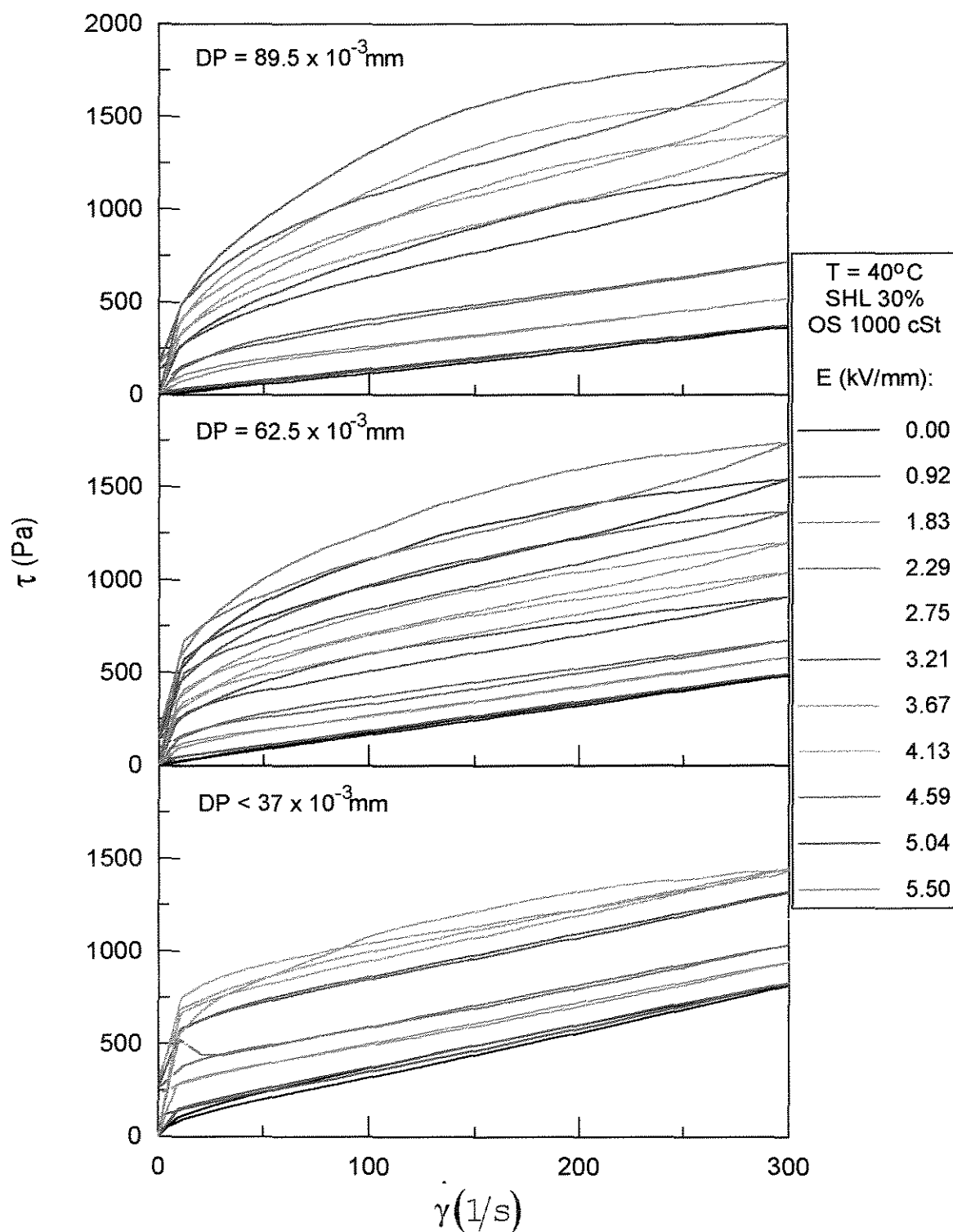


Figura A.17: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C.

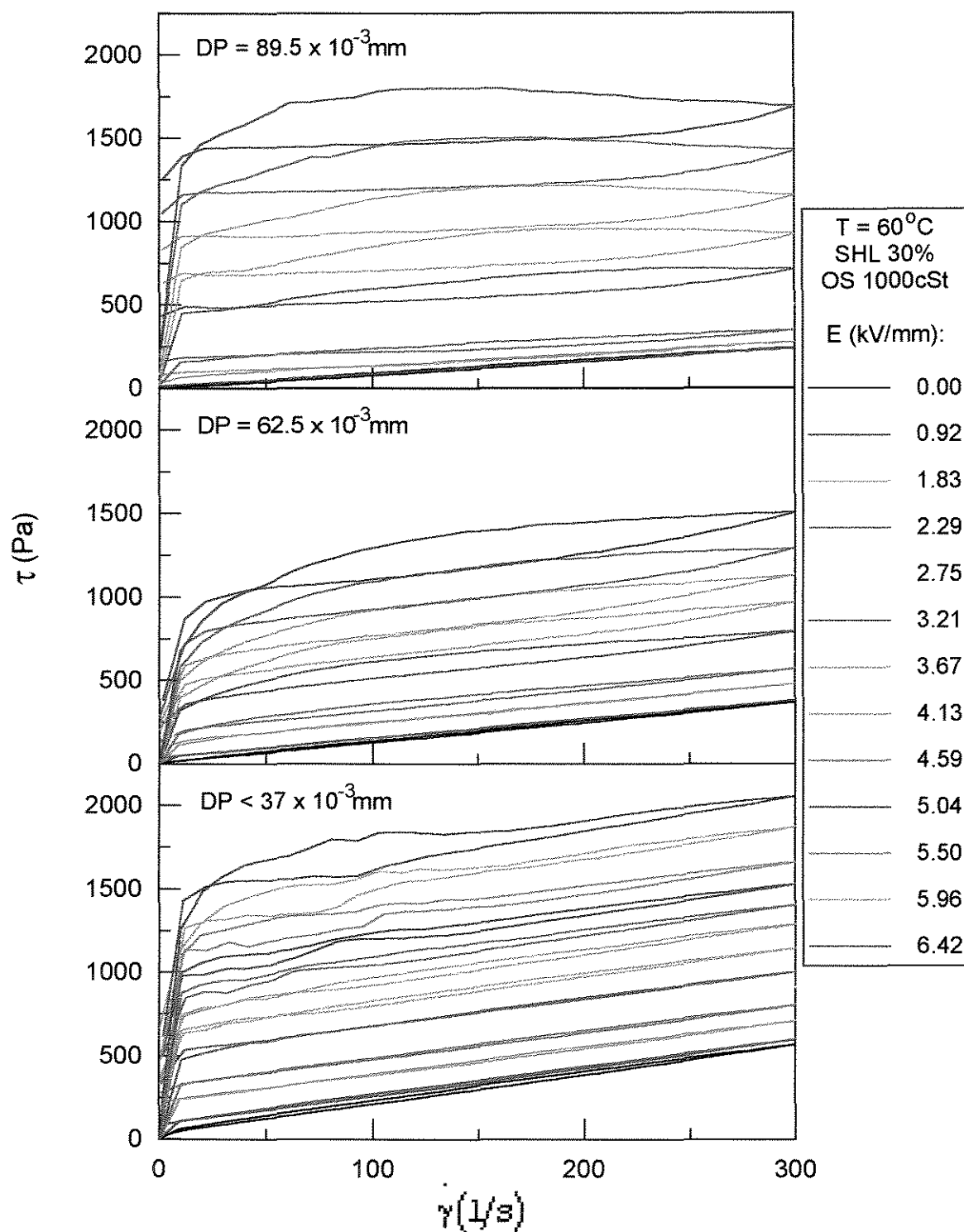


Figura A.18: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C .

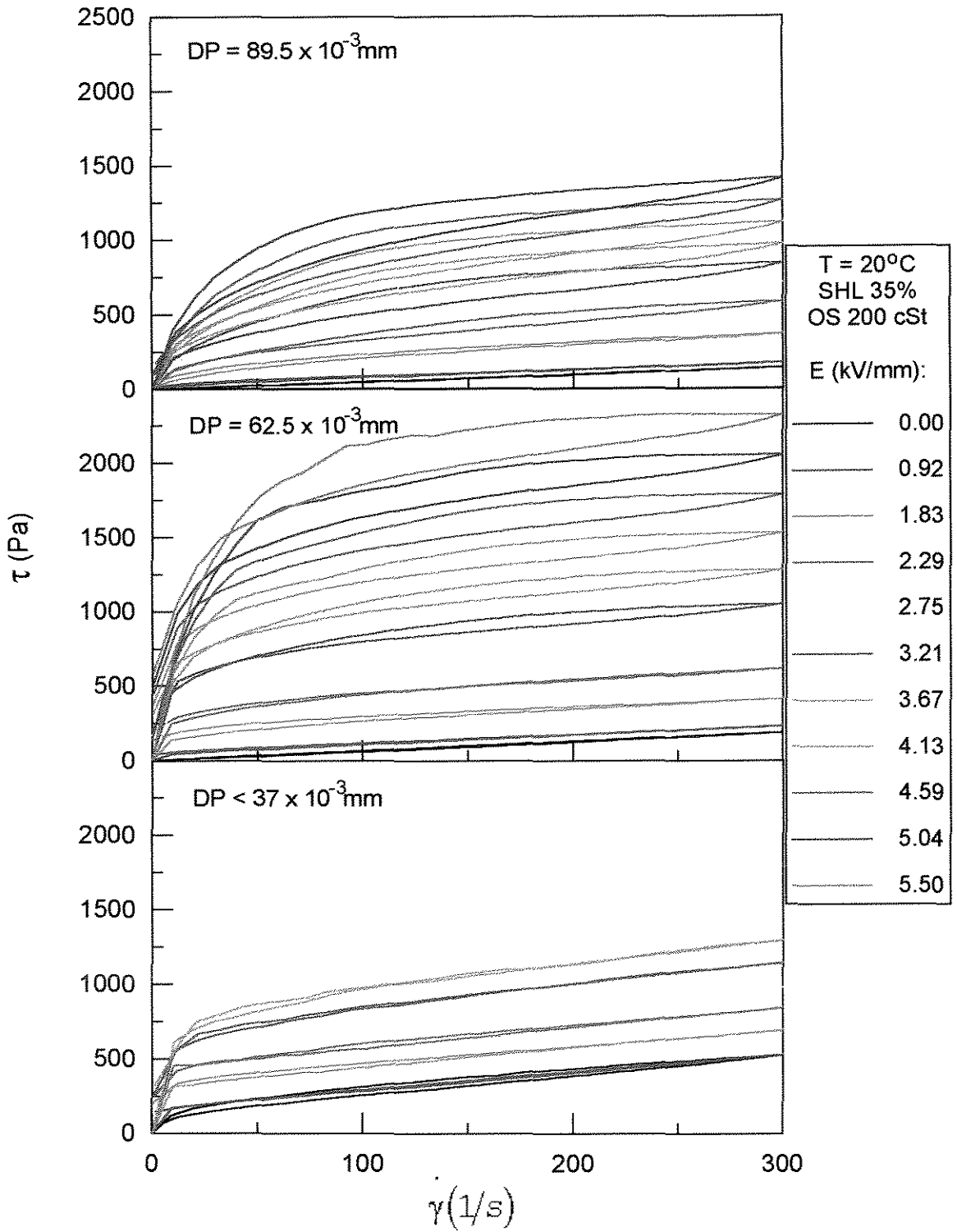


Figura A.19: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C .

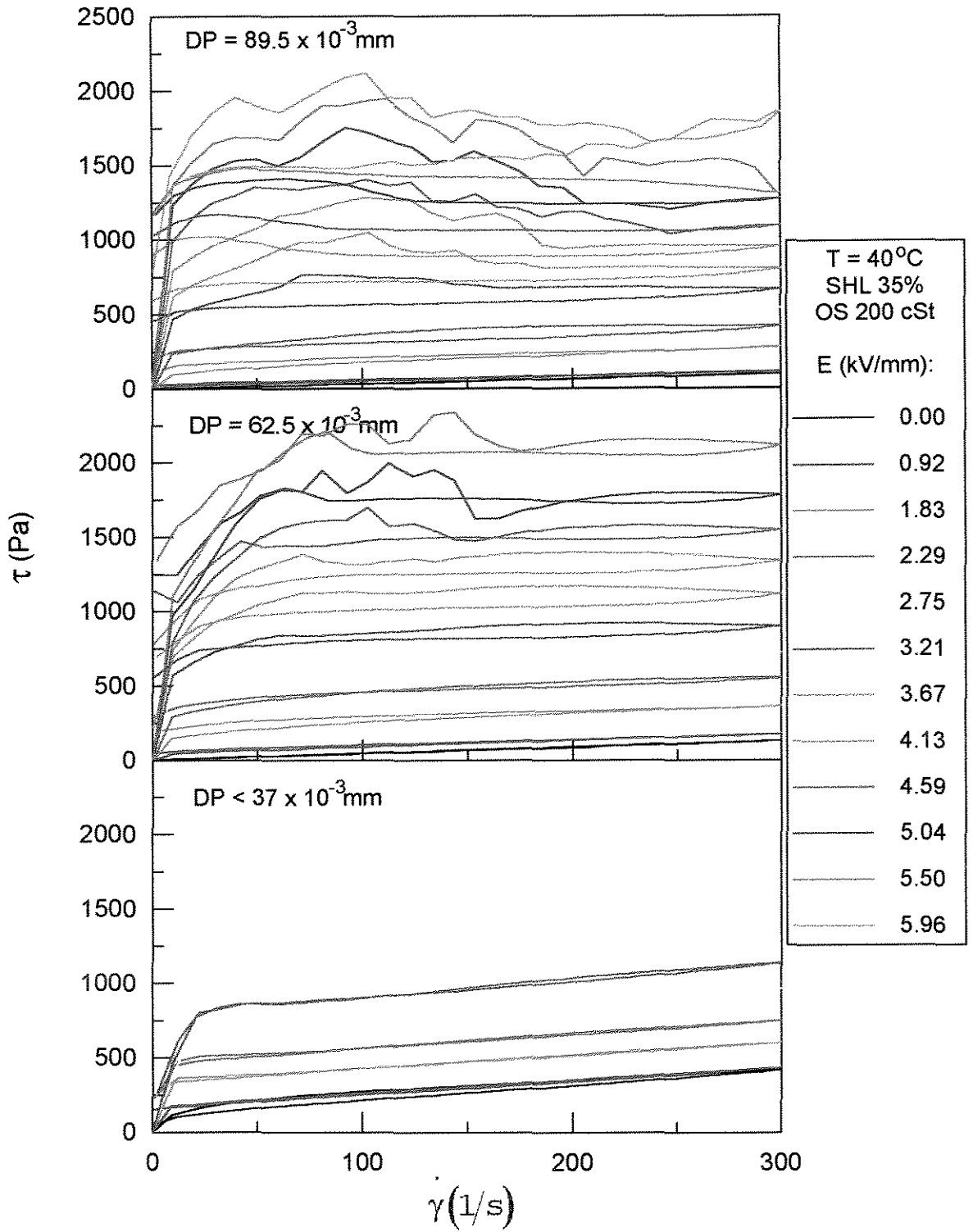


Figura A.20: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C.

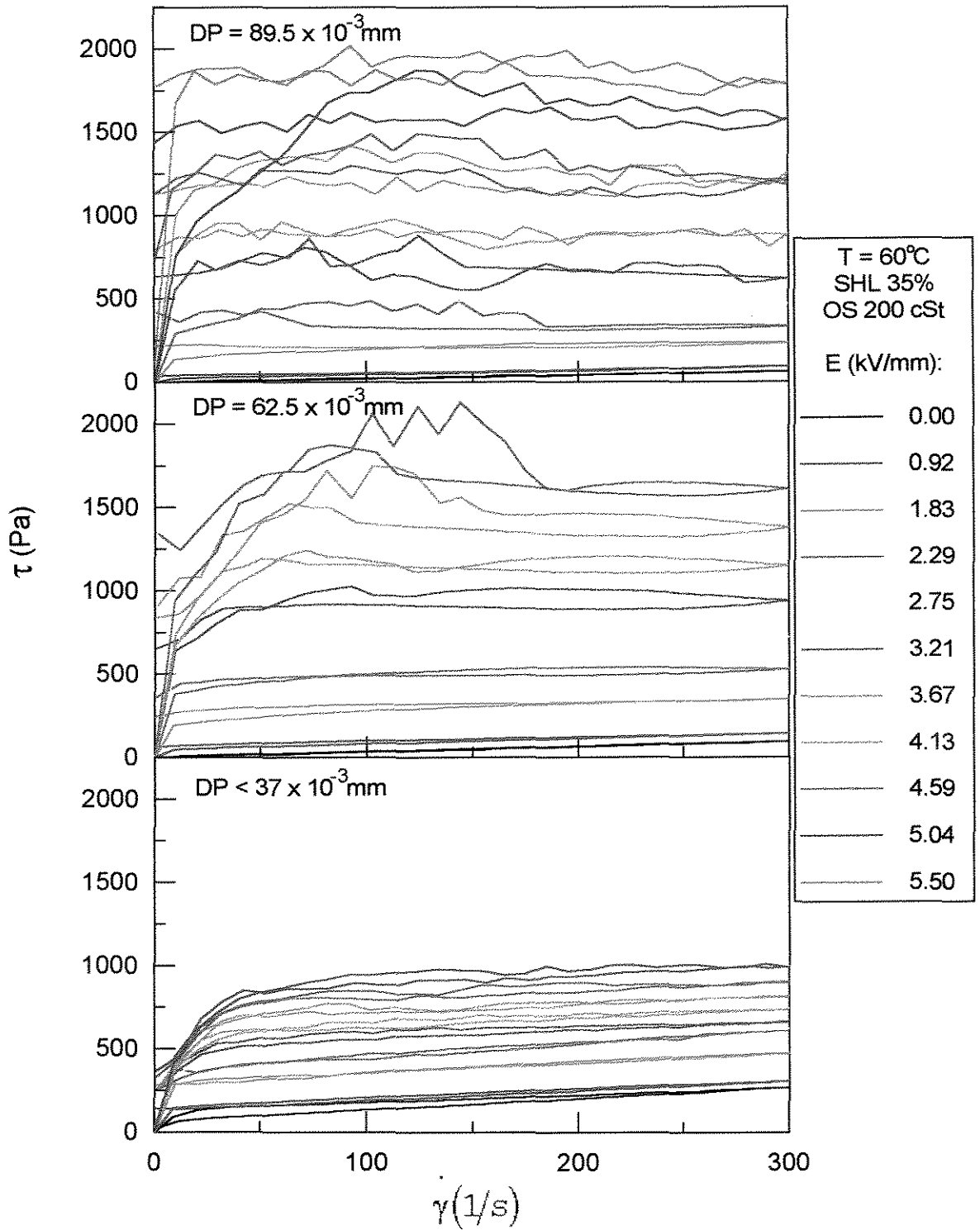


Figura A.21: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

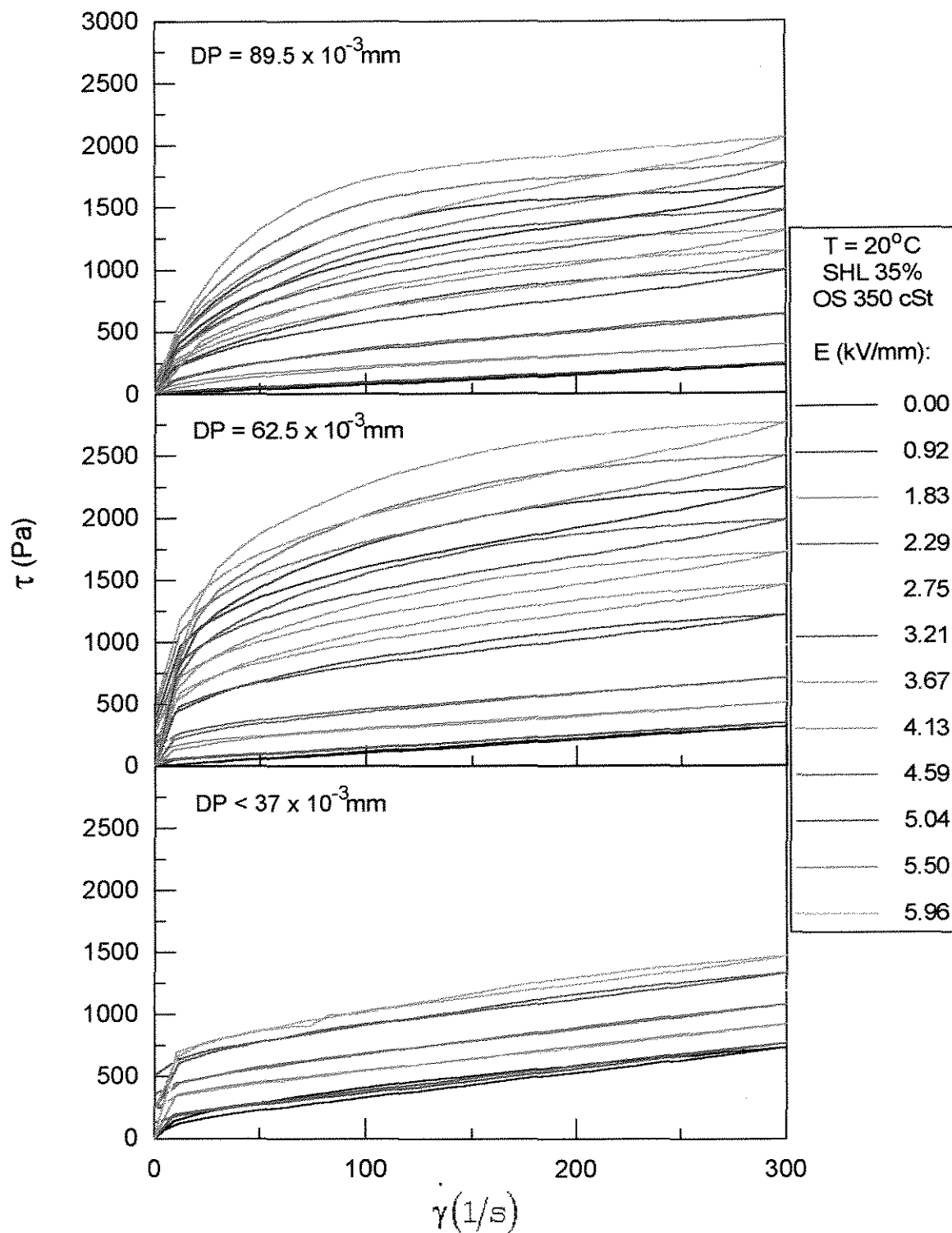


Figura A.22: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C .

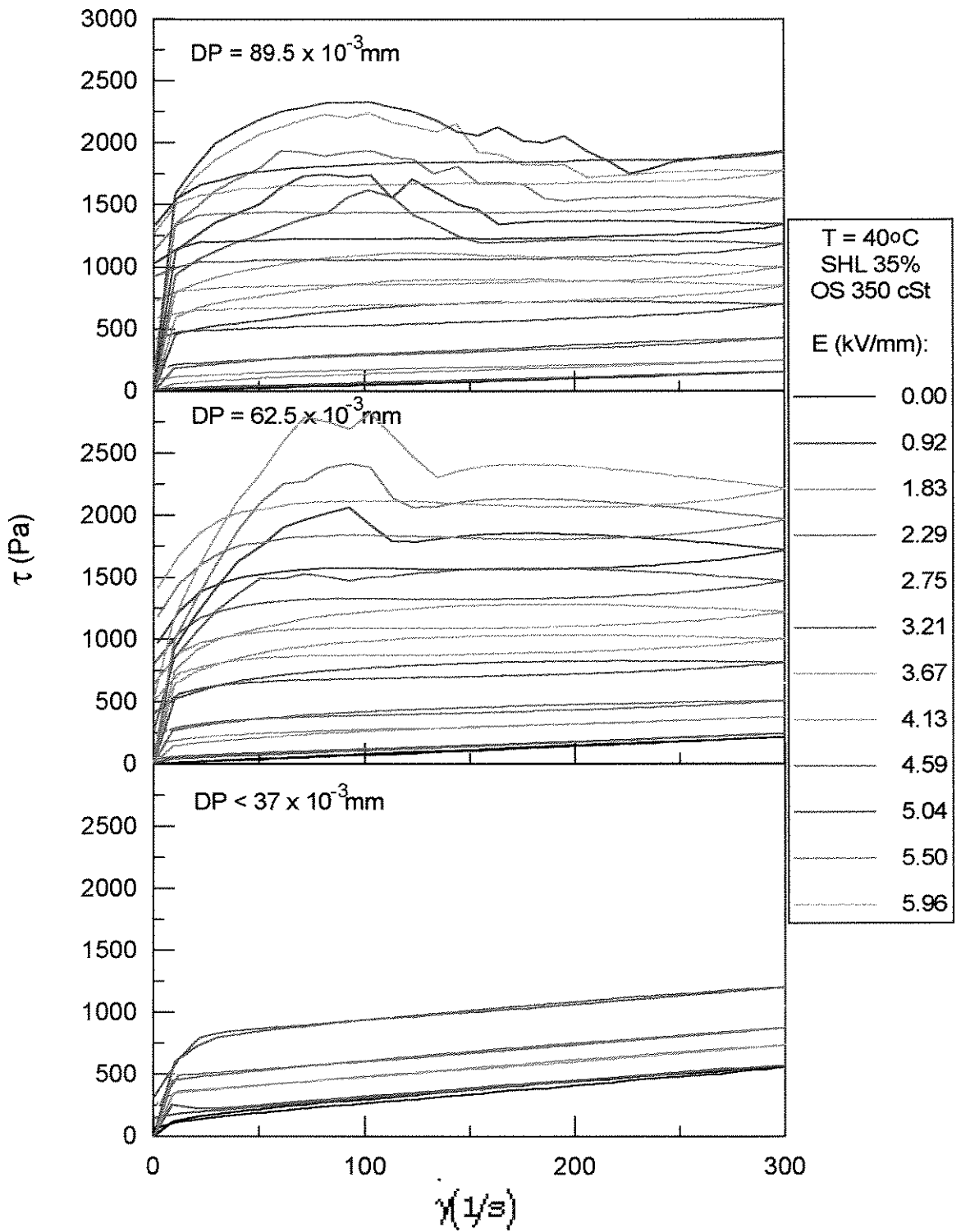


Figura A.23: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C.

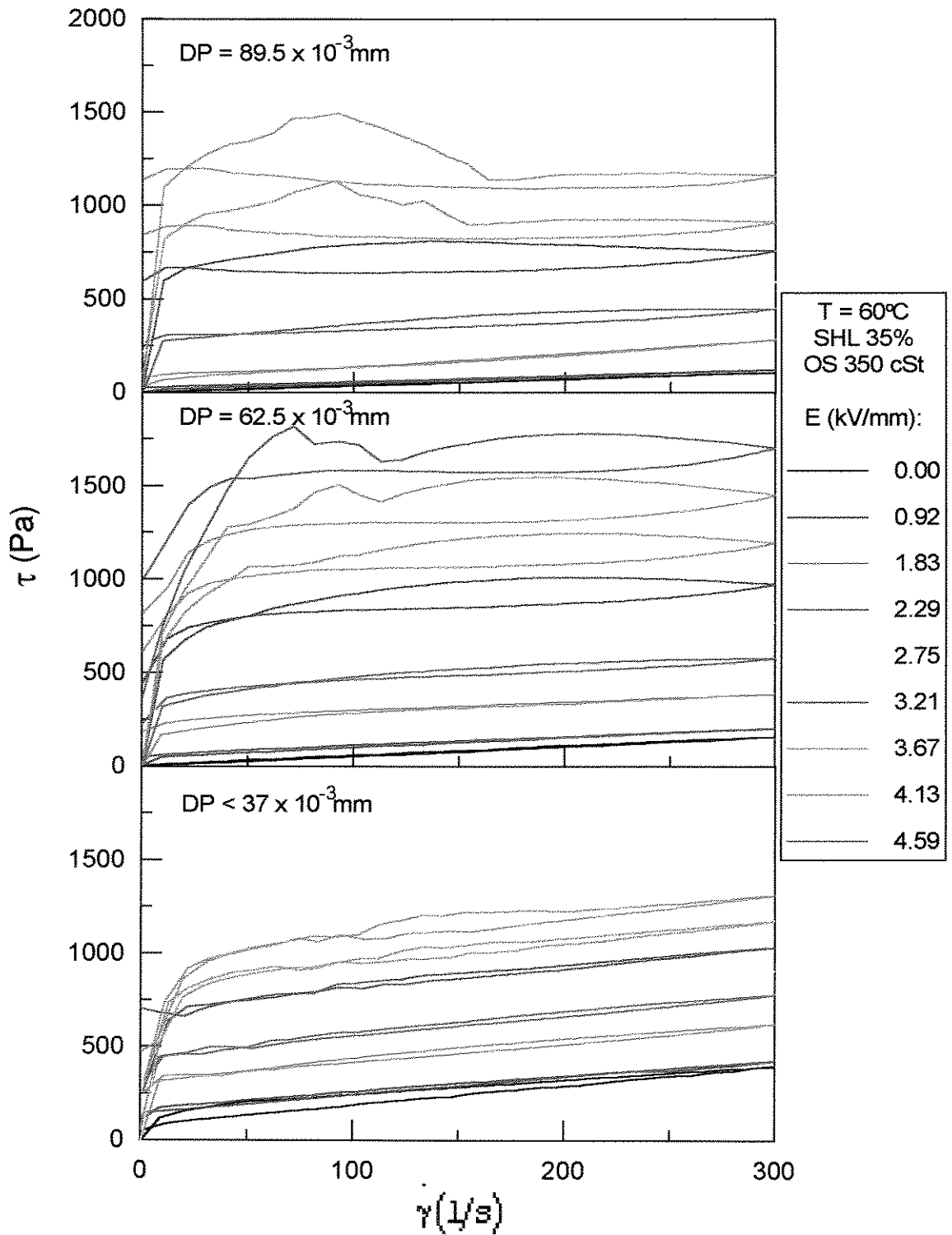


Figura A.24: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

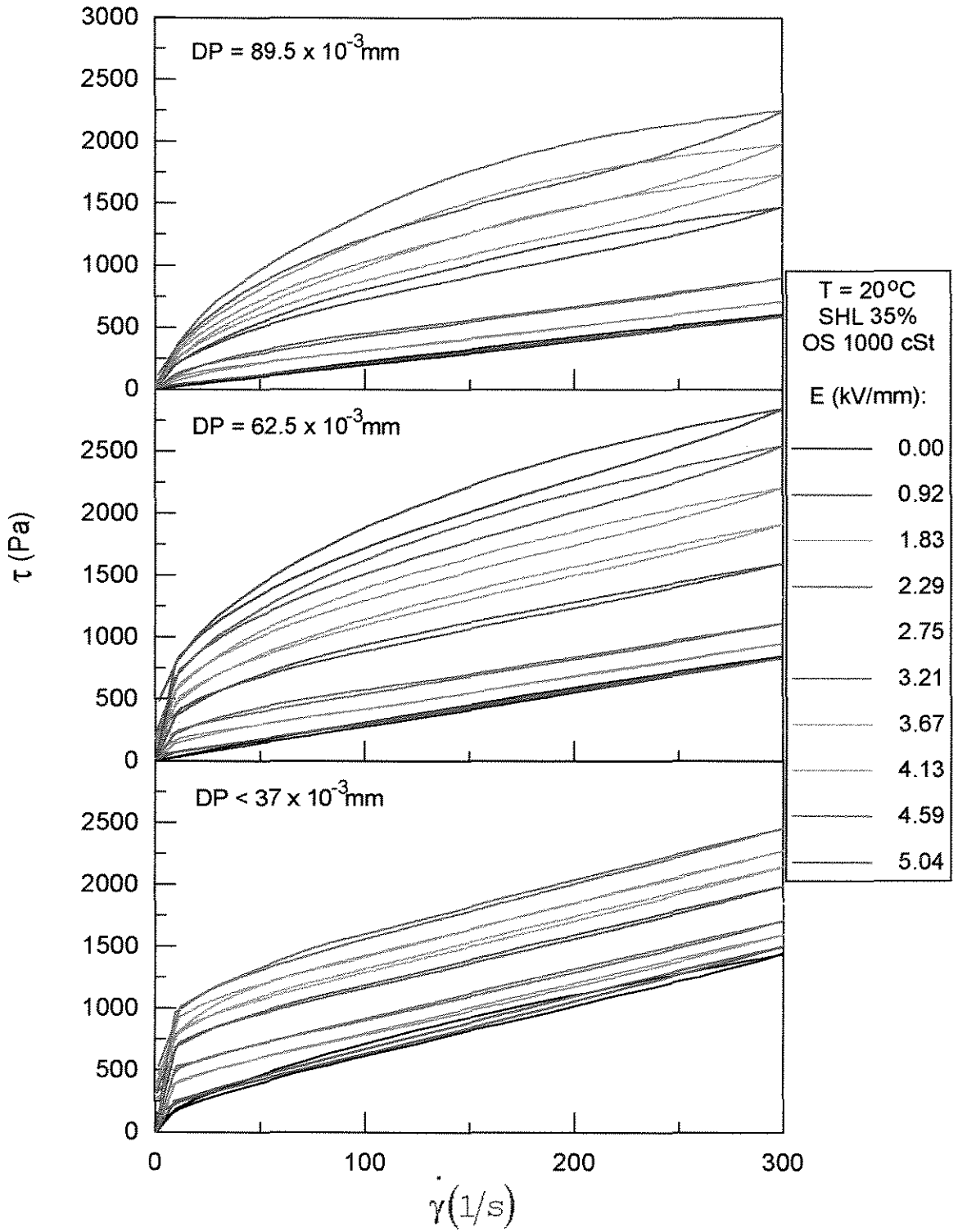


Figura A.25: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C.

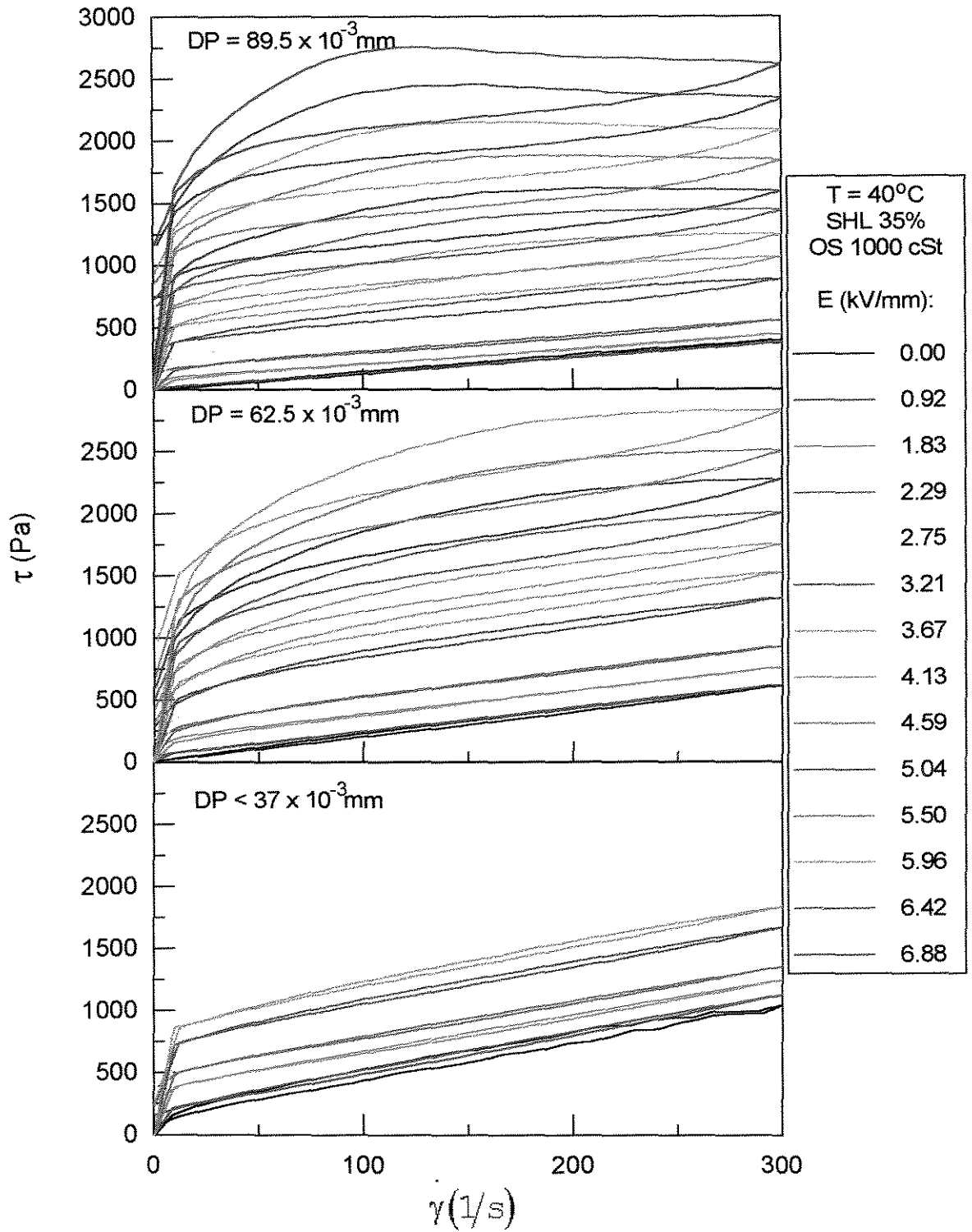


Figura A.26: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C .

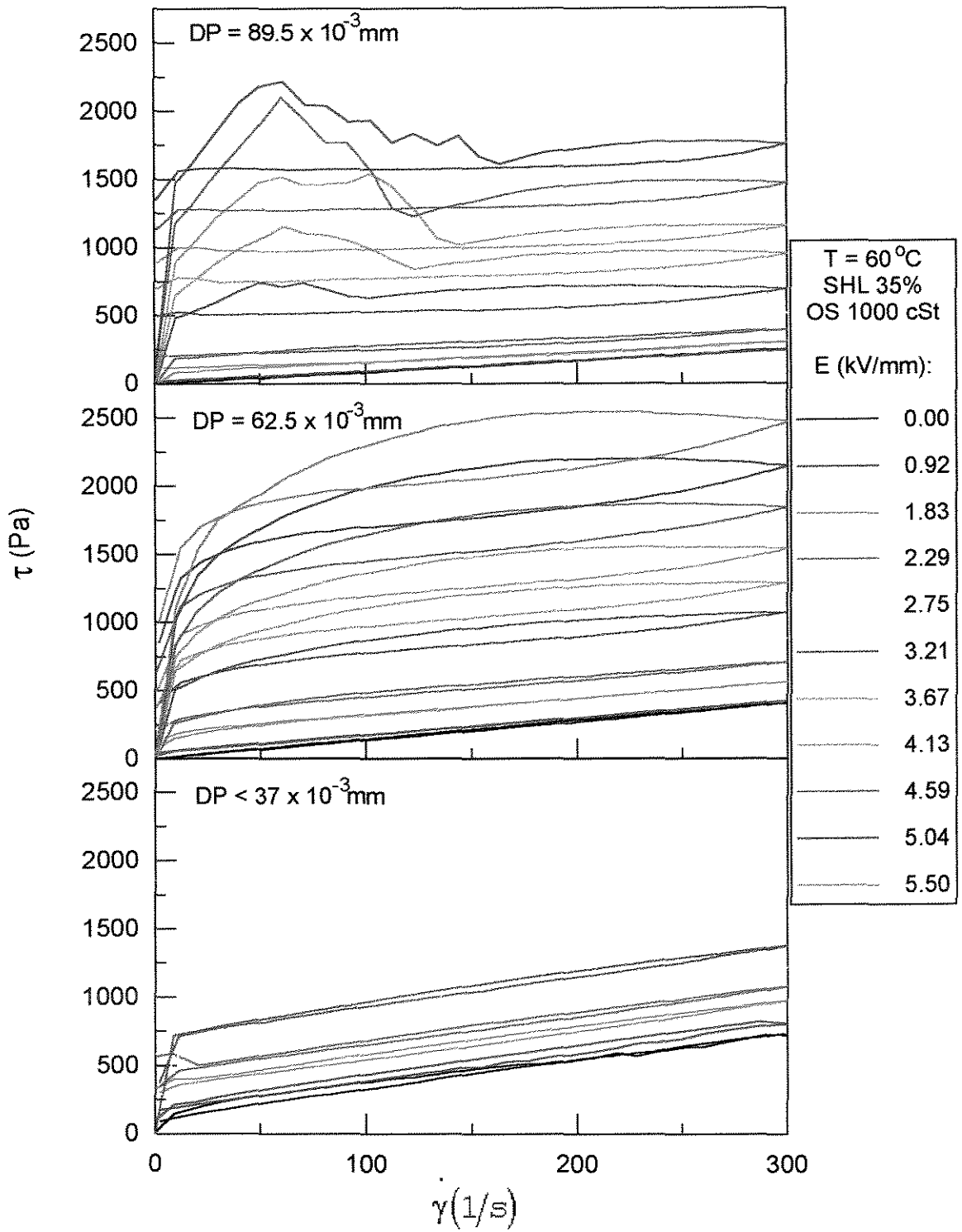


Figura A.27: Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

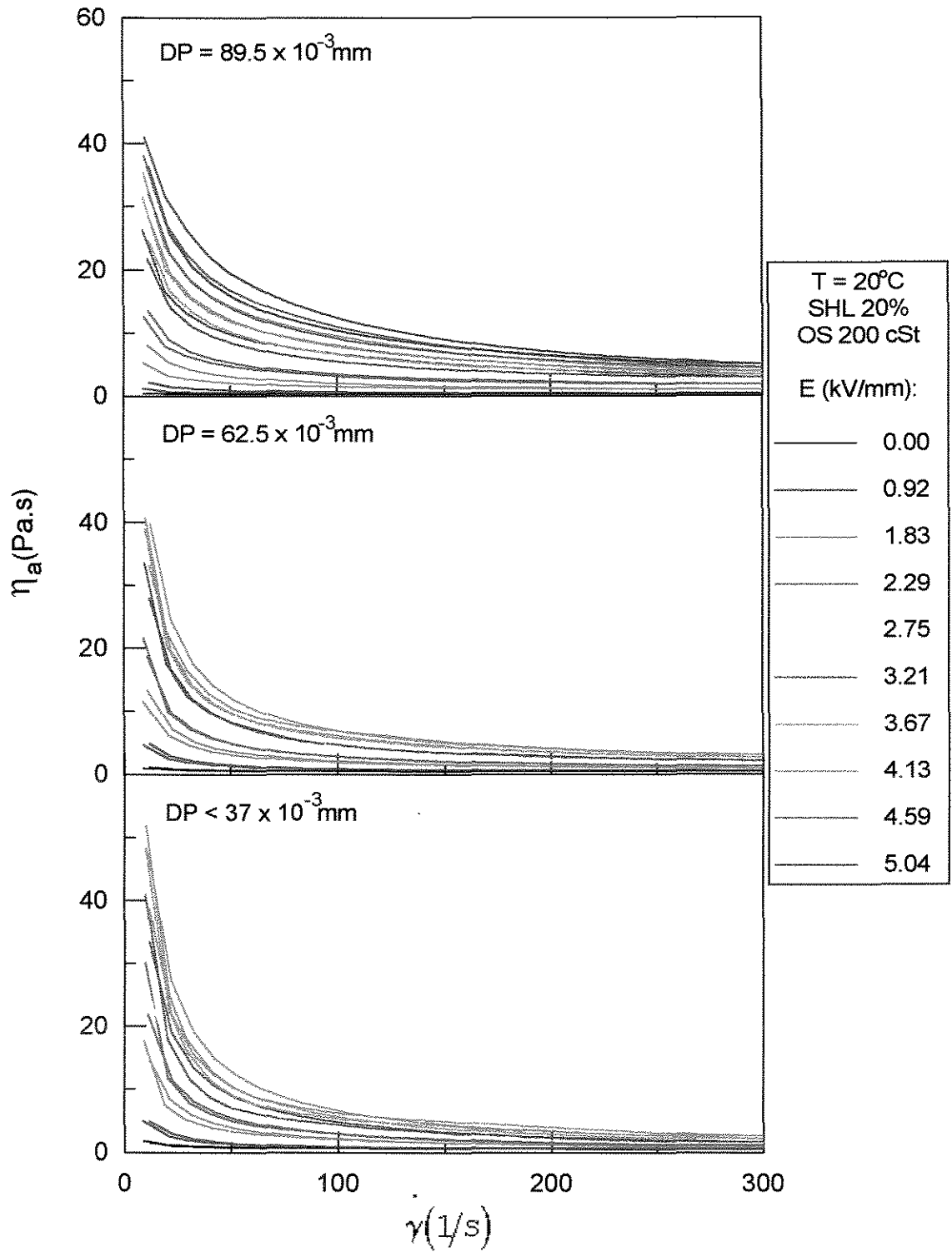


Figura A .28 : Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C.

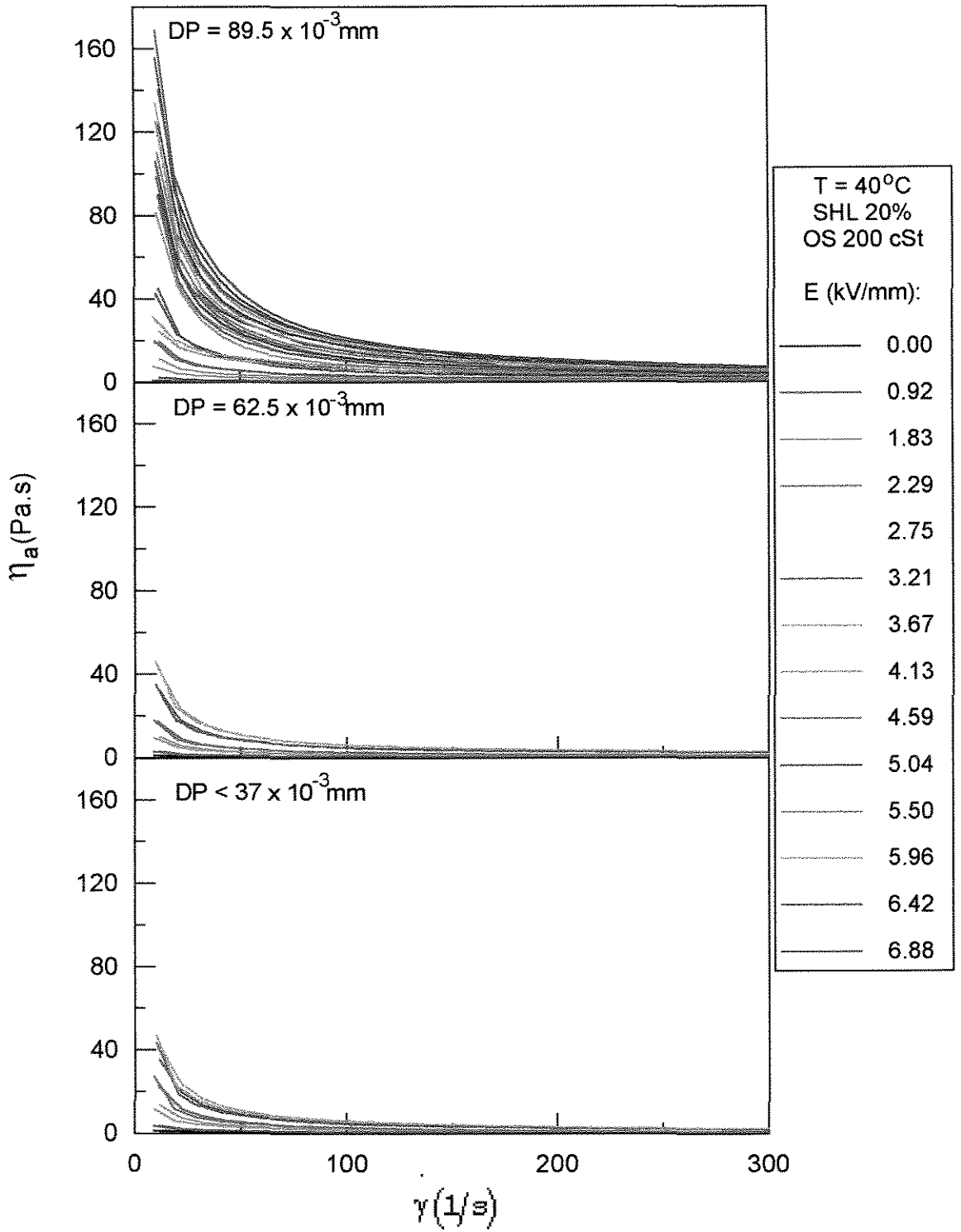


Figura A.29: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40°C .

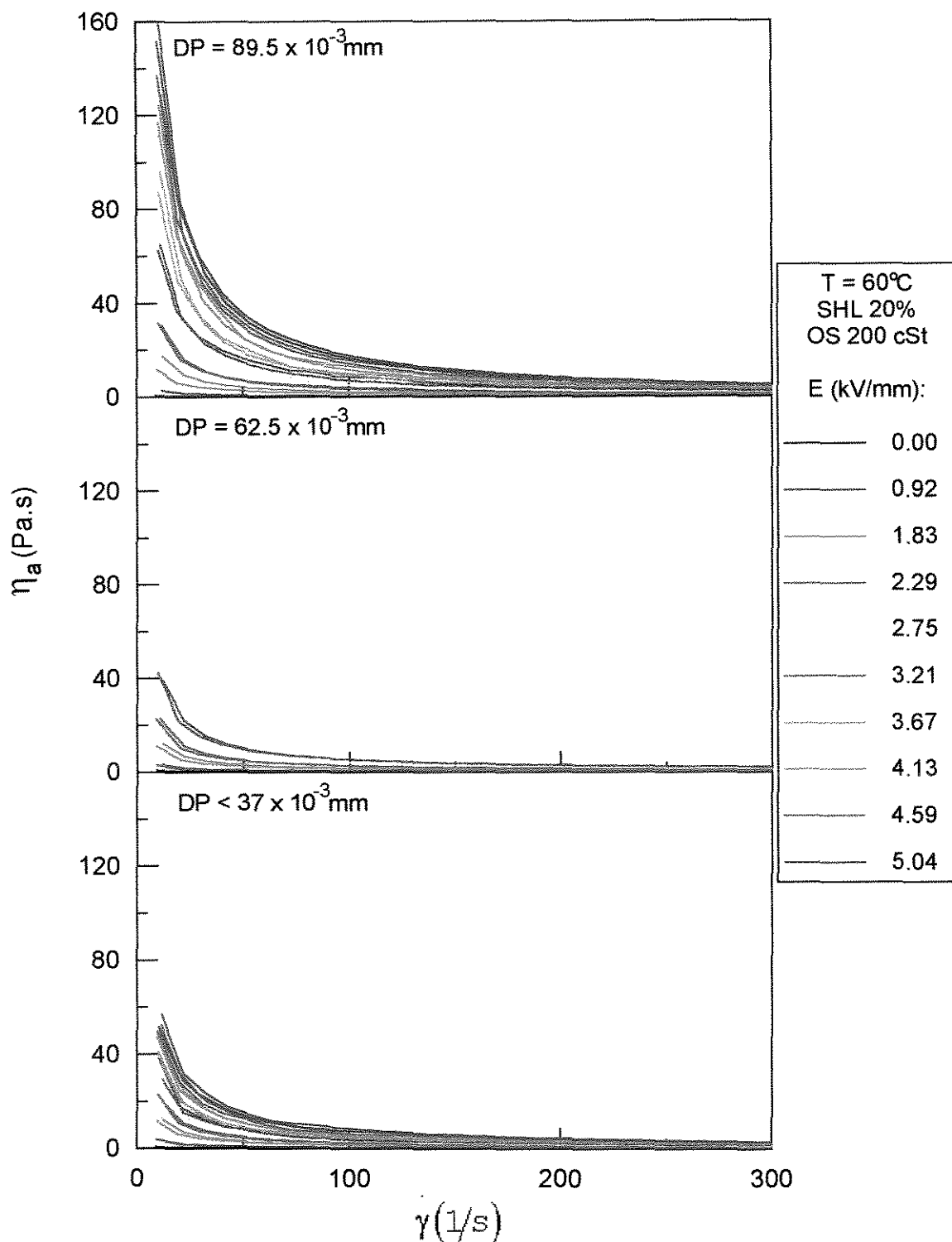


Figura A.30: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60 C.

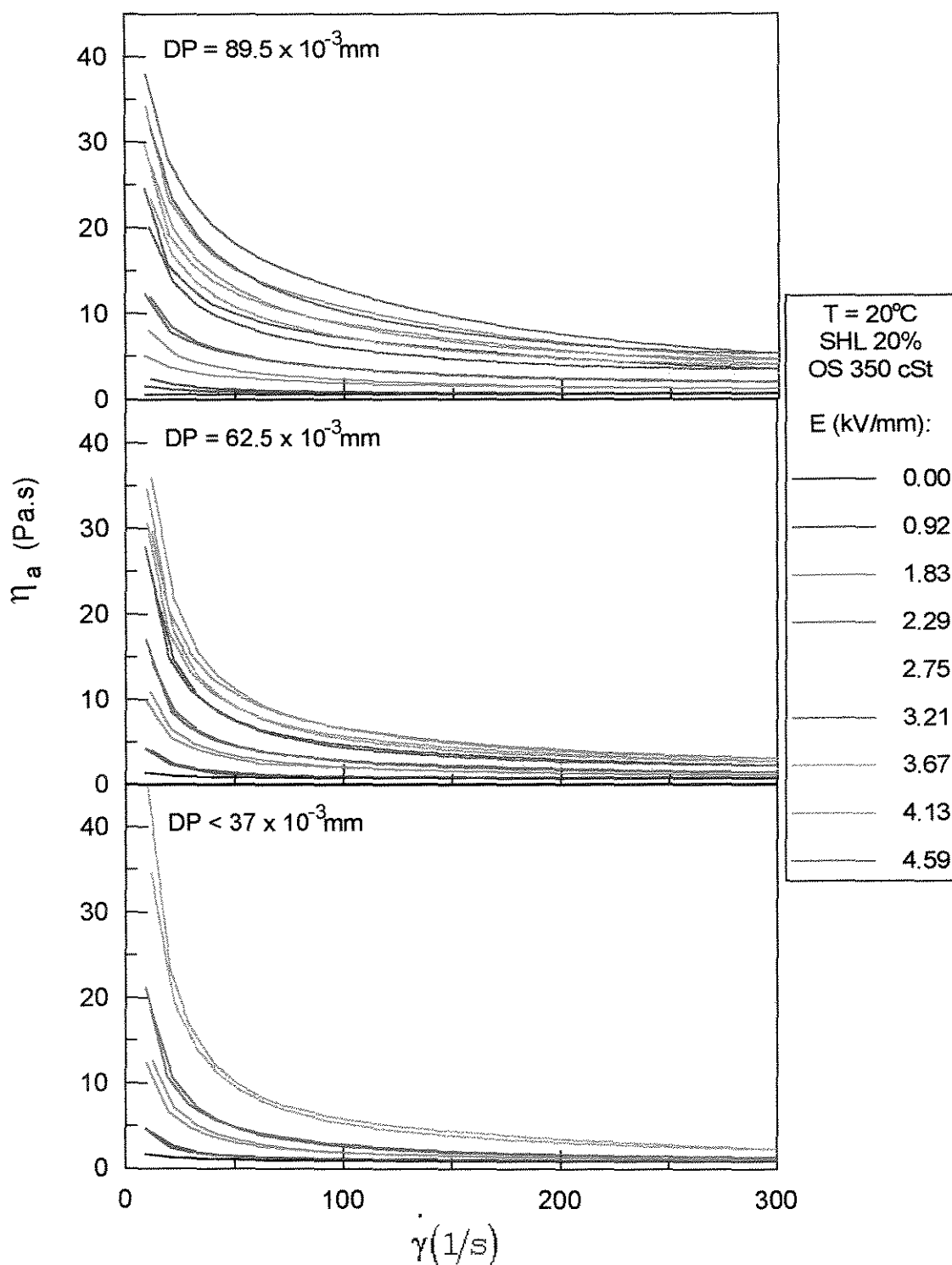


Figura A.31: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C.

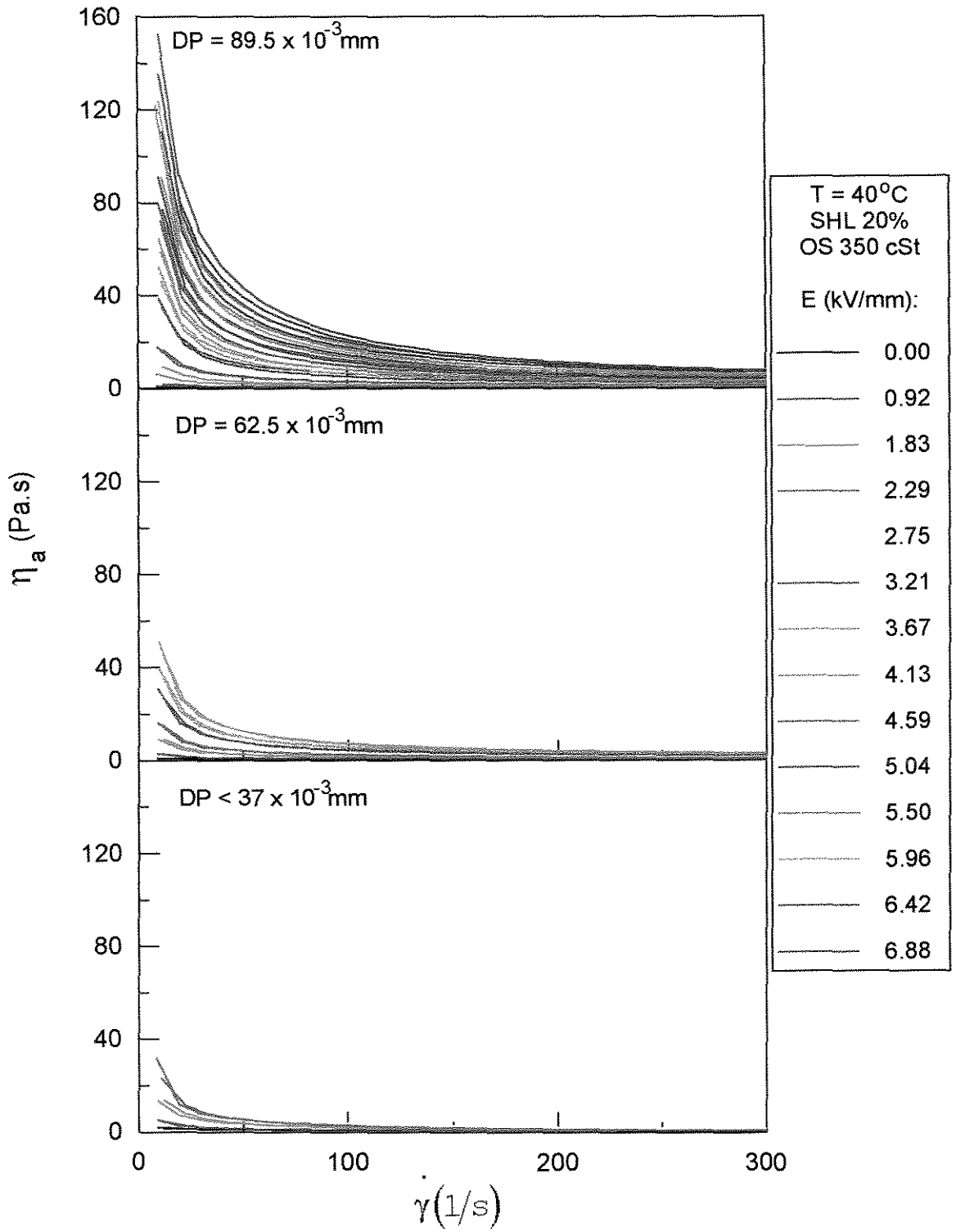


Figura A.32: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40°C .

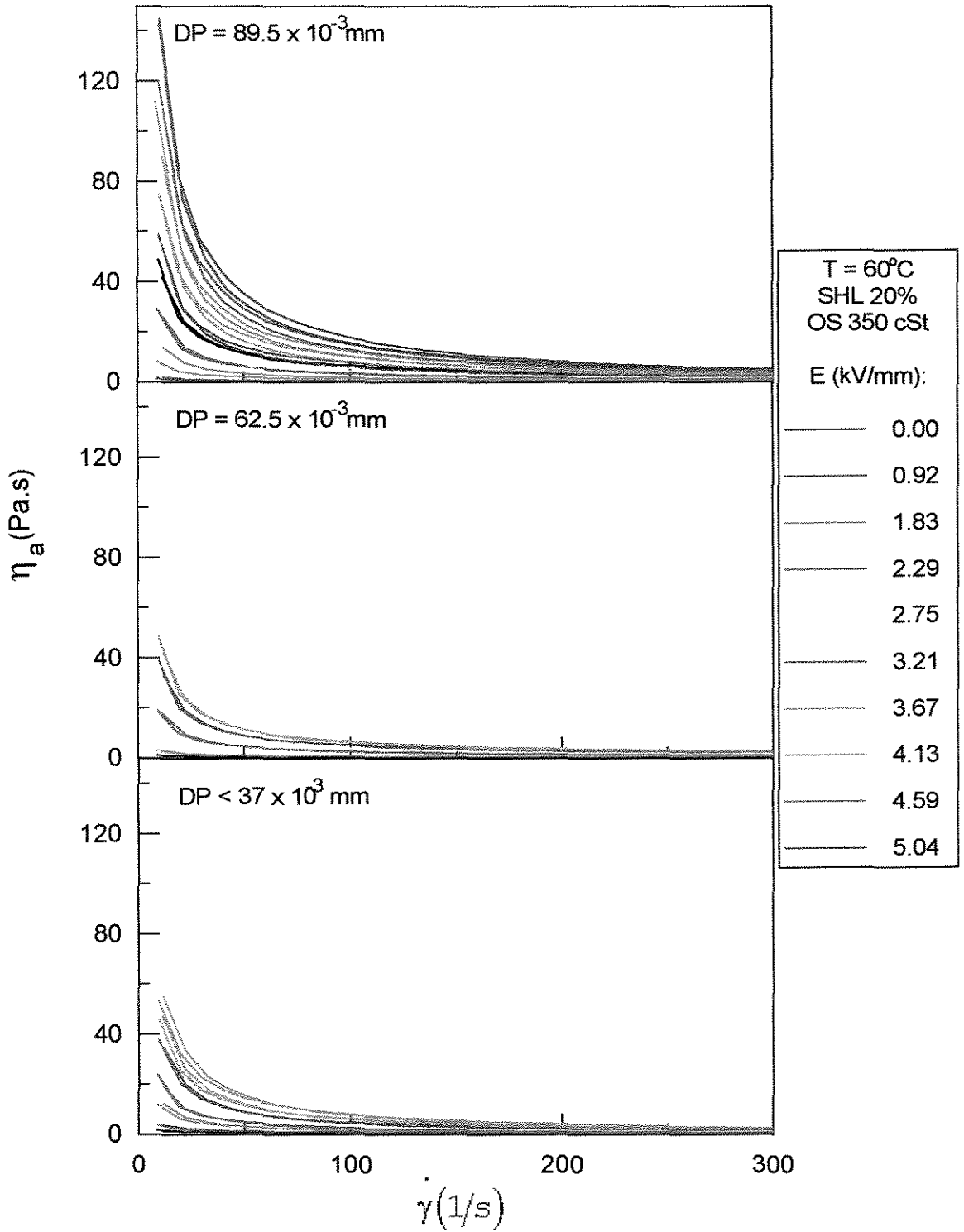


Figura A.33: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60°C .

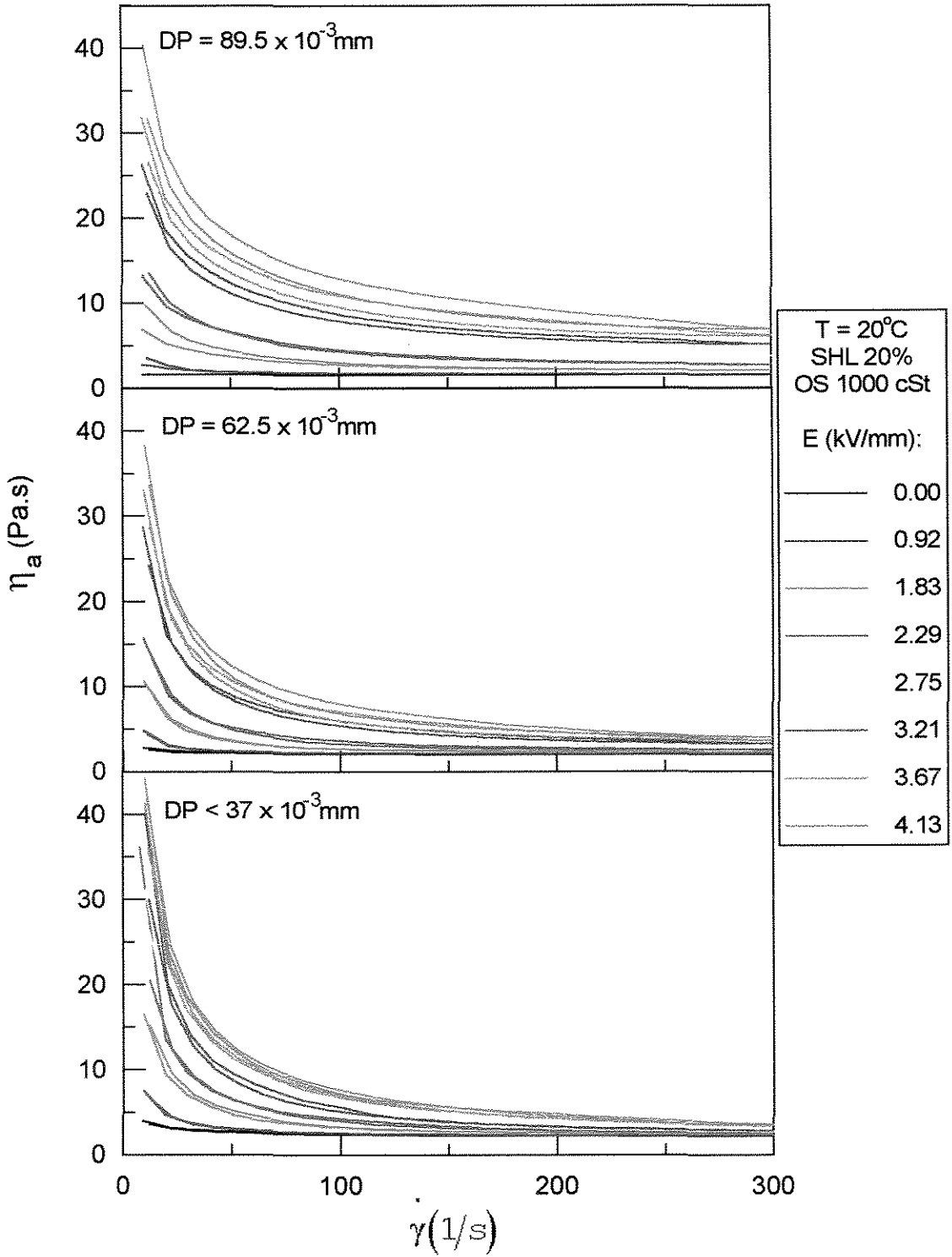


Figura A.34: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 20°C .

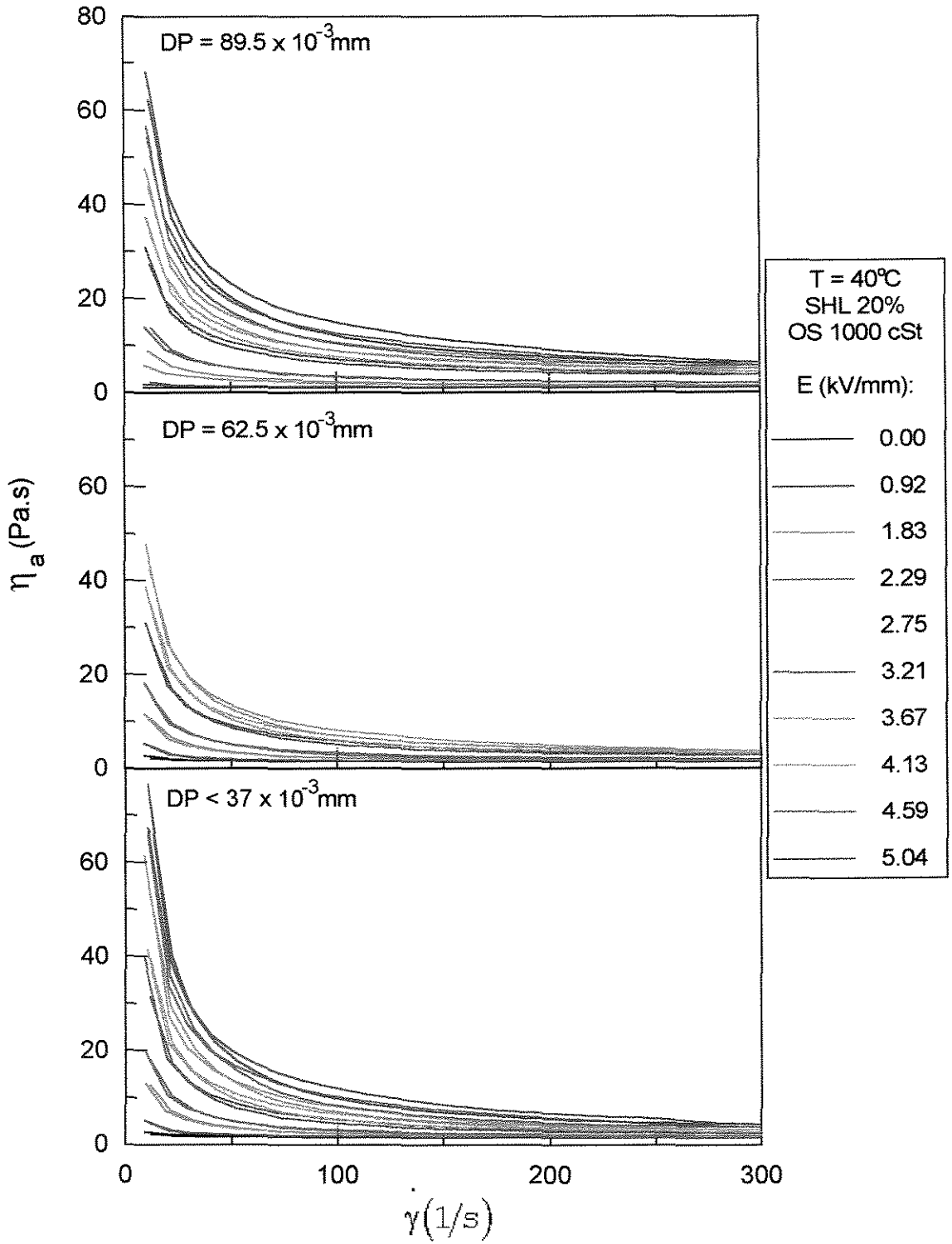


Figura A.35: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 40°C .

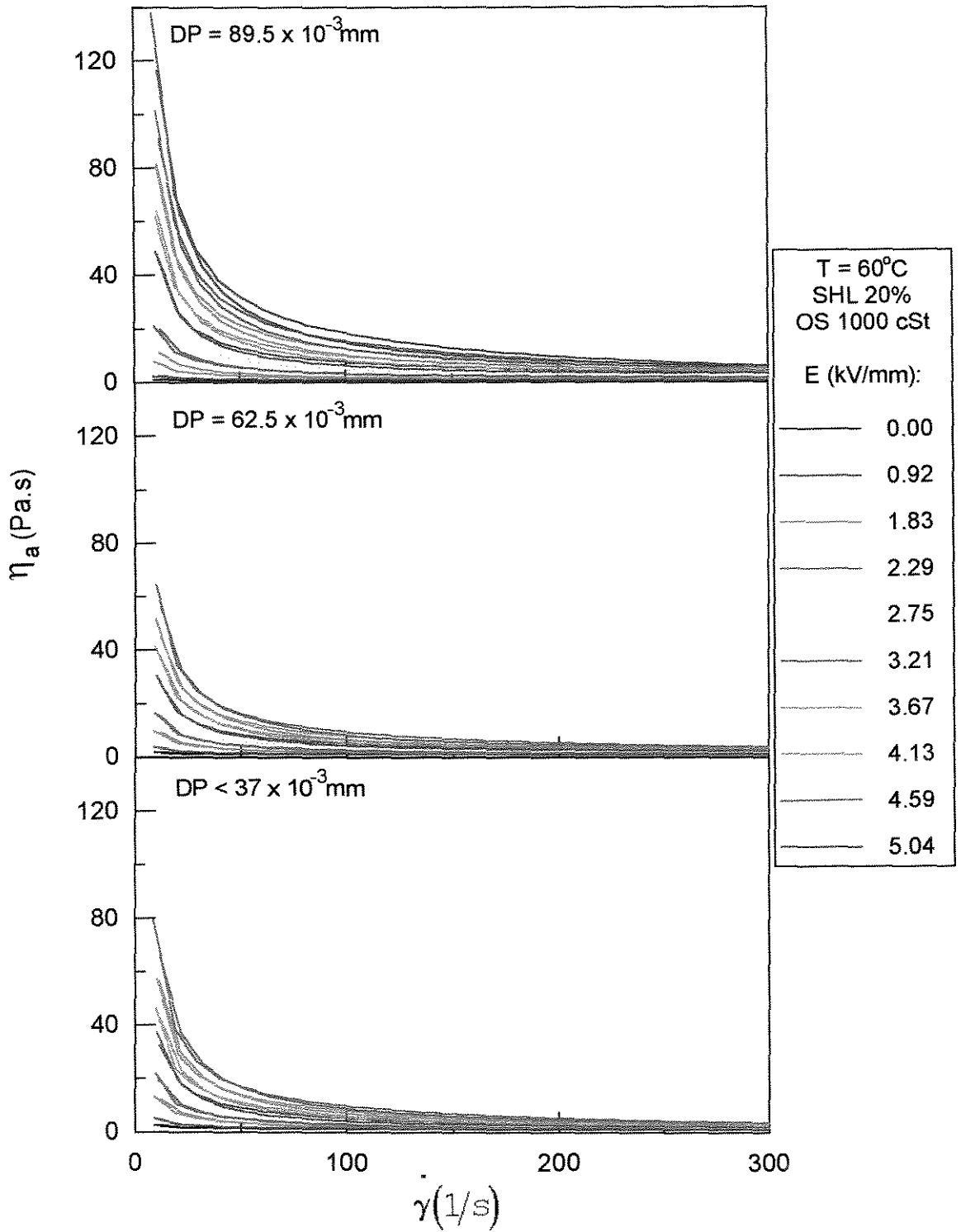


Figura A.36: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20% e temperatura de 60°C .

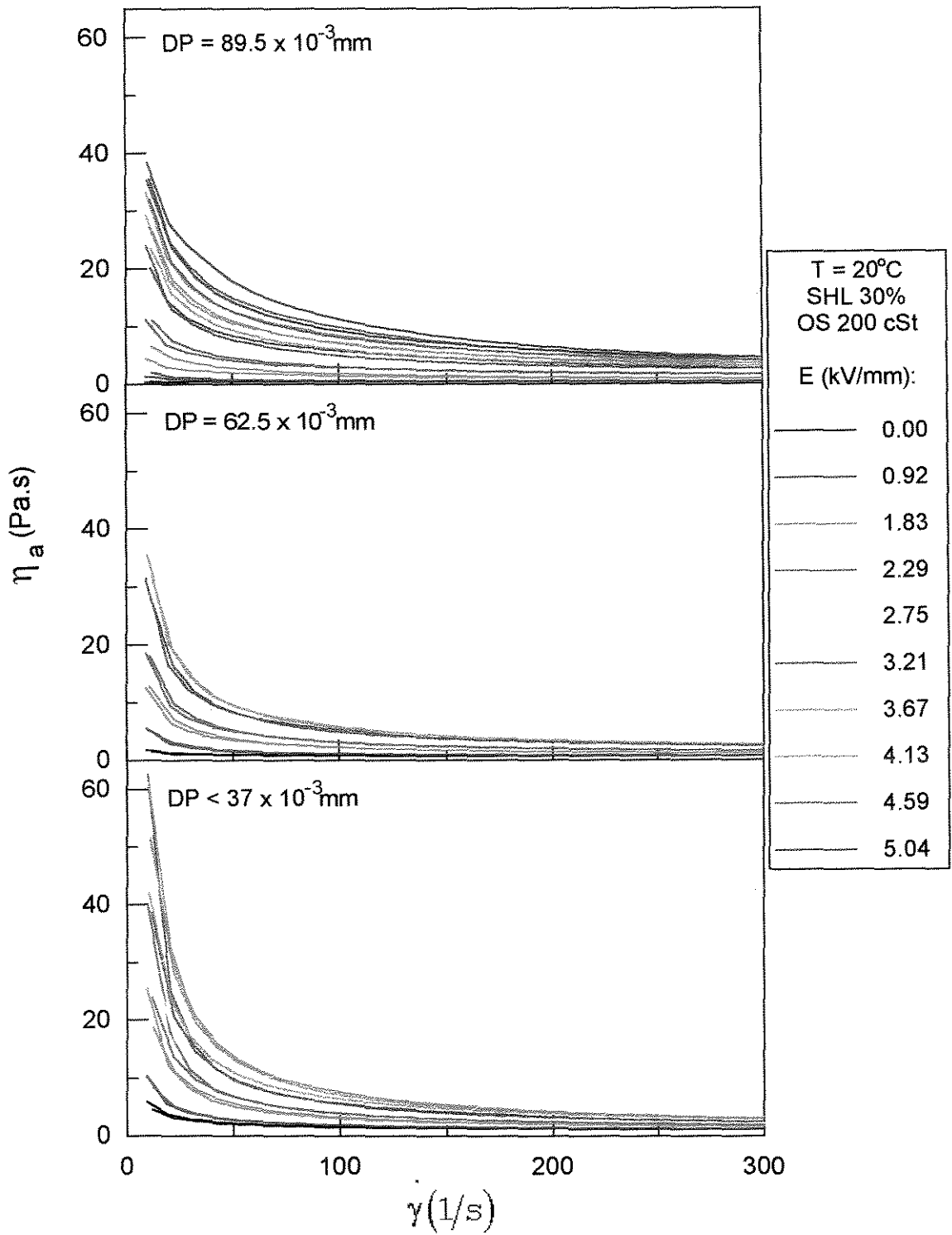


Figura A.37: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C .

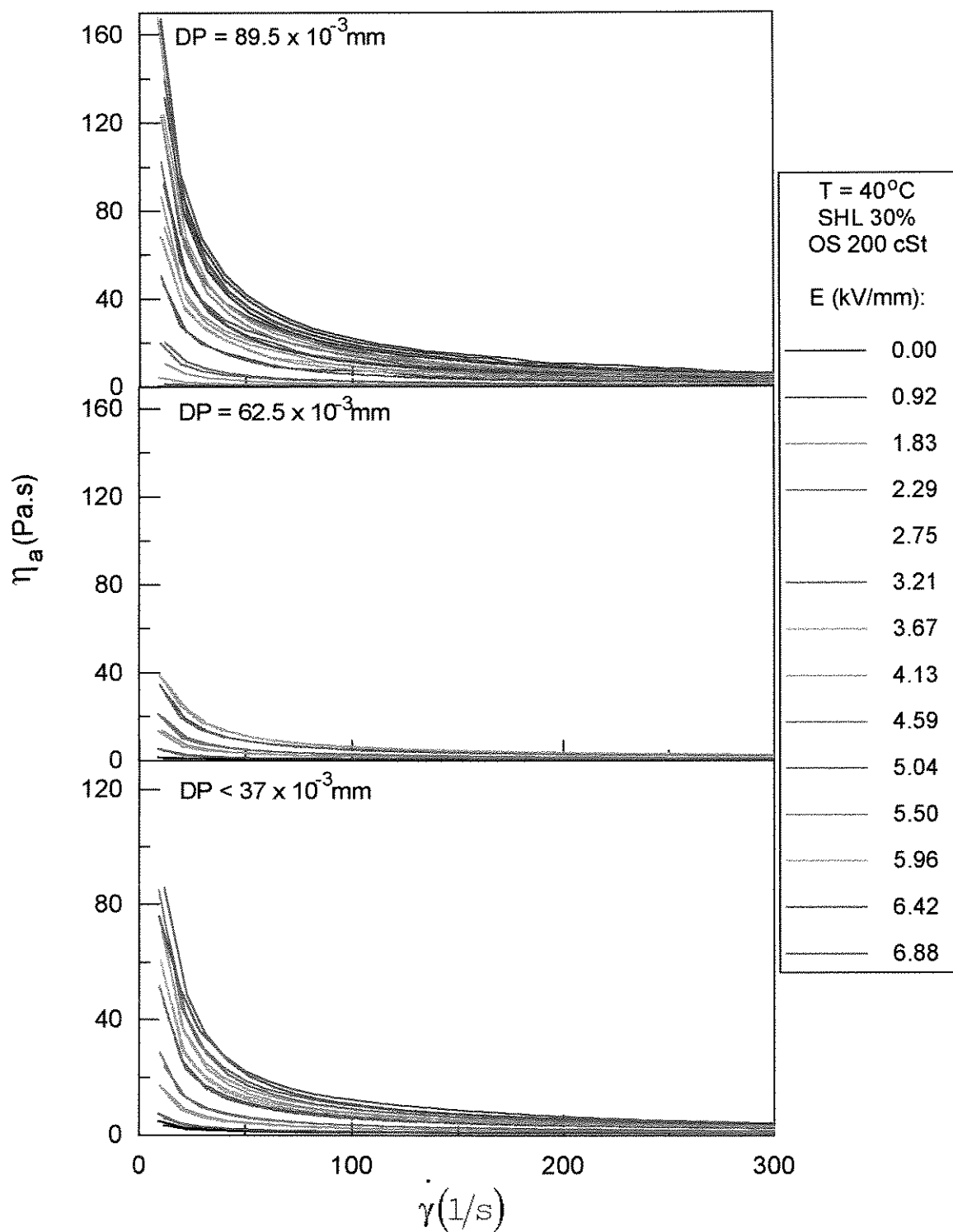


Figura A.38: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C .

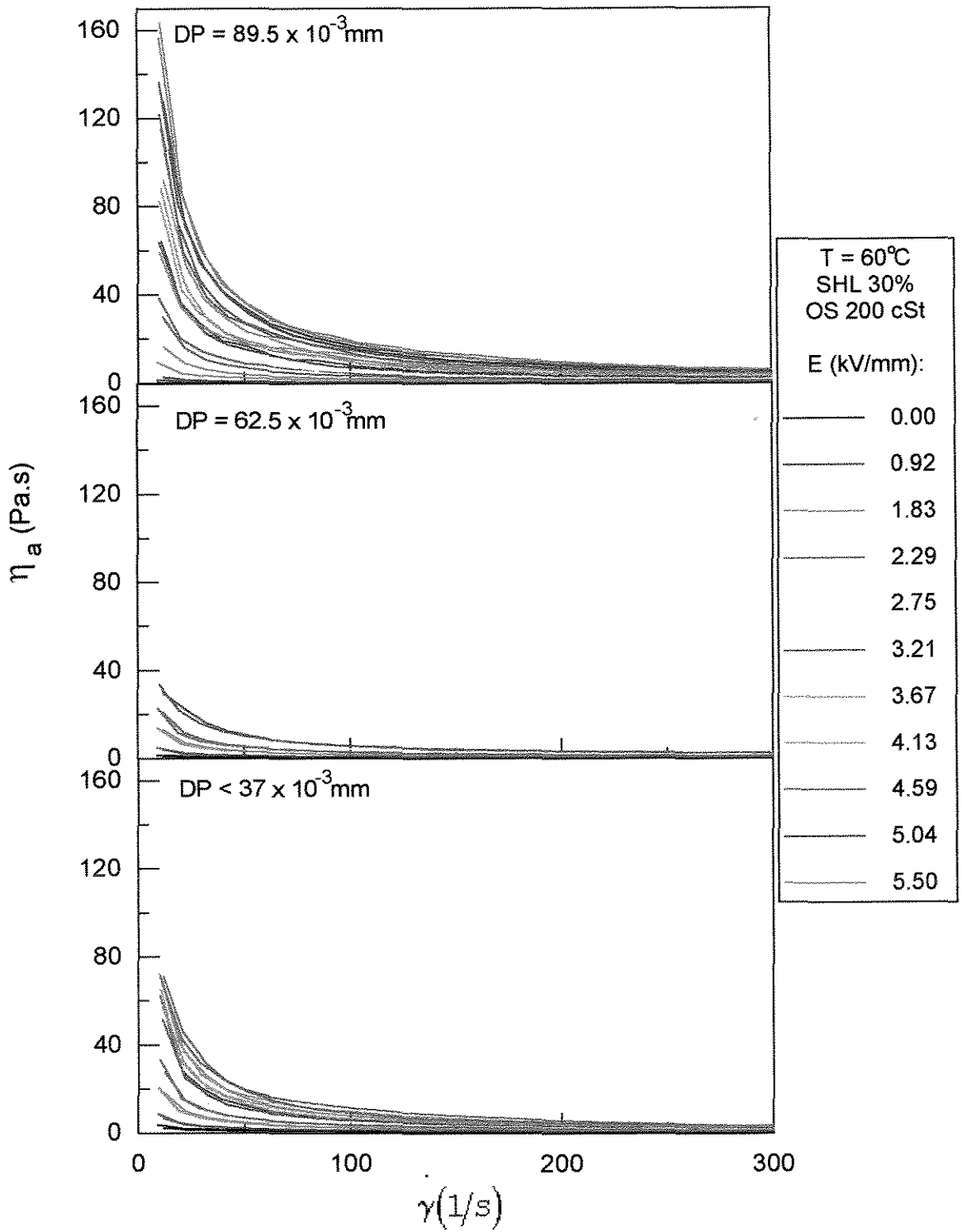


Figura A.39: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C.

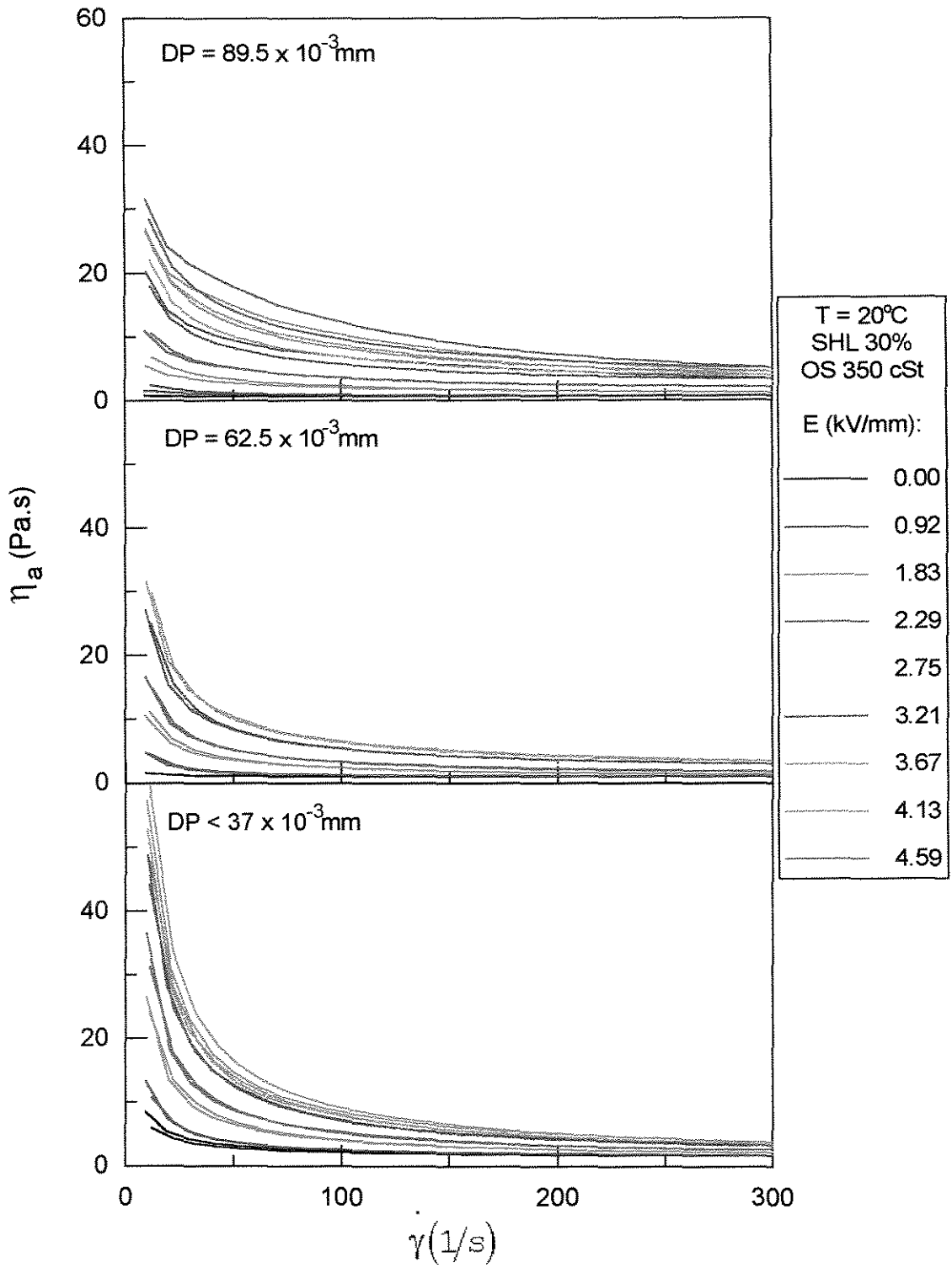


Figura A.40: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C .

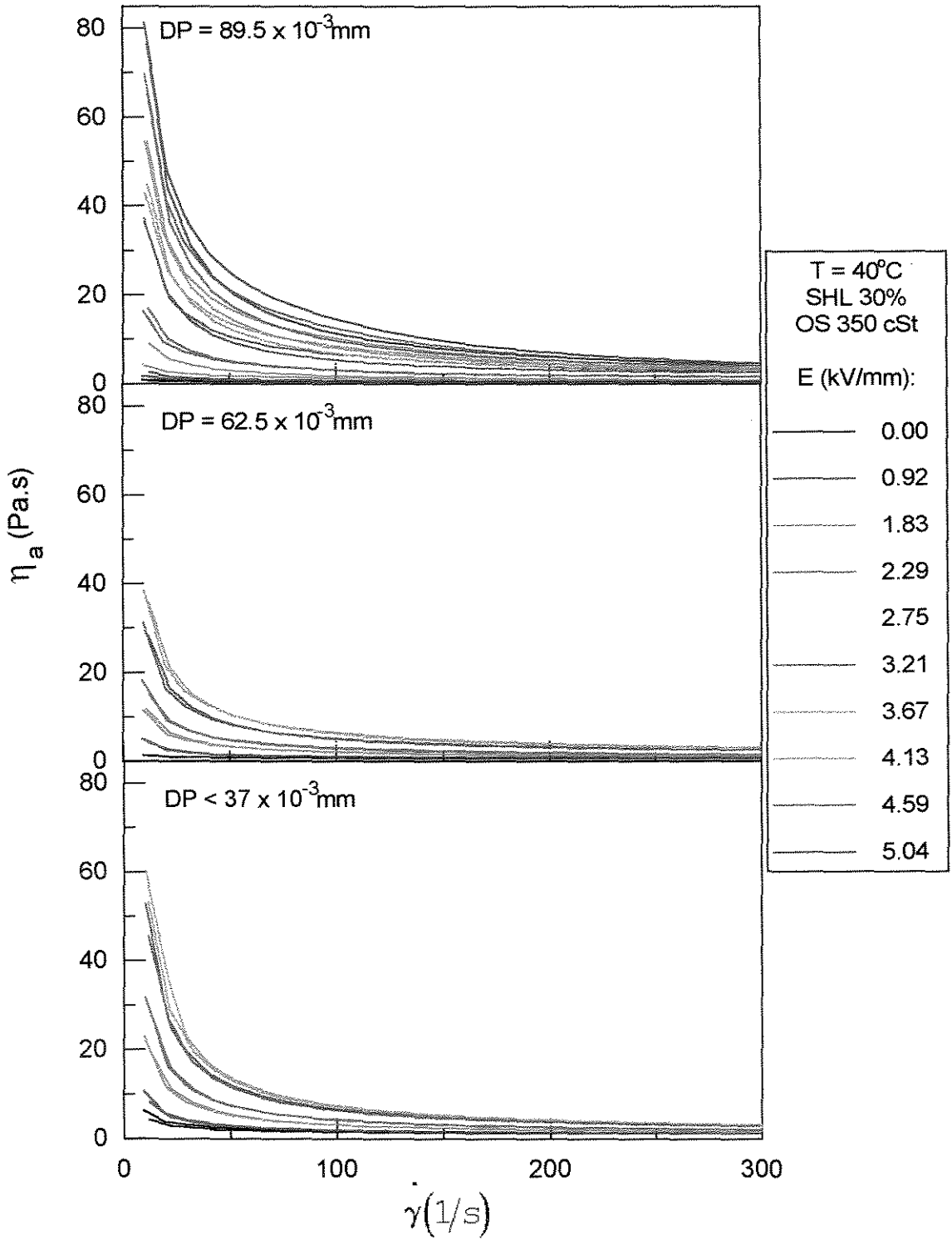


Figura A.41: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C.

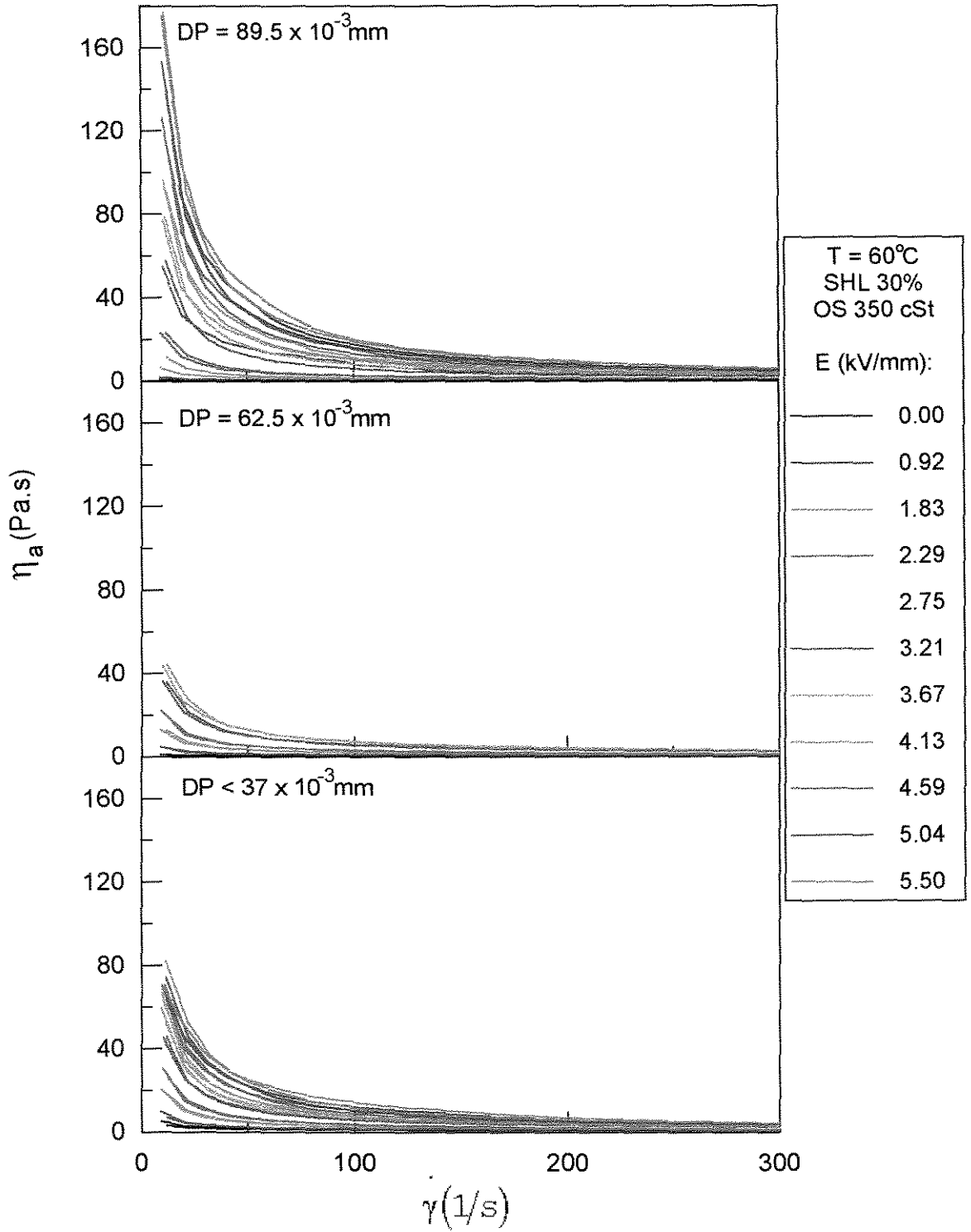


Figura A.42: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C .

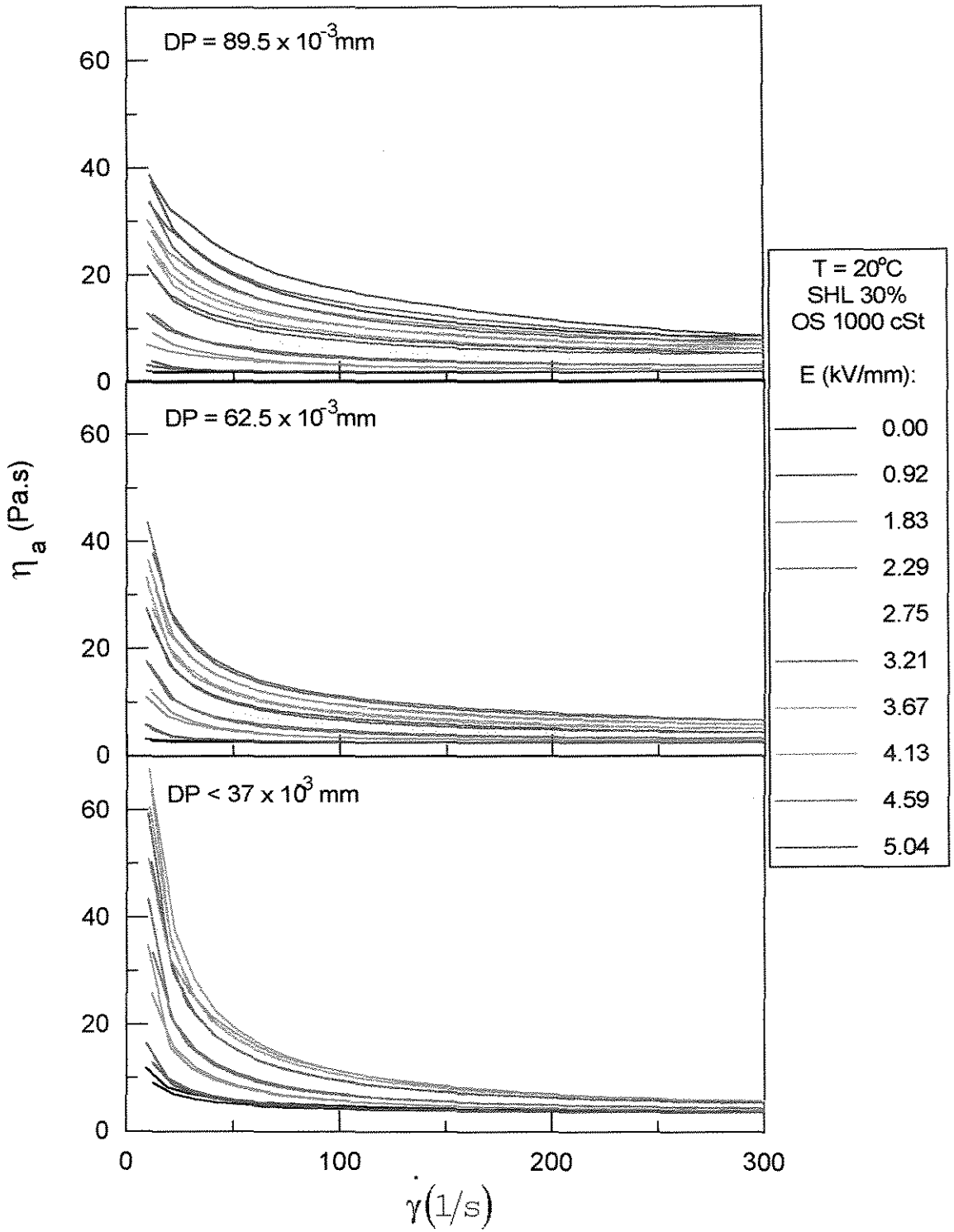


Figura A.43: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 20°C .

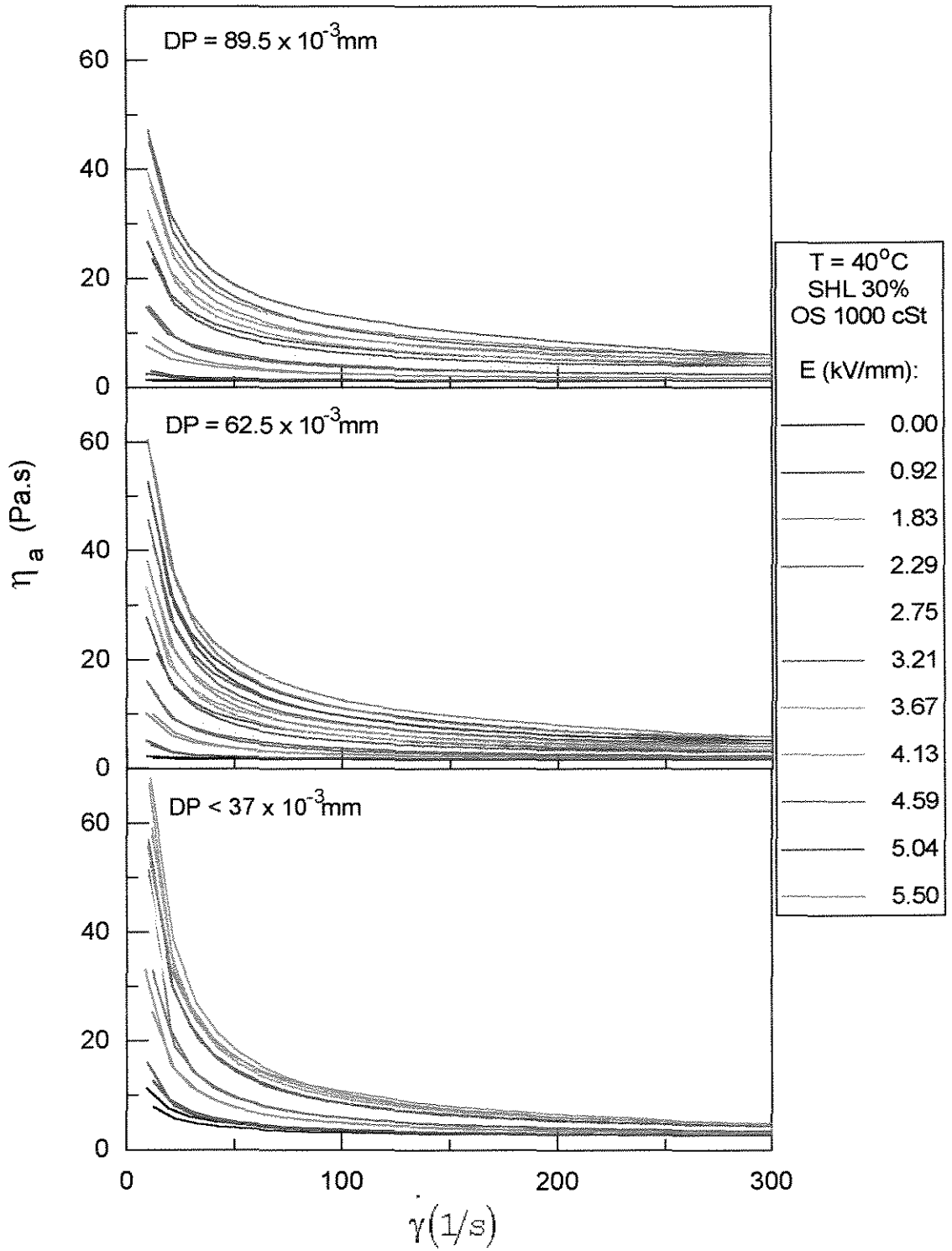


Figura A.44: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 40°C .

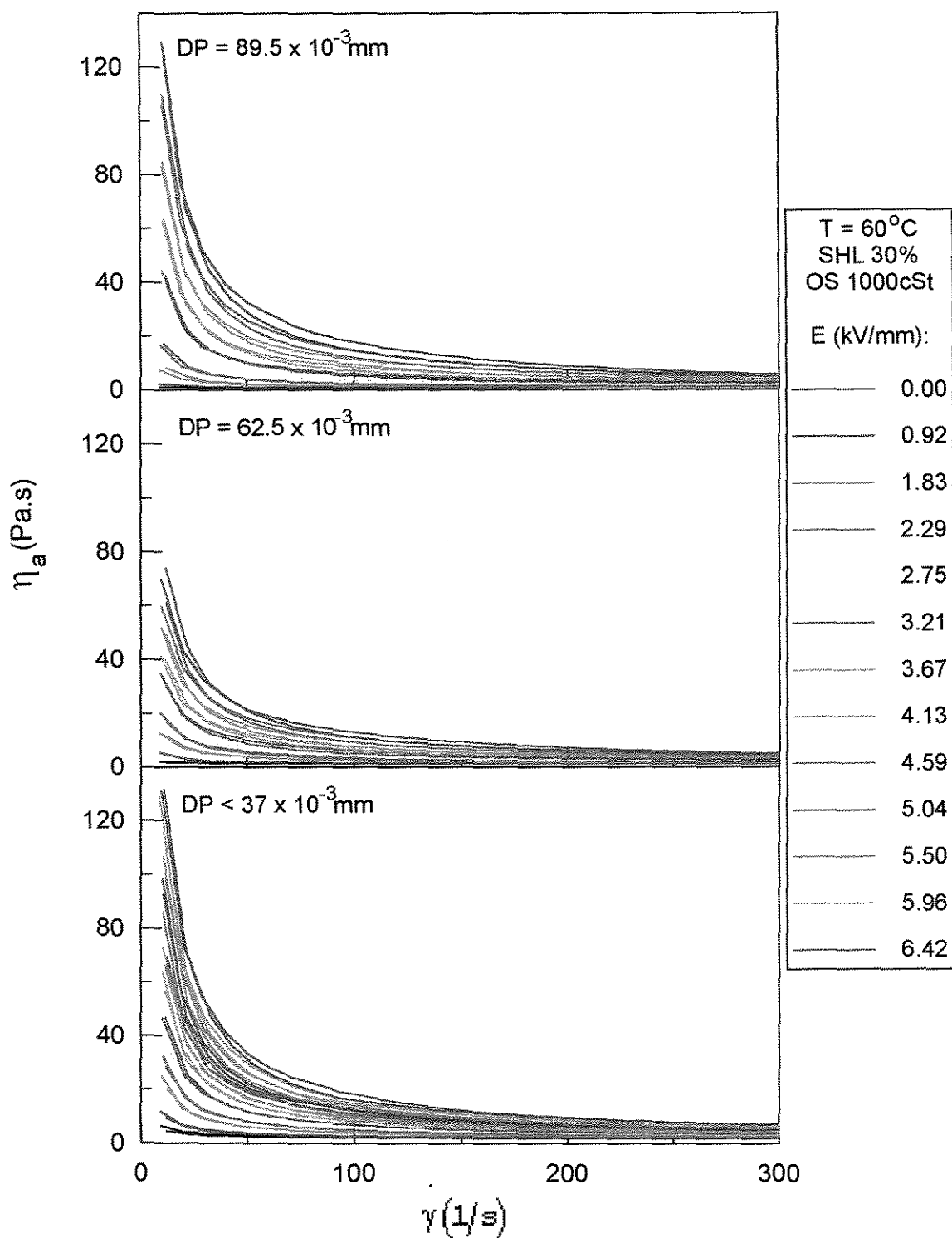


Figura A.45: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30% e temperatura de 60°C.

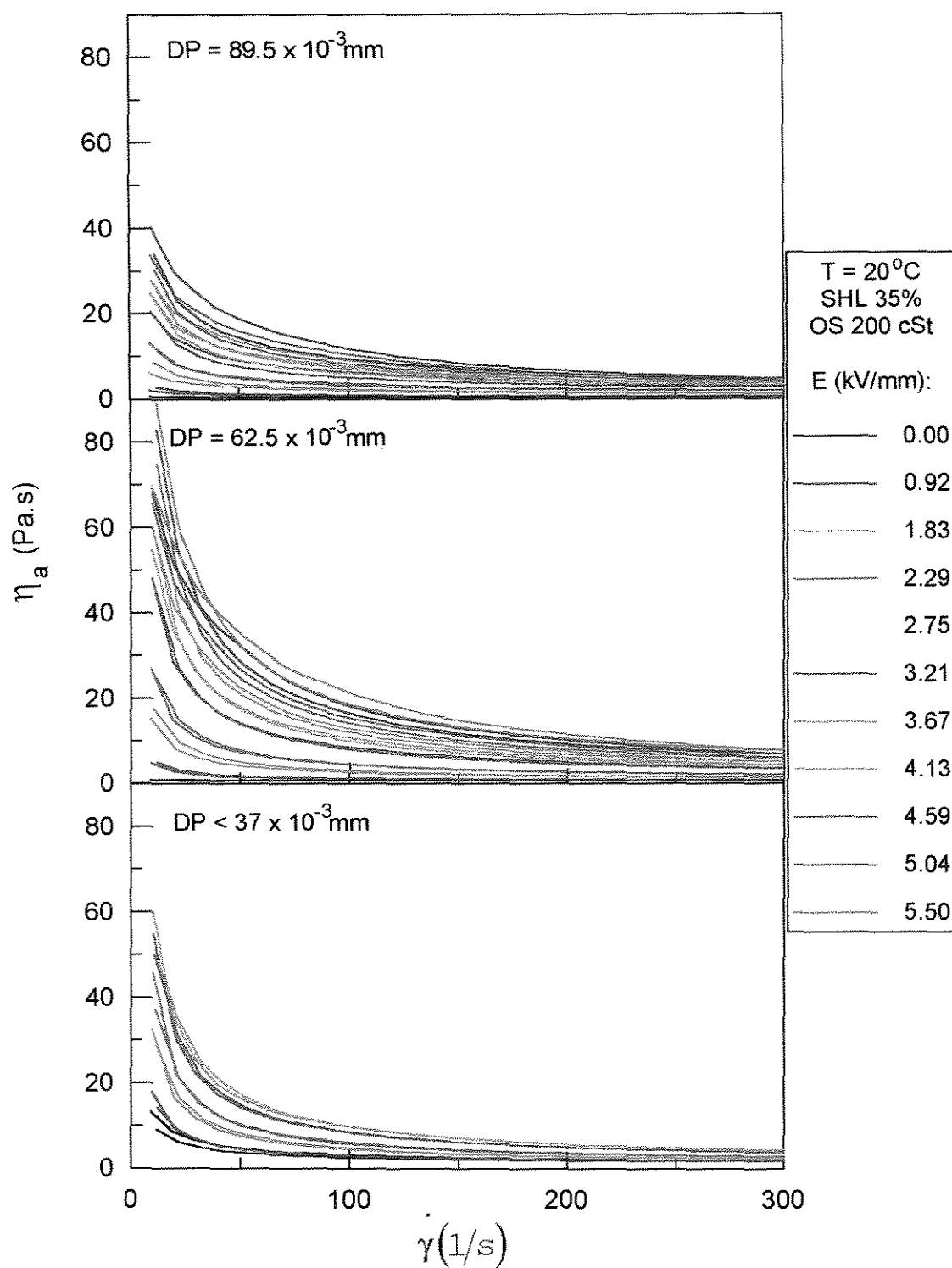


Figura A.46: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C.

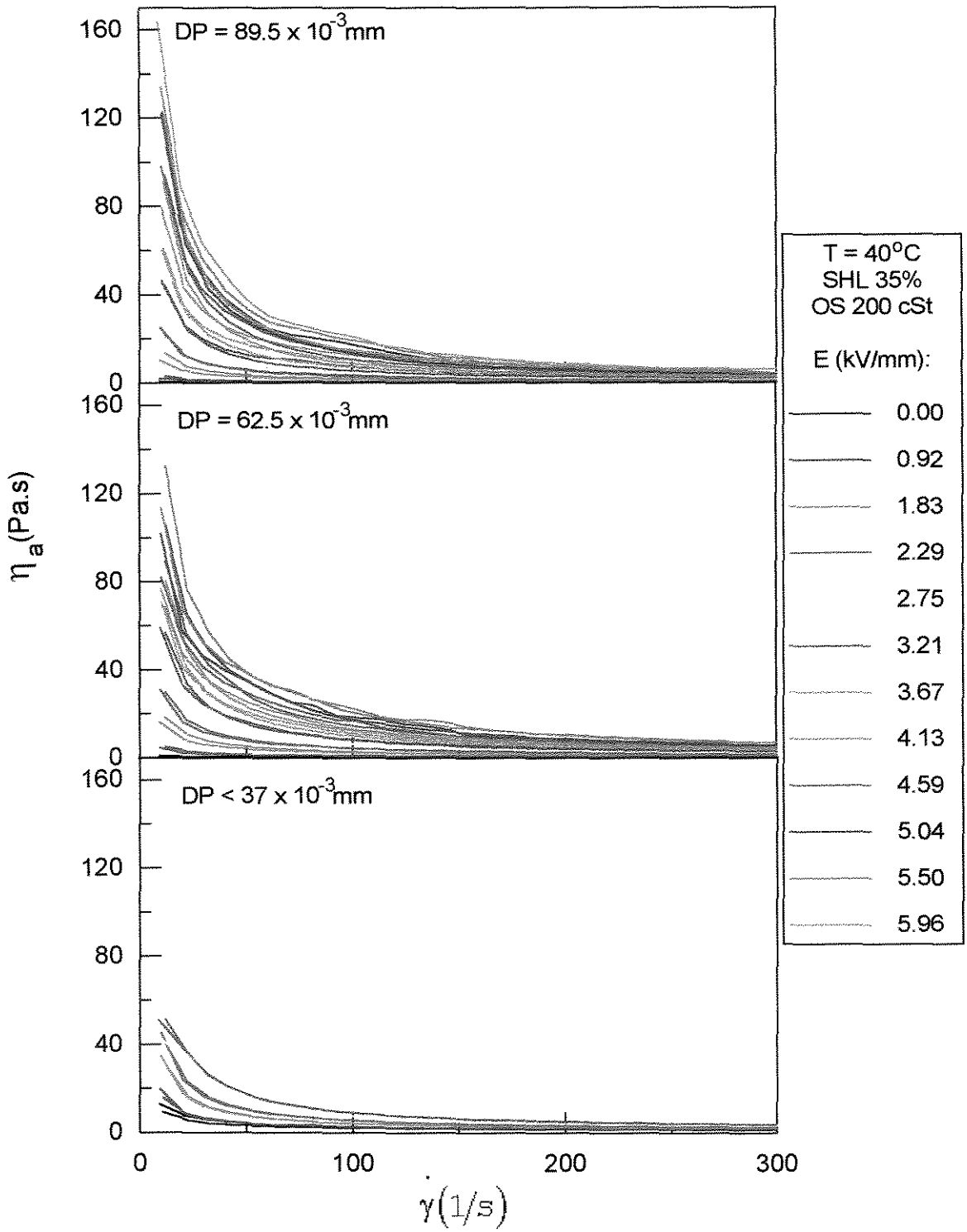


Figura A.47: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C .

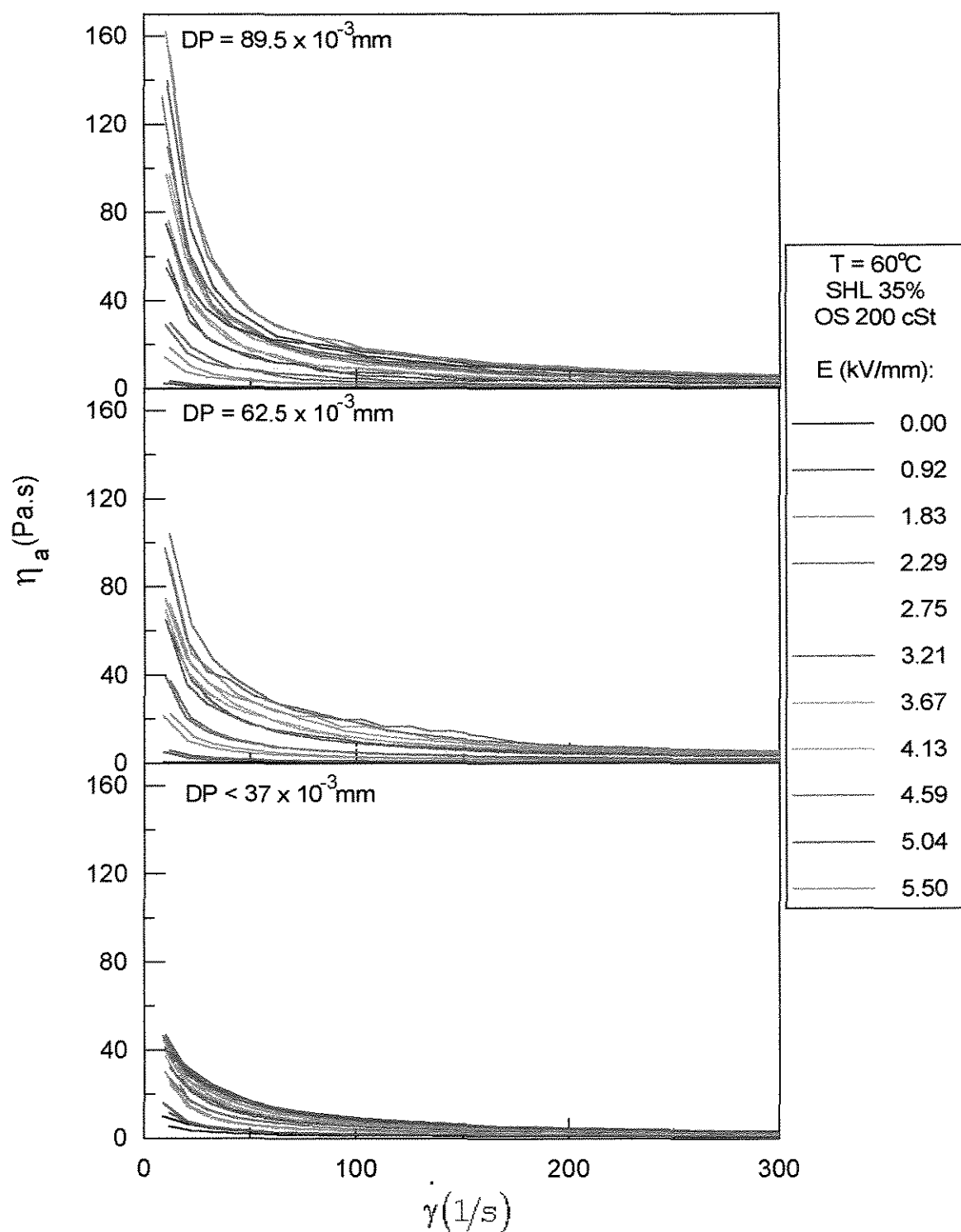


Figura A.48: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

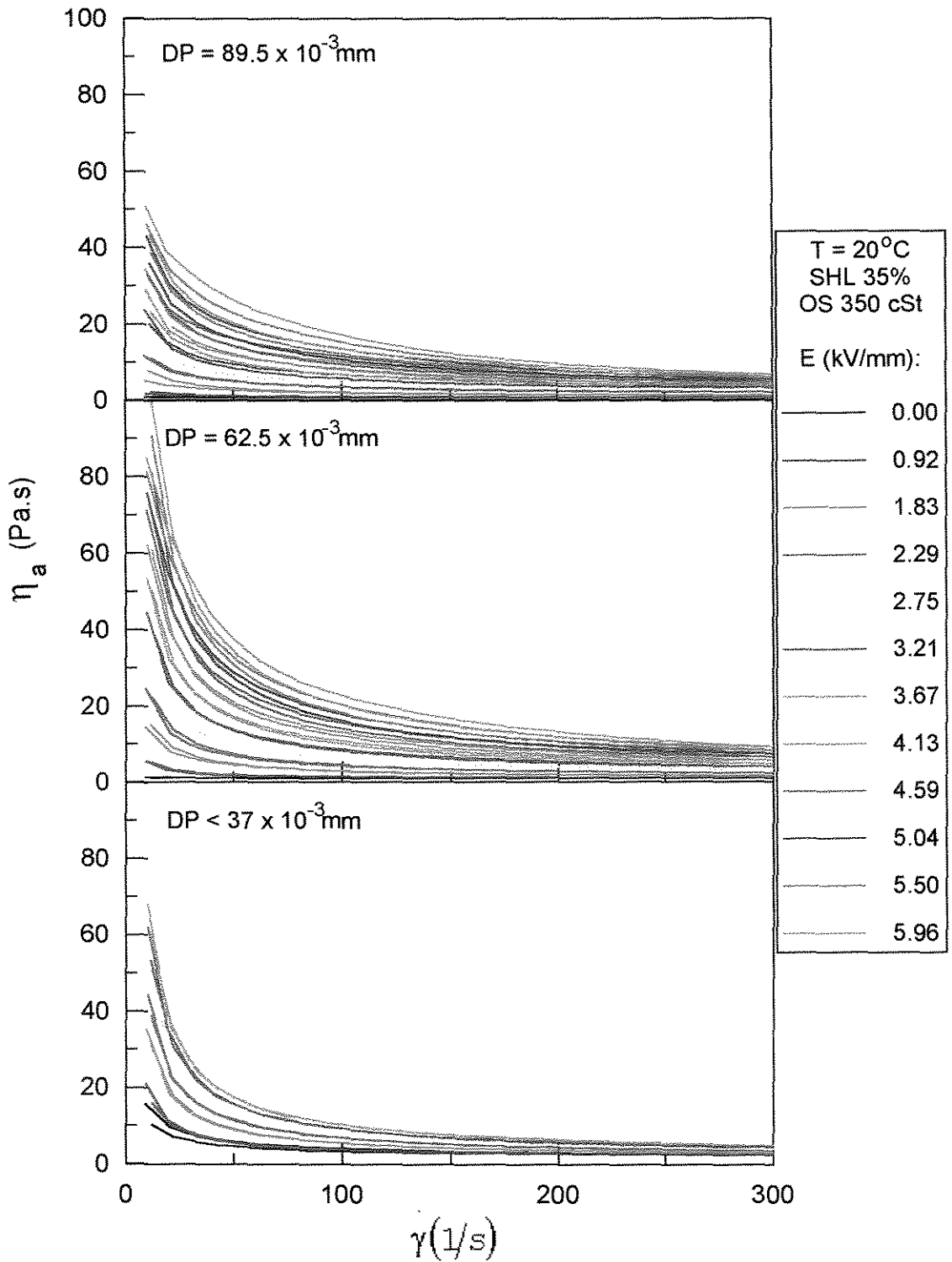


Figura A.49: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C.

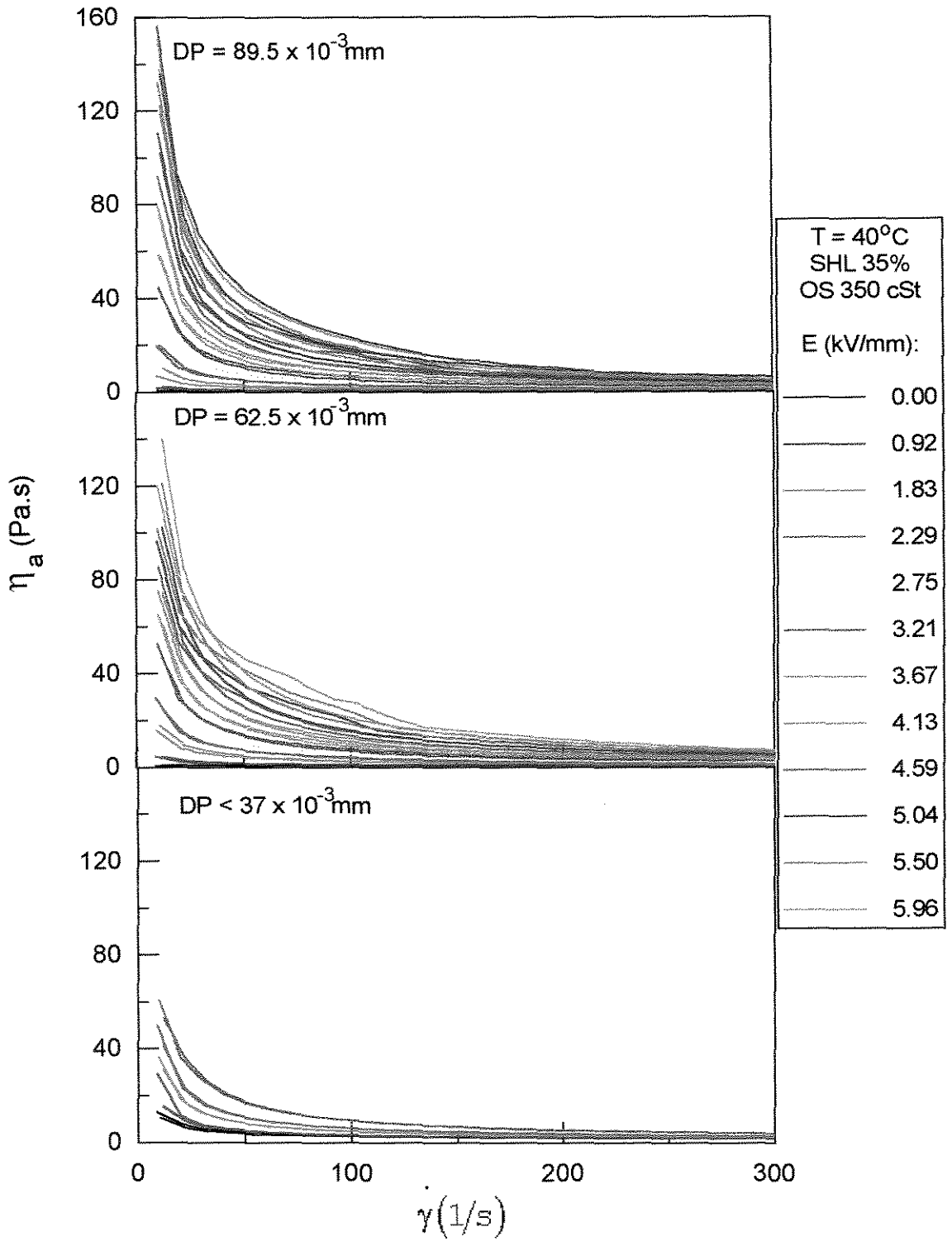


Figura A.50: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C.

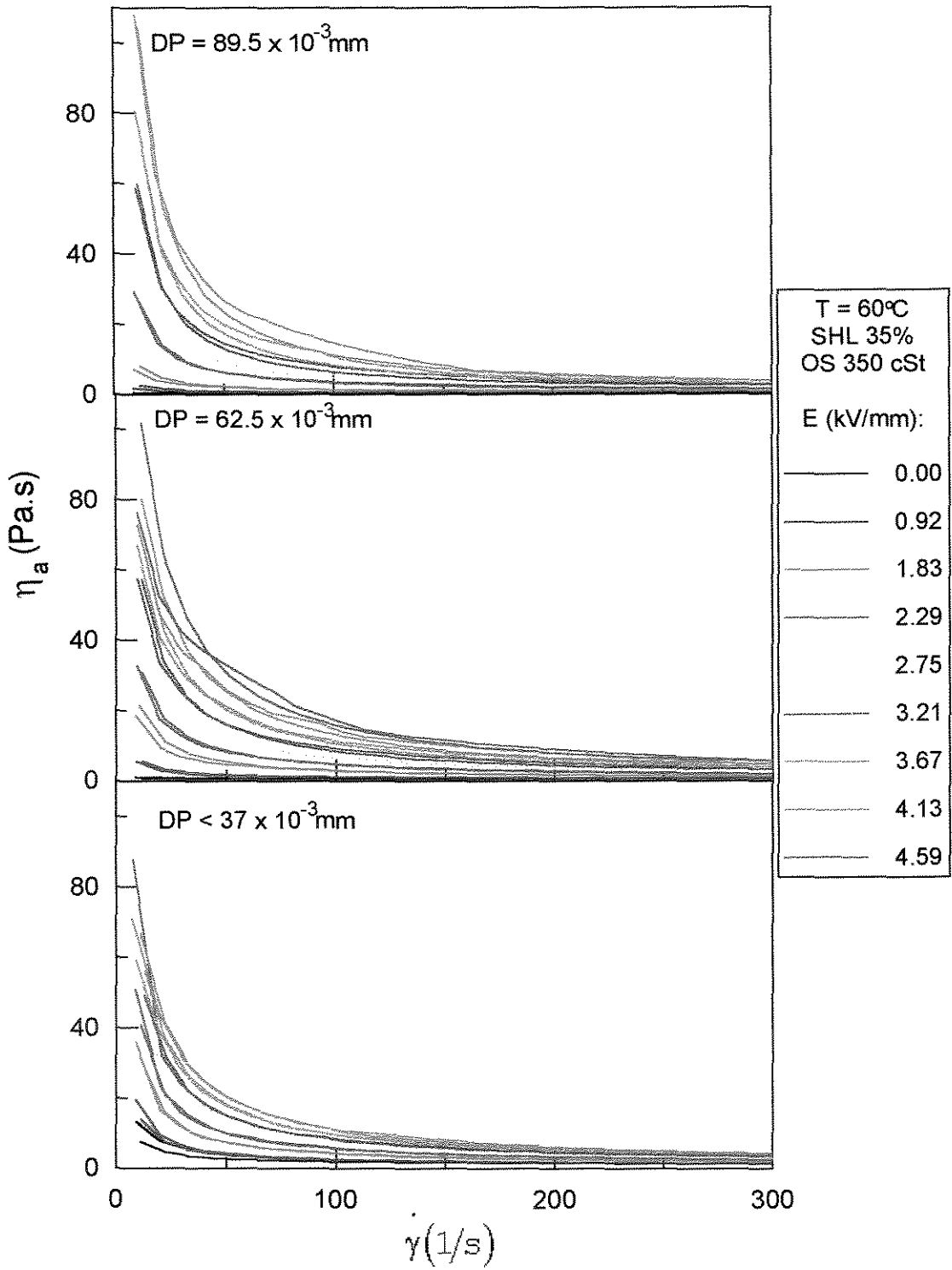


Figura A.51: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

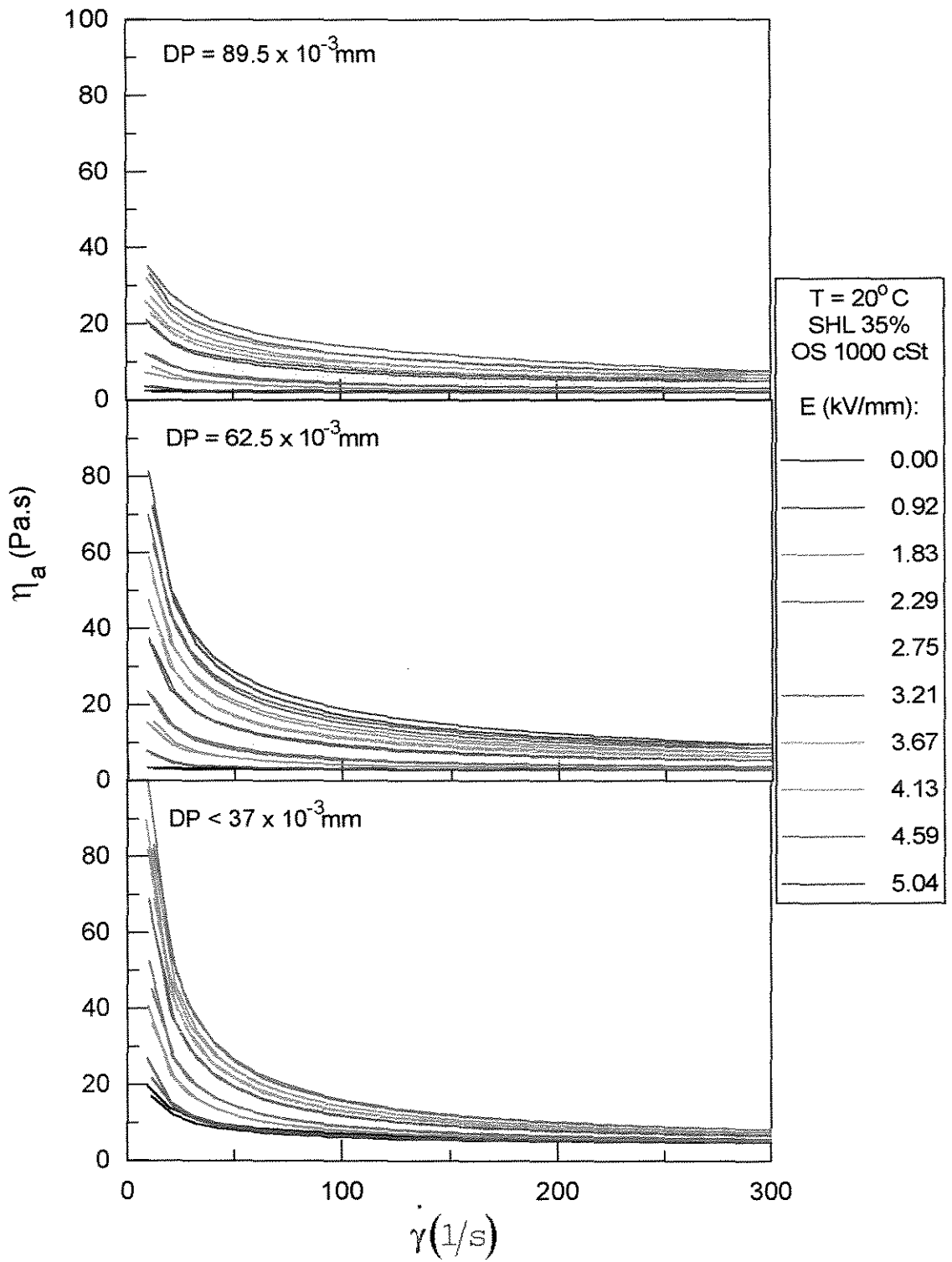


Figura A.52: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 20°C .

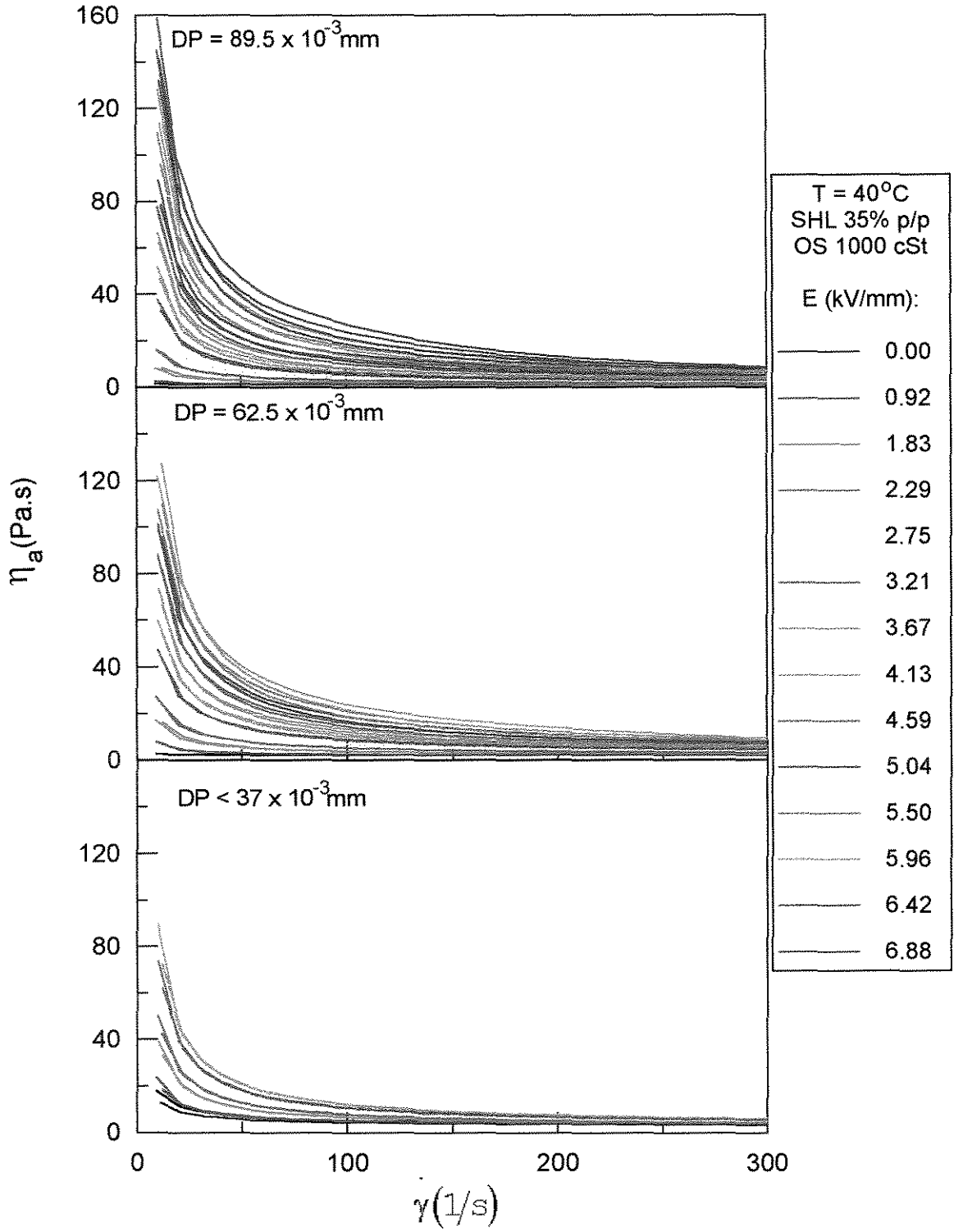


Figura A.53: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 40°C .

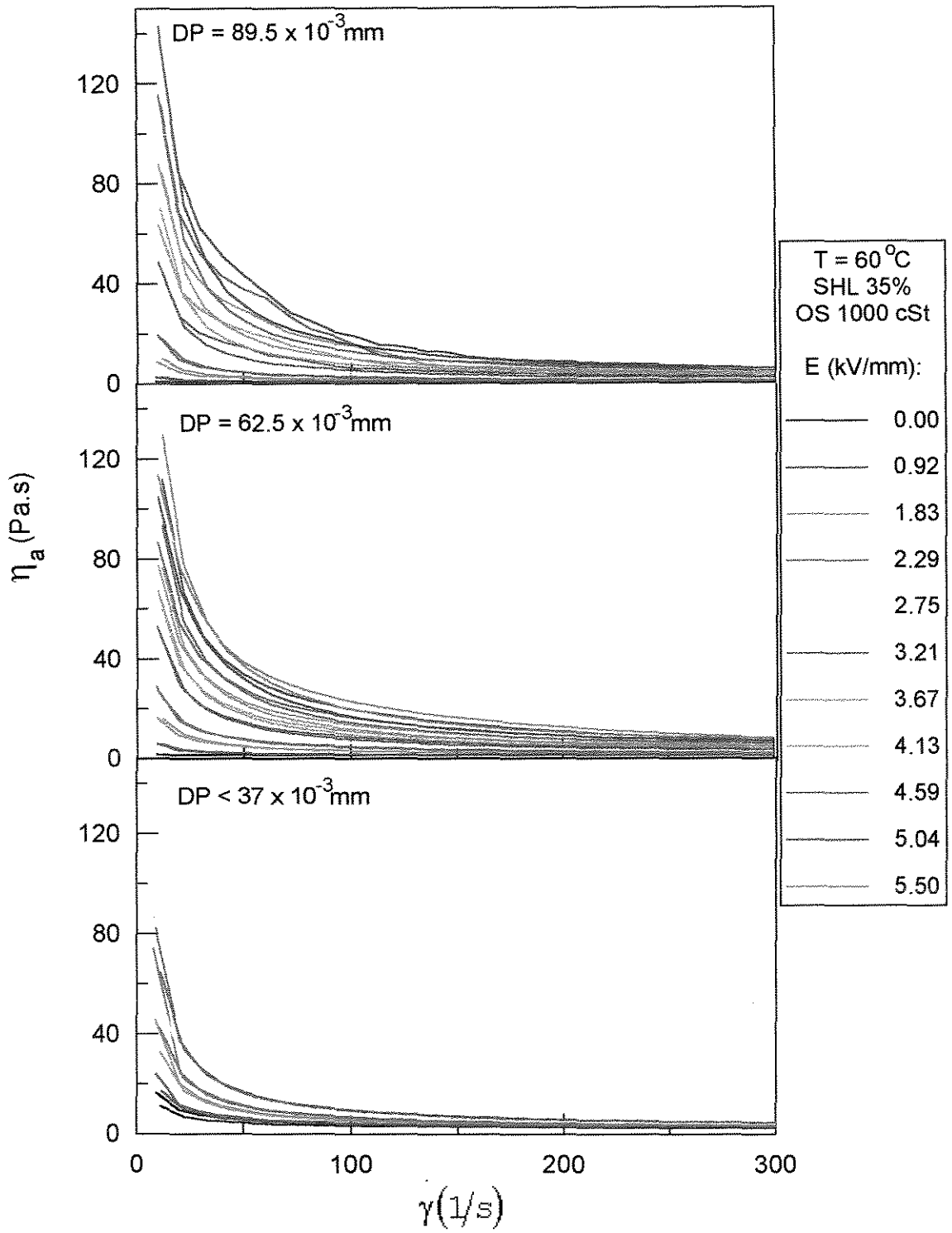


Figura A.54: Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35% e temperatura de 60°C.

APÊNDICE B

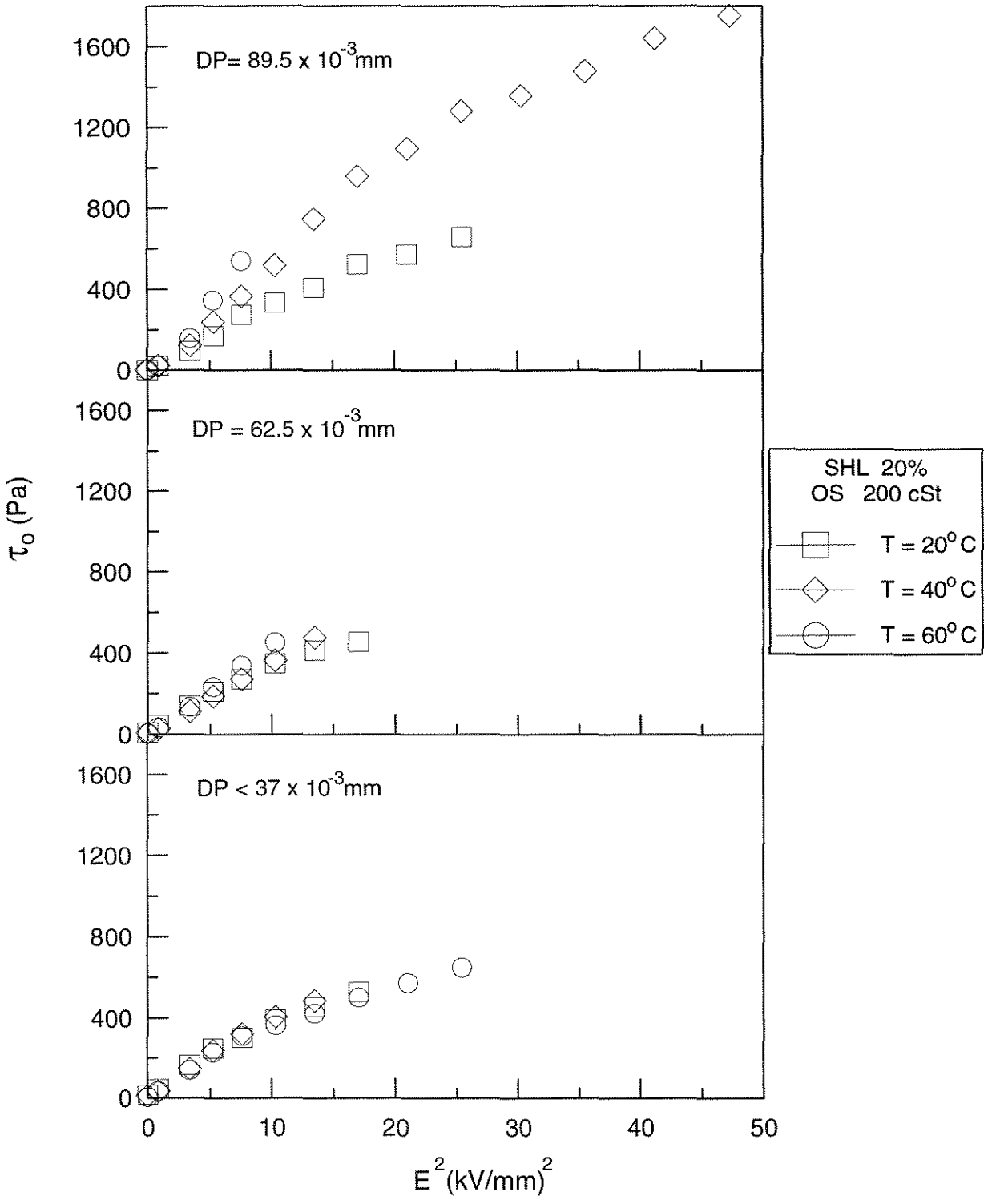


Figura B.1 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

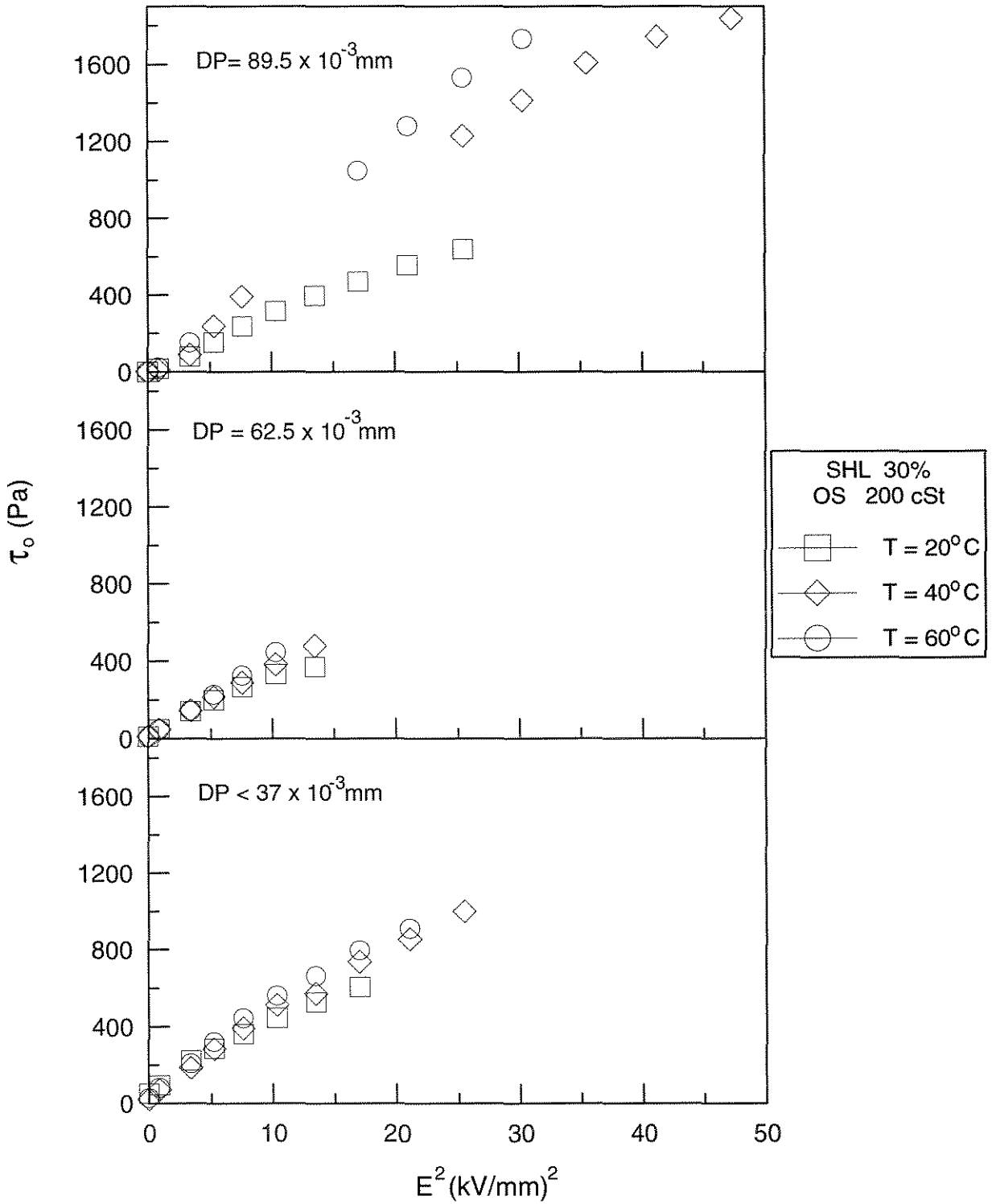


Figura B.2 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

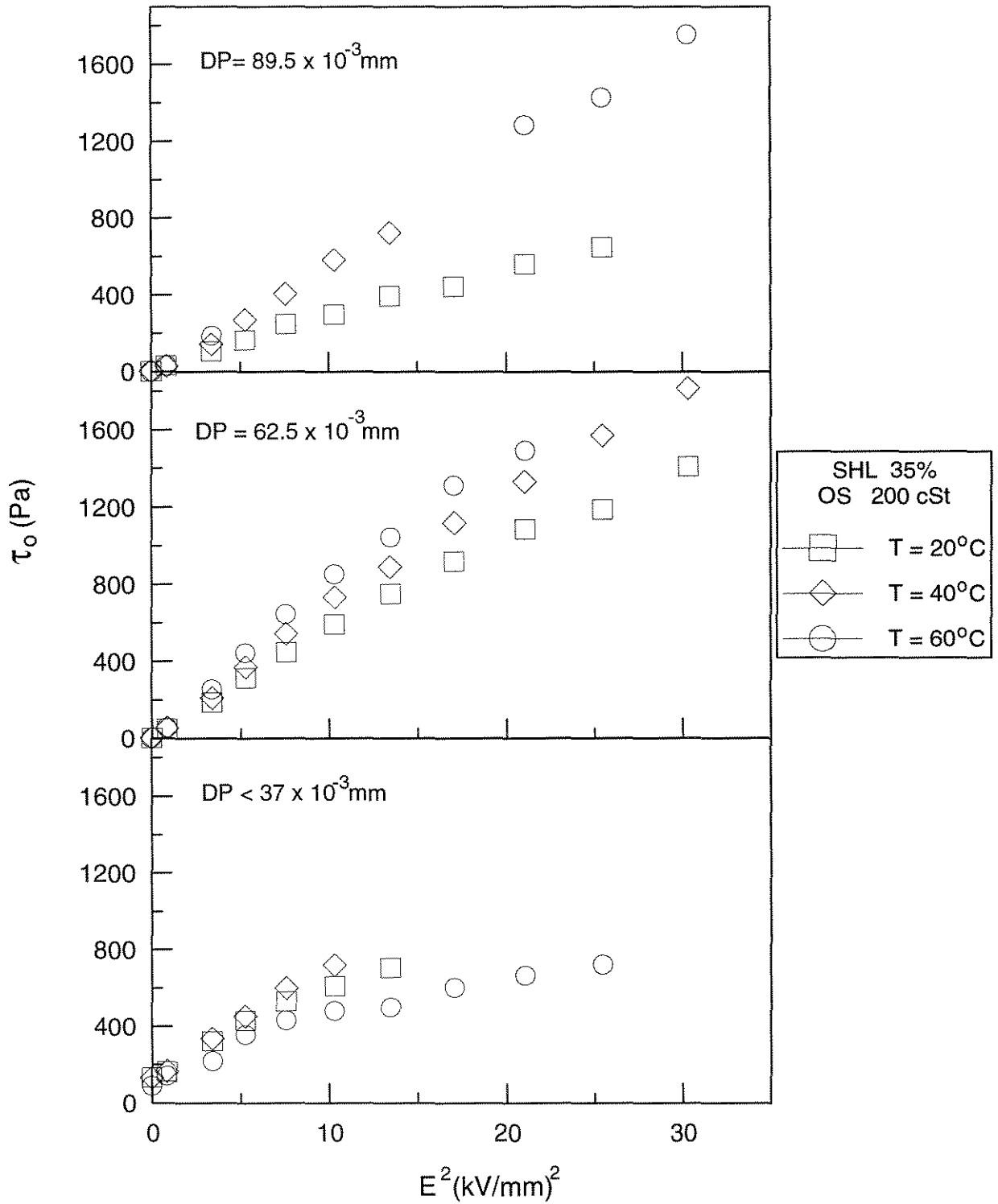


Figura B.3 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

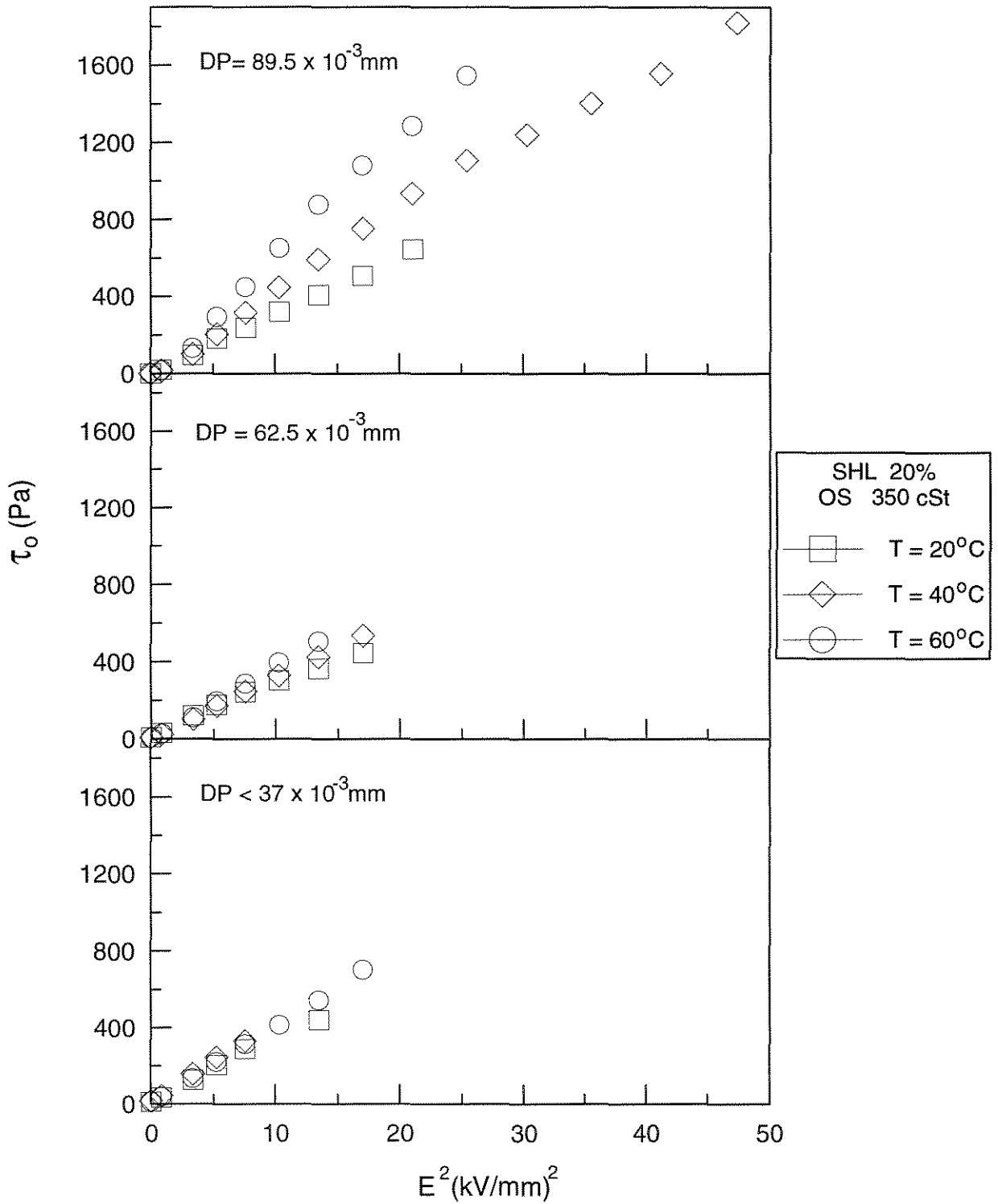


Figura B.4 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

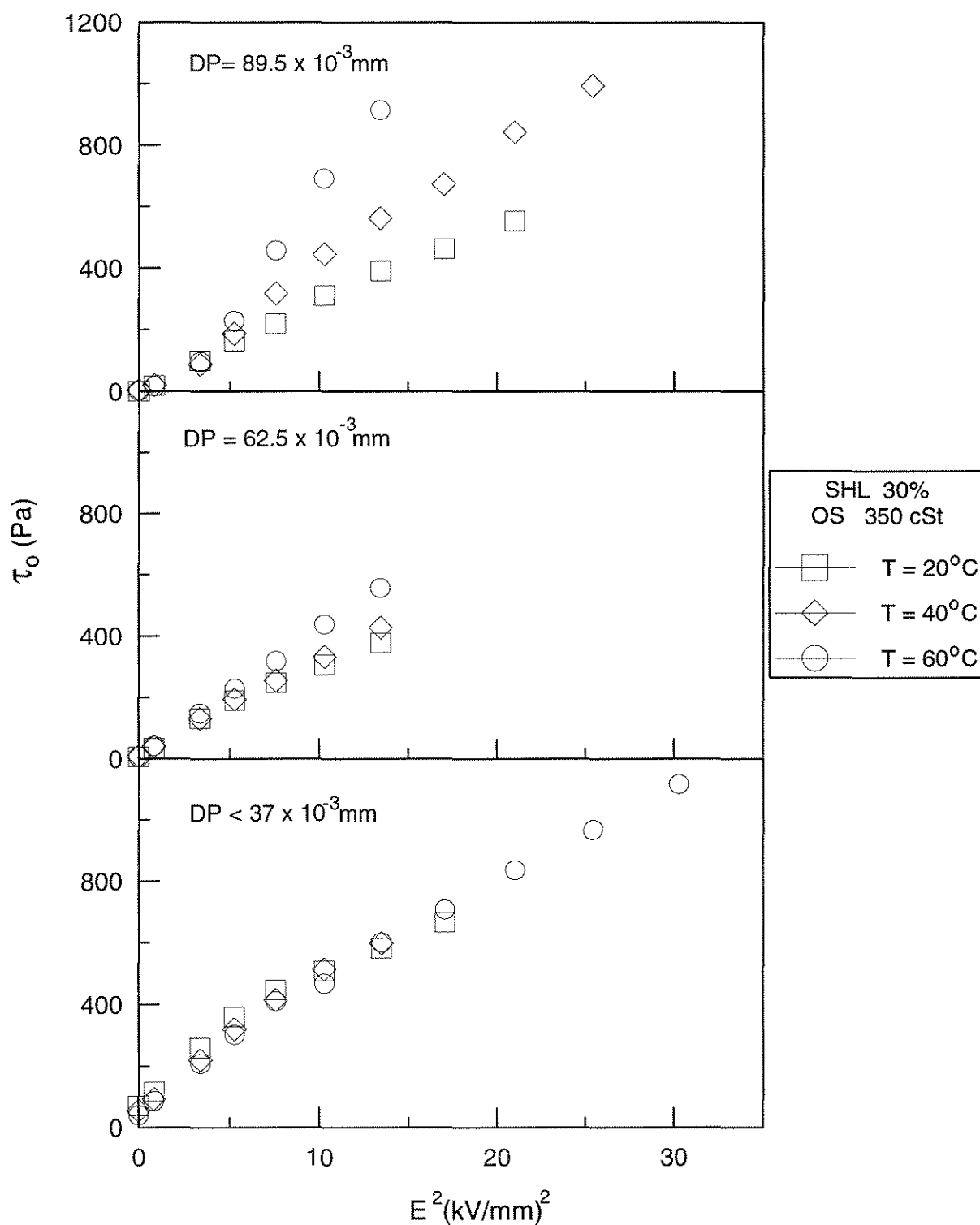


Figura B.5 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

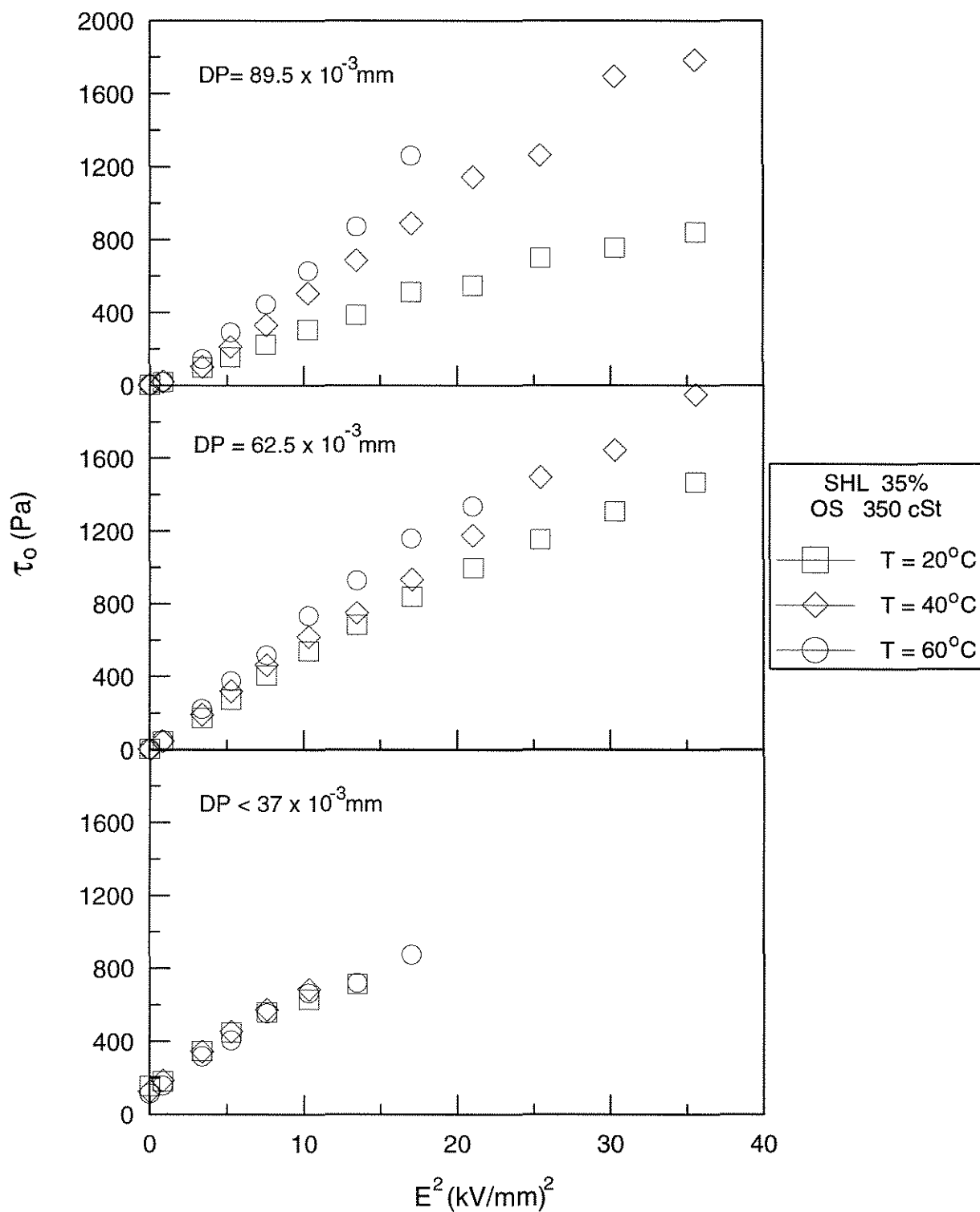


Figura B.6 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

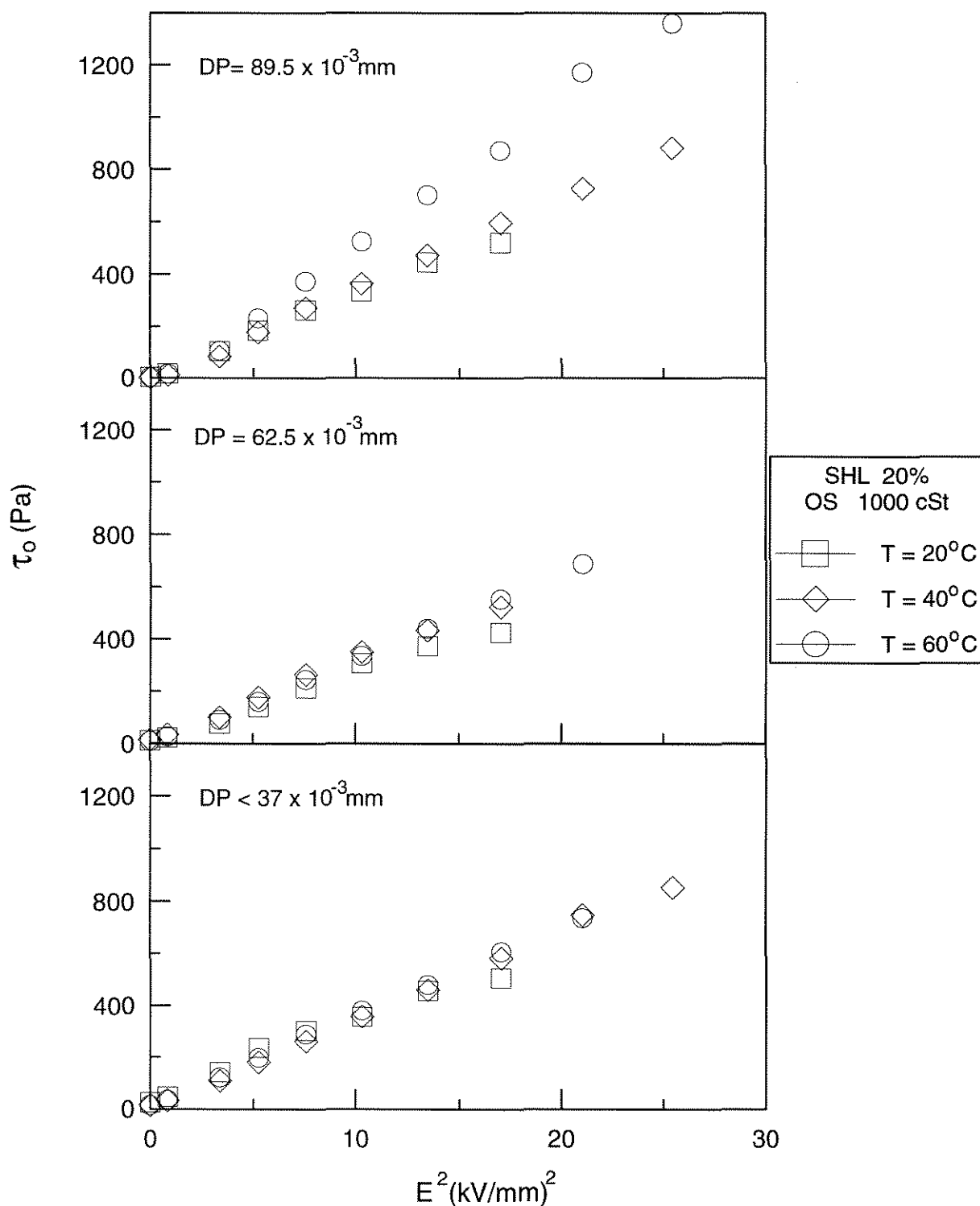


Figura B.7 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

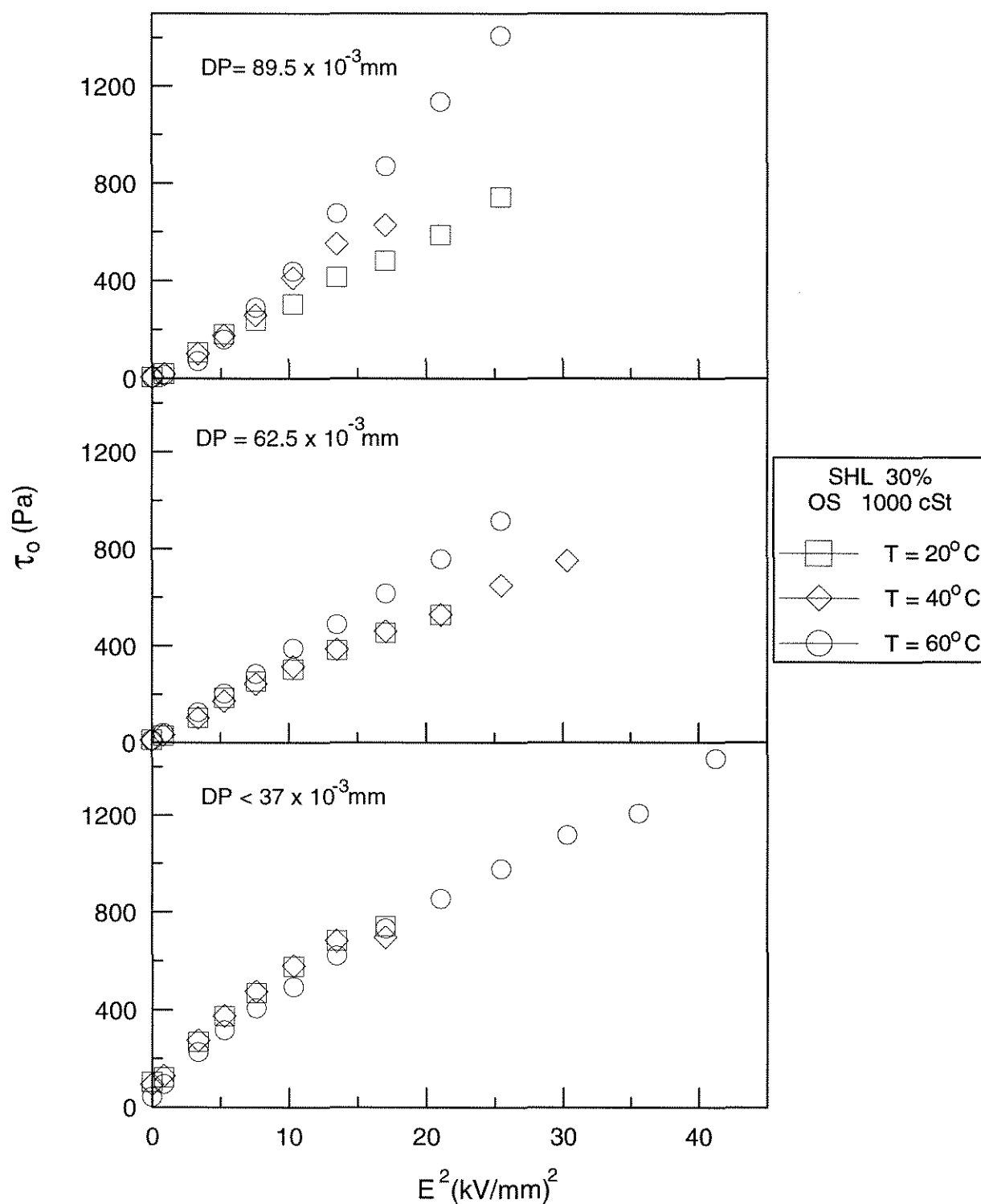


Figura B.8 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

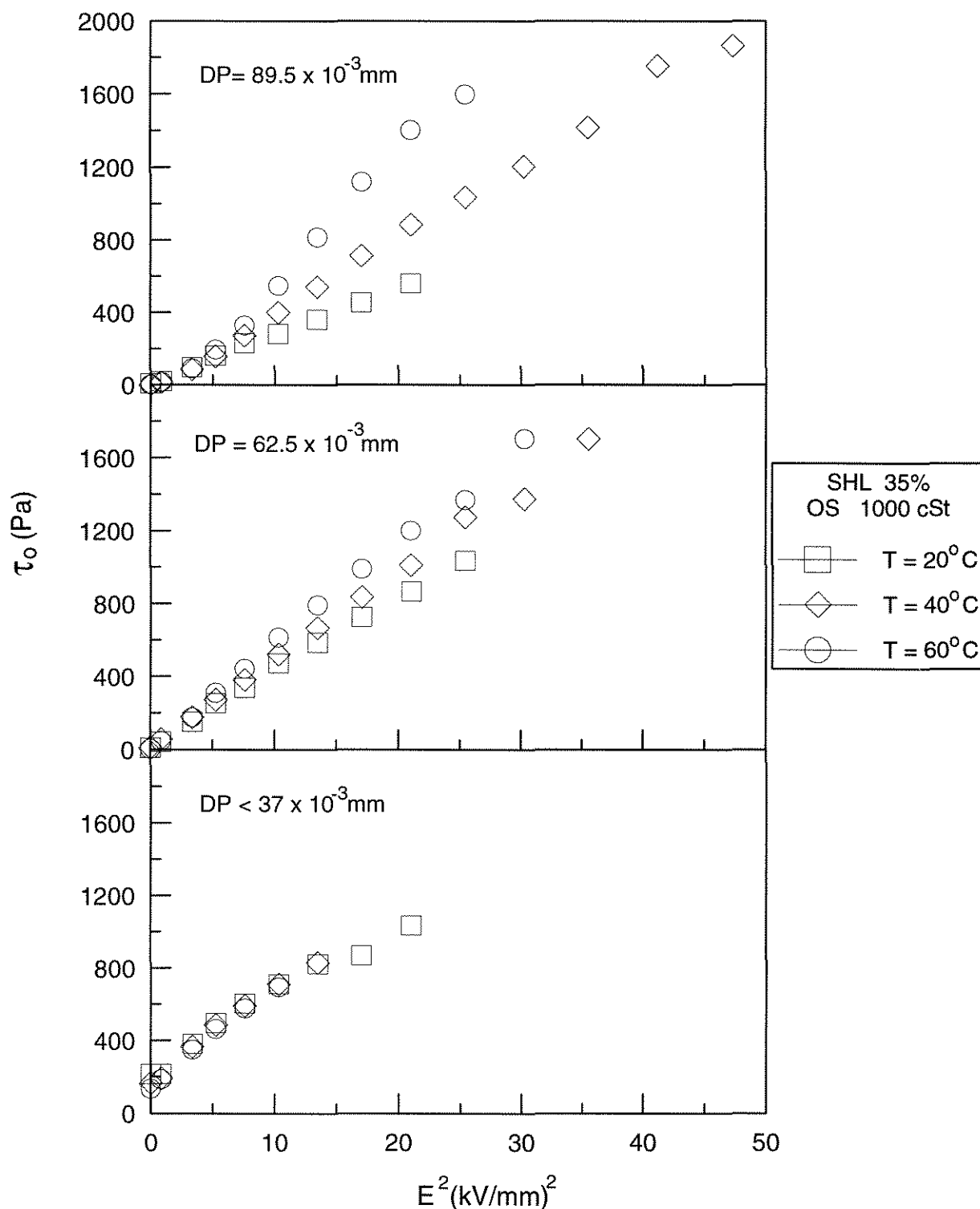


Figura B.9 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

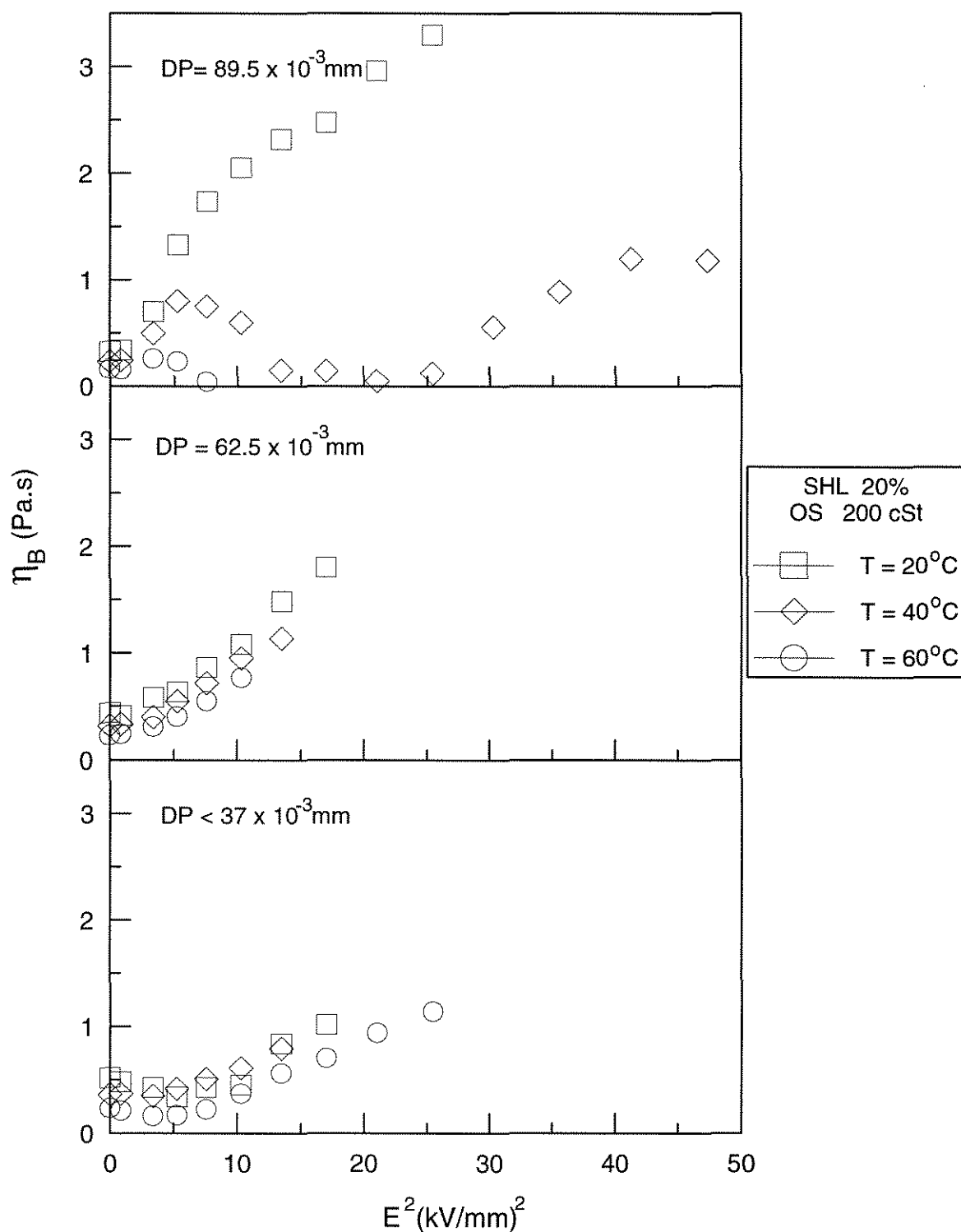


Figura B.10: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

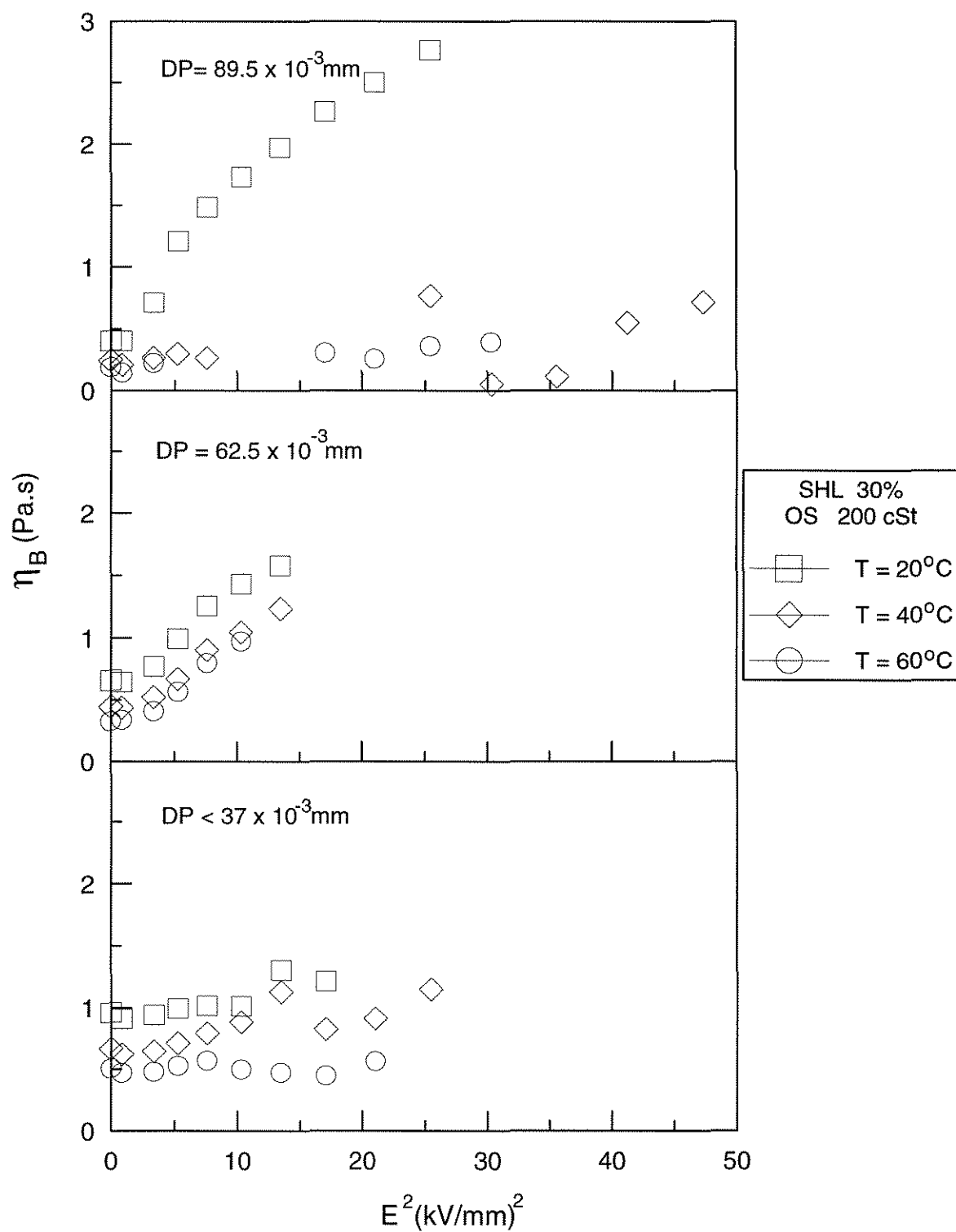


Figura B.11: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

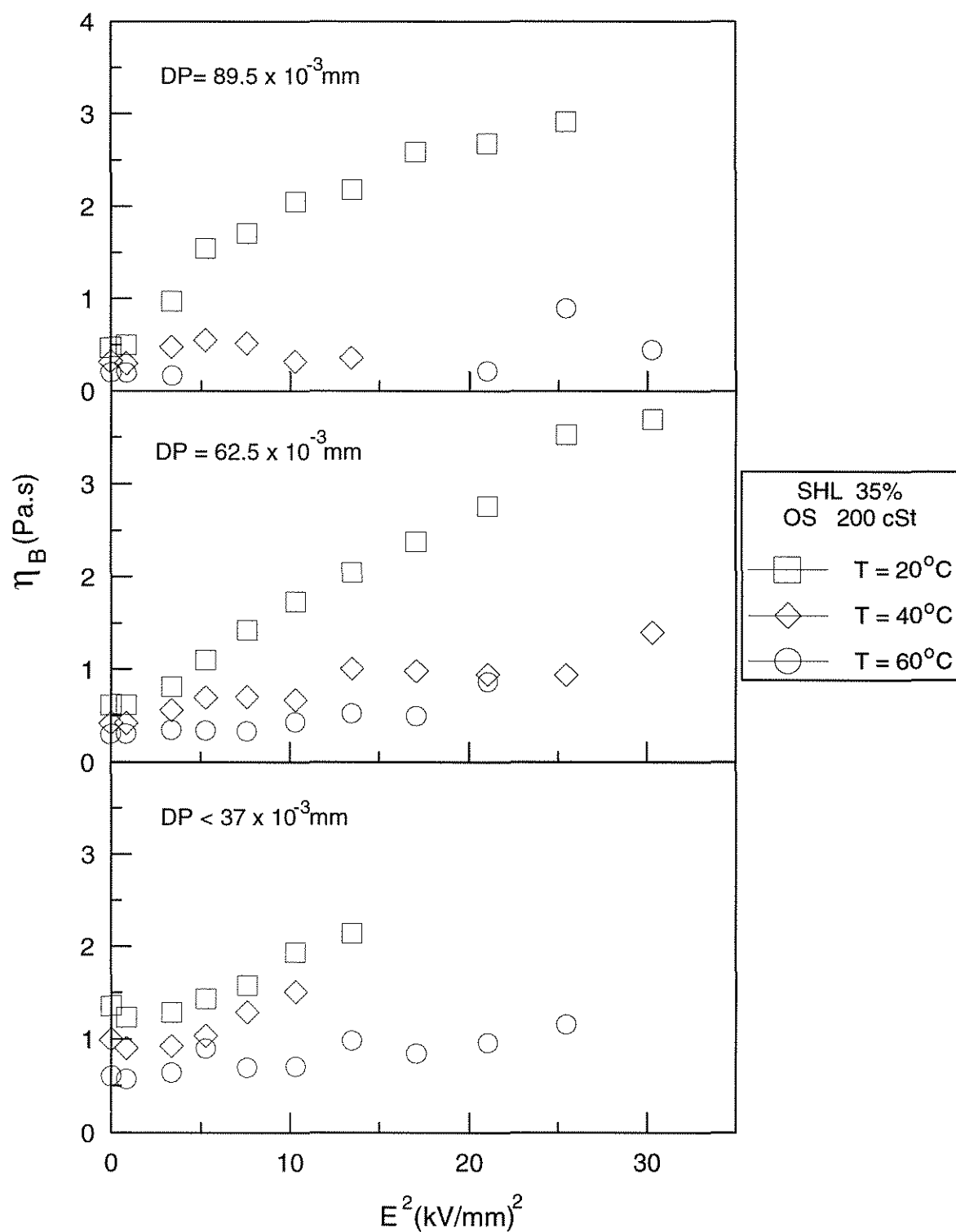


Figura B.12: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 200 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

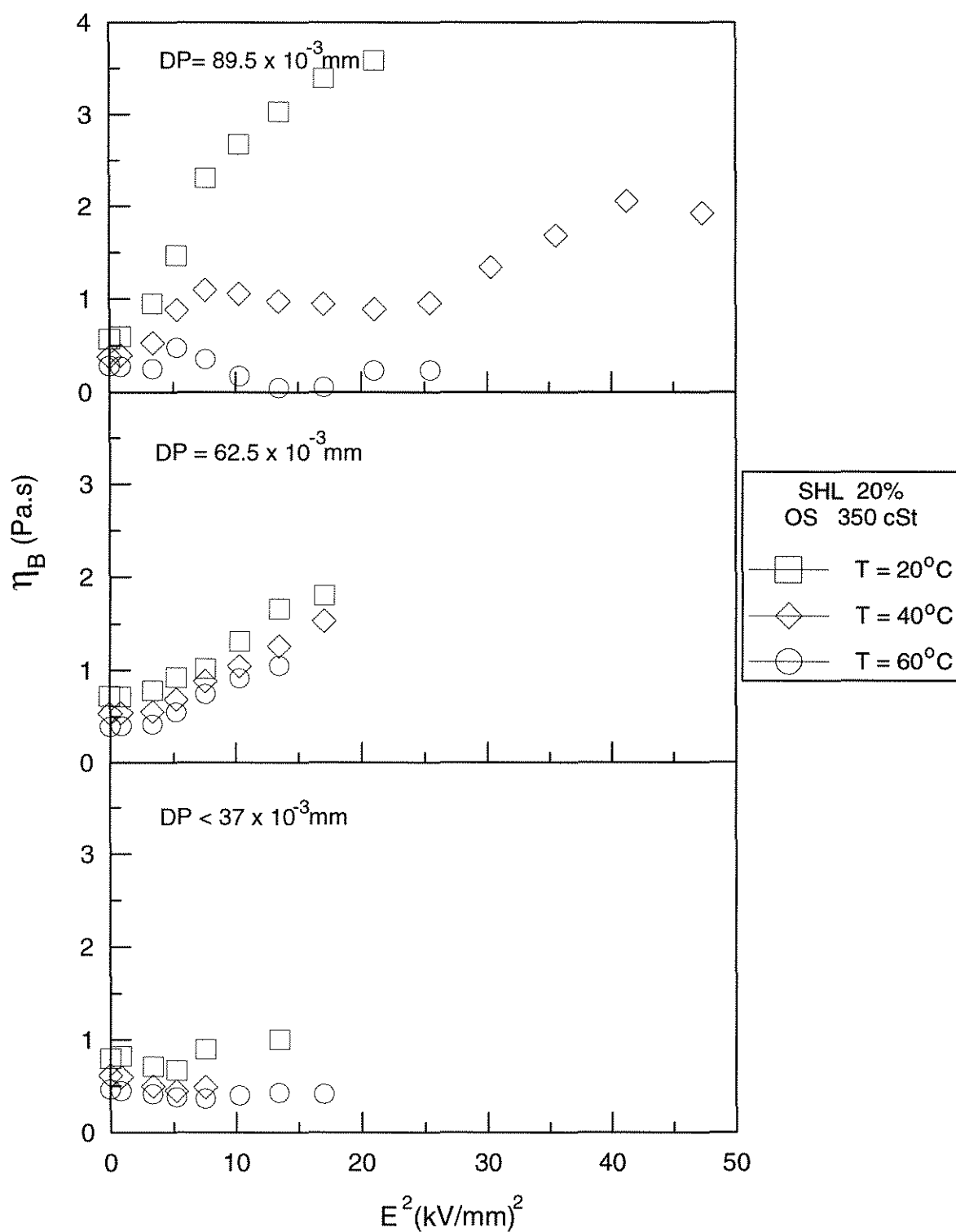


Figura B.13: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

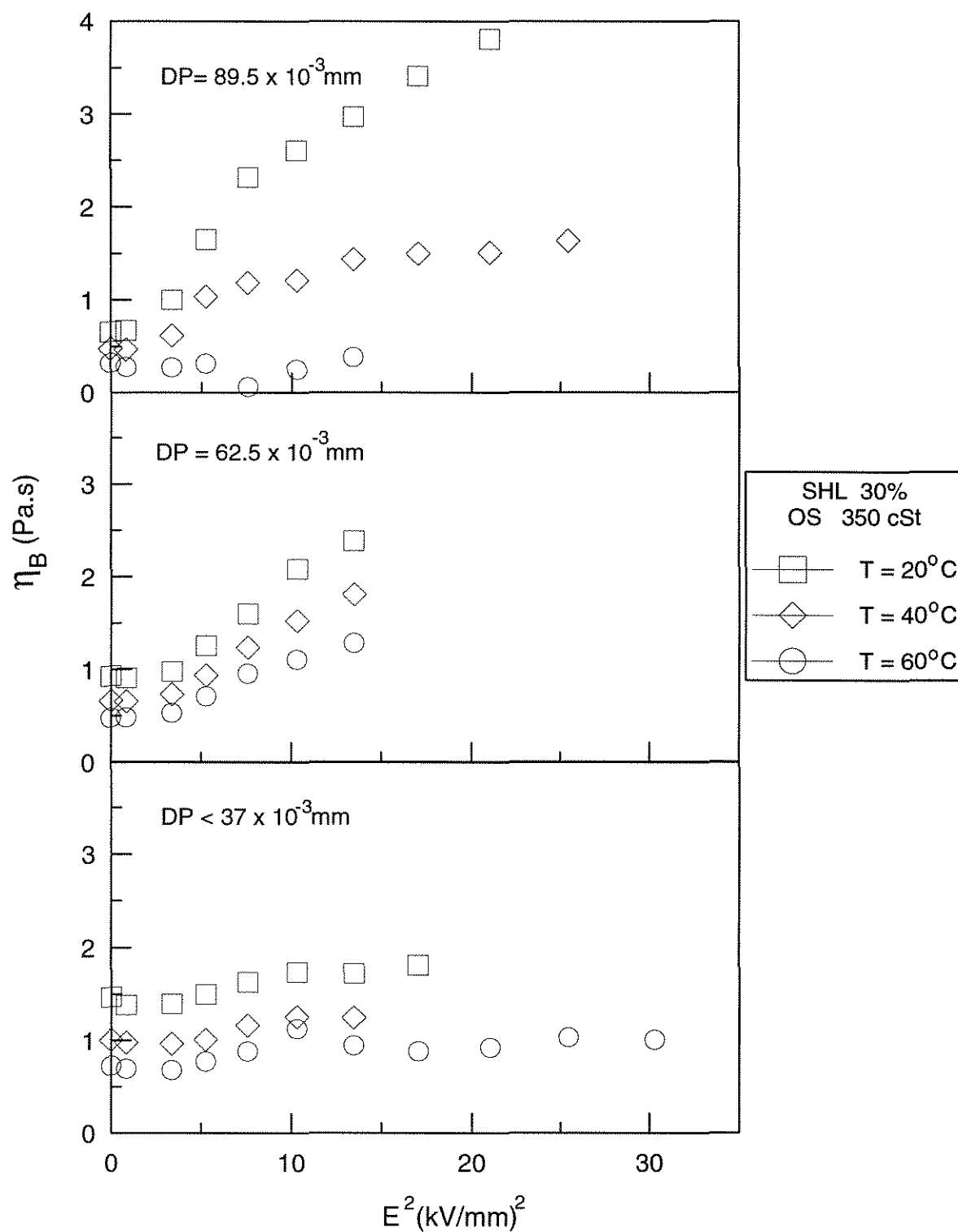


Figura B.14: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

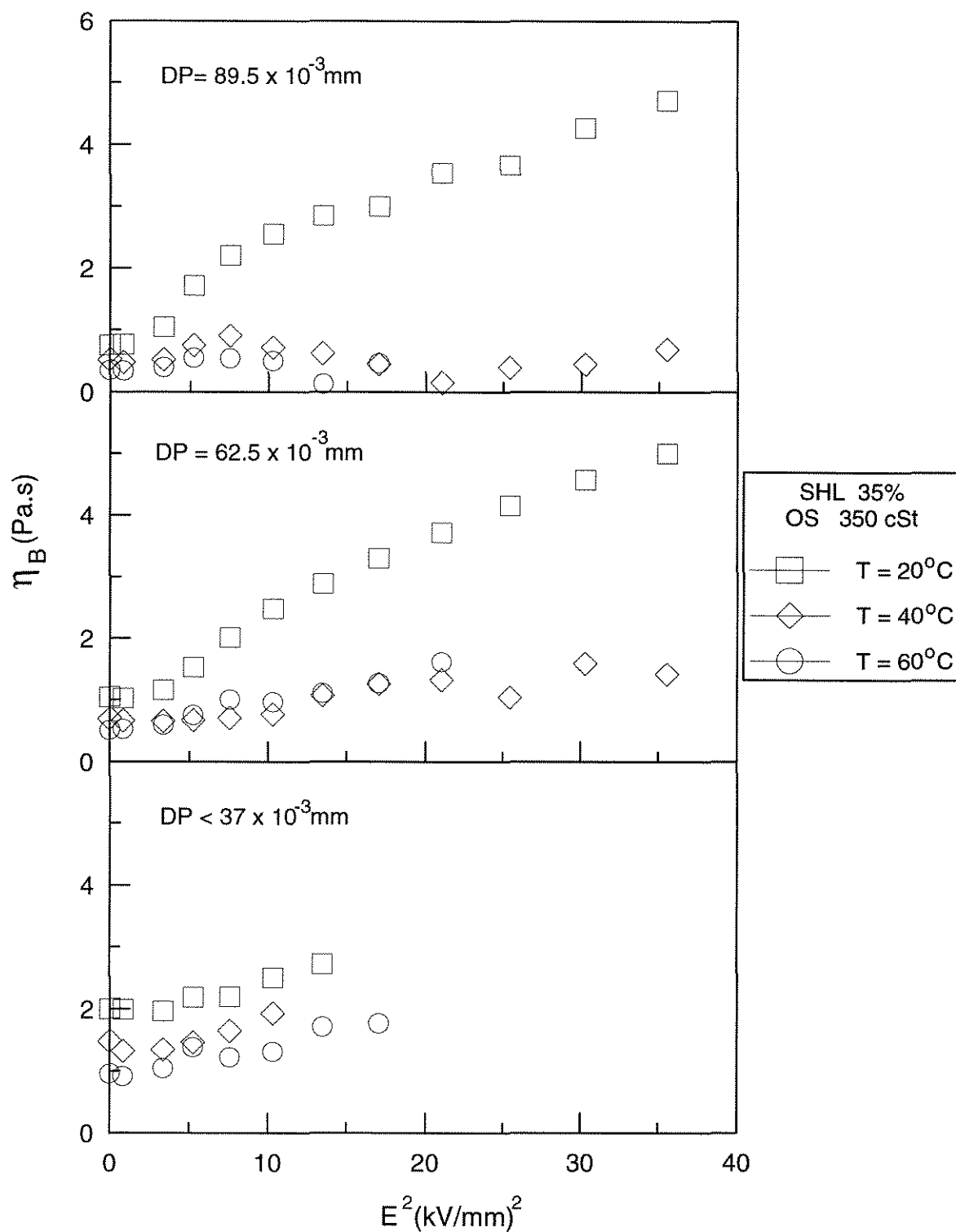


Figura B.15: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 350 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

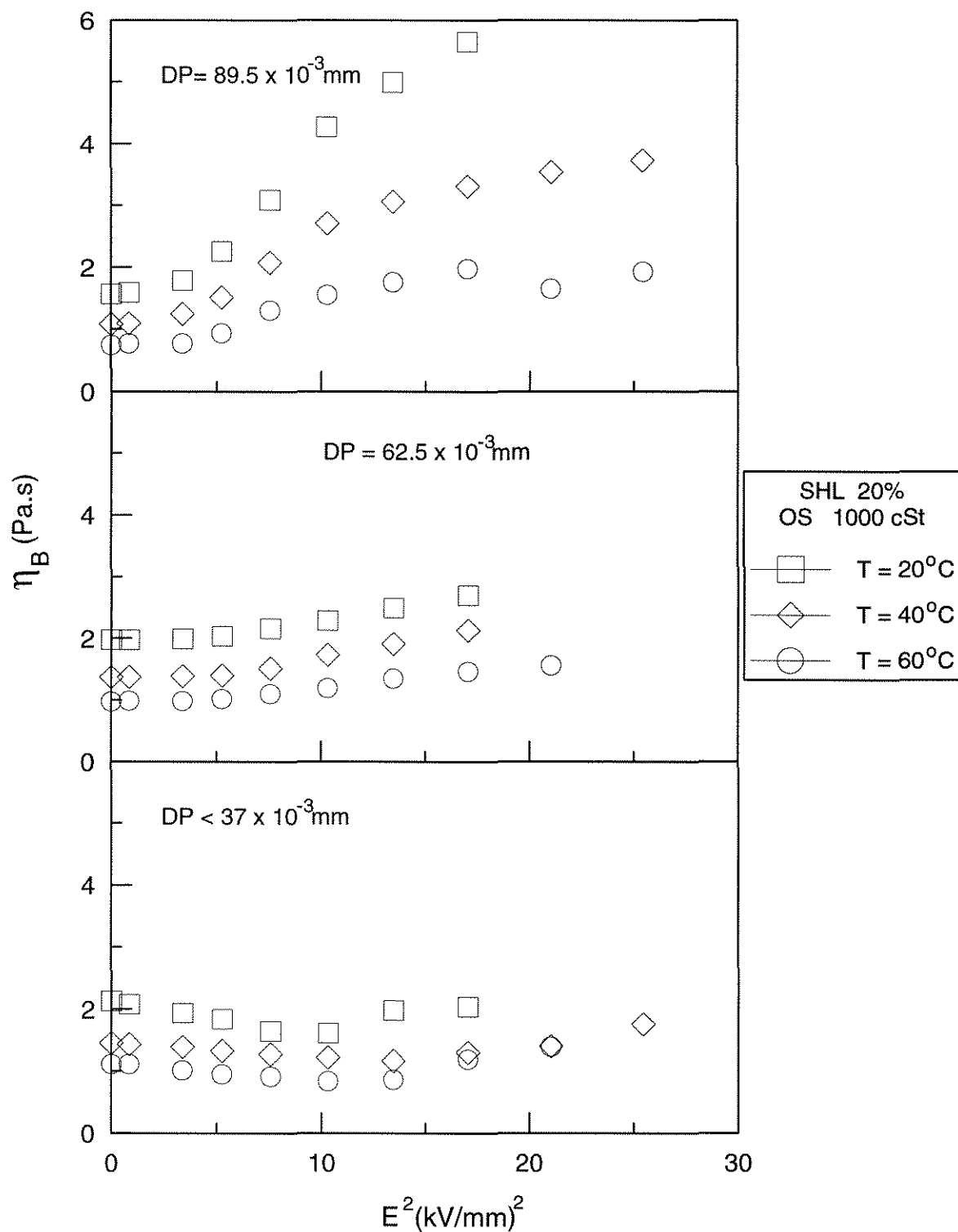


Figura B.16: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

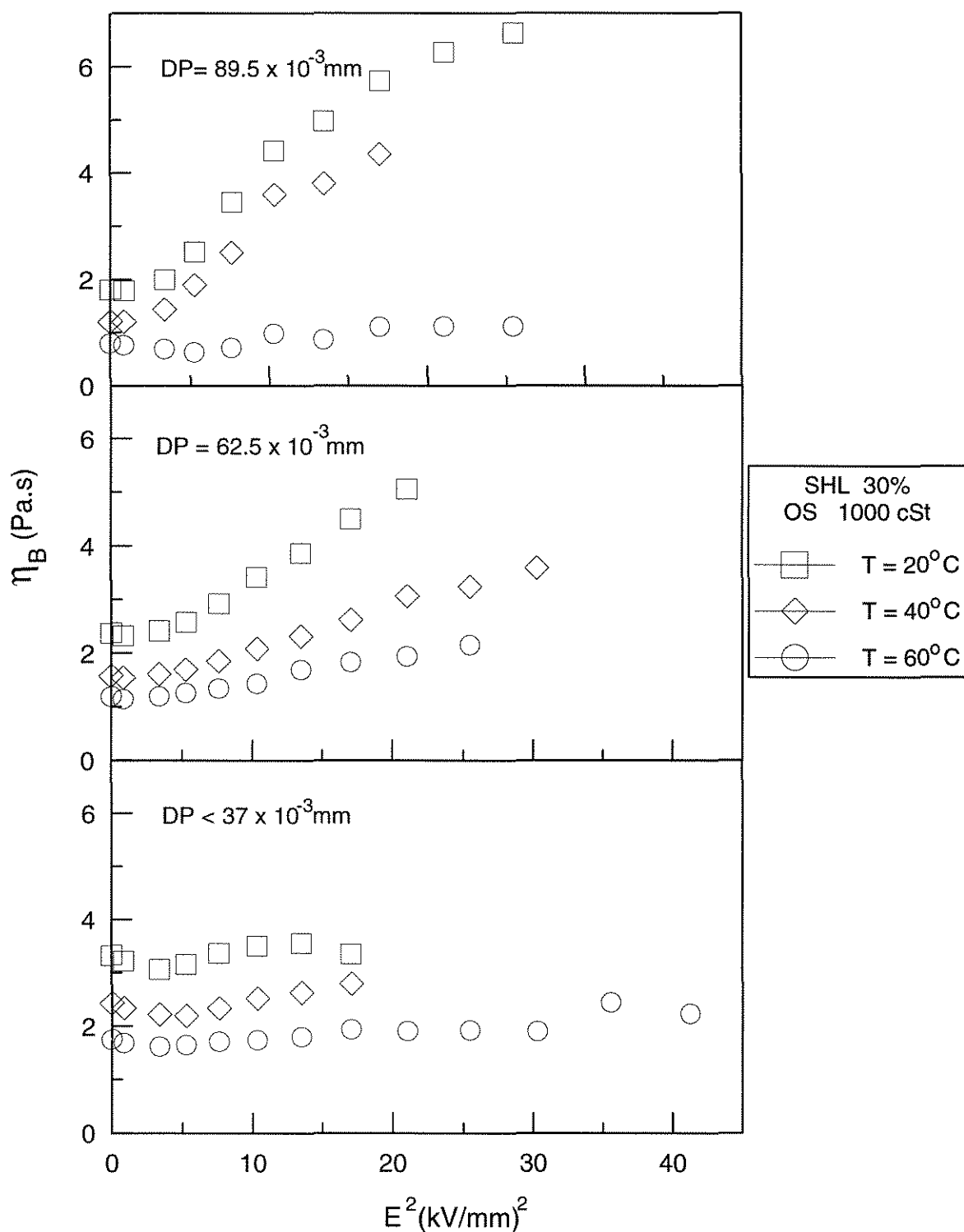


Figura B.17: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

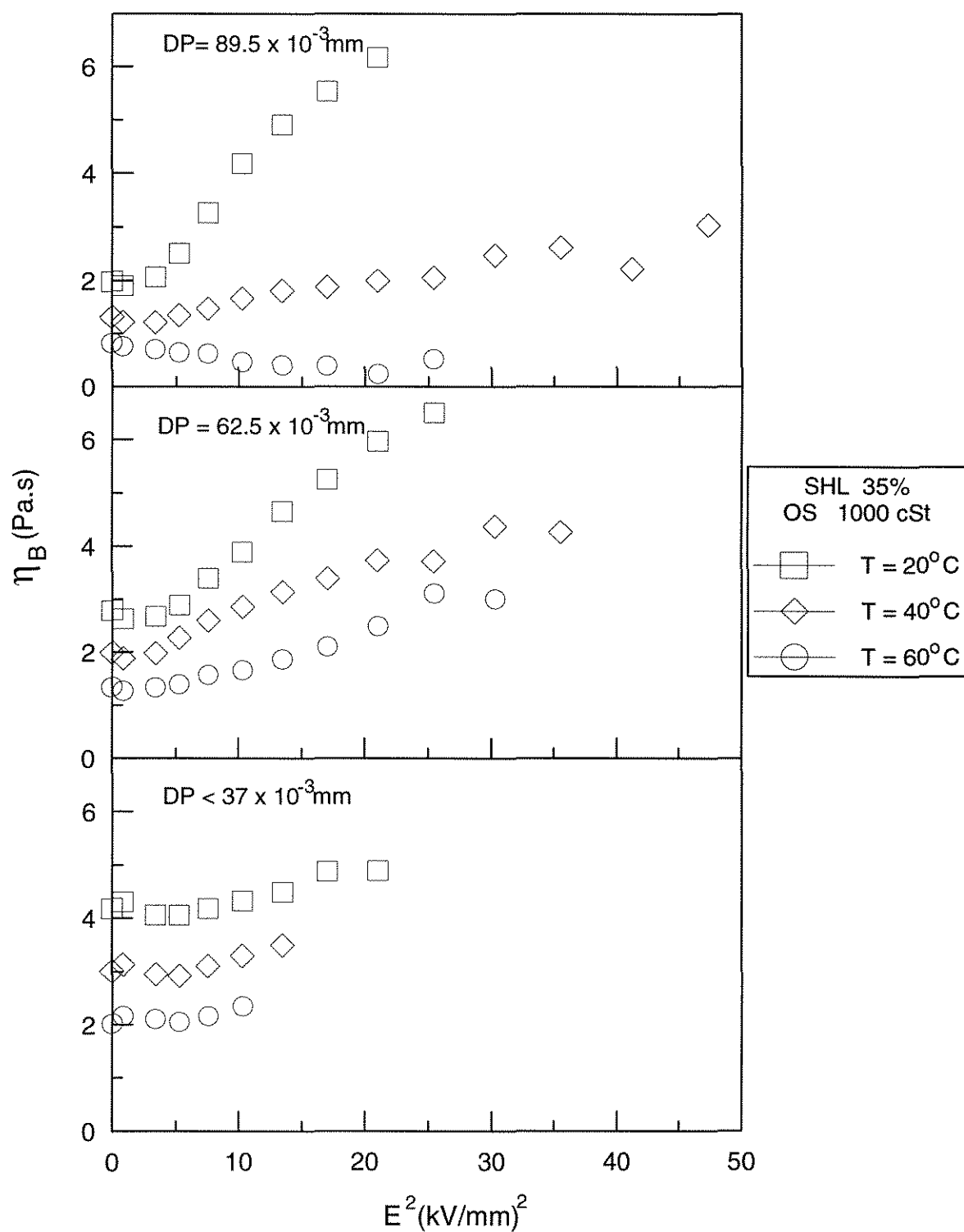


Figura B.18: Viscosidade de Bingham em função do quadrado da intensidade de campo elétrico para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone de viscosidade 1000 cSt, tendo como parâmetro a temperatura para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

APÊNDICE C

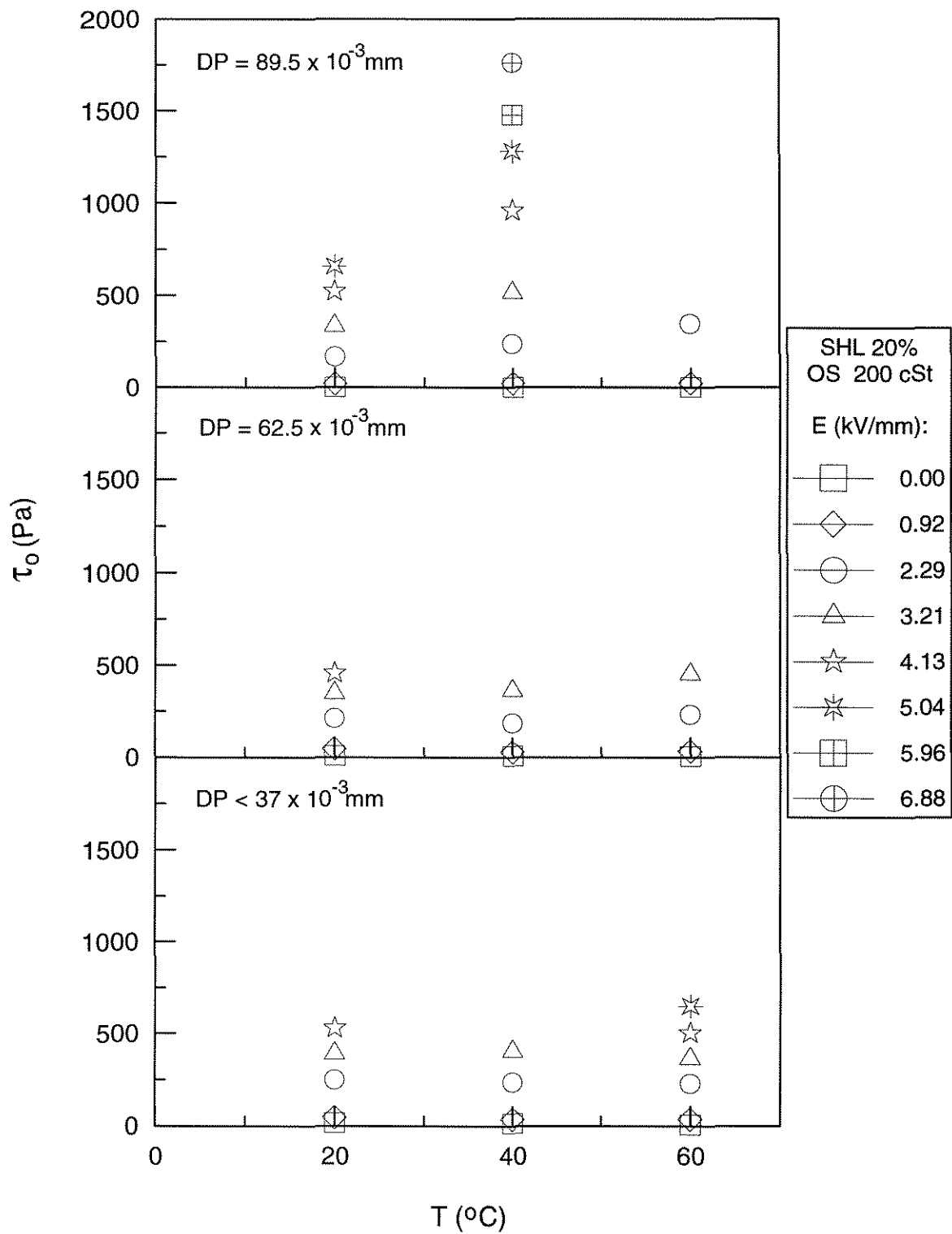


Figura C.1 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

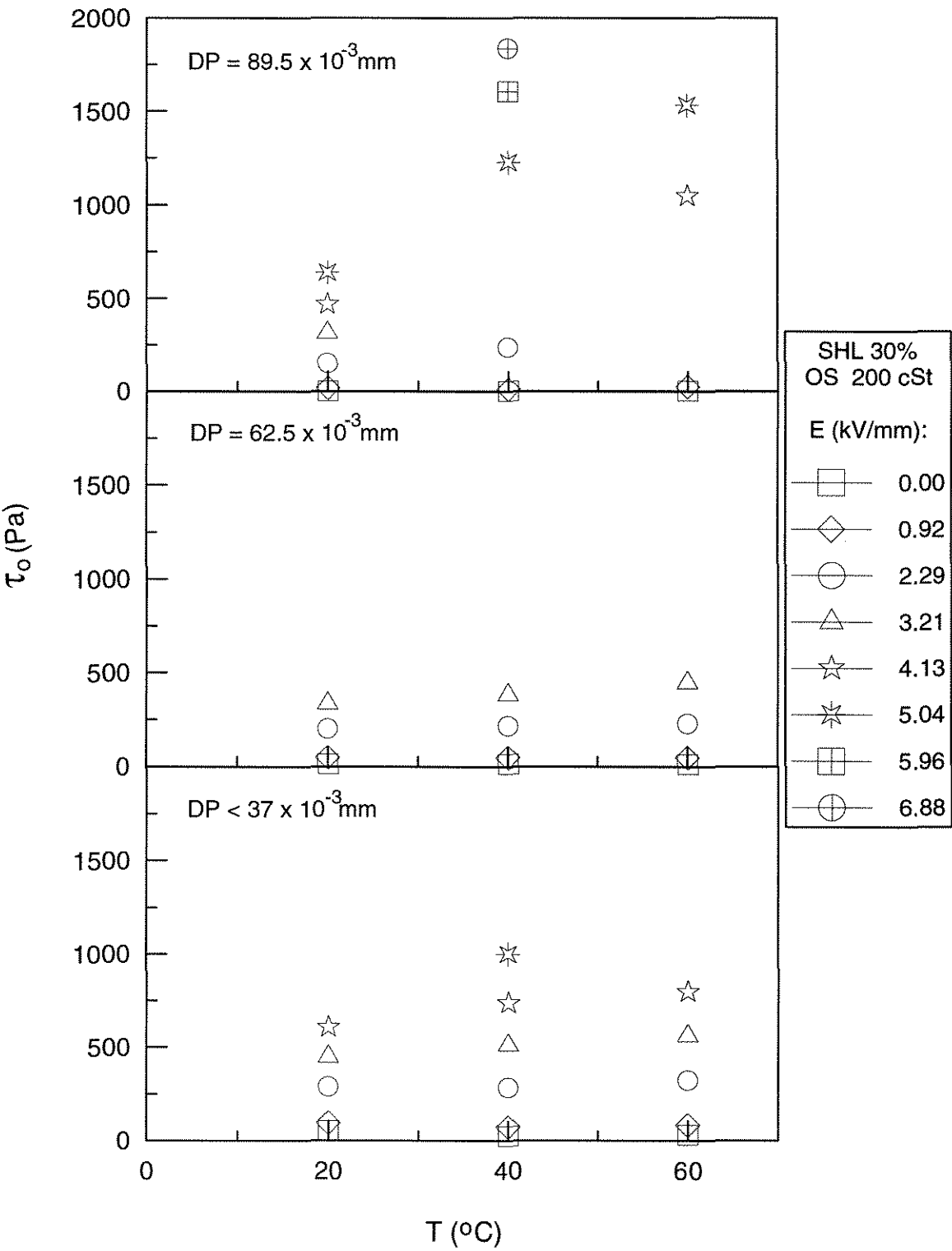


Figura C.2 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

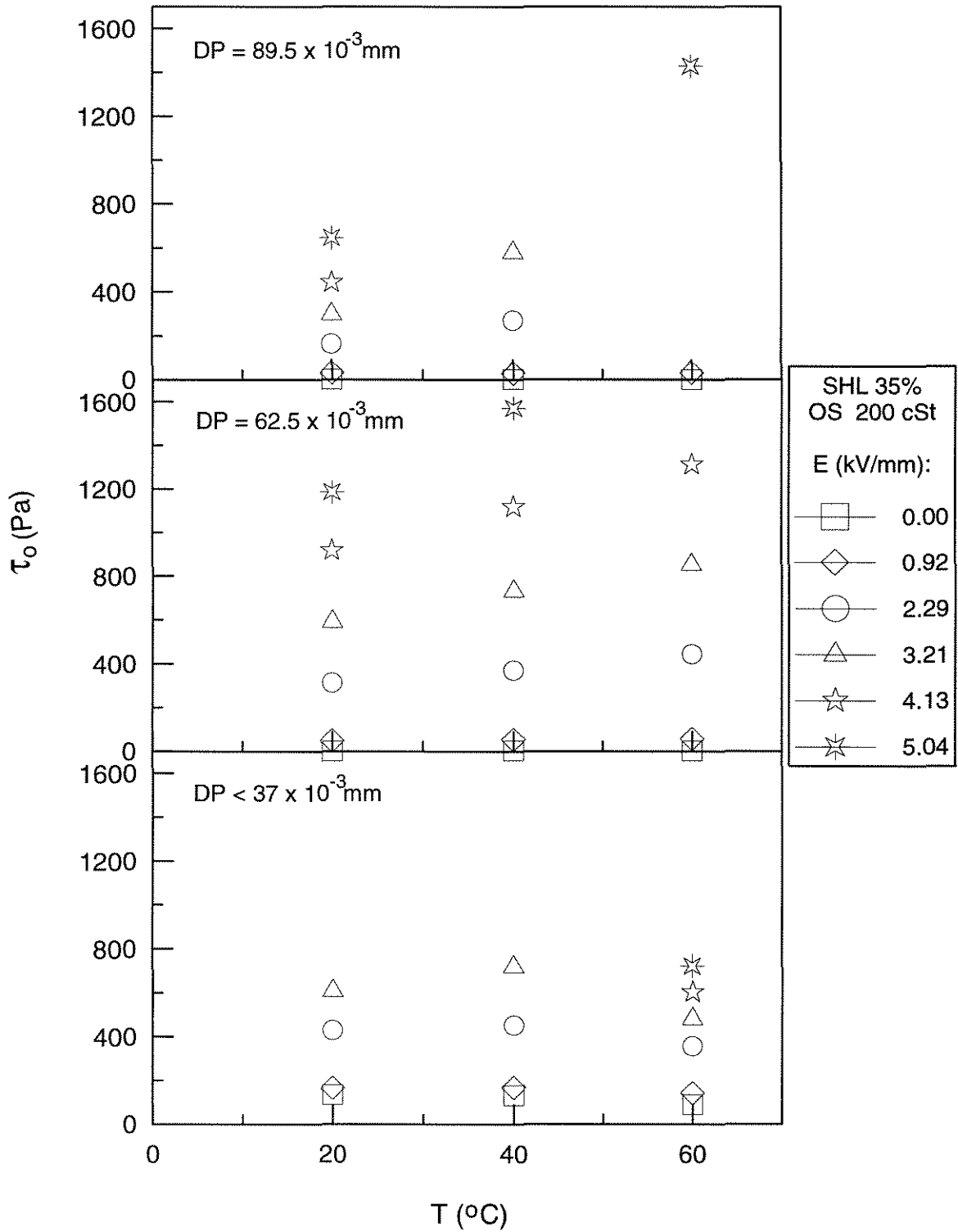


Figura C.3 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

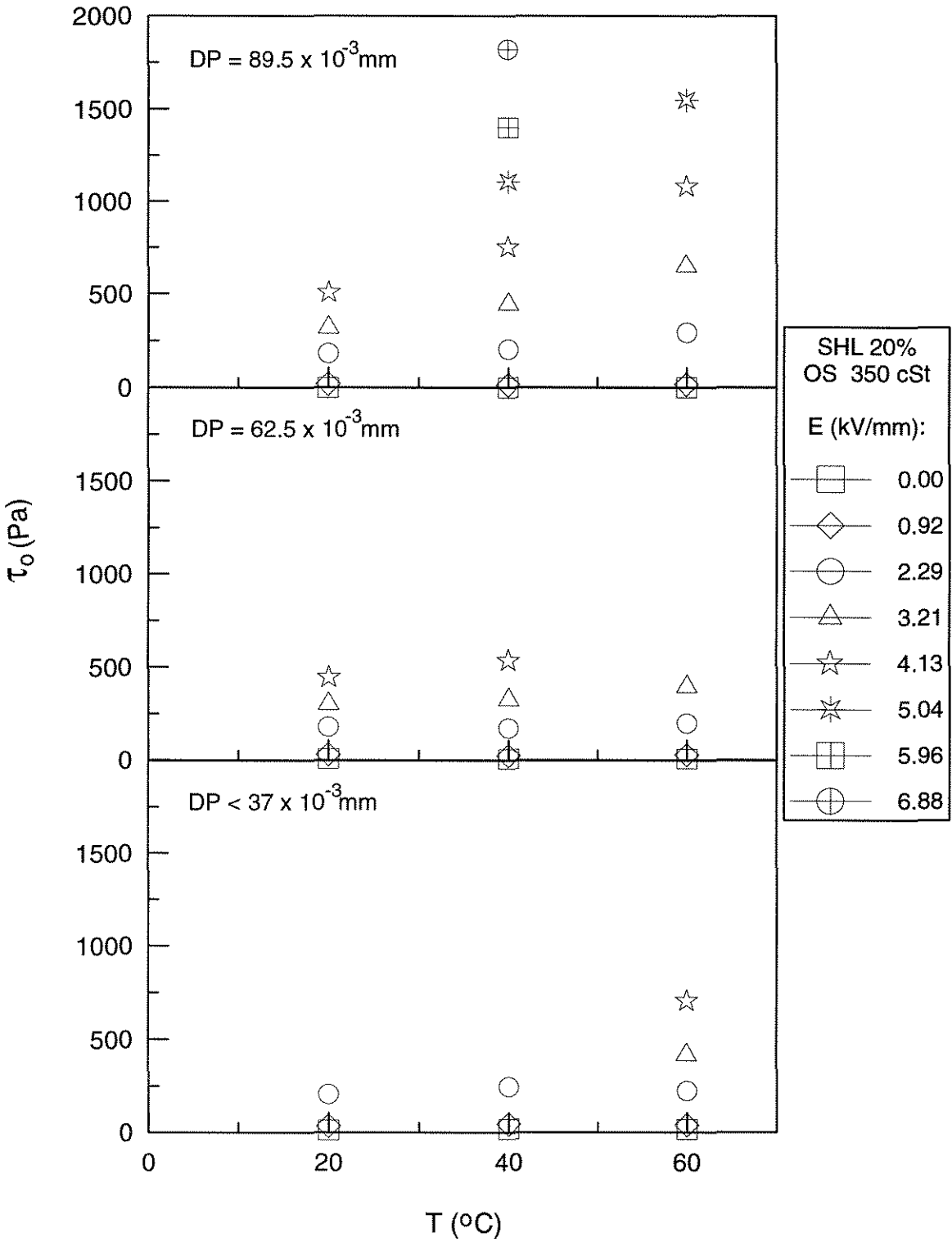


Figura C. 4 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

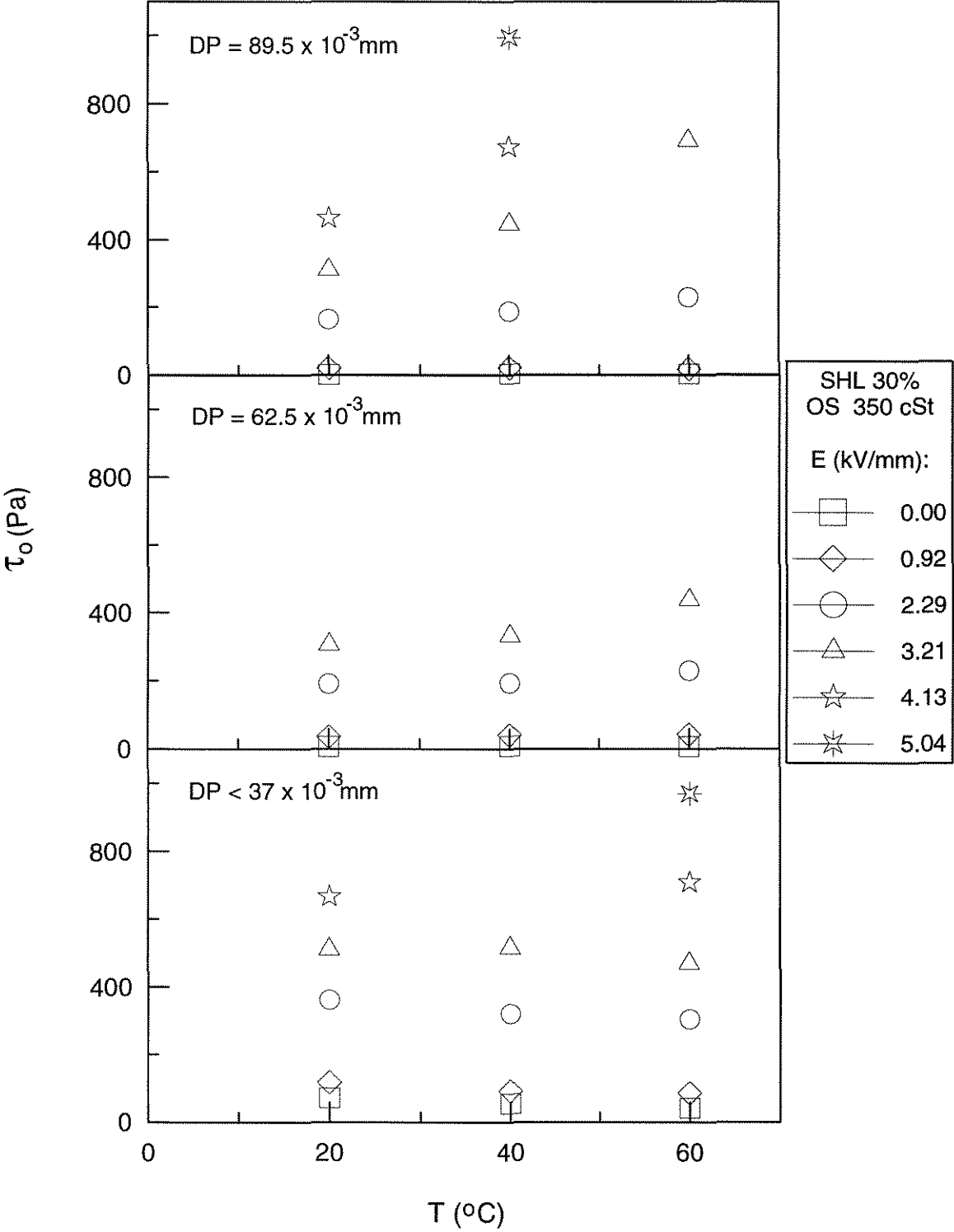


Figura C.5 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

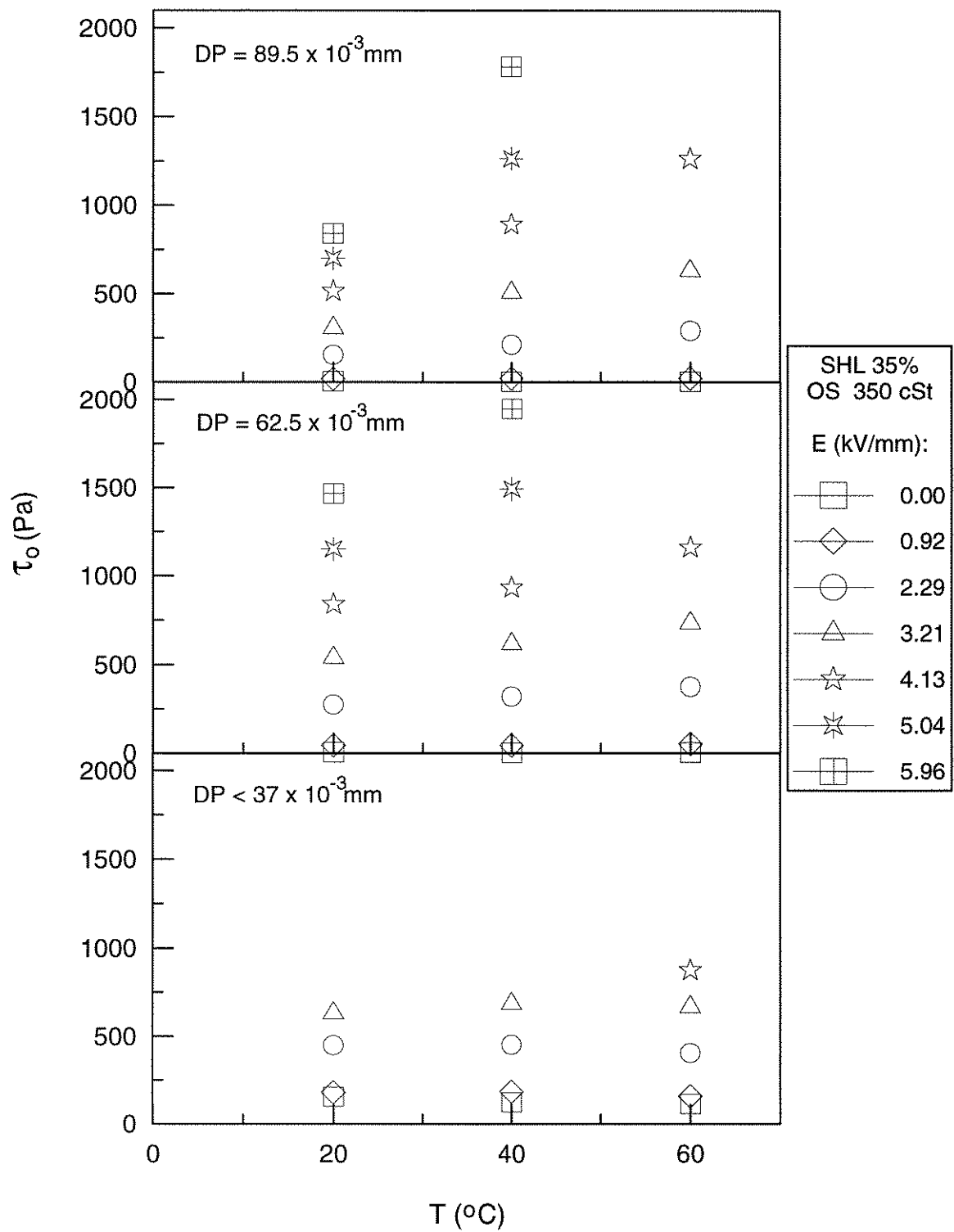


Figura C.6 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

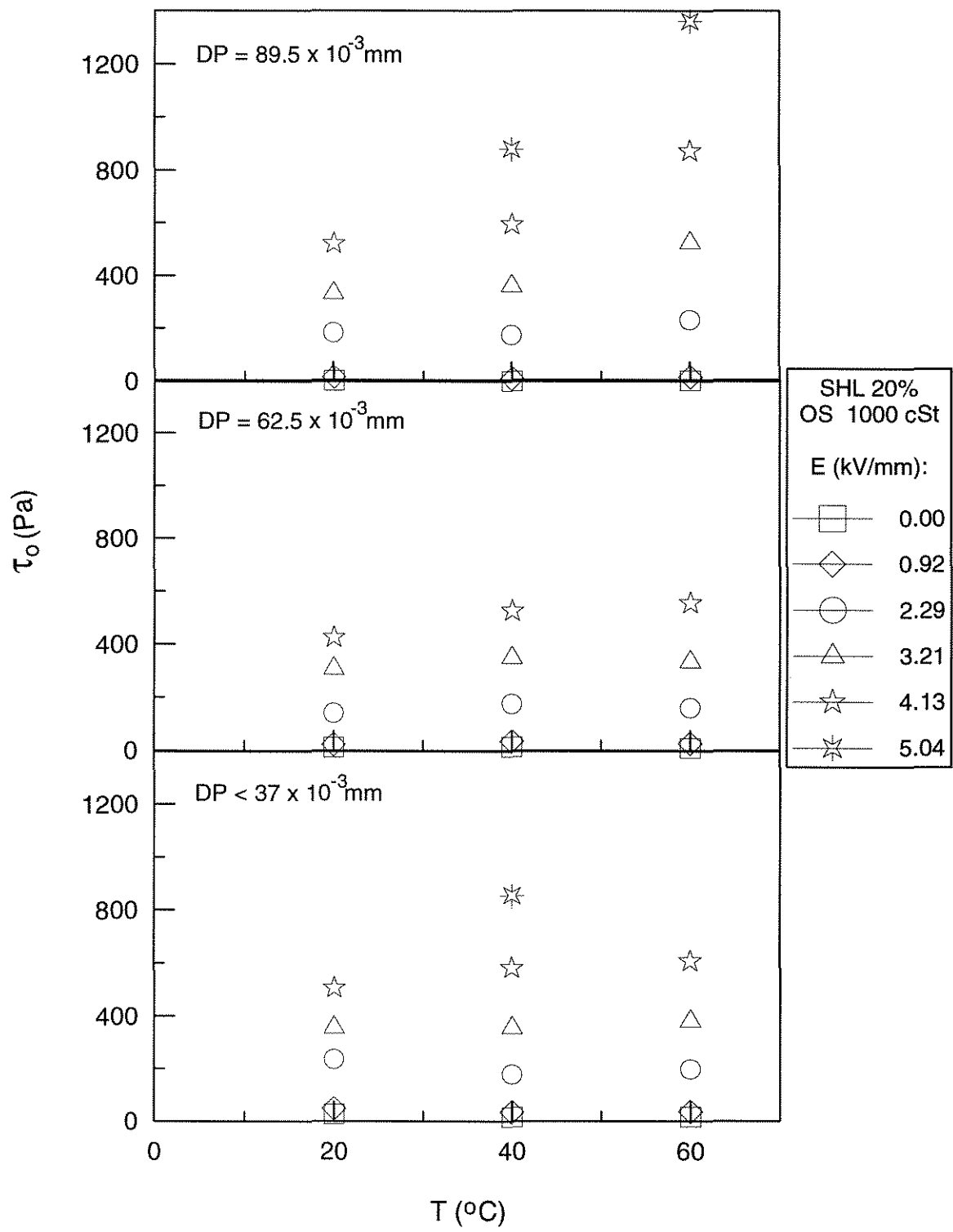


Figura C.7 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

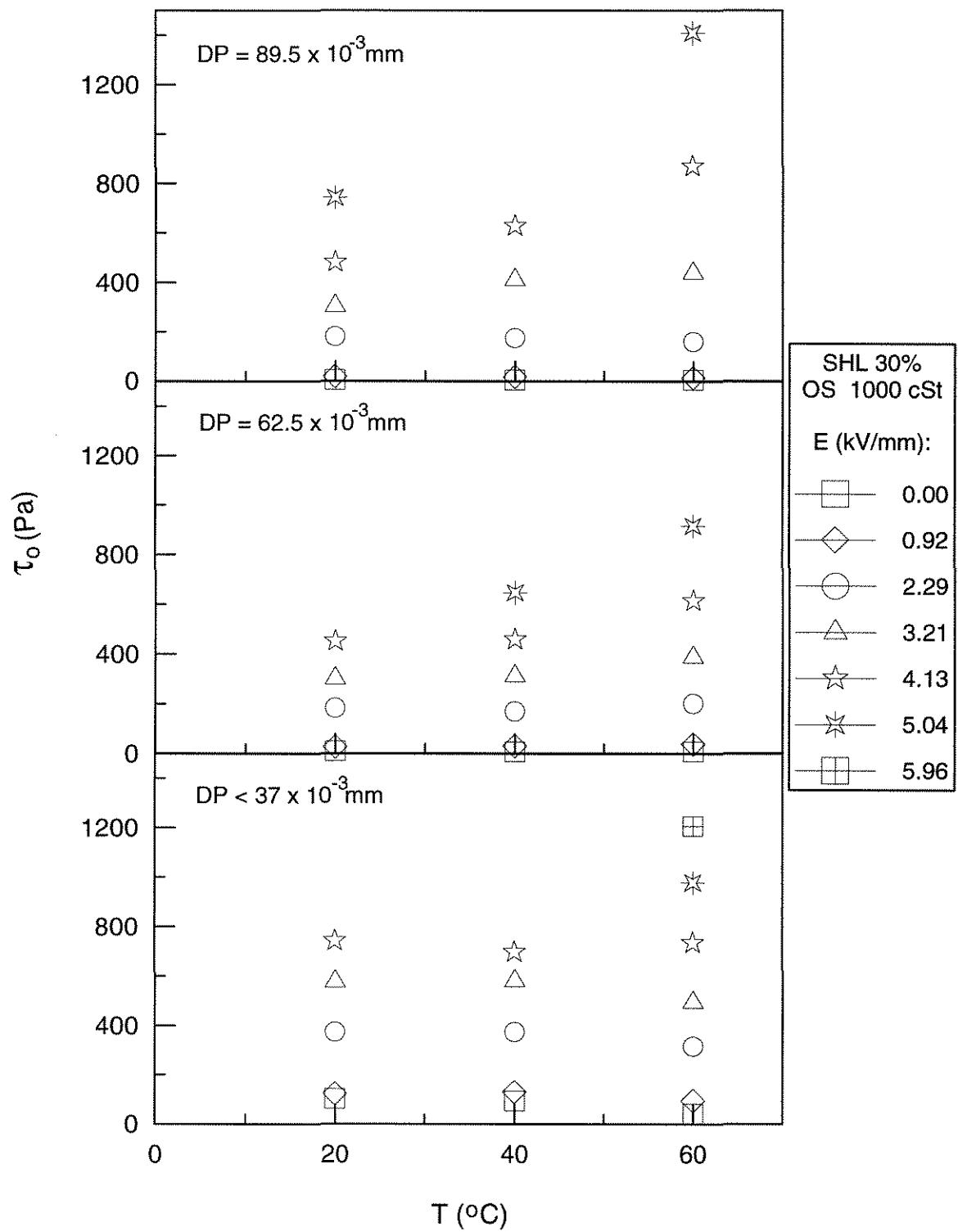


Figura C.8 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

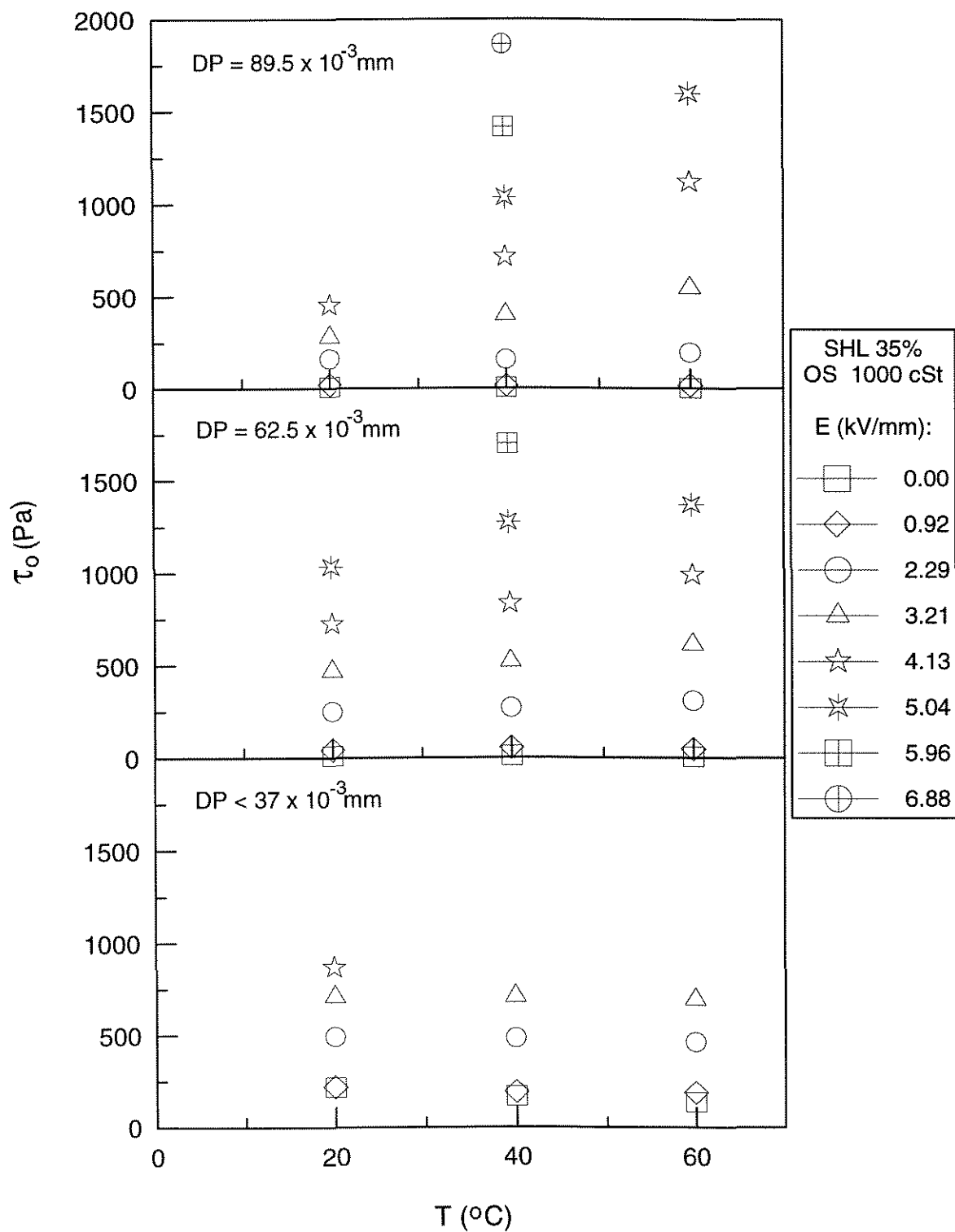


Figura C.9 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

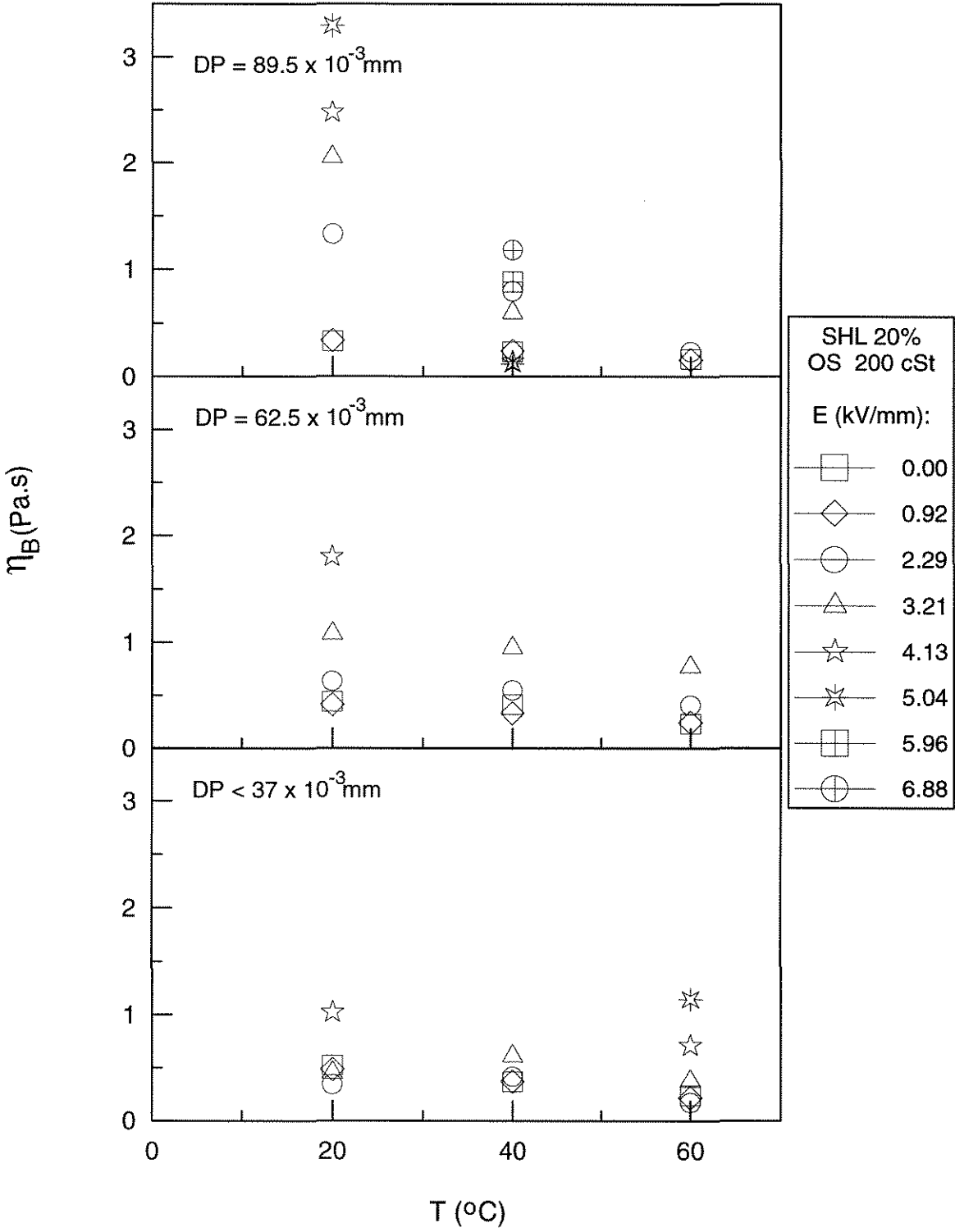


Figura C.10 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

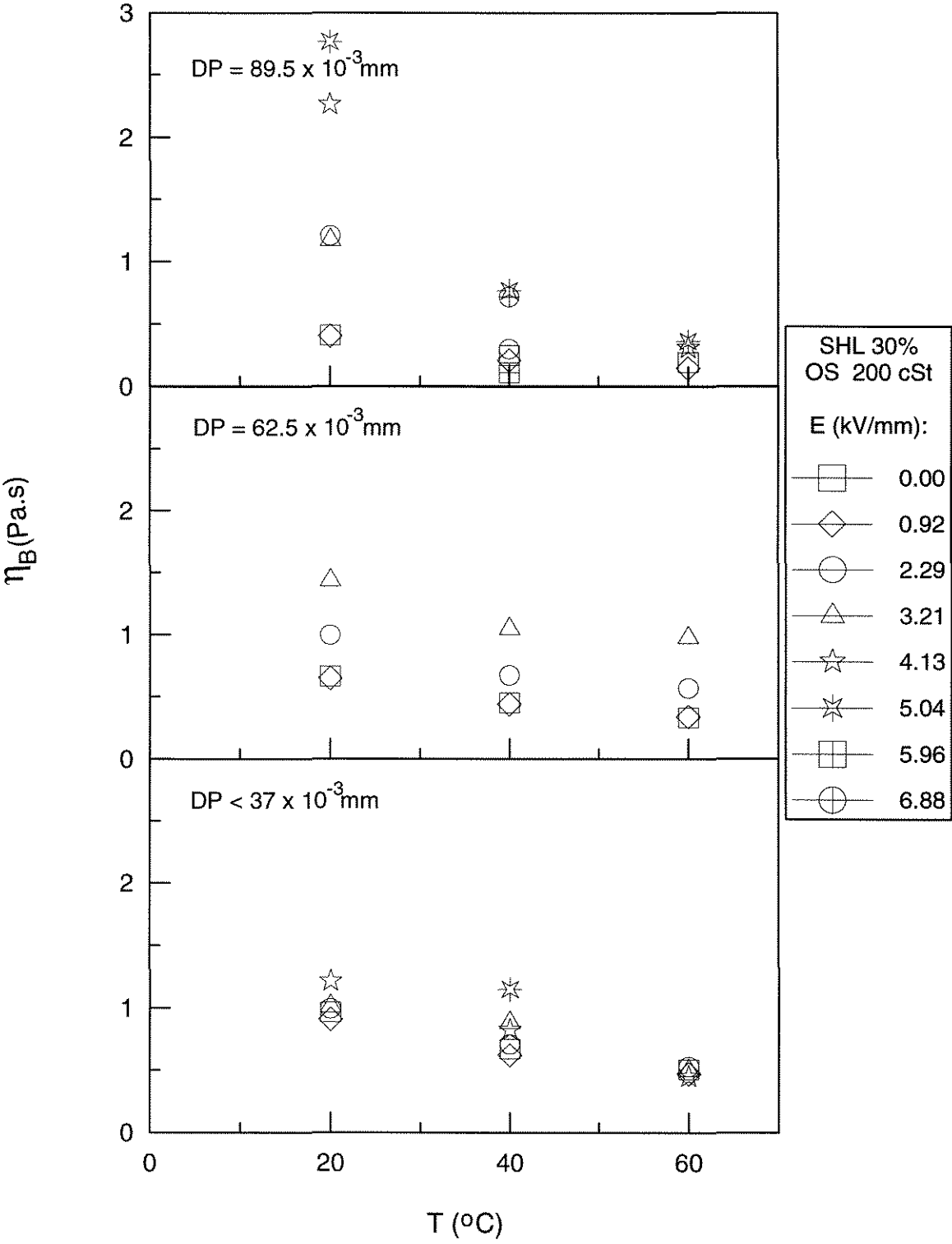


Figura C.11 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

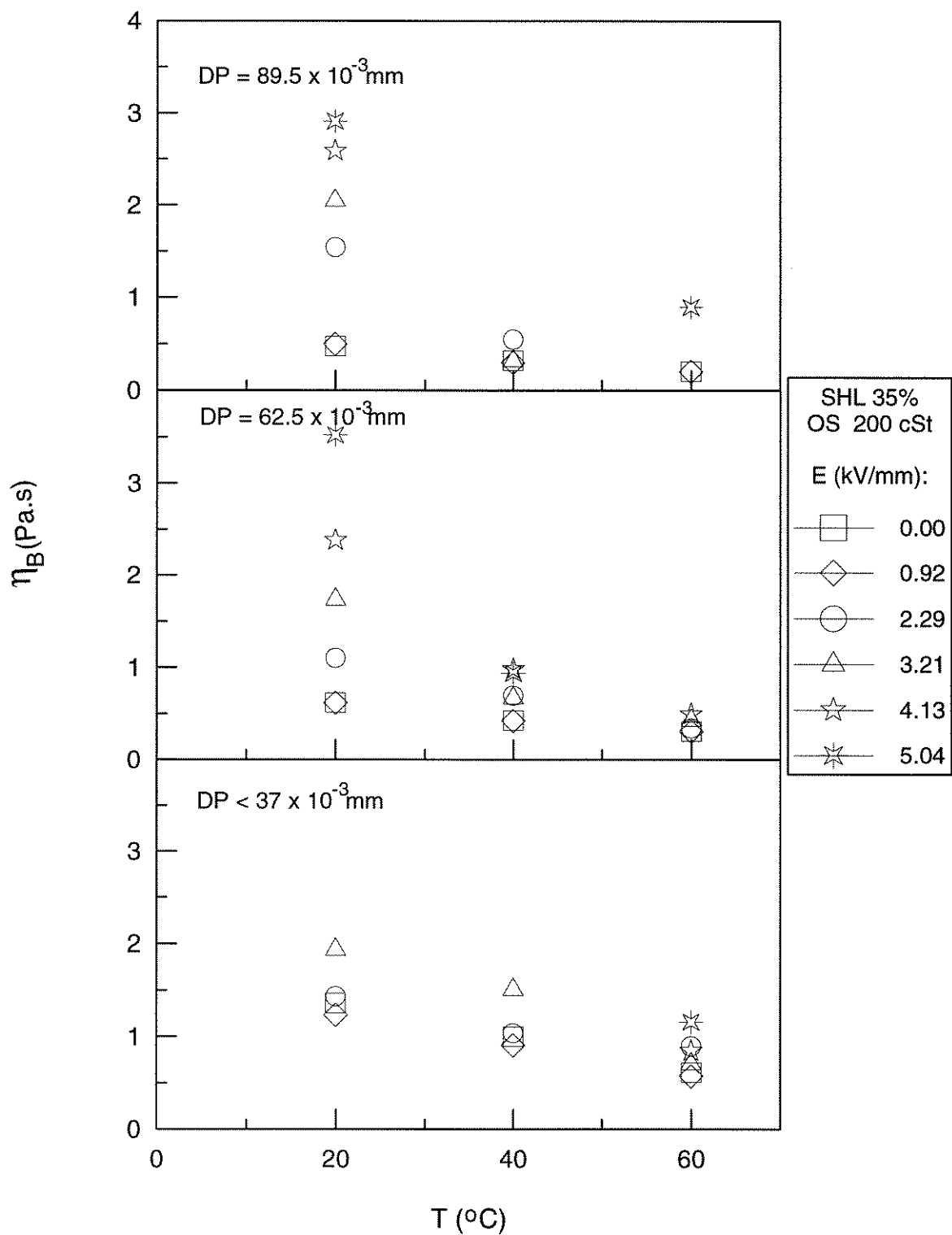


Figura C.12 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

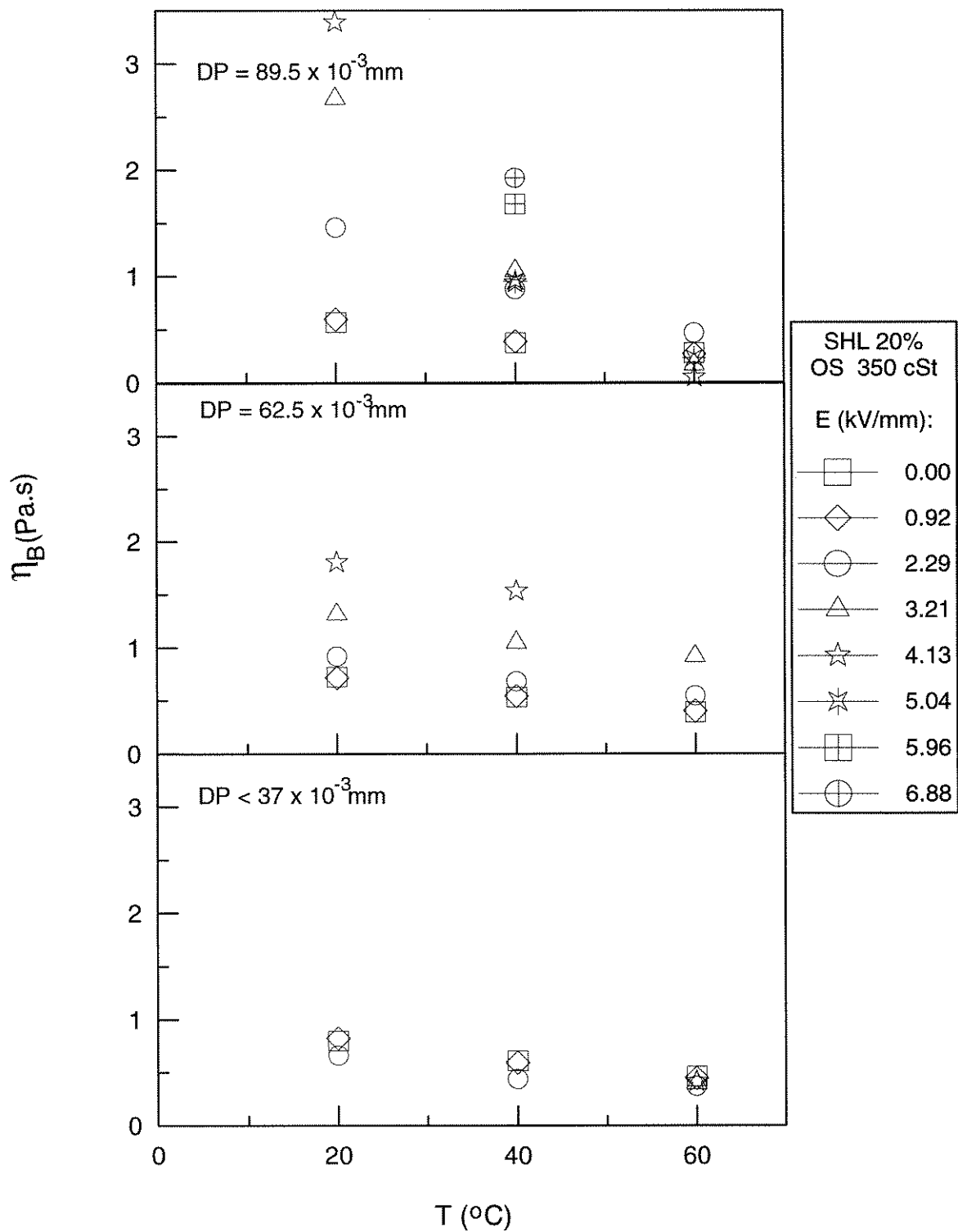


Figura C.13 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

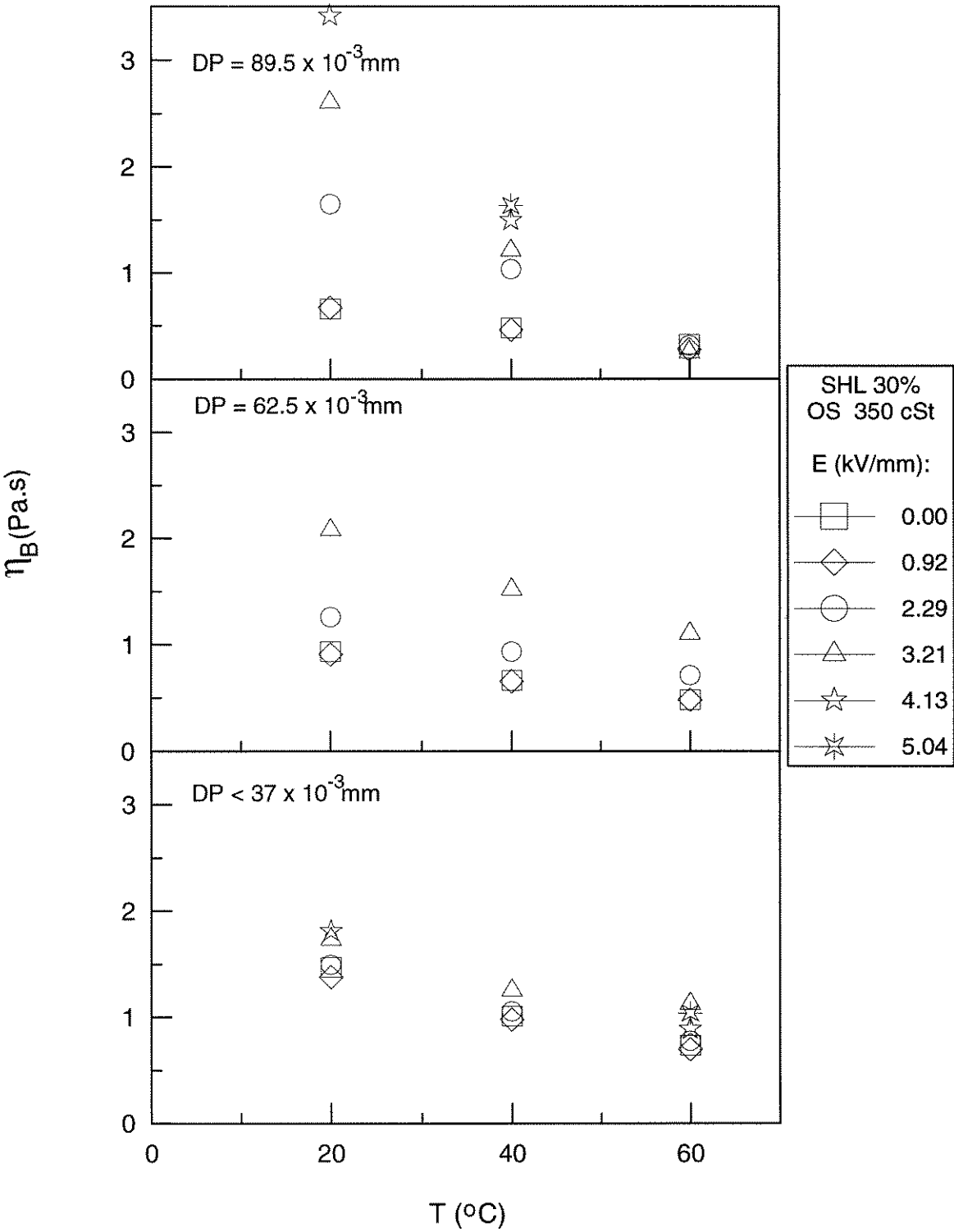


Figura C.14 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

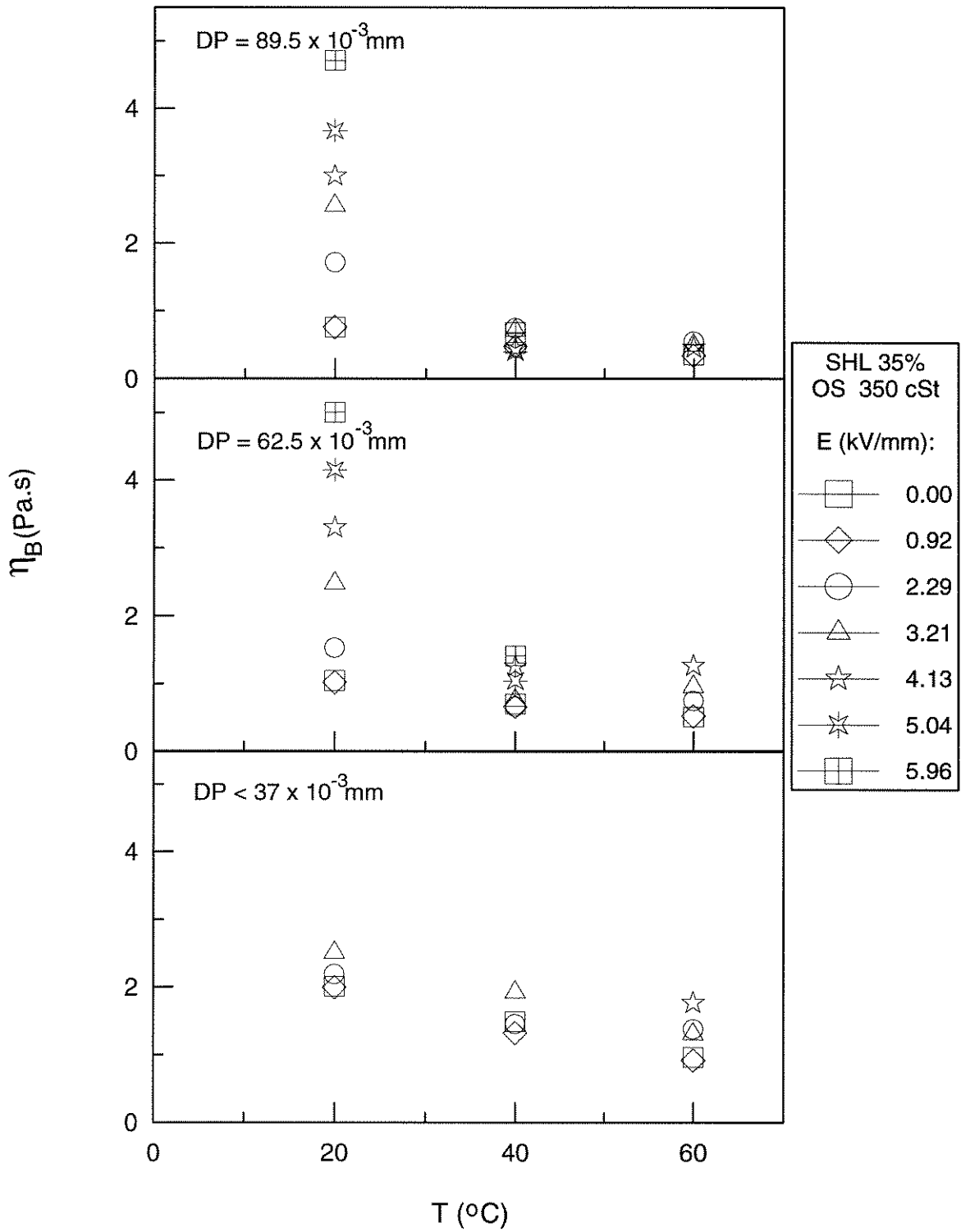


Figura C.15 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

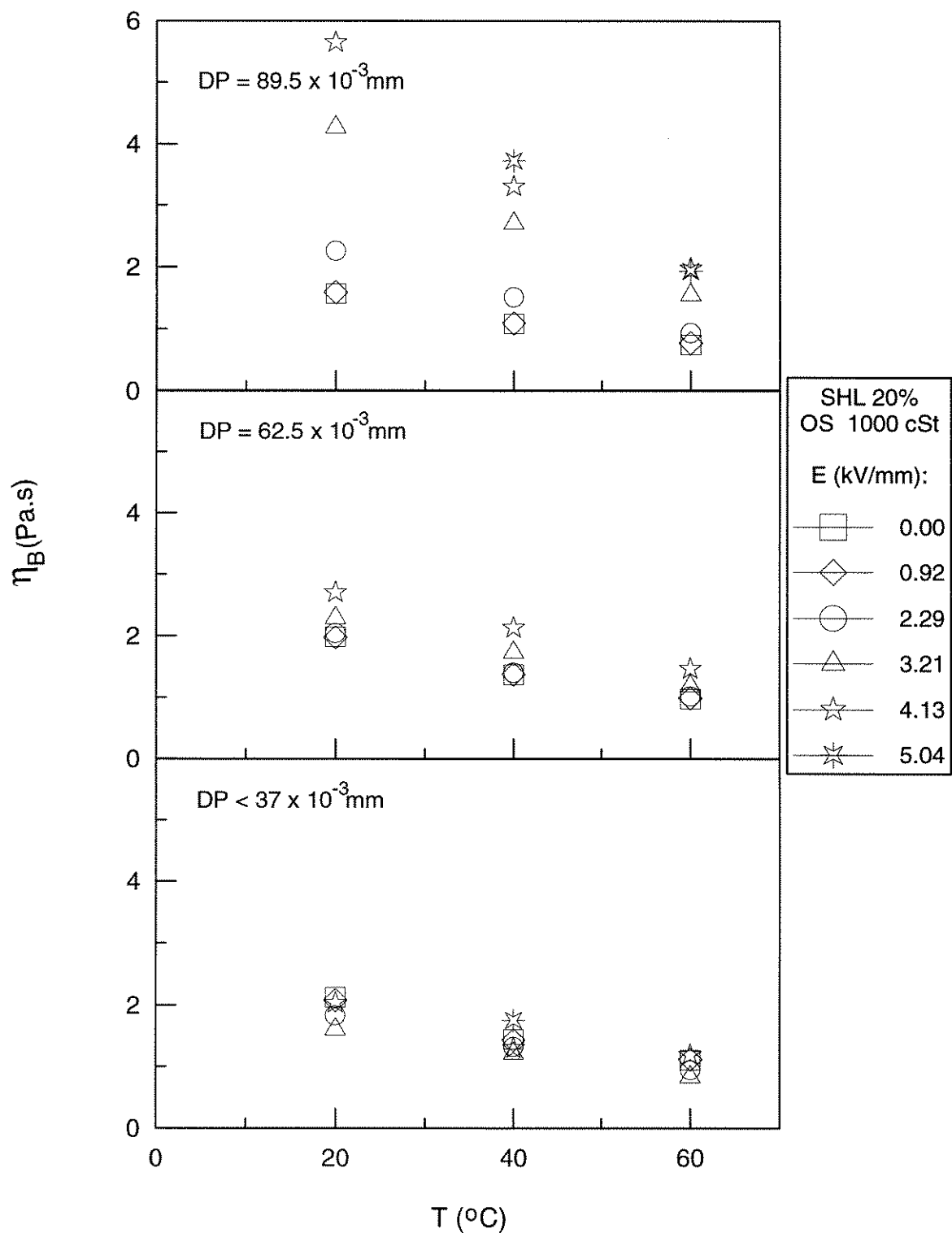


Figura C.16: Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

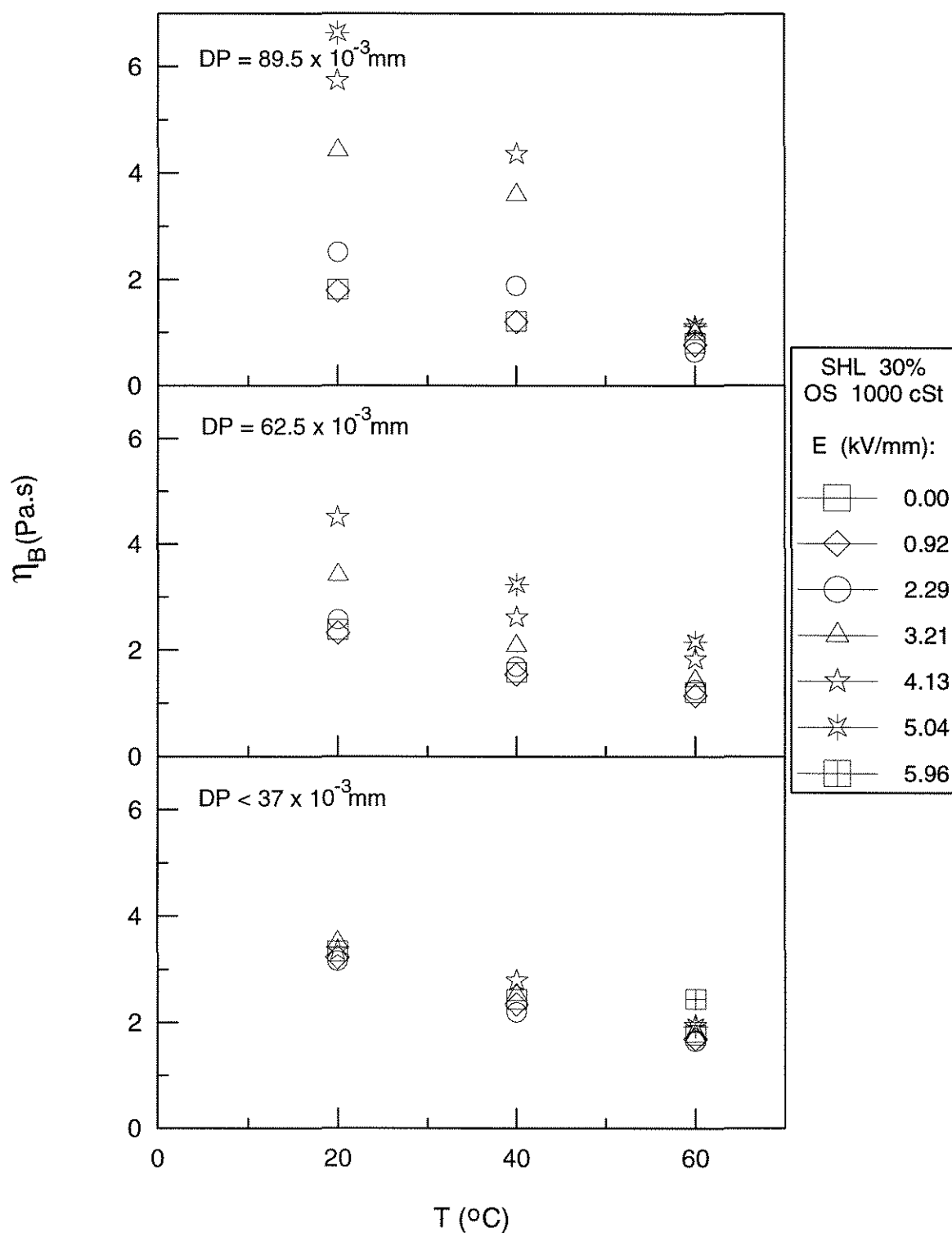


Figura C.17 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

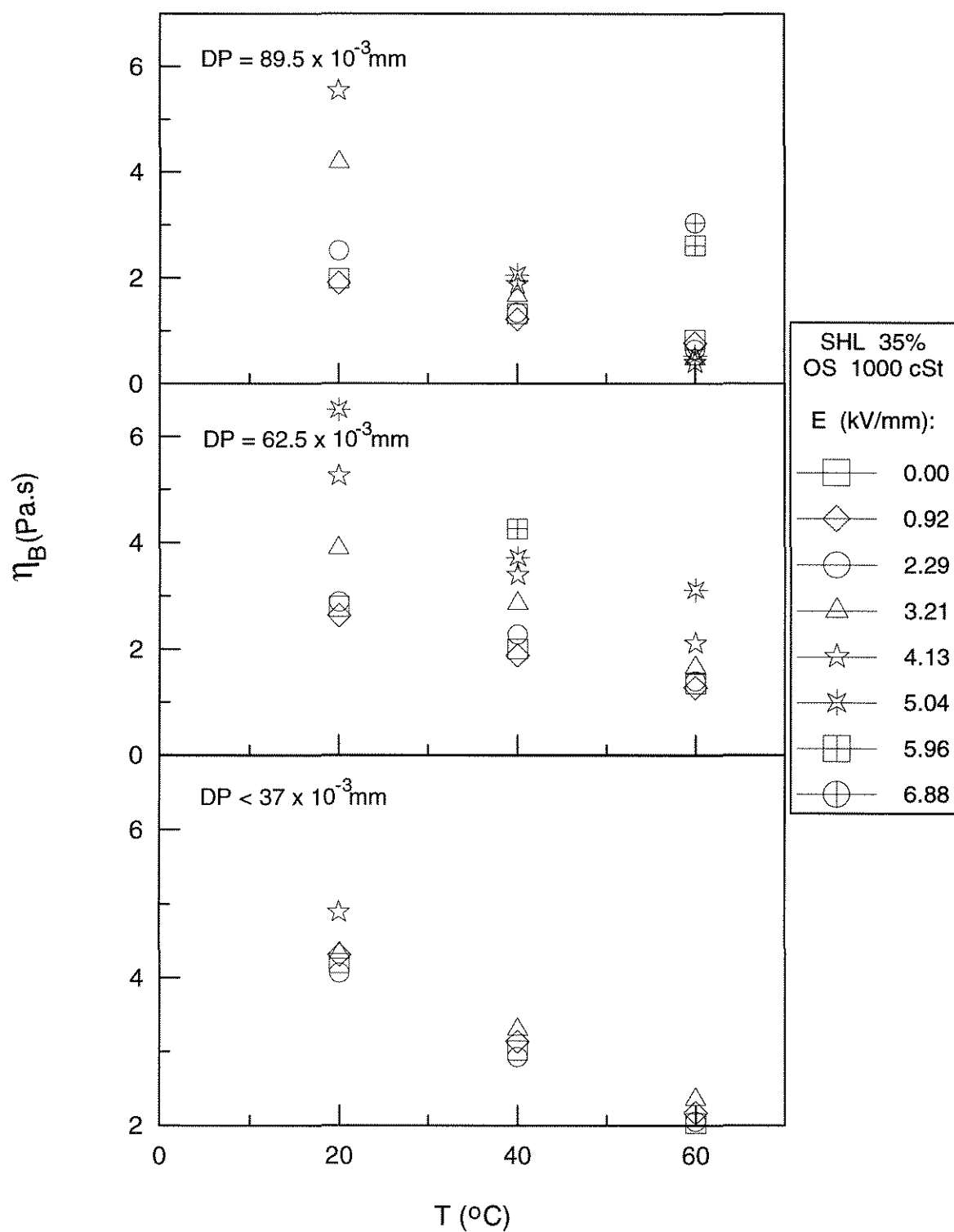


Figura C.18 : Viscosidade de Bingham em função da temperatura para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

APÊNDICE D

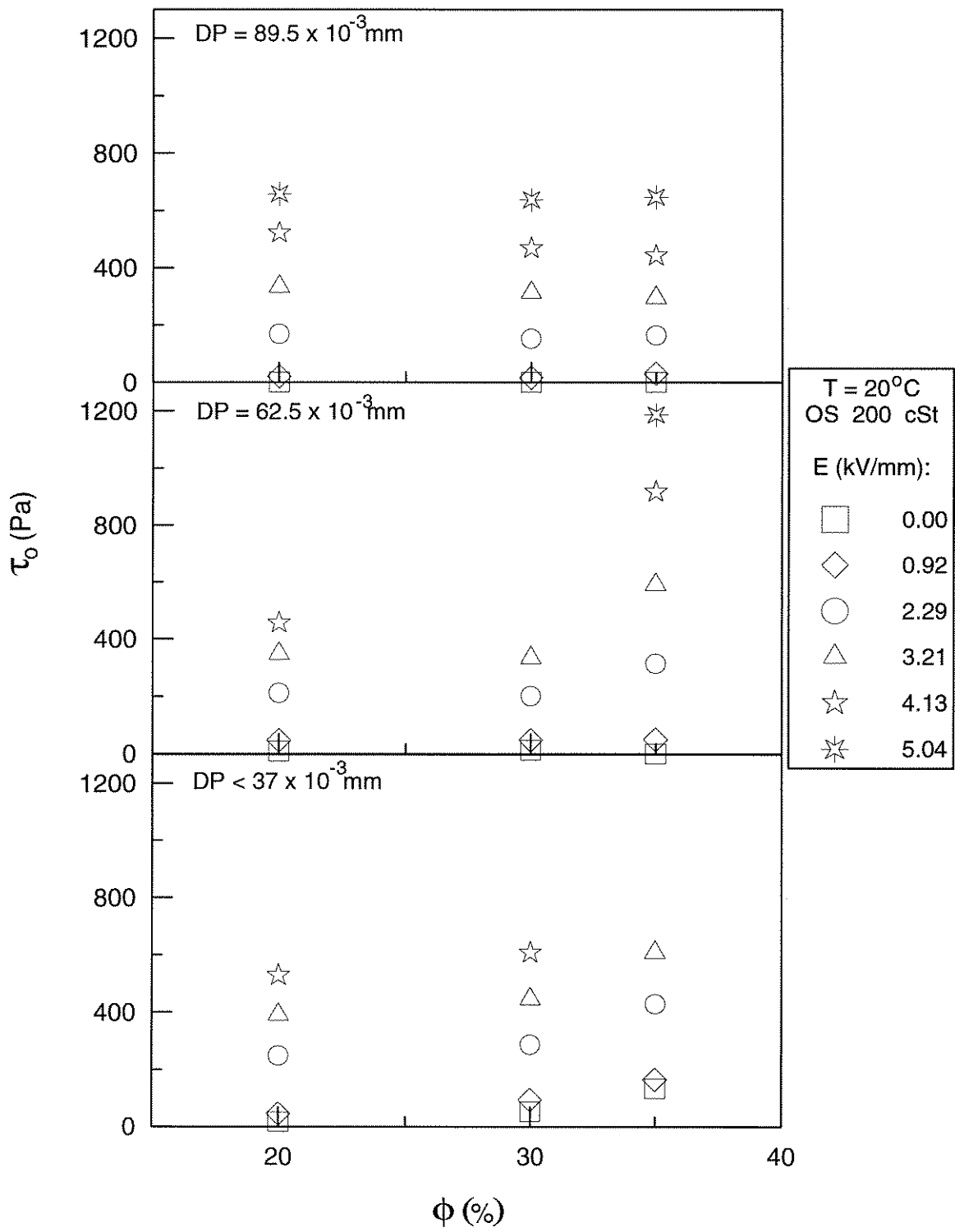


Figura D.1 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

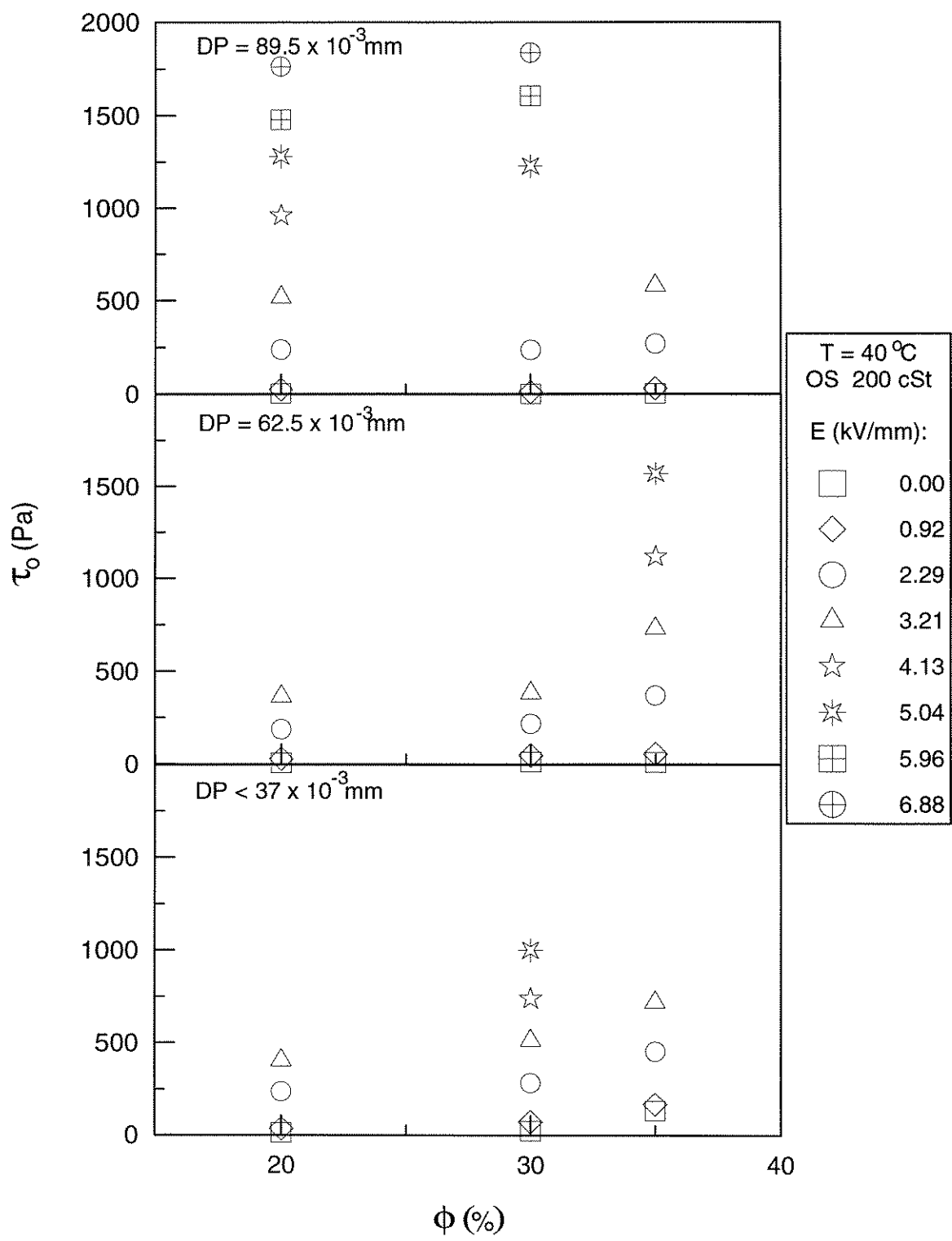


Figura D. 2 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

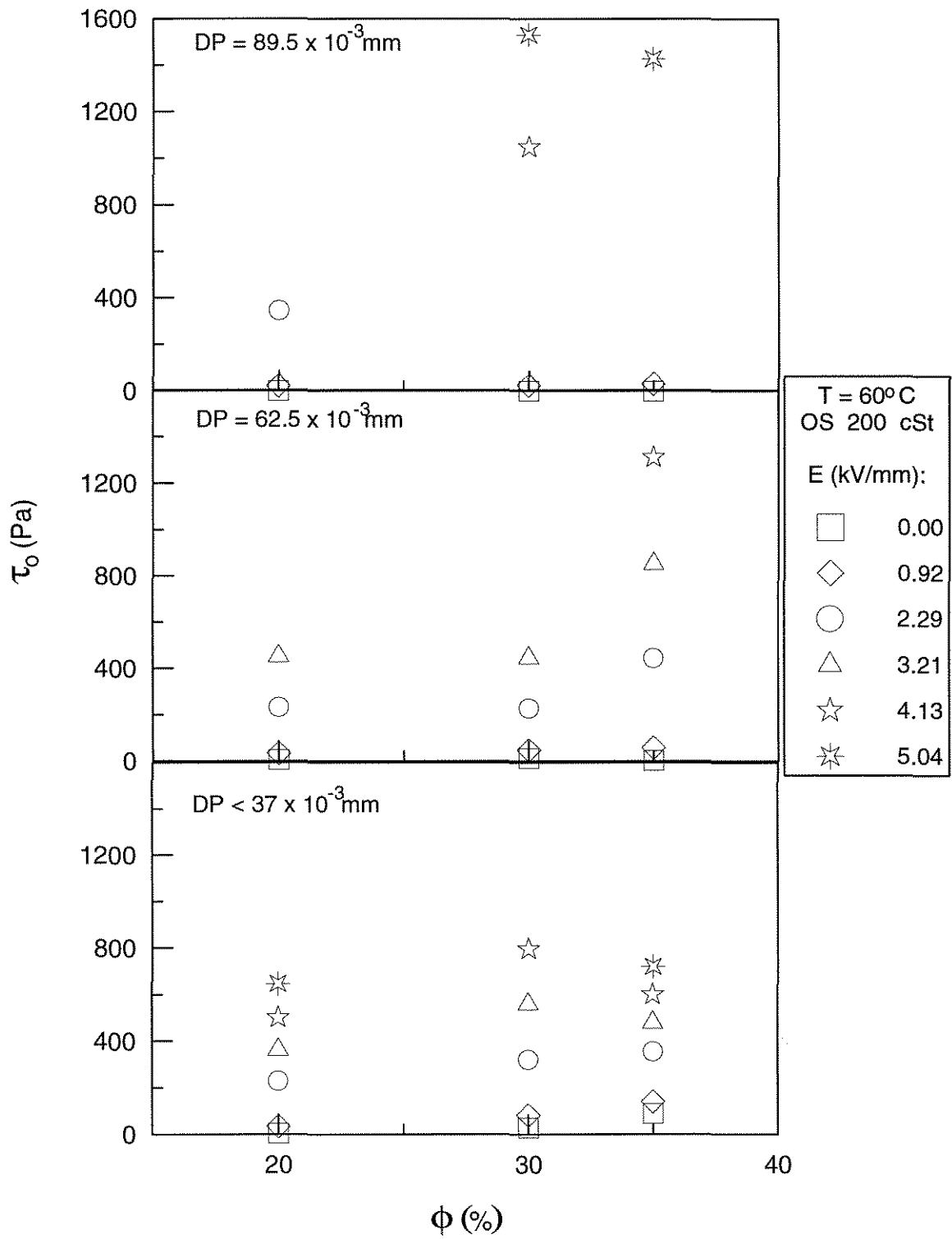


Figura D.3 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

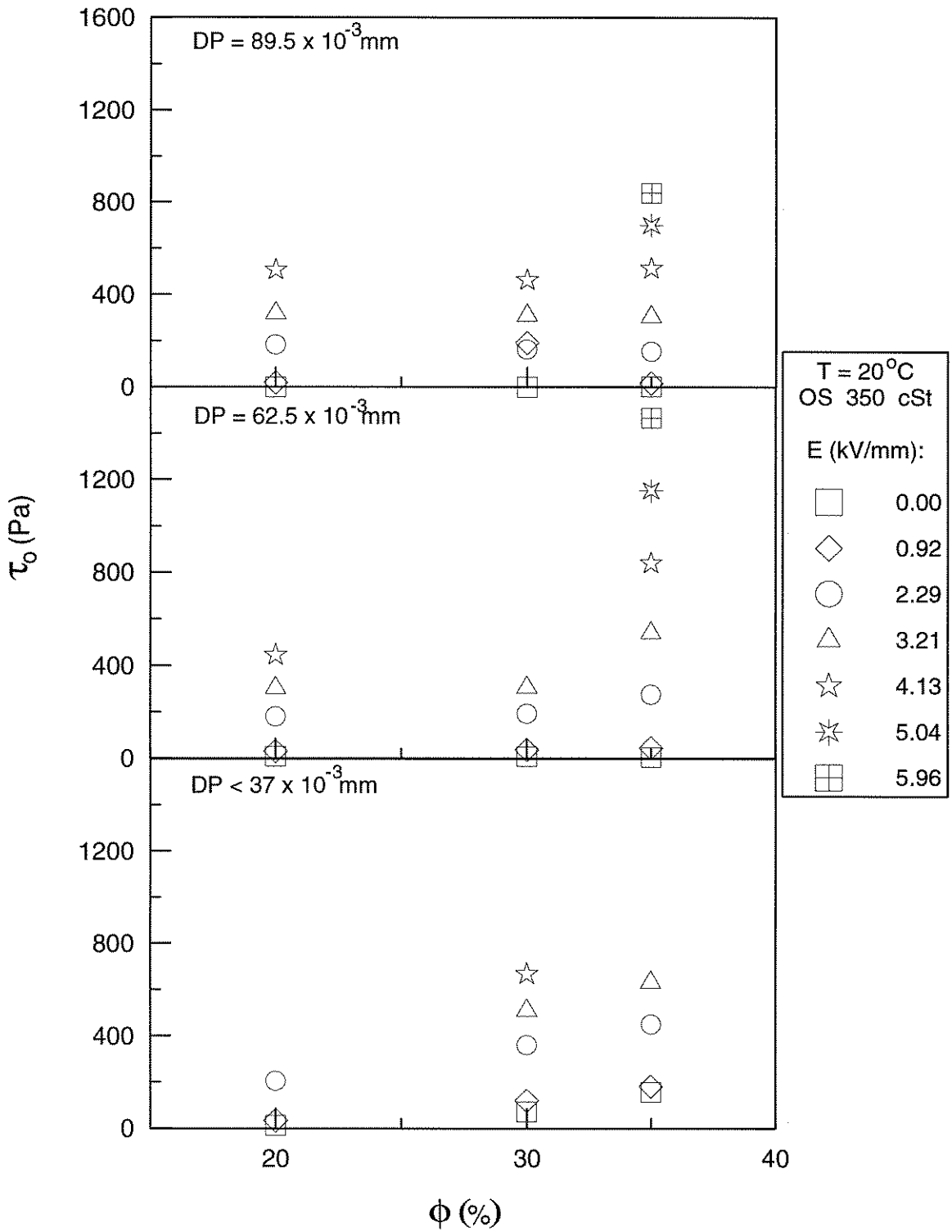


Figura D.4 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

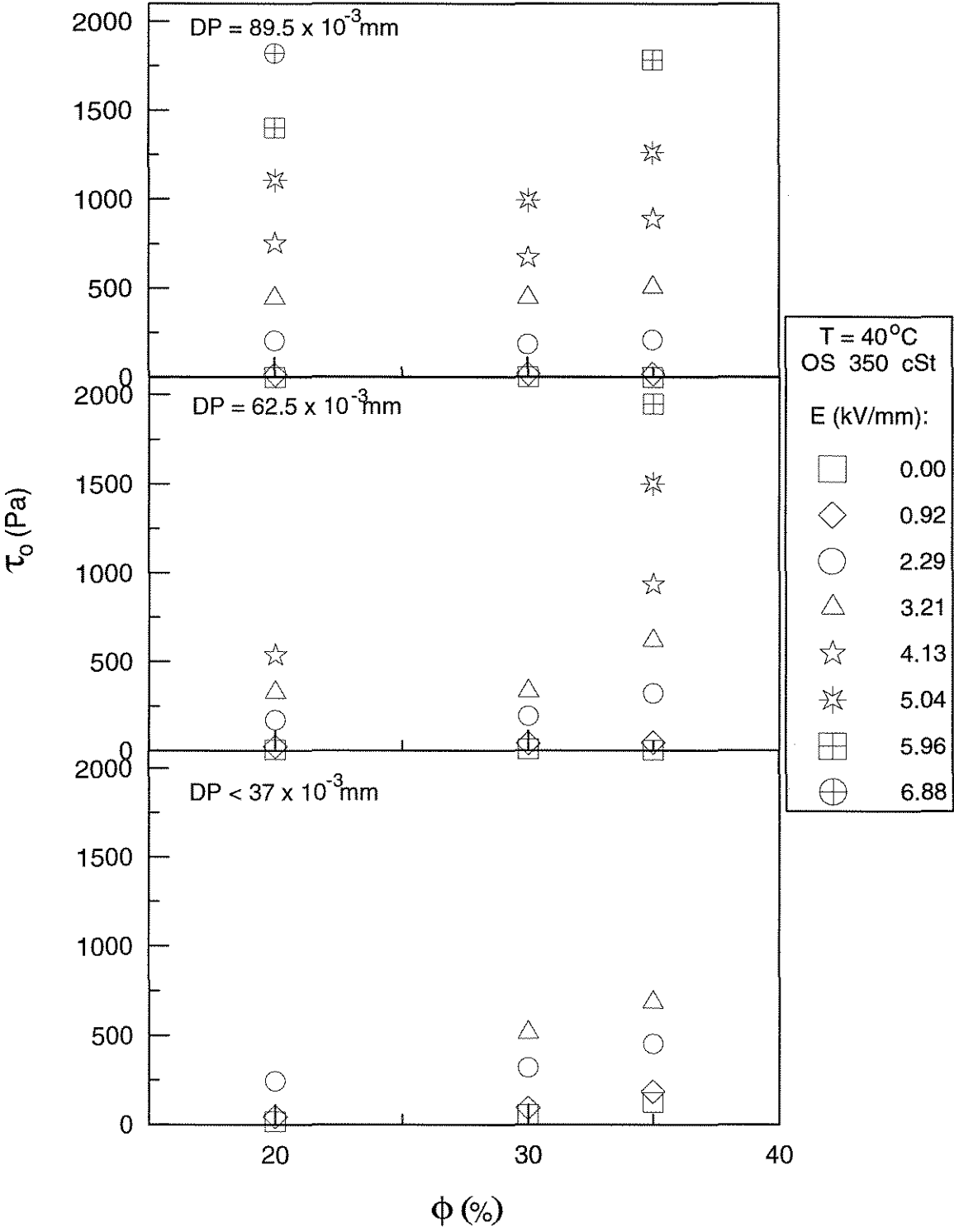


Figura D.5 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 40°C , tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

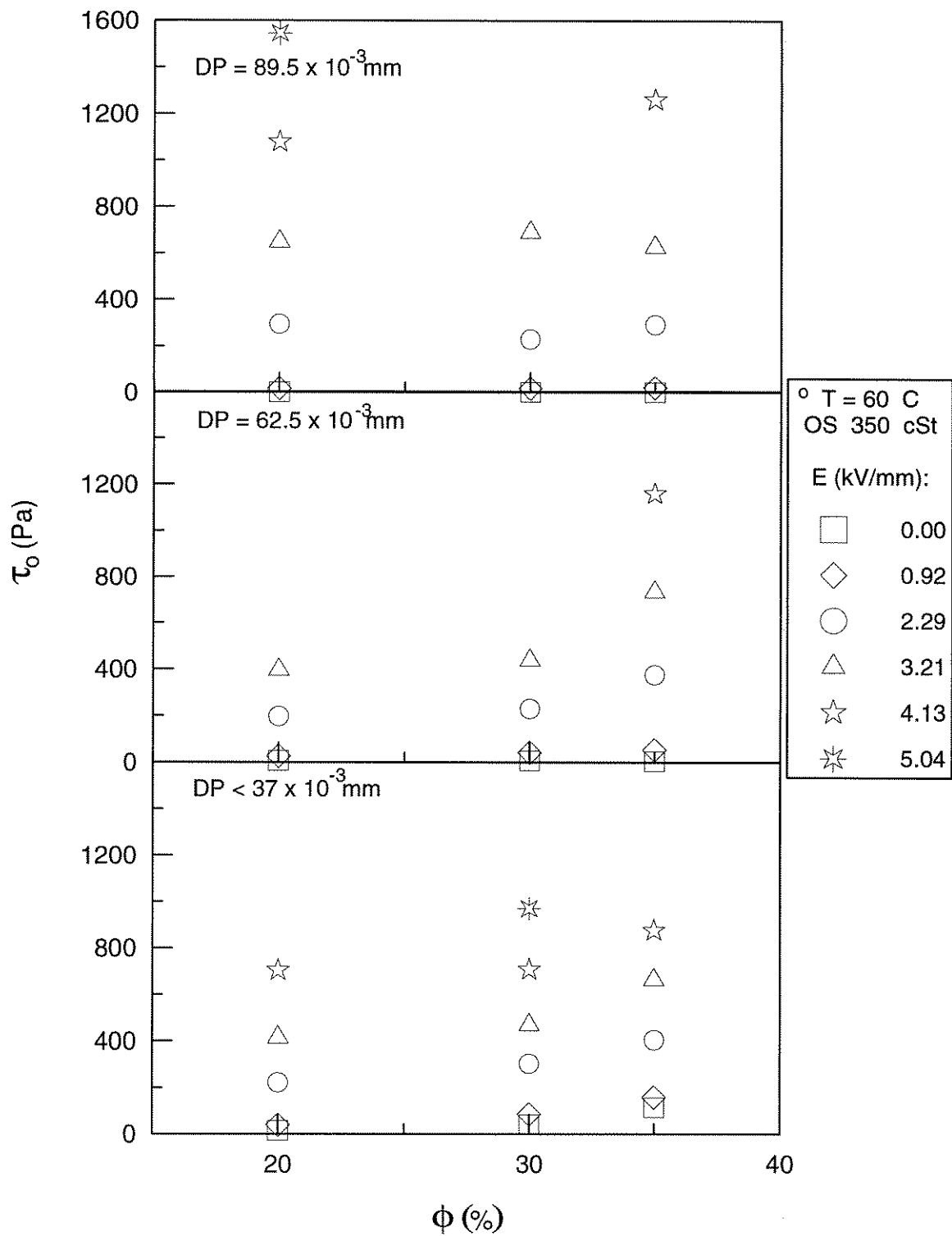


Figura D.6 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 60 °C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

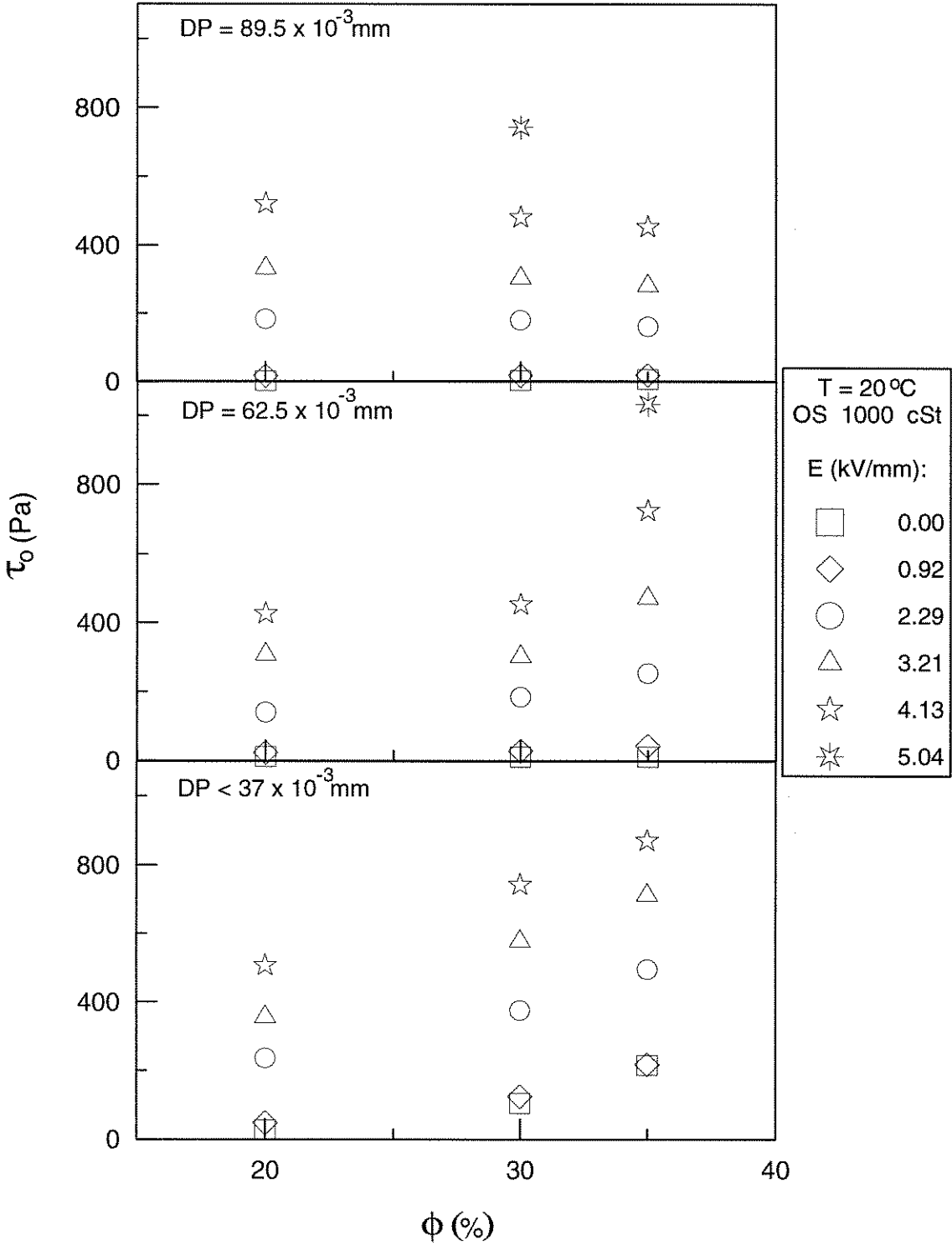


Figura D.7 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

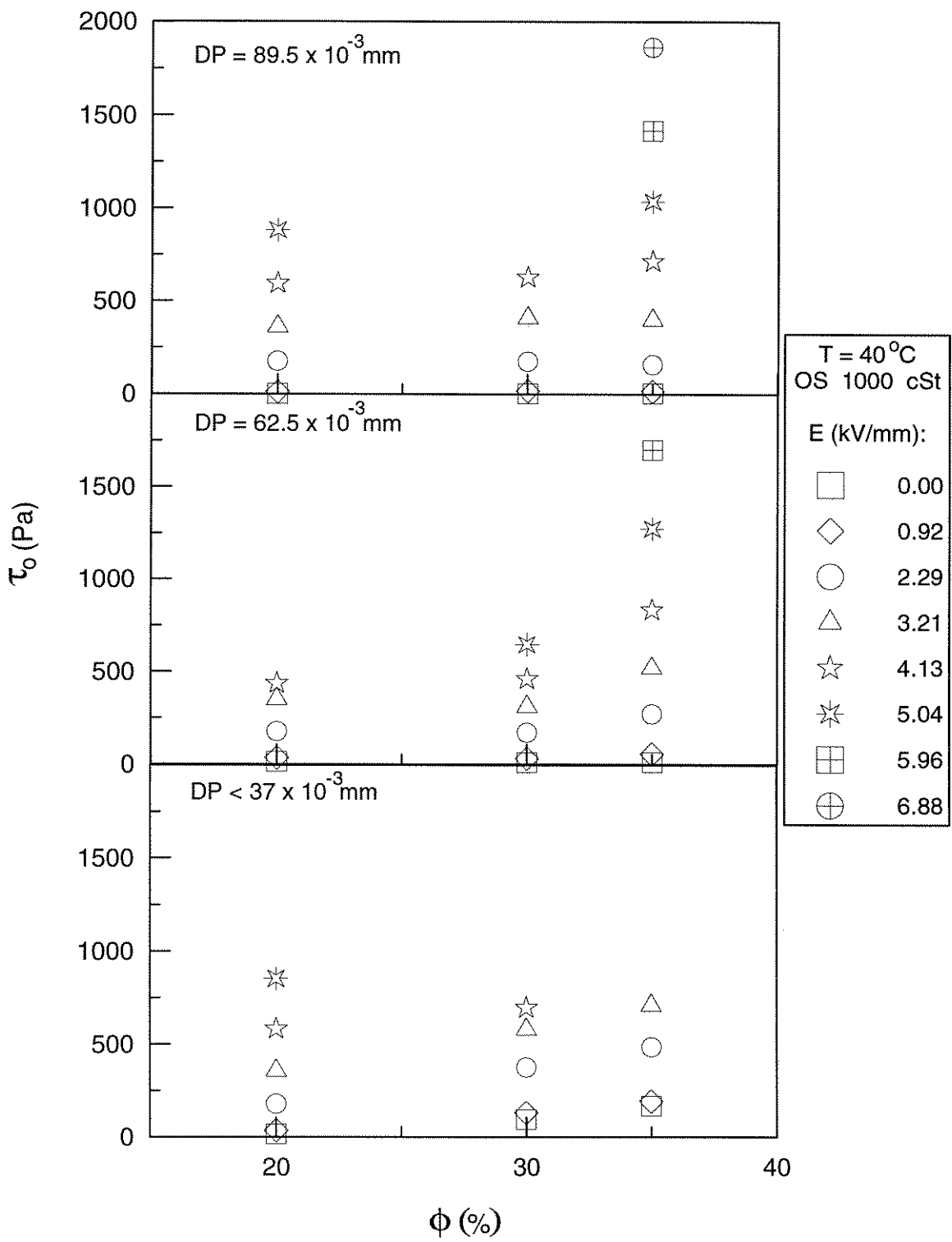


Figura D.8 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

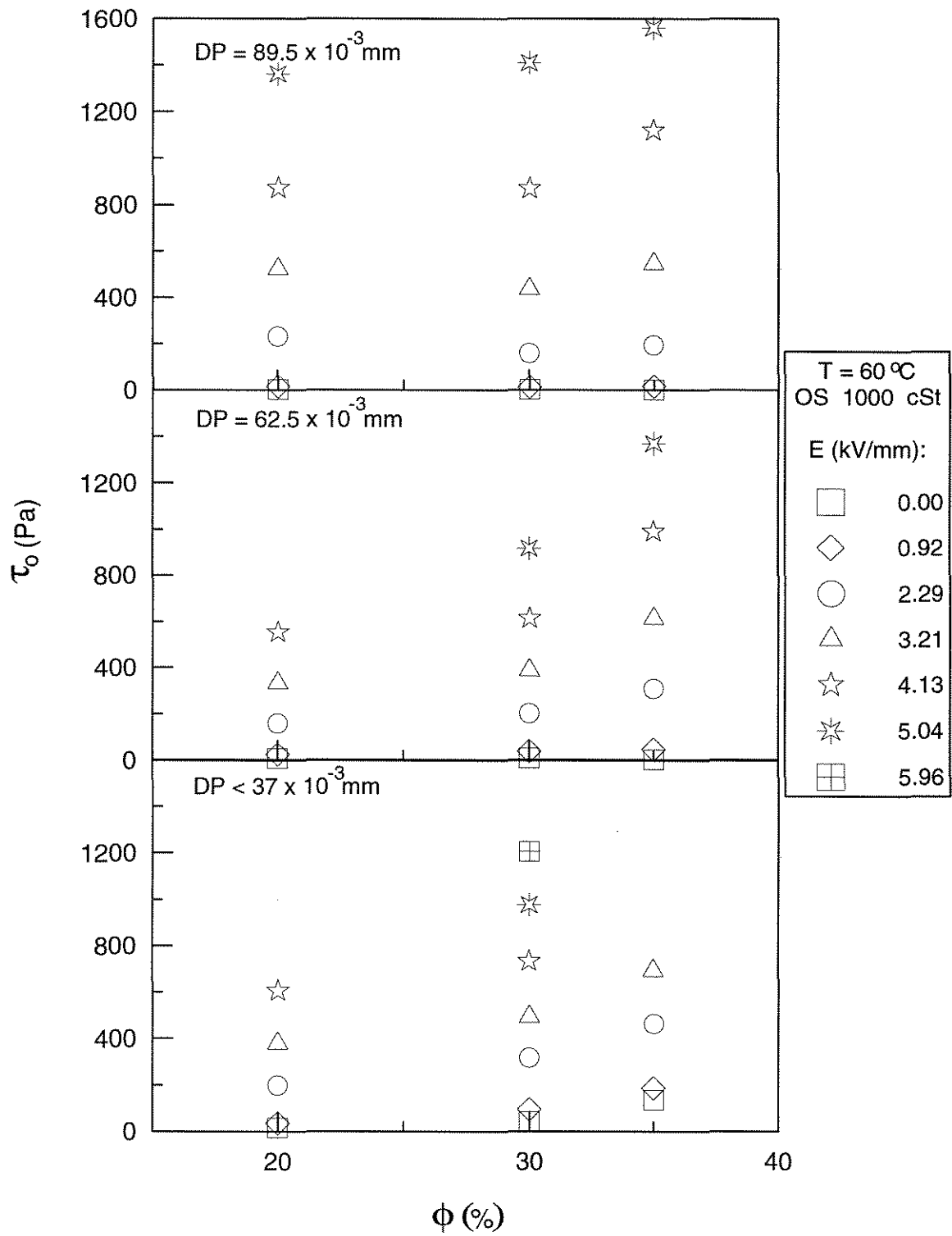


Figura D.9 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

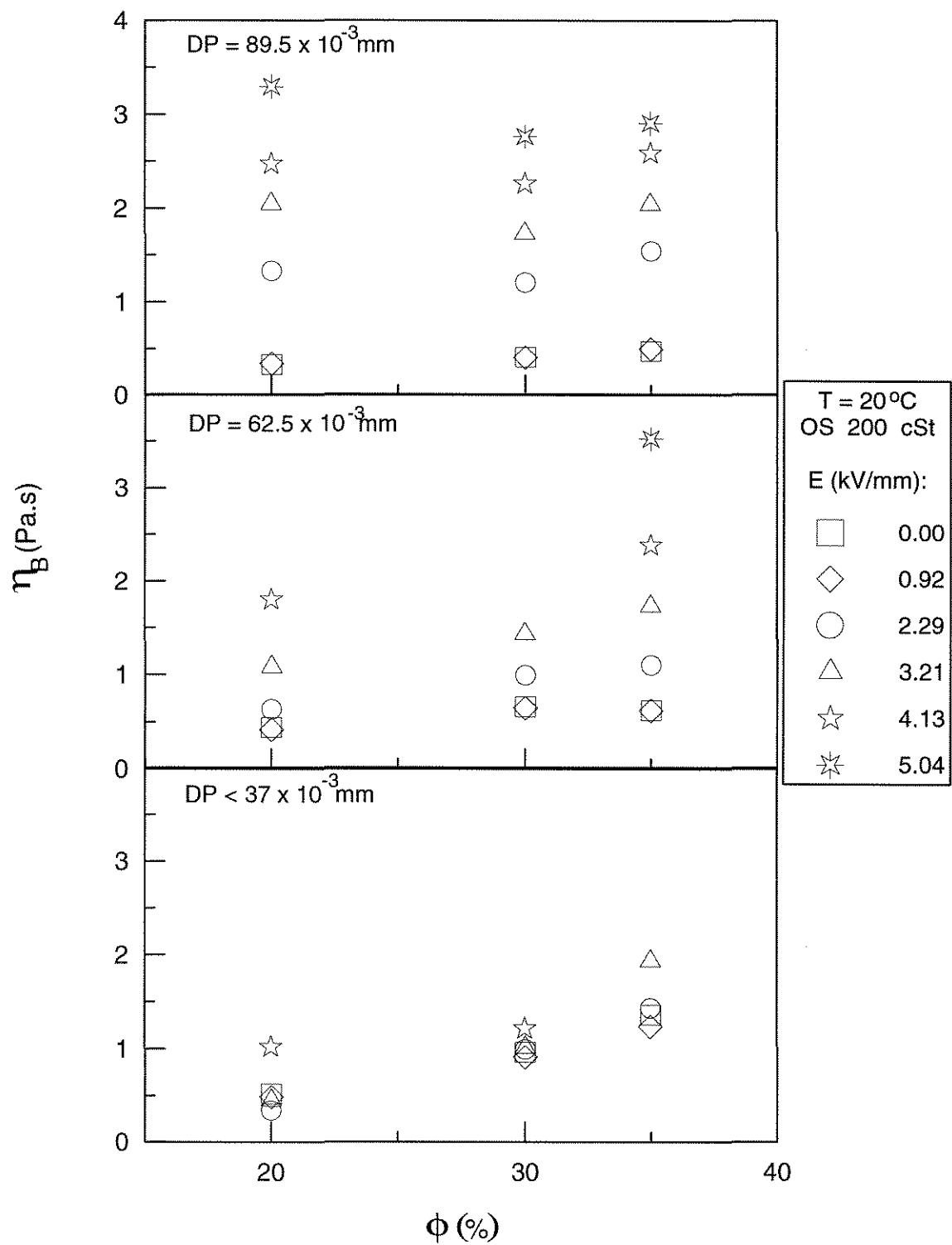


Figura D.10 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

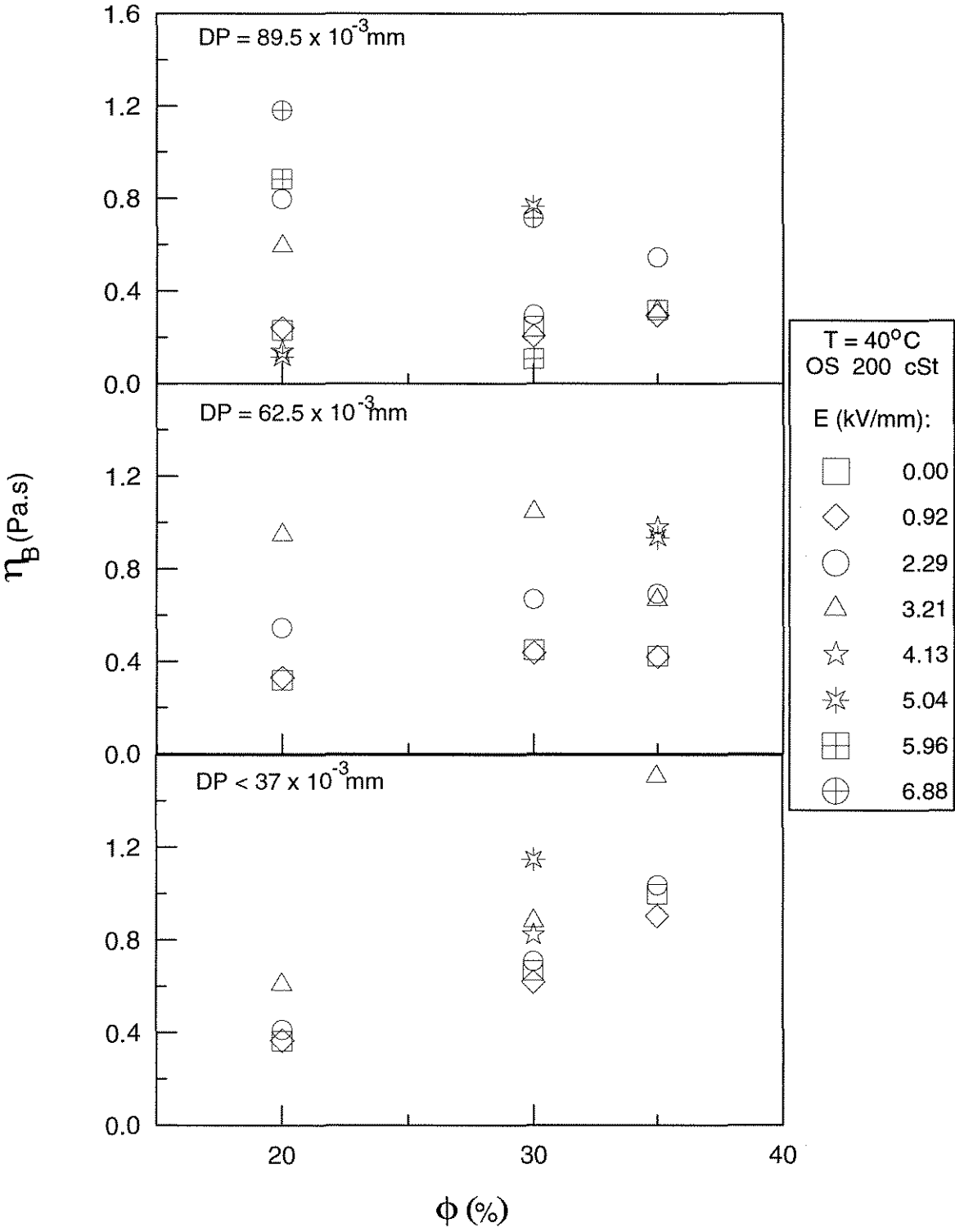


Figura D.11 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

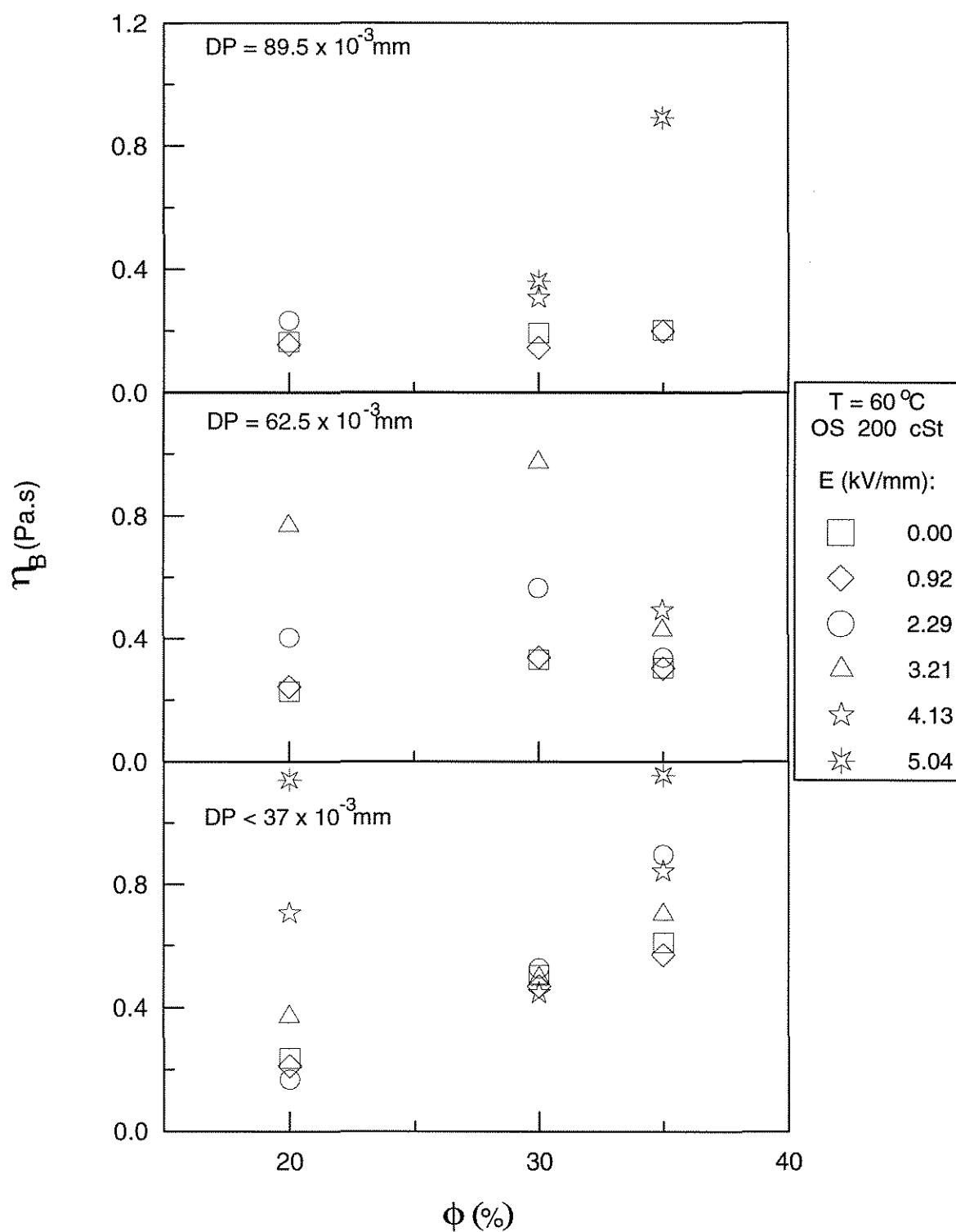


Figura D.12 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

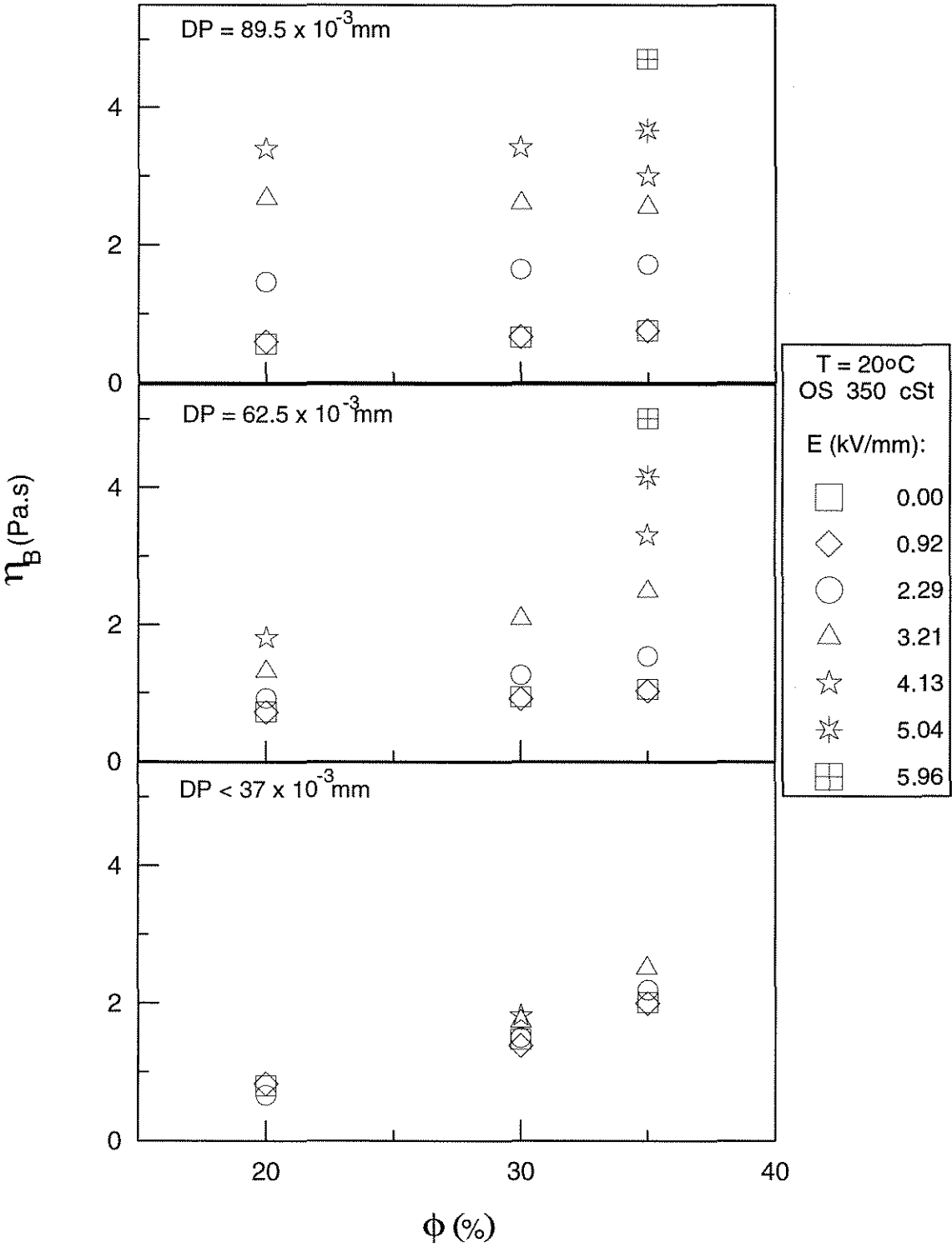


Figura D.13 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

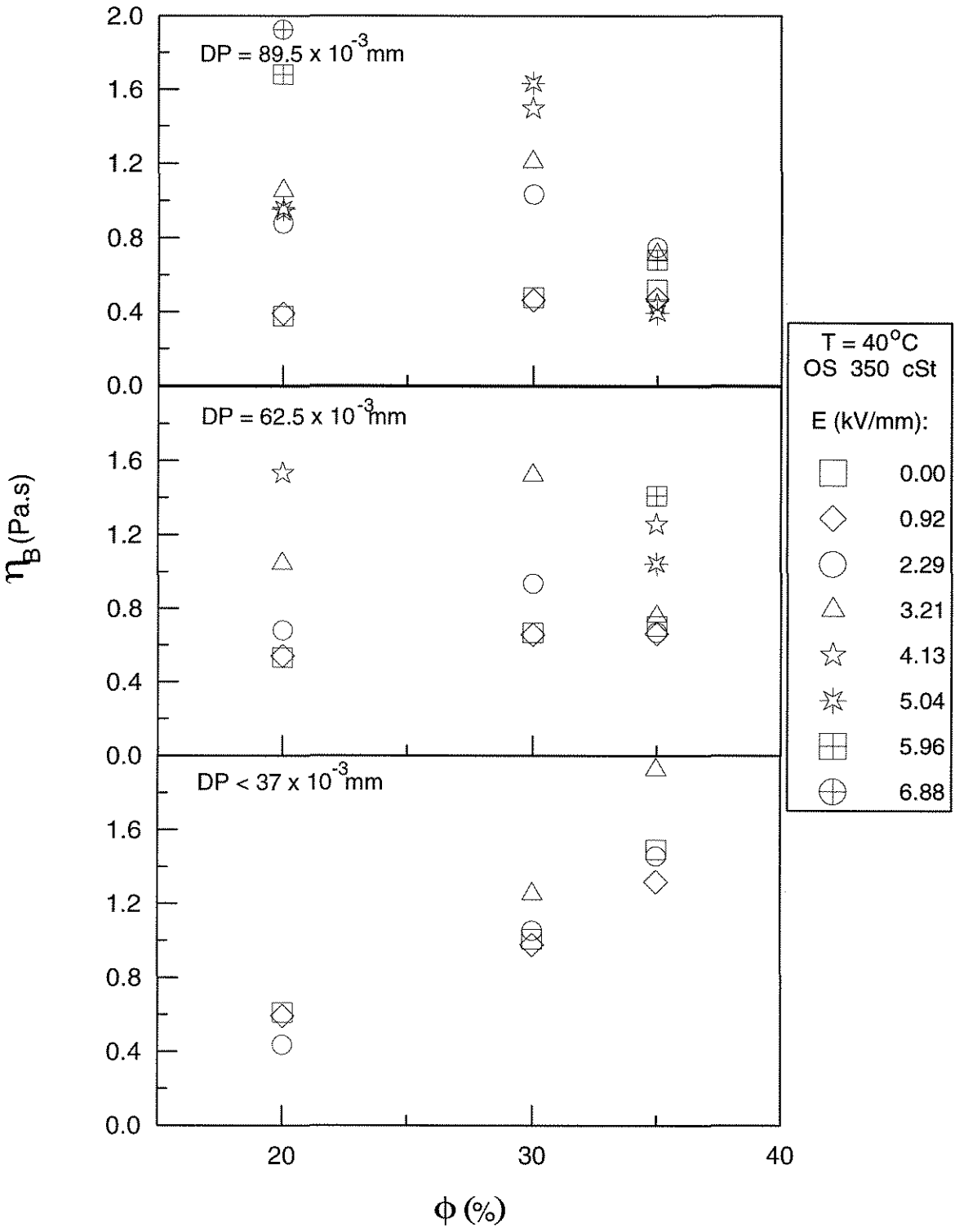


Figura D.14 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

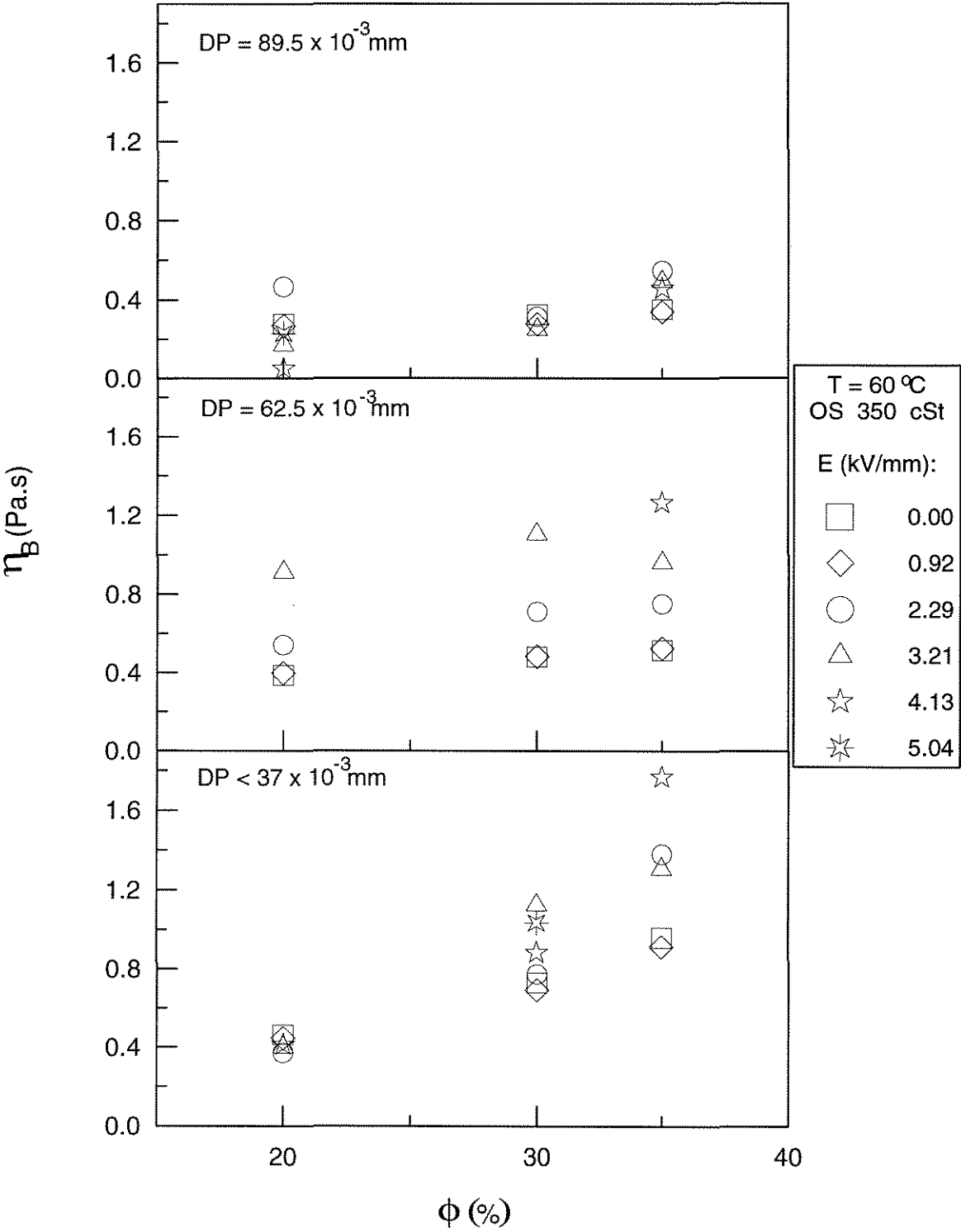


Figura D.15: Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

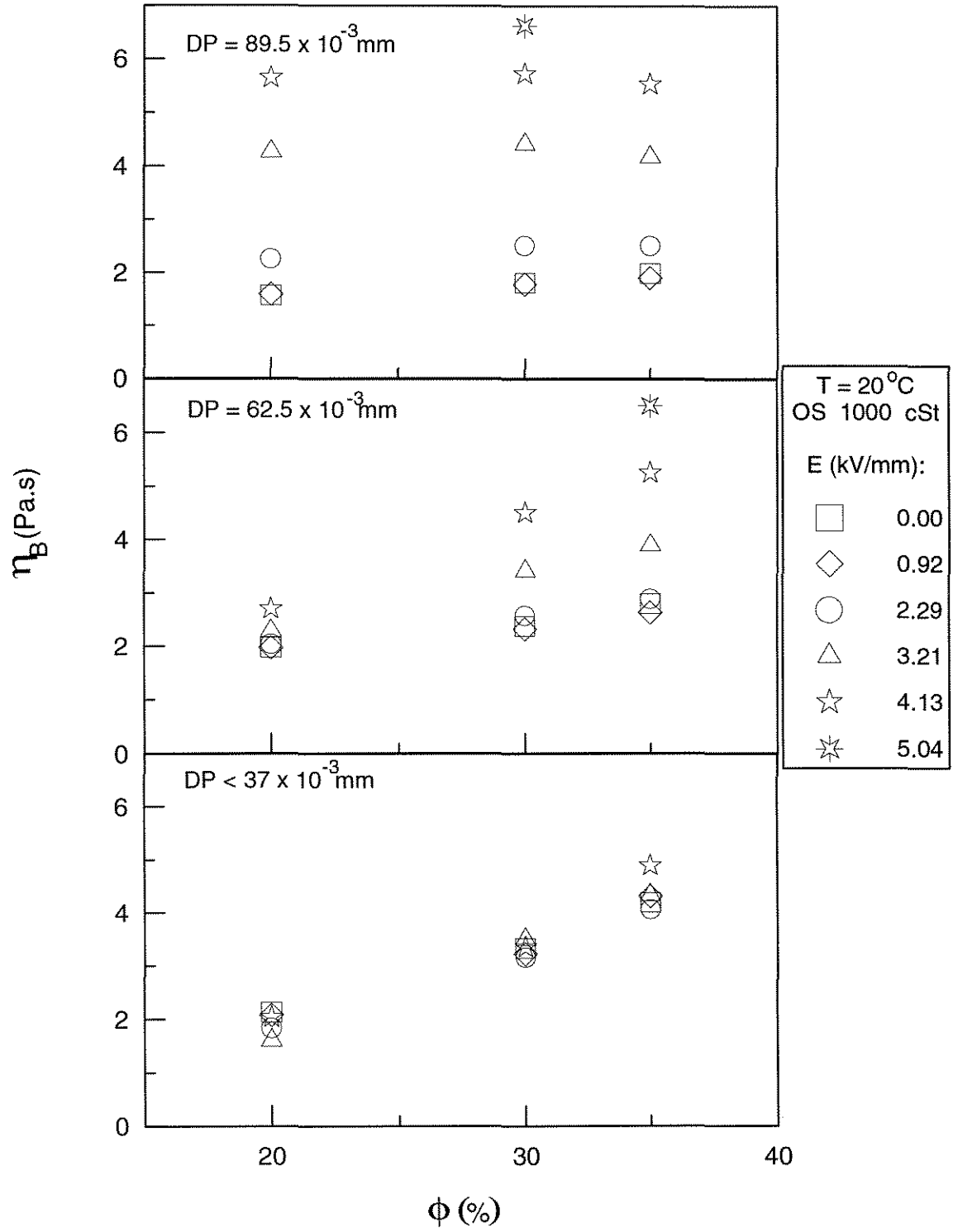


Figura D.16 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 20°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

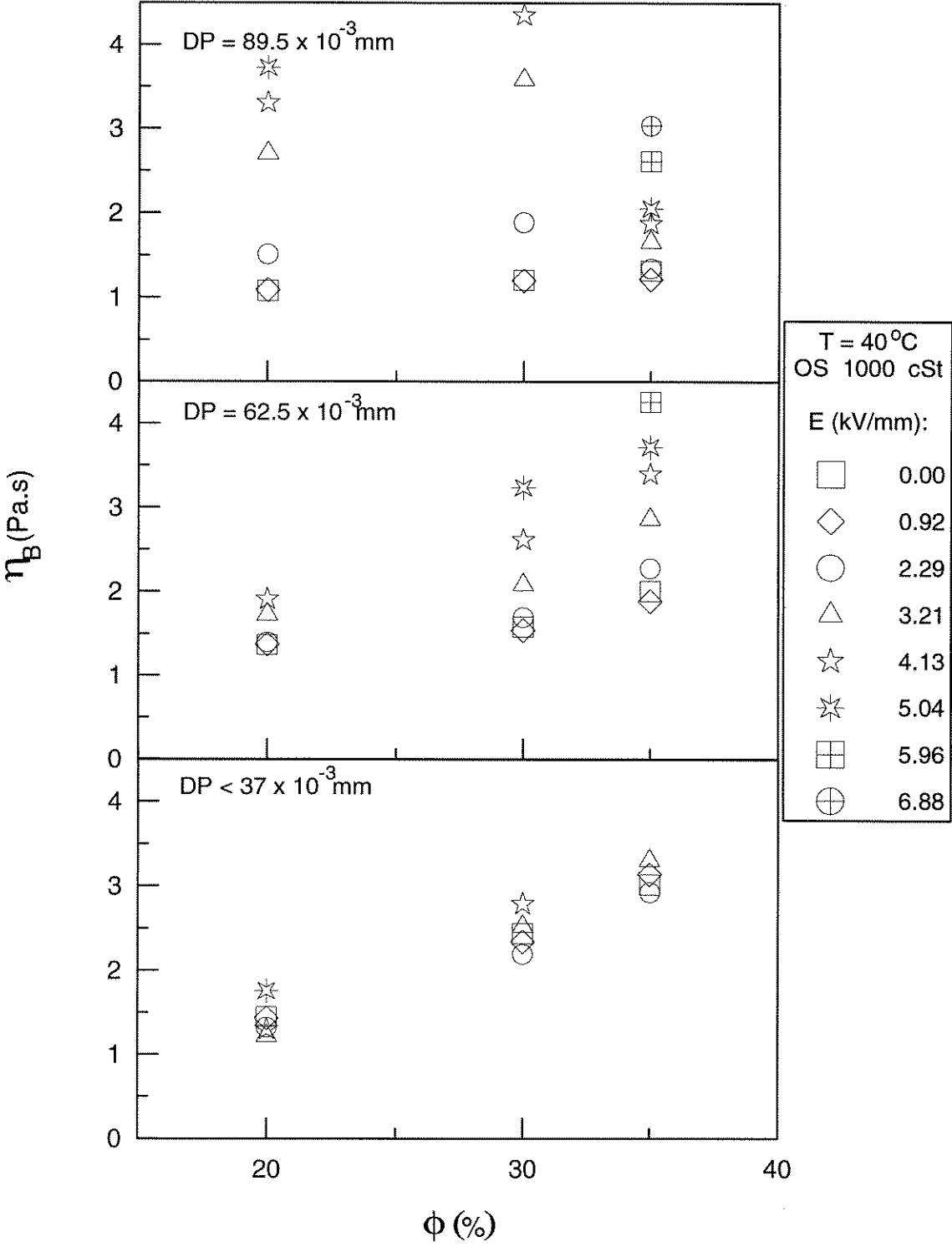


Figura D.17 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 40°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

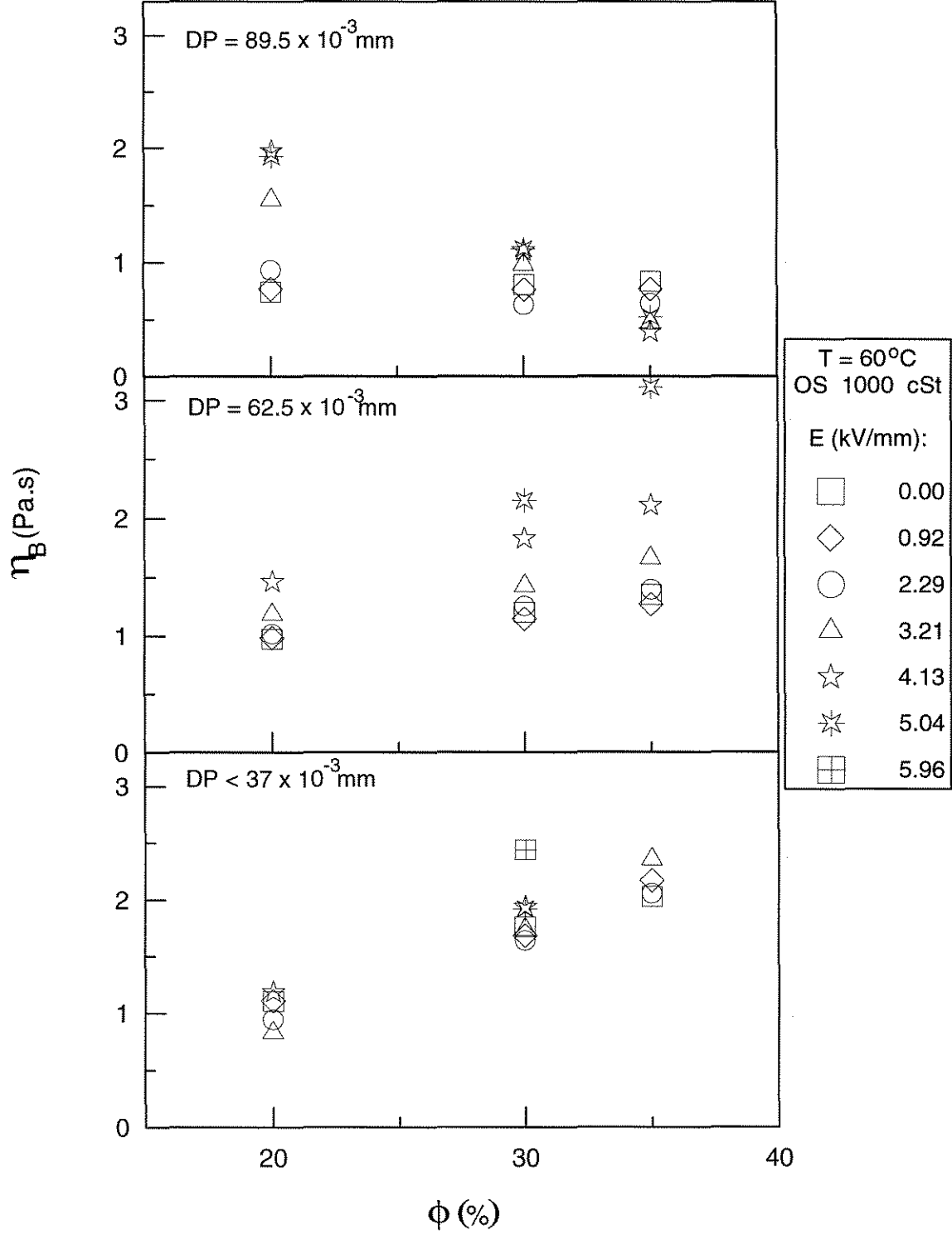


Figura D.18 : Viscosidade de Bingham em função da fração em peso de sólidos para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt) à temperatura de 60°C, tendo como parâmetro intensidade de campo elétrico para diferentes diâmetros de partículas.

APÊNDICE E

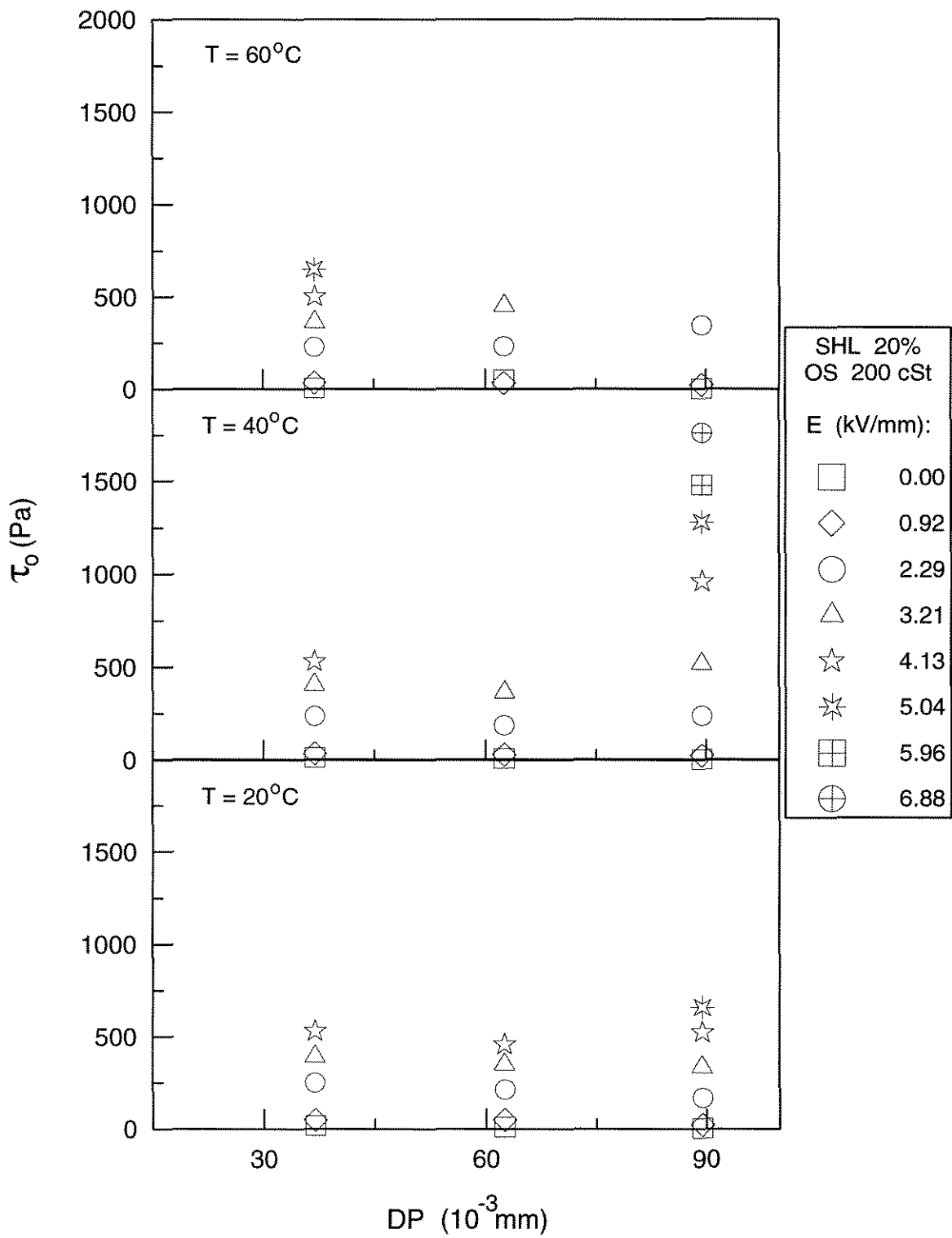


Figura E.1 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

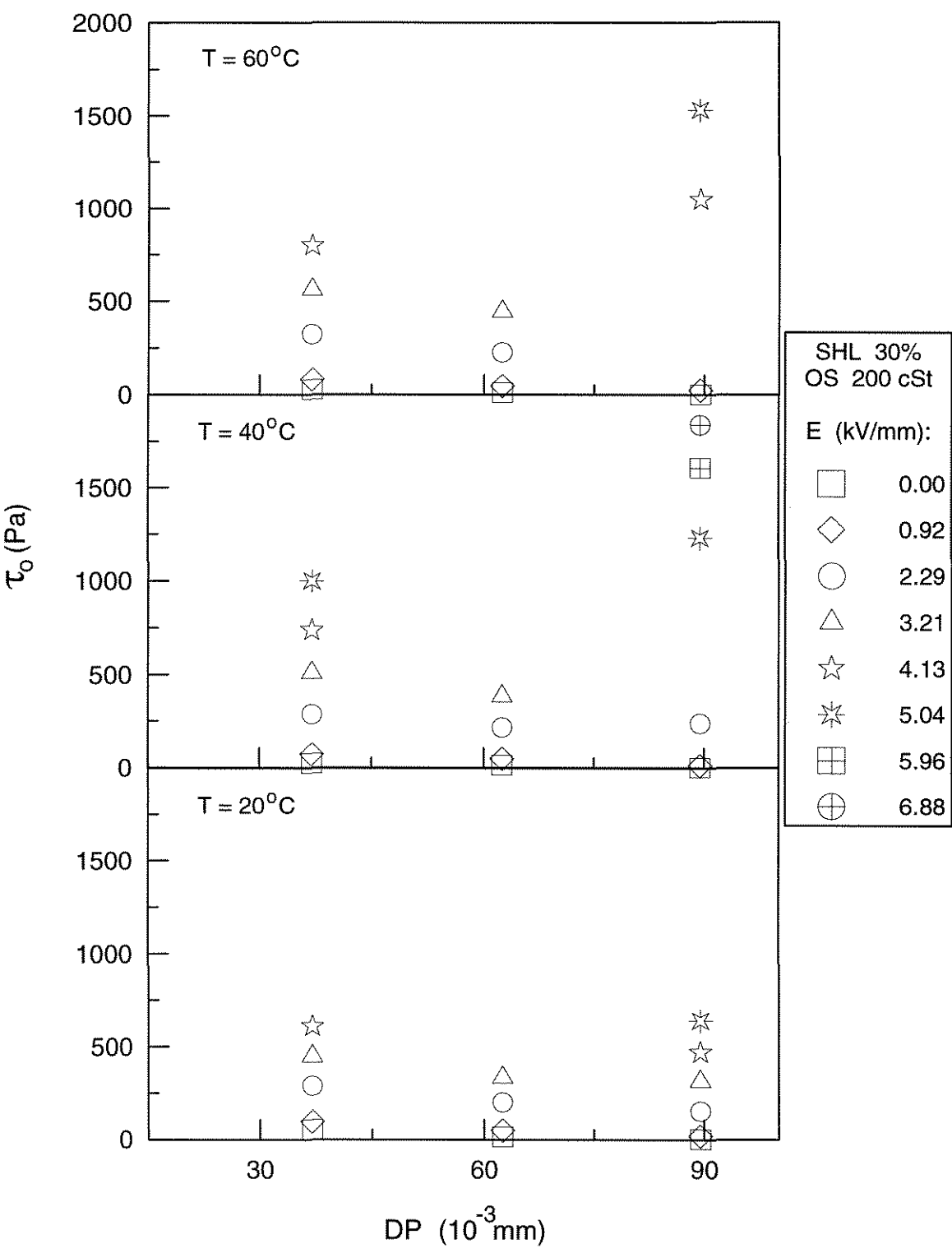


Figura E.2 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

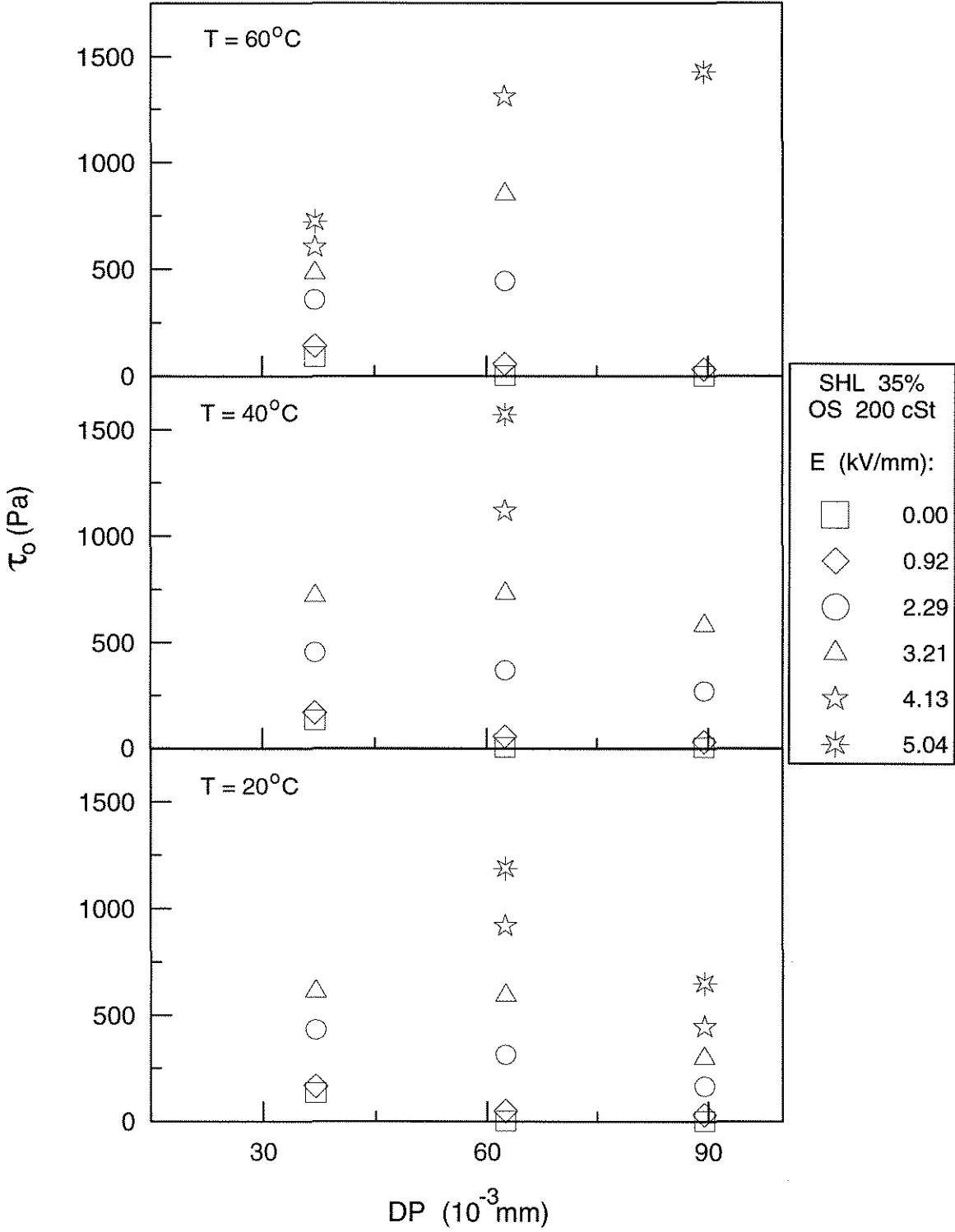


Figura E.3 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

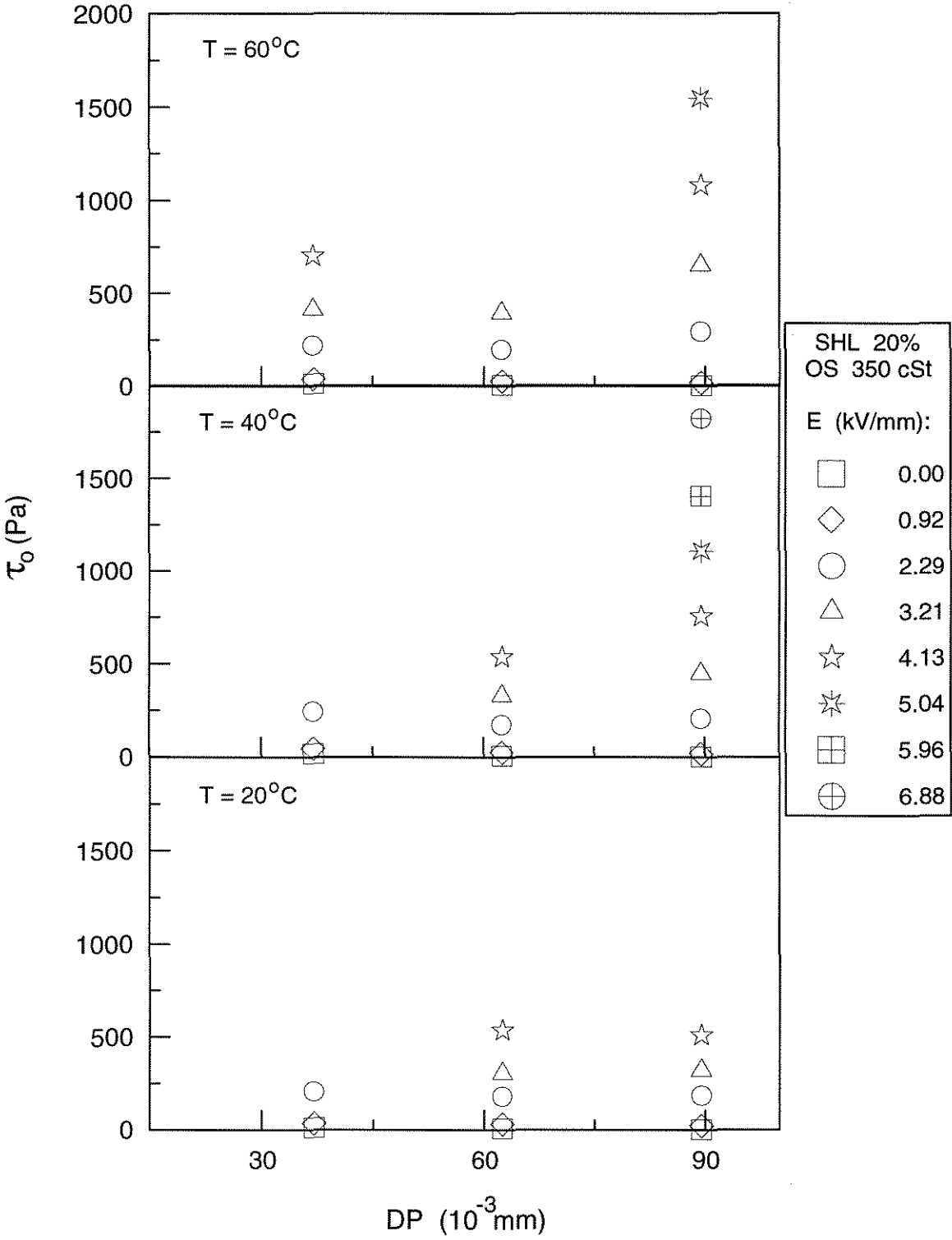


Figura E.4 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

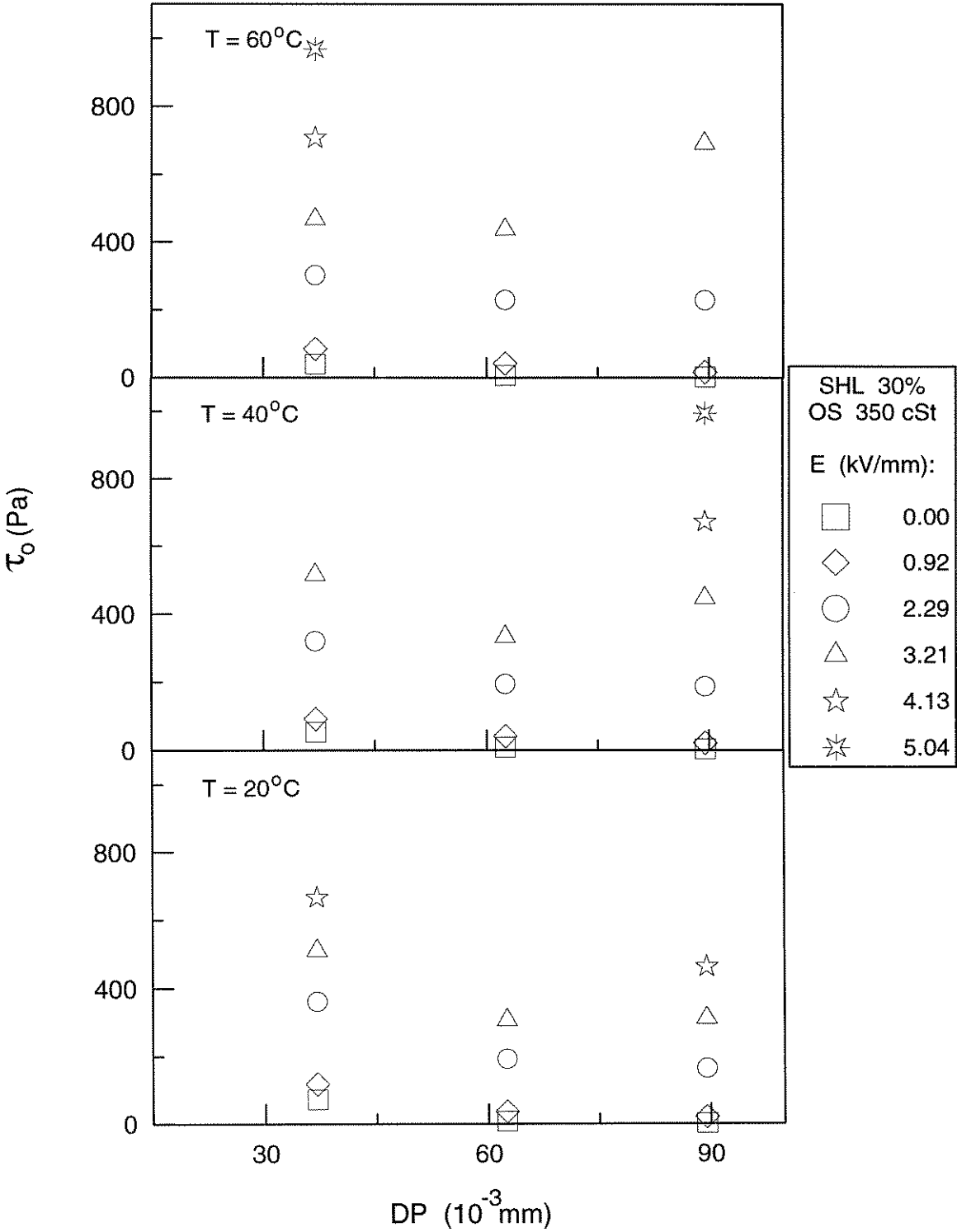


Figura E . 5 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

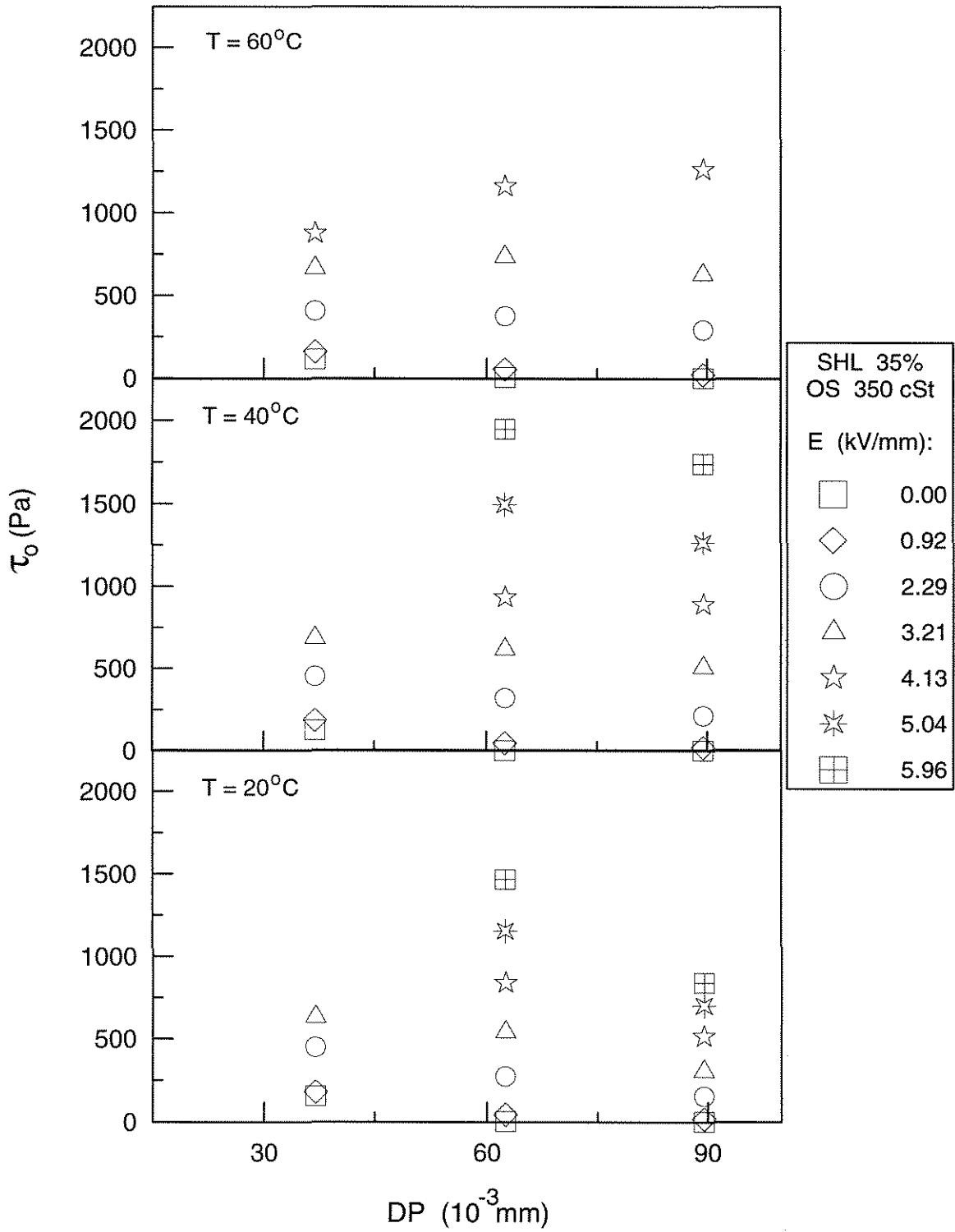


Figura E.6 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

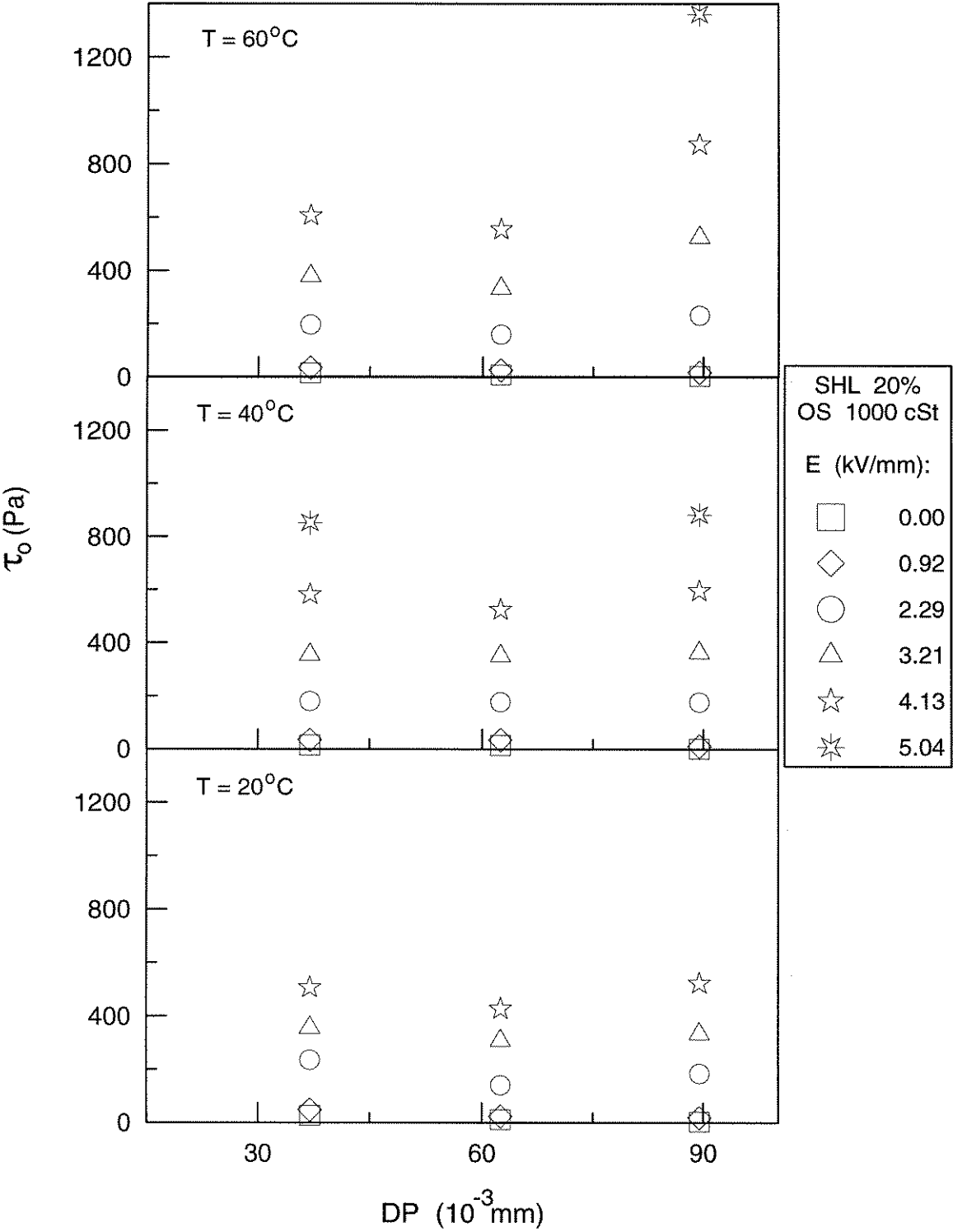


Figura E.7 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

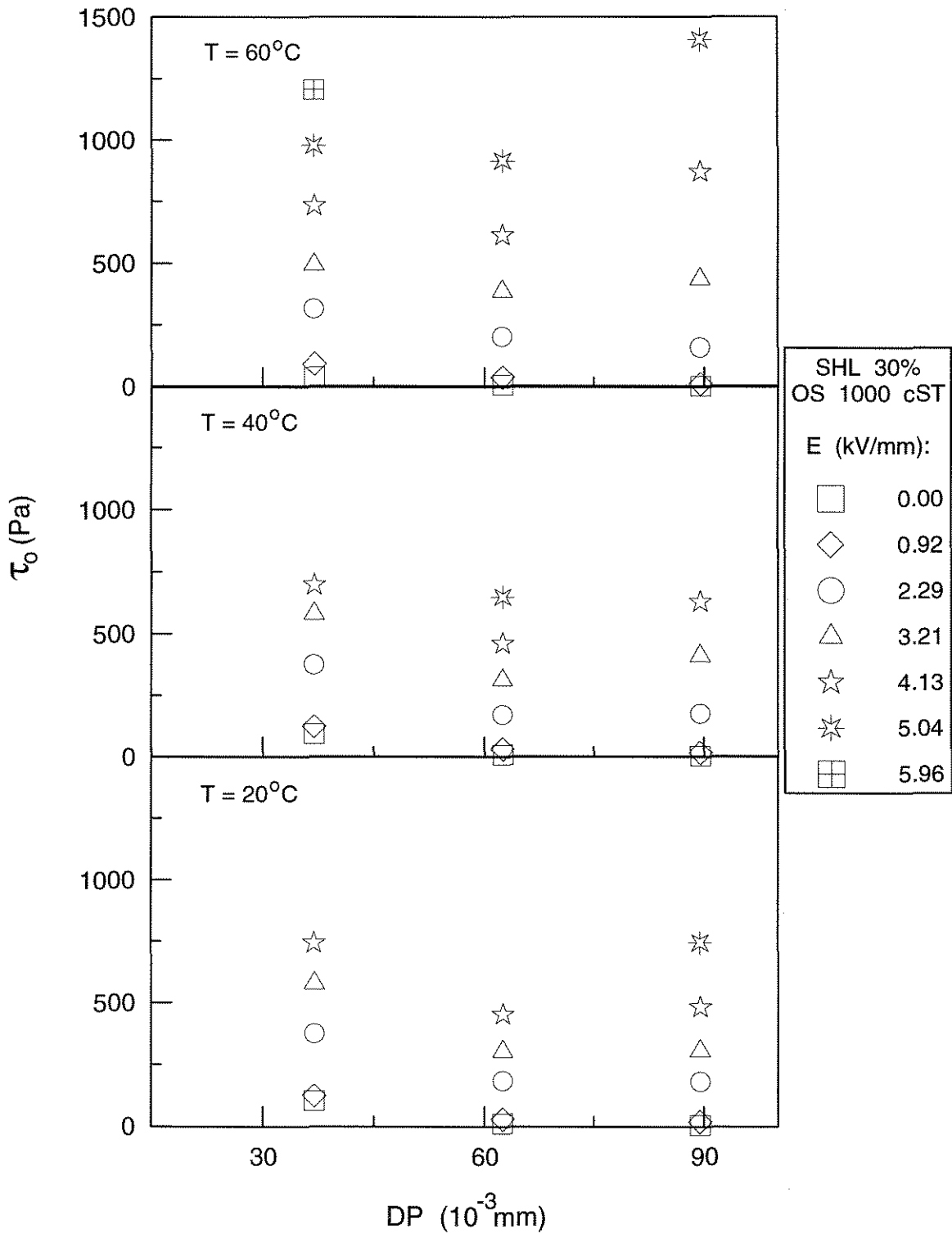


Figura E.8 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

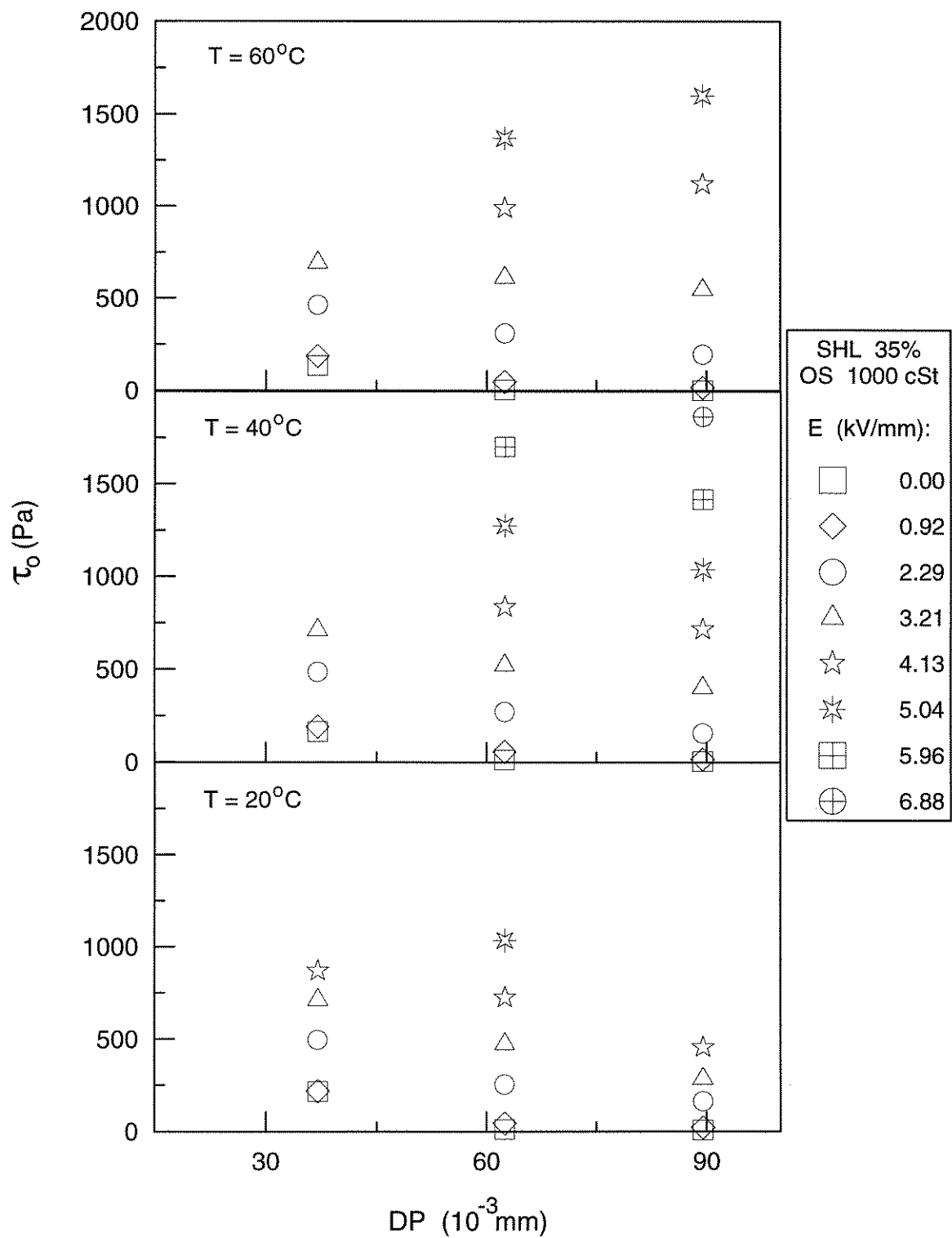


Figura E.9 : Tensão limite de escoamento de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

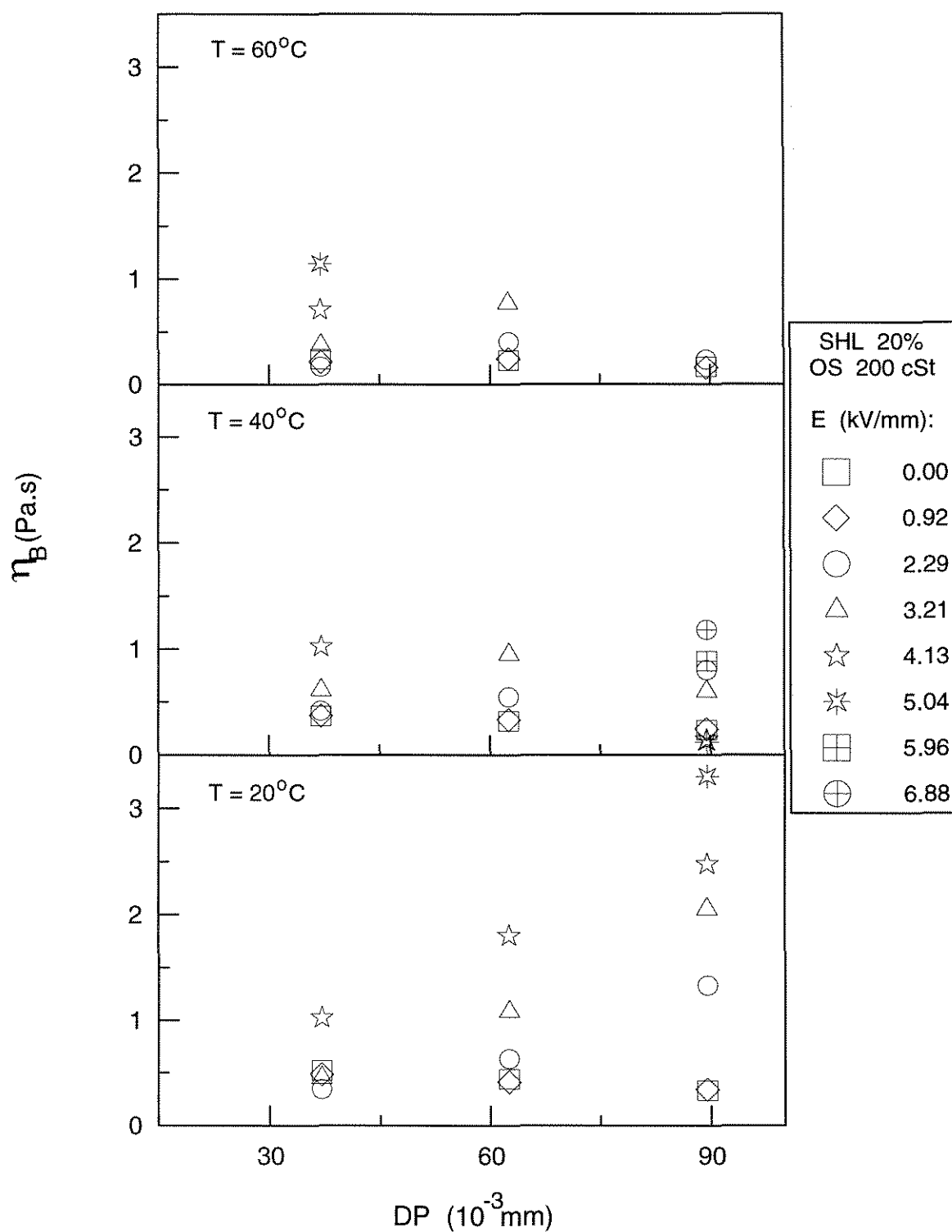


Figura E.10 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

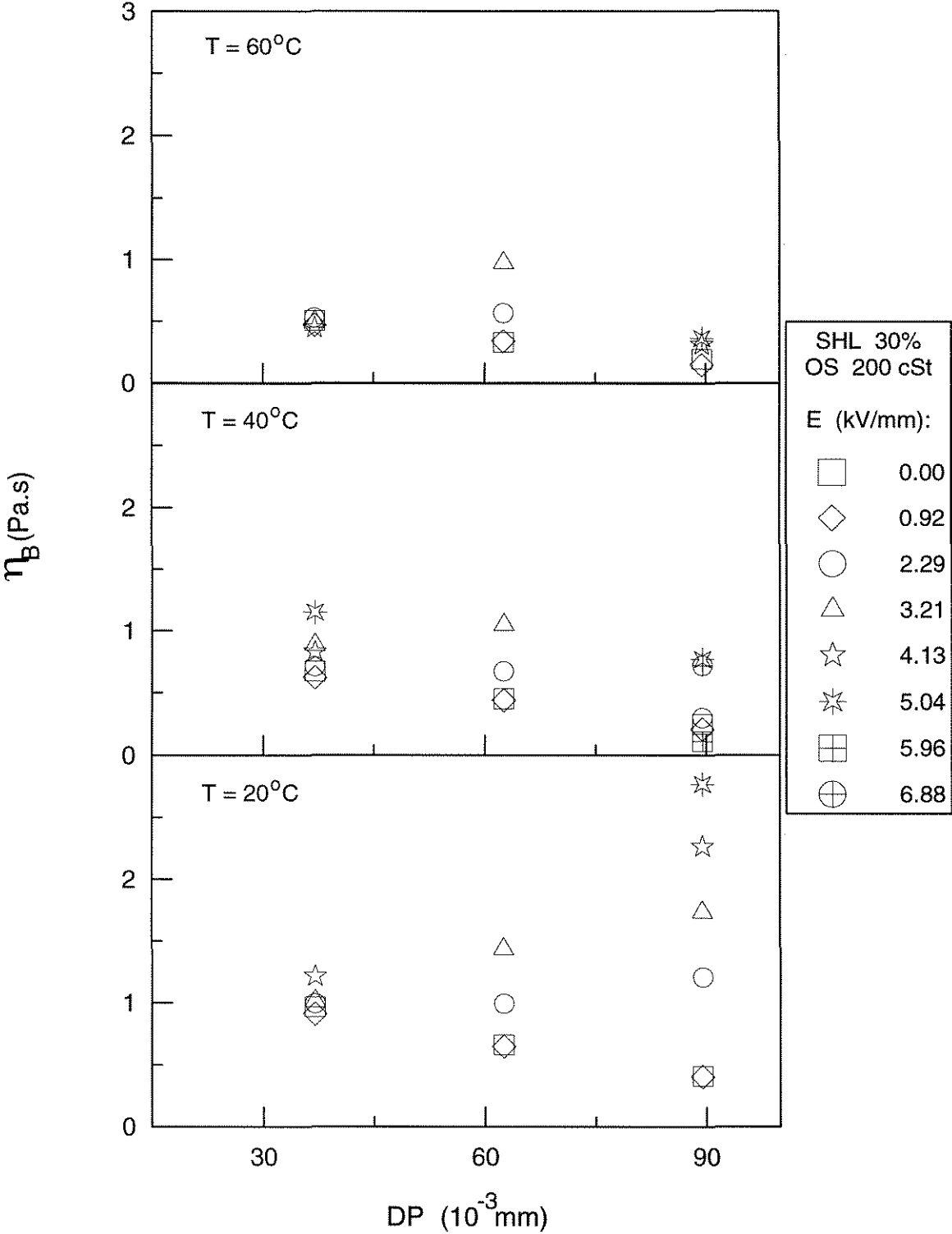


Figura E.11 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

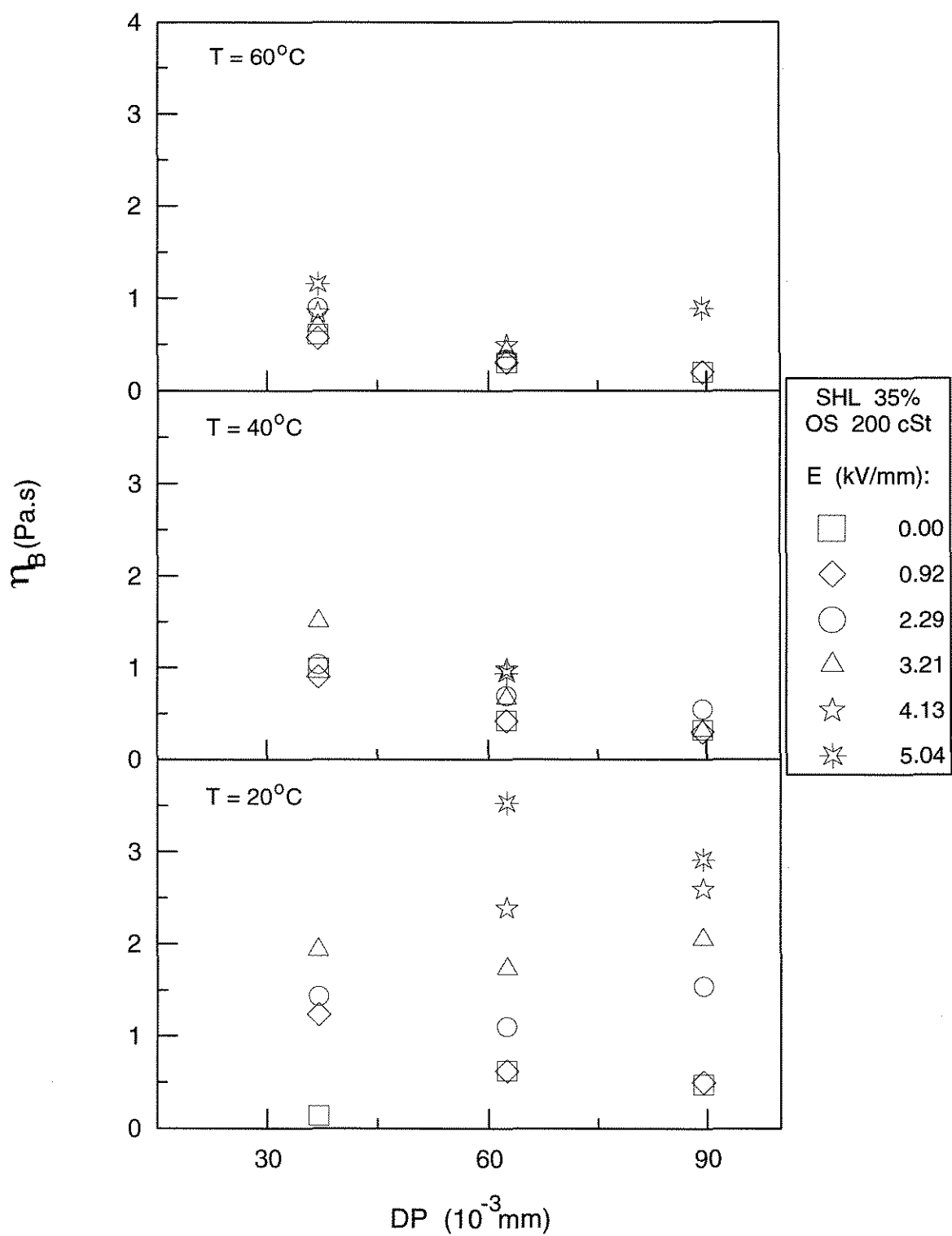


Figura E.12 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 200 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

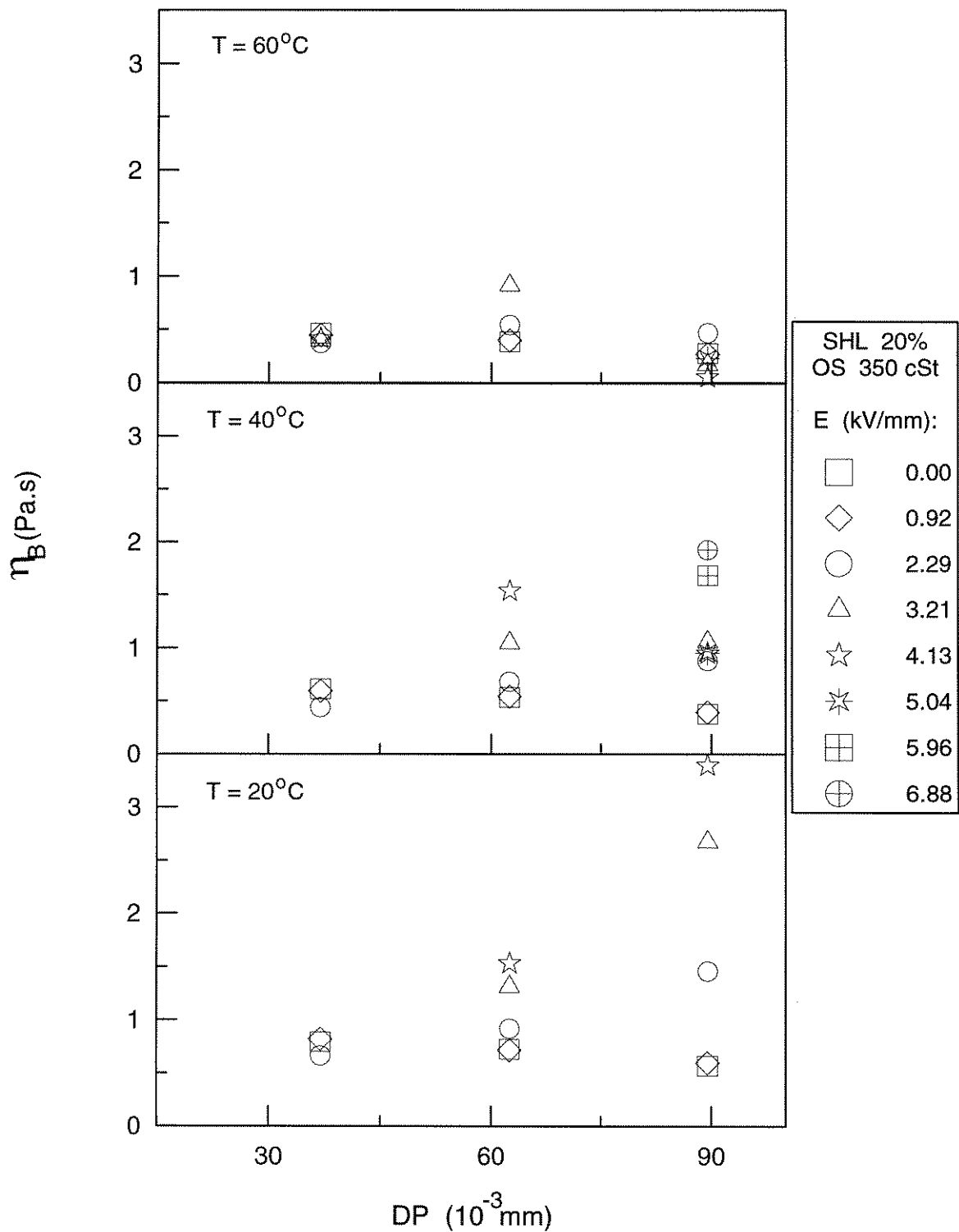


Figura E.13 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

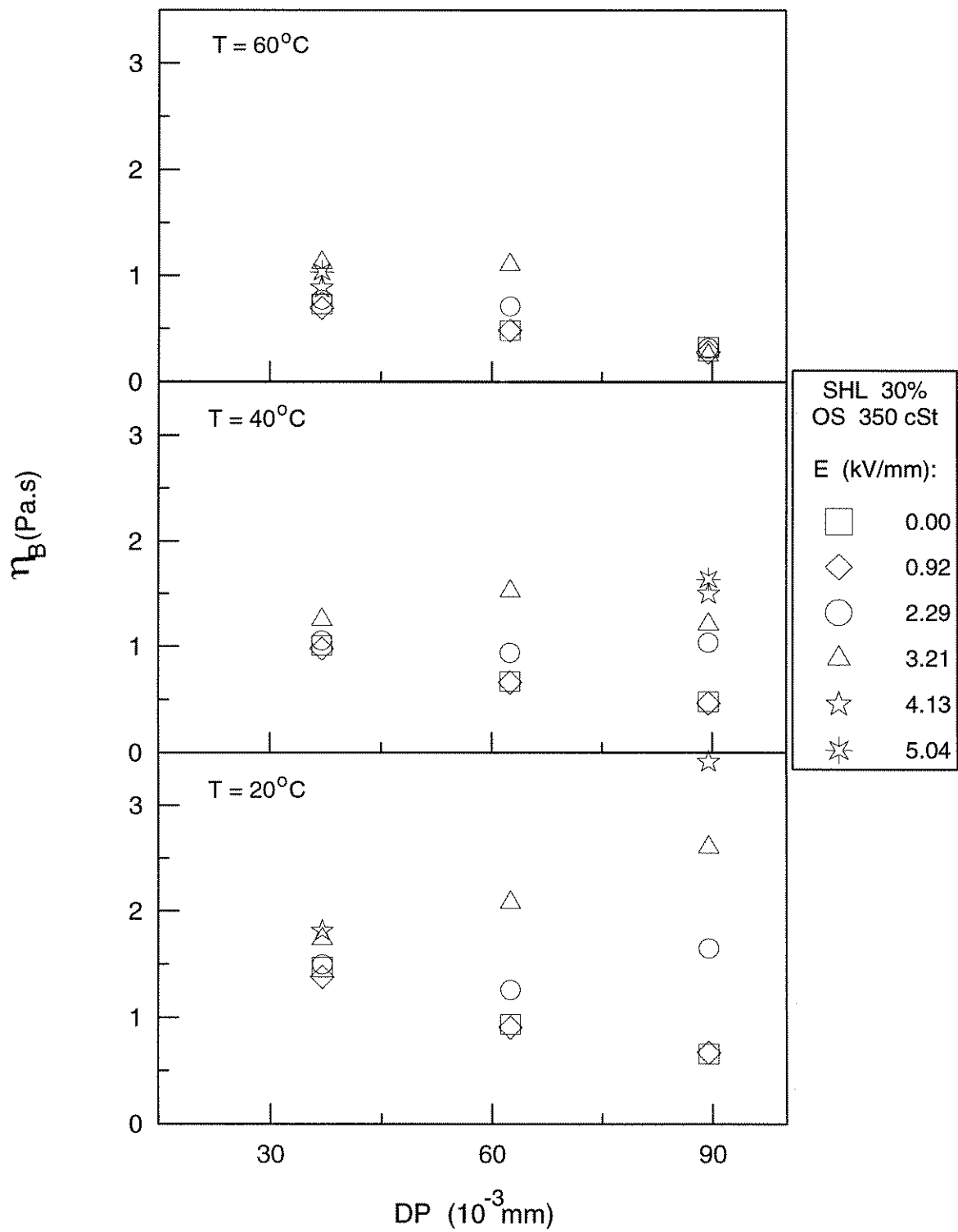


Figura E.14 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

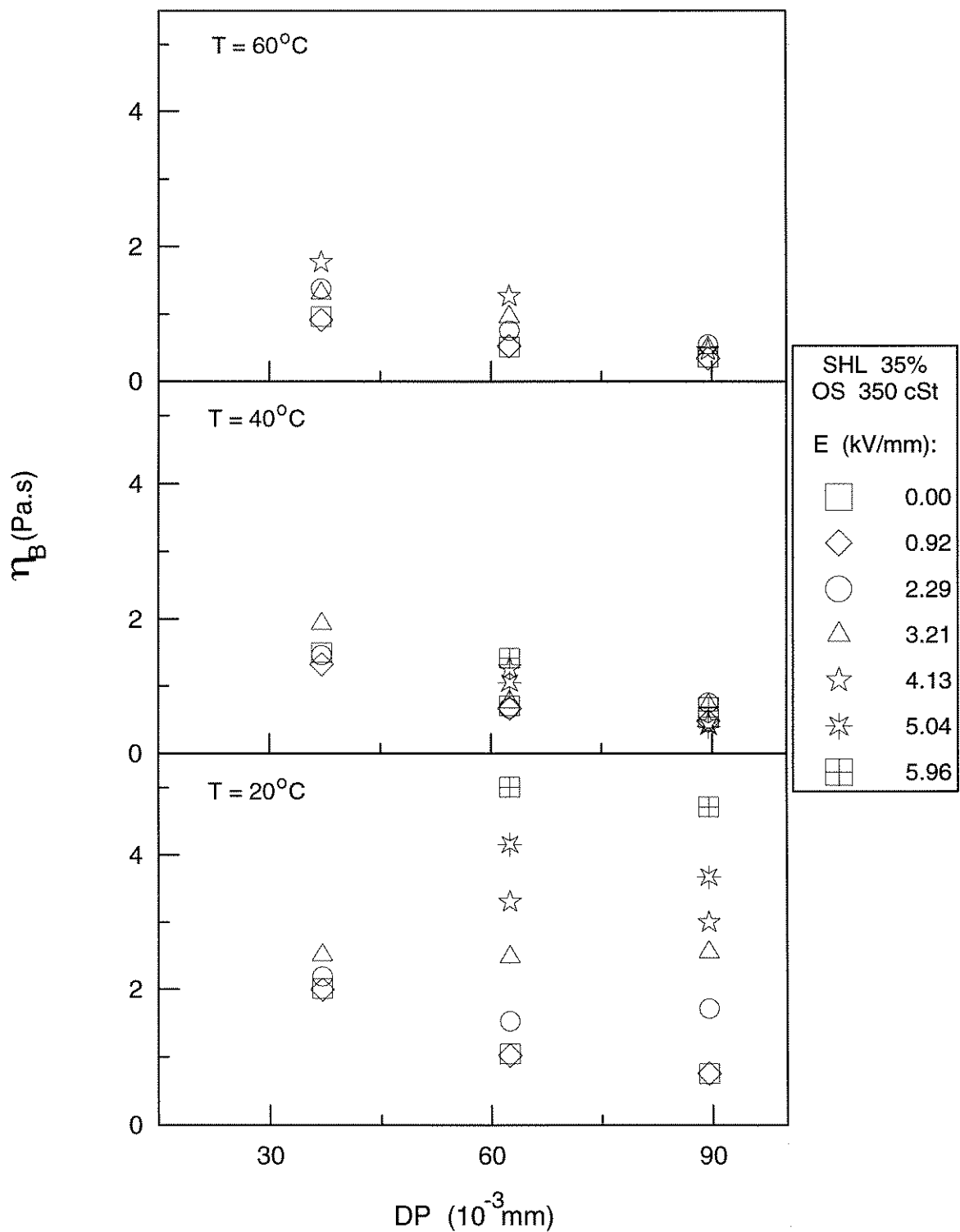


Figura E.15 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 350 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.

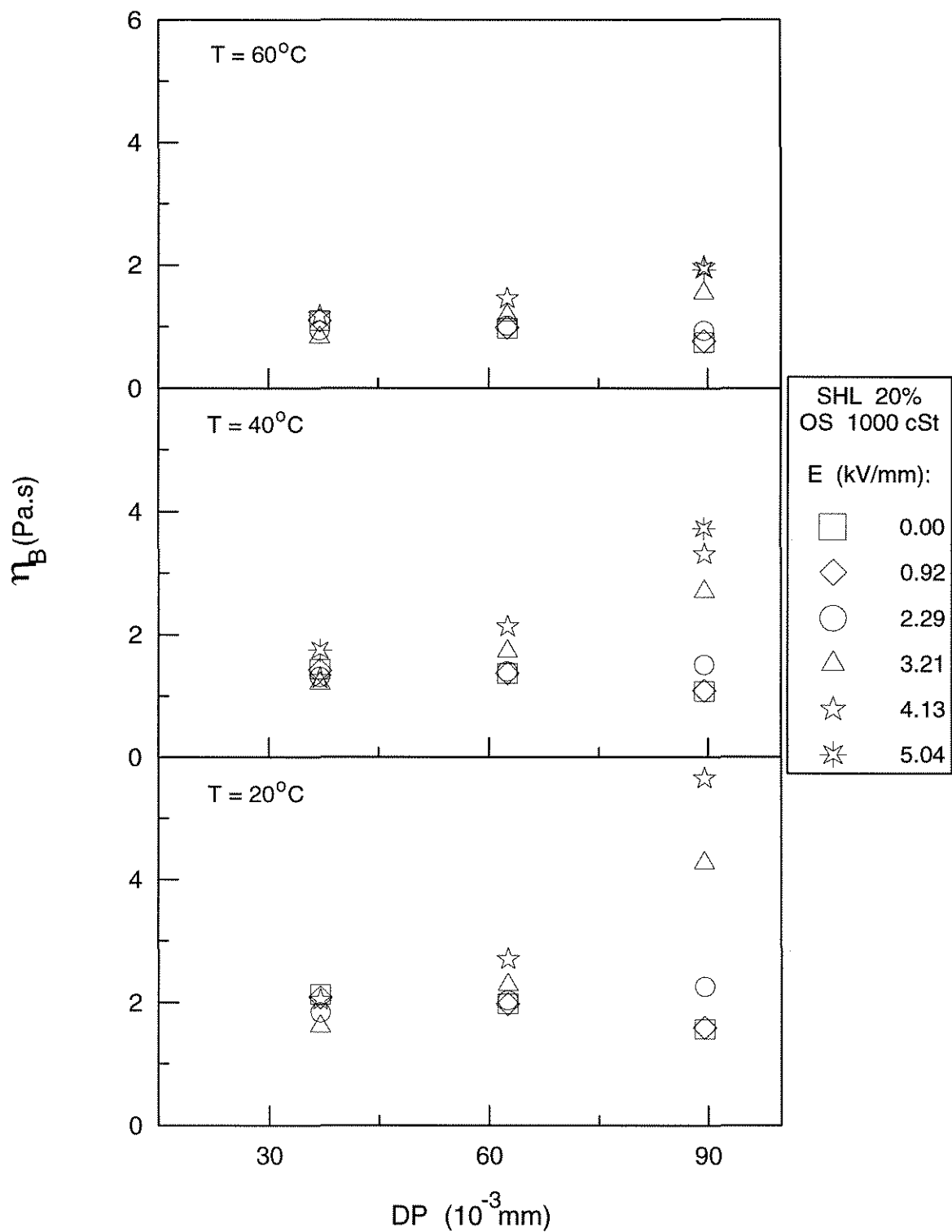


Figura E.16 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 20%.

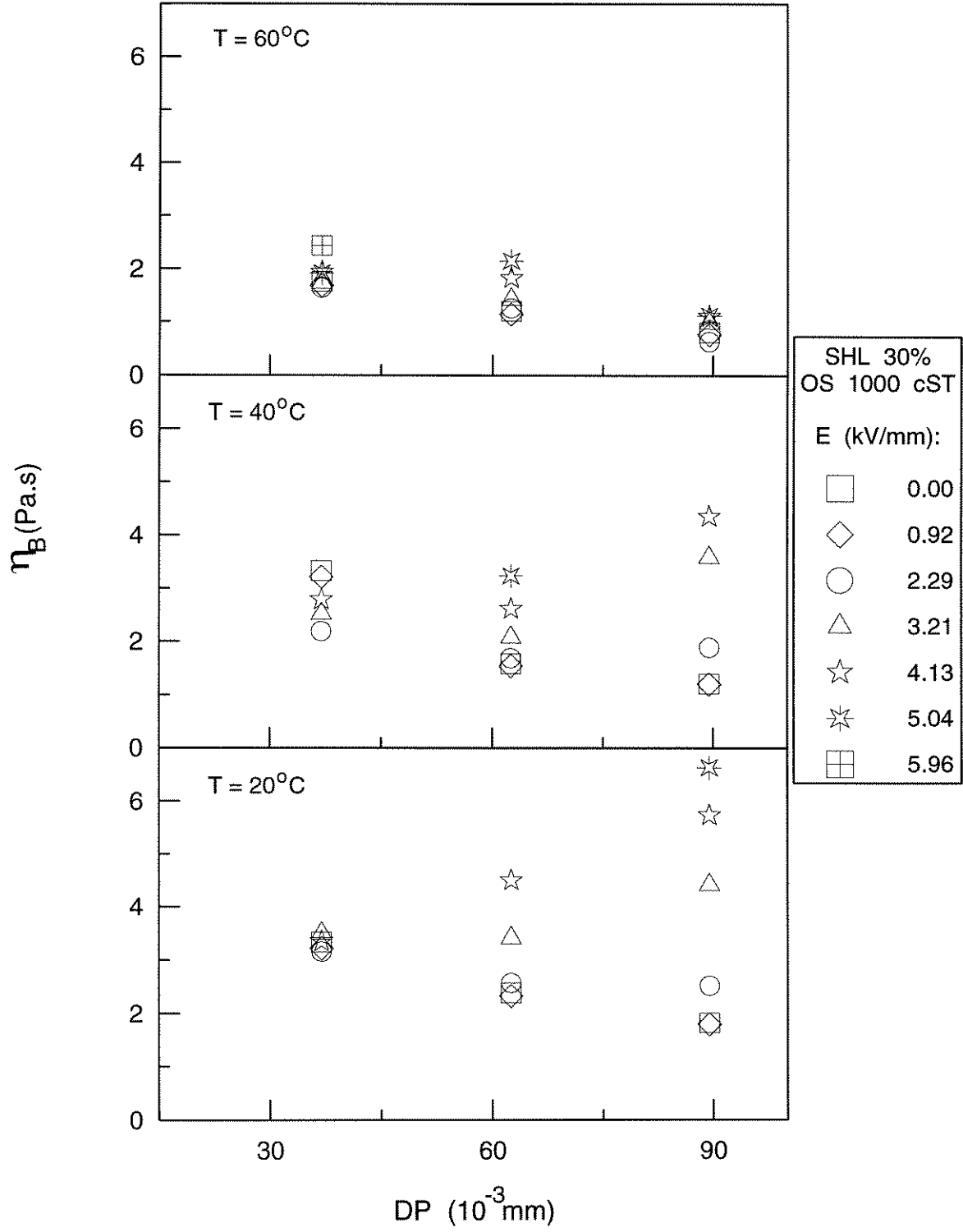


Figura E.17 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 30%.

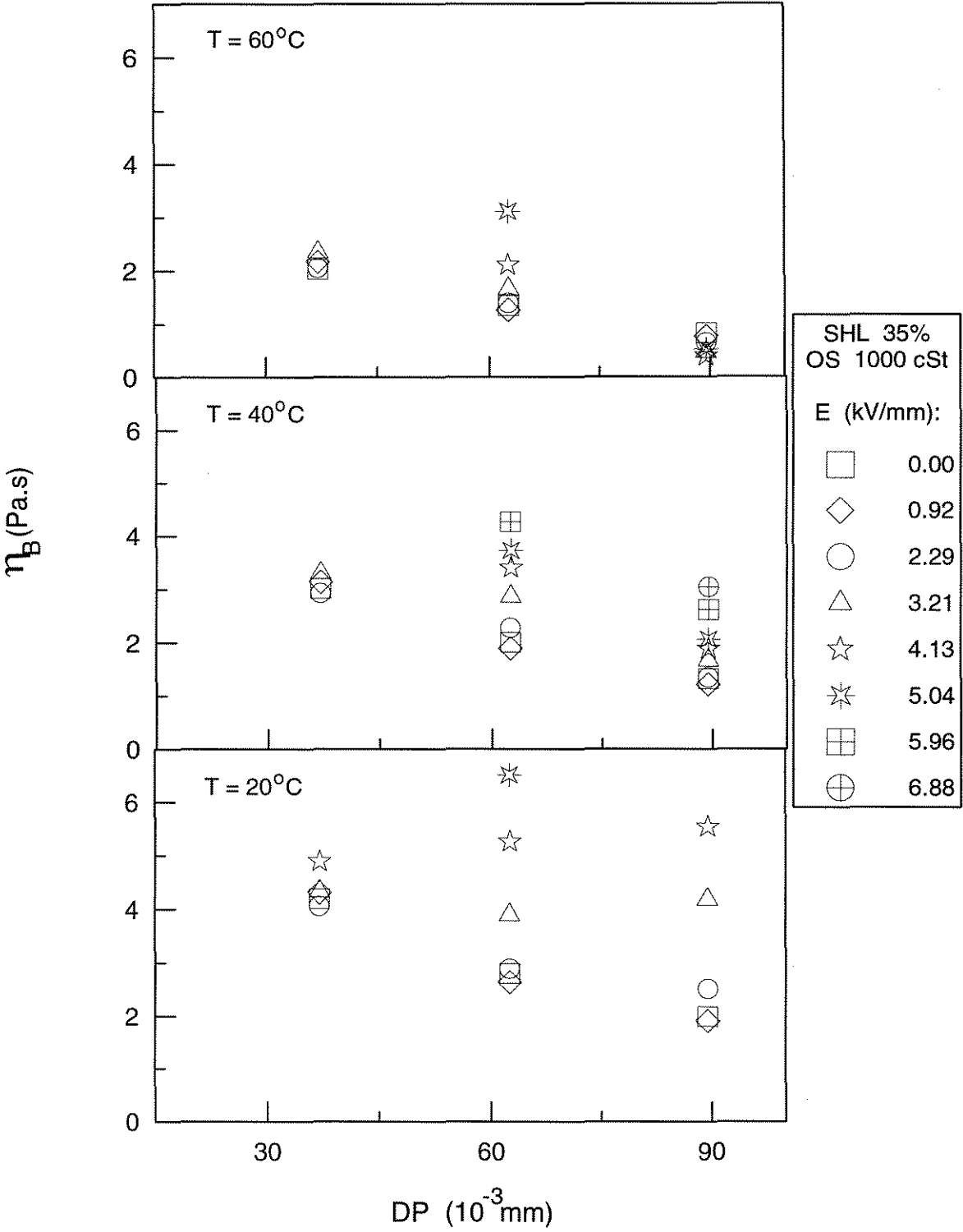


Figura E.18 : Viscosidade de Bingham em função do diâmetro das partículas para suspensões de sulfato de hidrazina - lítio em óleo de silicone (viscosidade 1000 cSt), tendo como parâmetro a intensidade de campo elétrico para diferentes temperaturas. Concentração em peso de sólidos de 35%.