

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
E DOS MATERIAIS - PPGEMM

ANÁLISE DE FORÇA E DE LUBRIFICANTES EM TREFILAÇÃO
DE ARAMES DE AÇO

por

JOSÉ LESINA CÉZAR
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM.

PORTO ALEGRE

1986

ANÁLISE DE FORÇA E DE LUBRIFICANTES
EM TREFILAÇÃO DE ARAMES DE AÇO

DISSERTAÇÃO

*Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para a obtenção
do Título de*

MESTRE EM ENGENHARIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: METALURGIA DE TRANSFORMAÇÃO

por

JOSÉ LESINA CÉZAR
Engenheiro Mecânico

1986

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Metalurgia da Transformação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

*Orientador: Lírio Schaeffer
Doutor em Engenharia
UFRGS - PPGEMM*

Banca Examinadora:

- 1. Paulo Roberto Cetlim
Doutor em Engenharia
Departamento de Metalurgia - UFMG*
- 2. Luiz Fernando A. Carvalho
Mestre em Engenharia
Siderúrgica Riograndense S.A.*
- 3. Rubens Kuhl
Mestre em Engenharia
Siderúrgica Riograndense S.A.*

*Ivan Guerra Machado
Doutor em Engenharia
Coordenador do PPGEMM*

RESUMO

Este trabalho propõe um método prático de se determinar a força de trefilação com a utilização de uma célula de carga. Também apresenta modelos teóricos de cálculo de força, baseados na Teoria Elementar da Plasticidade, para fins de comparação. Dentre estes modelos, discute-se com maior profundidade o Modelo dos Discos que permite uma análise sobre o comportamento do material no interior da fieira.

Paralelamente foram feitas comparações entre os lubrificantes comumente empregados em trefilação de arames em condições tipicamente industriais. Esta análise foi baseada nas bitolas utilizadas, reduções, ângulos de fieiras, estado do material, composição química e granulometria dos lubrificantes levando-se em consideração força medida, acabamento e rugosidade superficial do arame ao longo dos passes.

ABSTRACT

This work proposes an experimental method to determine drawing load by means of a load cell. Theoretical models based on the elementary theory of plasticity are presented and compared with the experimental technique. The disc model was discussed in depth as it allows an analysis of the behaviour of the material inside the die.

A comparative study of common wire drawing lubricants under typical industrial conditions was also carried out. The study involved the effect of wire gages, reductions, die angles, materials, chemical composition and granulometry of lubricants, measure load, wire roughness and surface finishing throughout all passes.

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Prof. Dr. Lirio Schaeffer pela orientação deste trabalho.
- Aos Colegas e Técnicos do Laboratório de Conformação Mecânica pelos auxílios prestados.
- Ao Laboratório de Corrosão em nome do Prof. Adão A. Mautone e Técnica Ivone A. Dadaut pela colaboração prestada.
- À Siderúrgica Riograndense pela doação do material para a pesquisa e em particular aos engenheiros Luiz F. A. Carvalho, Luiz A. B. Germano da Silva e Luiz Carlos Tettamanzy.
- À Álbarus S/A em nome dos engenheiros Sérgio Filinowicz, Ernani P. Nunes e Edelmar Liedke pela colaboração concedida.
- À CAPES pelos recursos financeiros concedidos.
- À Imbra S/A em nome de Ivo Werlang pela doação dos lubrificantes.
- À Sr^a Eliane Wolfart Schaeffer pela datilografia deste trabalho.
- A todos que de alguma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Resumo | IV |
| Abstract | V |
| Lista de Figuras | X |
| Lista de Tabelas | XIII |
| Significado dos Símbolos Utilizados | XV |
| 0. <i>INTRODUÇÃO</i> | 17 |
| 1. <i>ESTADO ATUAL DA TÉCNICA</i> | 18 |
| 2. <i>DESENVOLVIMENTOS RECENTES EM TREFILAÇÃO</i> | 20 |
| 3. <i>CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TREFILAÇÃO</i> | 25 |
| 3.1 <i>Lubrificantes</i> | 25 |
| 3.2 <i>Lubrificação</i> | 26 |
| 3.3 <i>Propriedades do lubrificante para trefilação a seco</i> | 28 |
| 3.4 <i>Características dos sabões; importância da preparação do fio-máquina, velocidade, temperatura e pressão na trefilação</i> | 29 |
| 3.4.1 <i>Características dos sabões</i> | 29 |
| 3.4.2 <i>Preparação do fio-máquina</i> | 30 |
| 3.4.3 <i>Pressão, temperatura e velocidade na trefilação</i> | 32 |
| 3.5 <i>Espessura da camada lubrificante</i> | 32 |
| 3.6 <i>Como detectar falhas de lubrificação</i> | 36 |
| 4. <i>MODELOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DE FORÇA</i> | 38 |
| 4.1 <i>Introdução</i> | 38 |
| 4.2 <i>Modelo proposto: modelo dos discos</i> | 38 |
| 4.3 <i>Outros modelos</i> | 44 |
| 4.3.1 <i>Modelo de Siebel</i> | 44 |
| 4.3.2 <i>Modelo de Lewis e MacLellan</i> | 45 |
| 4.3.3 <i>Modelo de Sachs</i> | 45 |
| 4.3.4 <i>Modelo de Geleji</i> | 45 |
| 4.3.5 <i>Modelo de Palmov</i> | 45 |
| 4.3.6 <i>Modelo de Davis e Dokos</i> | 46 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5. | CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PARÂMETROS IMPORTANTES DE TREFILAÇÃO..... | 47 |
| 5.1 | Coeficiente de atrito | 47 |
| 5.2 | Resistência ao escoamento | 49 |
| 5.3 | Ângulos das fieiras | 51 |
| 5.4 | Pressão média na parede da fieira | 52 |
| 6. | ANÁLISE EXPERIMENTAL | 53 |
| 6.1 | Obtenção da curva de escoamento | 53 |
| 6.1.1 | Método utilizado | 53 |
| 6.1.2 | Resultados obtidos | 54 |
| 6.2 | Medição de força | 56 |
| 6.2.1 | Descrição dos equipamentos | 56 |
| 6.2.2 | Procedimento experimental | 59 |
| 6.2.3 | Resultados obtidos | 60 |
| 7. | ANÁLISES GERAIS DO ARAME E DO LUBRIFICANTE :..... | 76 |
| 7.1 | Objetivos dos testes | 76 |
| 7.2 | Ensaio propostos | 76 |
| 7.2.1 | Ensaio de tração | 76 |
| 7.2.2 | Ensaio de dureza | 76 |
| 7.2.3 | Medições de rugosidade dos arames trefilados | 86 |
| 7.2.4 | Medições de granulometria dos sabões | 89 |
| 8. | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 91 |
| 8.1 | Análise dos modelos teóricos com a força medida | 91 |
| 8.2 | Considerações sobre o modelo dos discos | 93 |
| 8.3 | Análise de lubrificantes | 96 |
| 9. | CONCLUSÕES | 143 |
| 10. | SUGESTÕES DE CONTINUIDADE | 145 |
| 11. | BIBLIOGRAFIA | 146 |
| 12. | APÊNDICE A - PROJETO DO SENSOR PARA MEDIR FORÇA DE TREFILAÇÃO | 151 |

13. APÊNDICE B - PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO
DOS DISCOS..... 158

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Fig. 2.1 - Processo de trefilação a quente</i> | 21 |
| <i>Fig. 2.2 - Sistema de resfriamento direto</i> | 22 |
| <i>Fig. 2.3 - Esquema da unidade de resfriamento em trefilação</i> | 23 |
| <i>Fig. 3.1 - Fluxograma de preparação do fio-máquina</i> | 31 |
| <i>Fig. 3.2 - Influência da velocidade sobre a camada lubrificante</i> | 33 |
| <i>Fig. 3.3 - Fieira de pressão de construção soviética</i> | 34 |
| <i>Fig. 3.4 - Zona de deformação em uma fieira segmentada</i> | 35 |
| <i>Fig. 3.5 - Princípio para medir impedância elétrica Z entre o arame e fieira</i> | 37 |
| <i>Fig. 4.1 - Modelo dos discos</i> | 39 |
| <i>Fig. 4.2 - Condição de equilíbrio num disco infinitesimal</i> | 40 |
| <i>Fig. 5.1 - Esquema de trefilação de arames mostrando forças aplicadas em tiras infinitesimais nas porções cônicas e paralelas da fieira</i> | 48 |
| <i>Fig. 5.2 - Esquema de trefilação com a pressão média atuante.....</i> | 52 |
| <i>Fig. 6.1 - Construção de curvas de escoamento através de deformações sucessivas</i> | 54 |
| <i>Fig. 6.2 - Curvas de escoamento</i> | 57 |
| <i>Fig. 6.3 - Esquema da montagem da experiência</i> | 59 |
| <i>Fig. 6.4 - Valores de força medidos (1ª série)</i> | 62 |
| <i>Fig. 6.5 - Valores de força medidos (2ª série)</i> | 64 |
| <i>Fig. 6.6 - Valores de força medidos (3ª série)</i> | 67 |
| <i>Fig. 6.7 - Montagem do sistema de medição</i> | 68 |
| <i>Fig. 6.8 - Valores de força medidos (4ª série)</i> | 72 |
| <i>Fig. 6.9 - Registro de força do lubrificante Dri-Lube-1600 (1º passe)...</i> | 73 |
| <i>Fig. 6.10 - Registro de força do lubrificante Dri-Lube-1600 (2º passe)...</i> | 73 |
| <i>Fig. 6.11 - Registro de força do lubrificante Dri-Lube-1600 (3º passe)...</i> | 74 |
| <i>Fig. 6.12 - Registro de força do lubrificante Dri-Lube-1600 (4º passe)...</i> | 74 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 6.13 - Registro de força do lubrificante Dri-Lube -1600 (5º passe). | 75 |
| Fig. 6.15 - Registro de força do Lubrificante Dri-Lube -1600 (6º passe). | 75 |
| Fig. 7.1 - Teste de tração com os cinco corpos de prova considerando os lubrificantes ($d_o = 3,00$ mm) | 77 |
| Fig. 7.2 - Testes de tração com o arame 2,66 mm considerando os lubrifi- cantes | 78 |
| Fig. 7.3 - Comparação entre as tensões máximas nos 8 lubrificantes (2ª e 3ª série)..... | 79 |
| Fig. 7.4 - Corpos de prova embutidos em secções longitudinais | 80 |
| Fig. 7.5 - Arame com diâmetro 3,00 mm-micrografia - corte longitudinal. | 84 |
| Fig. 7.6 - Arame com diâmetro 2,65 mm-micrografia - corte longitudinal. | 84 |
| Fig. 7.7 - Arame com diâmetro 1,90 mm-micrografia - corte longitudinal. | 85 |
| Fig. 7.8. - Arame com diâmetro 1,57 mm-micrografia -corte longitudinal.. | 85 |
| Fig. 7.9 - Posições possíveis do arame em relação a fieira | 88 |
| Fig. 8.1 a- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CIM , 1ª s.) | 107 |
| Fig. 8.1 b- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CFE , 1ª S.) | 108 |
| Fig. 8.1 c- Modelos teóricos e força medida (Polimet, 1ª S.) | 109 |
| Fig. 8.1 d- Modelos teóricos e força medida (Imb.BS/SEX, 1ª S.) | 110 |
| Fig. 8.1 e- Modelos teóricos e força medida (Dri-Lube 1600, 1ª S.) | 111 |
| Fig. 8.1 f- Valores de força medidos (1ª série) | 112 |
| Fig. 8.2 a- Modelos teóricos e força medida (Imb.BS/CIM, 2ª S.) | 114 |
| Fig. 8.2 b- Modelos teóricos e força medida (Imb.BS/CFE, 2ª S.) | 115 |
| Fig. 8.2 c- Modelos teóricos e força medida (Polimet, 2ª S.) | 116 |
| Fig. 8.2 d. Modelos teóricos e força medida (Imb.BS/SEX, 2ª S.) | 117 |
| Fig. 8.2 e- Modelos teóricos e força medida (Dri-Lube 1600, 2ª S.) | 118 |
| Fig. 8.2 f- Modelos teóricos e força medida (Molykote G) | 119 |
| Fig. 8.2 g- Valores de força medidos (2ª série) | 120 |
| Fig. 8.3 a- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CFE/FOSFAT. MÉDIA, 3ª série) | 122 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 8.3 b- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CFE/FOSFAT.FINA, 3 ^a série) | 123 |
| Fig. 8.3 c- Modelos teóricos e força medida (Estearato de Cálcio, 3 ^a S.) | 124 |
| Fig. 8.3 d- Modelos teóricos e força medida (Poliétileno Glicol, 3 ^a S.).. | 125 |
| Fig. 8.3 e- Valores de força medidos (3 ^a S.) | 126 |
| Fig. 8.4 a- Modelos teóricos e força medidos (Imb. BS/CIM, 4 ^a S.) | 128 |
| Fig. 8.4 b- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CFE, 4 ^a S.) | 129 |
| Fig. 8.4 c- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/SEX, 4 ^a S.) | 130 |
| Fig. 8.4 d- Modelos teóricos e força medida(Dri-Lube 1600, 4 ^a S.) | 131 |
| Fig. 8.4 e- Modelos teóricos e força medida(Imb.BS/CFE/FOSFAT.MÉDIA, 4 ^a S.) | 132 |
| Fig. 8.4 f- Modelos teóricos e força medida (Imb. BS/CFE/BÓRAX, 4 ^a S.) ... | 133 |
| Fig. 8.4 g- Valores de força medidos (4 ^a S.) | 134 |
| Fig. 8.5 - Representação da variação da tensão na zona de deformação ... | 95 |
| Fig. 8.6 - Comparação entre tensões de trefilação (1 ^a S.) | 136 |
| Fig. 8.7 - Comparação entre tensões de trefilação (2 ^a S.) | 138 |
| Fig. 8.8 - Comparação entre tensões de trefilação (3 ^a S.) | 140 |
| Fig. 8.9 - Comparação entre tensões de trefilação (4 ^a S.)..... | 142 |
| Fig. A.1 - Placa sensora | 151 |
| Fig. A.2 - Distribuição de momentos radiais e tangenciais na placa cir- cular | 154 |
| Fig. A.3 - Desenho do conjunto sensor | 155 |
| Fig. A.4 - Curva de calibração do sensor T. 5000 | 157 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 5.1 | - Semi-ângulos das feiras com seus respectivos diâmetros | 51 |
| Tab. 6.1 | - Dados de $k_f \times \psi$ obtidos a partir do arame recozido com diâmetro 3,00 mm | 55 |
| Tab. 6.2 | - Dados de $k_f \times \psi$ obtidos a partir do arame encruado com diâmetro 3,00 mm | 56 |
| Tab. 6.3 | - Composição química dos aços ABNT 1010 e Ck 10 (DIN) | 58 |
| Tab. 6.4 | - Valores de força com as respectivas imprecisões (1 ^a série de testes) | 61 |
| Tab. 6.5 | - Valores de força com as respectivas imprecisões (2 ^a série de testes) | 63 |
| Tab. 6.6 | - Valores de força com as respectivas imprecisões (3 ^a série de testes) | 66 |
| Tab. 6.7 | - Valores de força com as respectivas imprecisões (4 ^a série de testes) | 71 |
| Tab. 7.1 | - Comparação entre as propriedades do material (2 ^a série de testes) | 82 |
| Tab. 7.2 | - Comparação entre as propriedades do material (3 ^a série de testes) | 83 |
| Tab. 7.3 | - Medições de rugosidade no sentido longitudinal | 87 |
| Tab. 7.4 | - Medições de granulometria com suas respectivas classificações.... | 90 |
| Tab. 8.1 | - Quadro comparativo entre força calculada e força medida em 6 passes (1 ^a série de testes)..... | 106 |
| Tab. 8.2 | - Quadro comparativo entre a força calculada e força medida em 4 passes (2 ^a série de testes) | 113 |
| Tab. 8.3 | - Quadro comparativo entre a força calculada e a força medida em 4 passes (3 ^a série de testes) | 121 |
| Tab. 8.4 | - Quadro comparativo entre força calculada e força medida em 4 passes (4 ^a série de testes) | 127 |
| Tab. 8.5 | - Valores de coeficiente de atrito com e sem filme de lubrificante. | 94 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab. 8.6 | - Parâmetros envolvidos na trefilação (2 ^a série de testes) | 100 |
| Tab. 8.7 | - Cálculos de força obtidos pelo modelo dos discos em 6 passes (1 ^a série) | 101 |
| Tab. 8.8 | - Cálculos de força obtidos pelo modelo dos discos em 4 passes (2 ^a , 3 ^a e 4 ^a série) | 104 |
| Tab. 8.9 | - Quadro comparativo entre as tensões de trefilação para os diversos lubrificantes em 6 passes (1 ^a série de testes) | 135 |
| Tab. 8.10 | - Quadro comparativo entre as tensões de trefilação para os diversos lubrificantes em 5 passes (2 ^a série de testes) | 137 |
| Tab. 8.11 | - Quadro comparativo entre as tensões de trefilação para os diversos lubrificantes em 4 passes (3 ^a série de testes) | 139 |
| Tab. 8.12 | - Quadro comparativo entre as tensões de trefilação para os diversos lubrificantes em 4 passes (4 ^a série de testes) | 141 |

SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS

- A_0 = área inicial do arame (mm^2)
 A_1 = área final do arame (mm^2)
 A_n = área final do arame no disco n (mm^2)
 d_0 = diâmetro inicial do arame (mm)
 d_1 = diâmetro final do arame (mm)
 d_s = distância inclinada do comprimento infinitesimal d_x na fieira
 F = força de trefilação (N)
 F_r = força de separação da fieira (N)
 k_f = tensão de escoamento do material (N/mm^2)
 k_{f_0} = tensão de escoamento inicial do material (N/mm^2)
 k_{f_1} = tensão de escoamento final do material (N/mm^2)
 k_{f_m} = tensão de escoamento média ($= \frac{k_{f_0} + k_{f_1}}{2}$) (N/mm^2)
 k = tensão de escoamento média logarítmica

$$K = \frac{k_{f_1} - k_{f_0}}{\ln \frac{A_0}{A_1}} \quad (\text{N}/\text{mm}^2)$$

 l_1 = comprimento do paralelo da fieira (mm)
 P = pressão atuante na parede da fieira (N/mm^2)
 q_m = pressão média atuante na parede da fieira (N/mm^2)
 ϵ = deformação relativa em área ($= \frac{\Delta A}{A_0}$) (-)
 ψ = deformação logarítmica (-)
 ψ_0 = deformação logarítmica inicial (-)
 ψ_1 = deformação logarítmica final (-)
 $\Sigma \psi$ = somatório das deformações logarítmicas (-)
 $\dot{\psi}$ = velocidade de deformação (s^{-1})
 μ = coeficiente de atrito de coulomb (-)

ρ = ângulo de atrito (rad)

σ_{x_i} = tensão de trefilação no disco i (N/mm^2)

σ_n = tensão de trefilação no disco n (N/mm^2)

α = semi-ângulo da fieira (rad)

ϕ = parcela referente ao trabalho redundante (-)

W = trabalho específico ($N \cdot mm/mm^3$)

INTRODUÇÃO

Para o dimensionamento correto de uma máquina de trefilar é necessário conhecer a força e o trabalho dispendido. Sem o conhecimento destas grandezas, é difícil prever o comportamento de um determinado processo de conformação, isto é, se a máquina está operando nas suas melhores condições. com o uso de modelos teóricos de cálculo de força, compatíveis com dados medidos, pode-se estimar a potência utilizada em cada passe de trefilação, visando a otimização do processo.

Existem vários modelos teóricos que fornecem valores aproximados da força de trefilação. Entre estes, podemos citar: Siebel, Sachs, Gelegi, Mac Lellan, Teoria dos Discos, entre outros. Todos modelos apresentam valores diferentes para o cálculo da força de trefilação, apesar de estarem baseados, em geral, nas mesmas variáveis, que são: ângulo da fieira, o coeficiente de atrito entre o material trefilado e a parede da fieira, áreas, reduções de áreas e tensão de escoamento (que normalmente é um valor médio entre a tensão de escoamento na entrada e na saída da fieira).

Este trabalho preocupa-se em descrever o Modelo dos Discos e comparar os valores obtidos com resultados de forças medidas utilizando-se uma célula de carga. Também são usados outros modelos teóricos cujos resultados são comparados com os valores medidos experimentalmente.

Paralelamente ao estudo da força testaram-se vários lubrificantes, em condições tipicamente industriais, e fizeram-se algumas considerações sobre eles. A comparação entre os lubrificantes está baseada nas condições em que foram realizados os testes, entre as quais: preparação do fio-máquina, preparação a que o arame com bitola 3,00 mm foi submetido, bitolas, reduções, ângulos de fieiras, estado do material, composição química e granulometria dos lubrificantes. Para esta análise levou-se em consideração a força medida, acabamento e rugosidade superficial do arame ao longo dos passes.

O material de teste utilizado é um aço baixo carbono (ABNT 1010) e o equipamento para trefilar é uma máquina marca HERBORN com capacidade 10 HP.

1 - ESTADO ATUAL DA TÉCNICA

Toda a vez que se deseja conhecer a real energia que é dispendida no processo ou mesmo o comportamento dos lubrificantes é necessário realizar testes experimentais medindo-se a força de trefilação e/ou atrito. Registros de força versus tempo (ou deslocamento) podem revelar, inclusive, uma tendência à degradação do lubrificante indicando variações indesejáveis na força de trefilação /1.1/. Um aumento súbito na força de trefilação pode ser indicativo de falhas na lubrificação ou mesmo de retirada de metais provocada pelo atrito arame-fieira (pick up) ocasionando o desgaste de ferramentas.

Johnson e Rowe /1.2/ mediram a força de trefilação com uma célula de carga e através da teoria de Sachs elaboraram curvas tensões de trefilação em função dos semi-ângulos das fieiras analisando lubrificantes sólidos e líquidos. As matérias-primas utilizadas foram cobre, bronze e aço com 0,12 % de carbono nos estados encruado e recozido. Para o aço encruado obtiveram valores para coeficiente de atrito na faixa de 0,025 a 0,090, sendo que o menor valor foi para o estearato de cálcio. Estes resultados confirmam a previsão de que o estado da lubrificação na trefilação é frequentemente de natureza quase hidrodinâmica. Técnica semelhante à descrita anteriormente foi utilizada por Gerbase /1.3/ em sua dissertação de mestrado; o mesmo mediu a força real de trefilação e utilizou as teorias de Siebel, Sachs e Geleji para avaliar o coeficiente de atrito. Estes valores variaram de 0,05 a 0,15 para lubrificantes sólidos em superfícies retificadas e torneadas.

Rigoni /1.4/ comparou porta-lubrificantes e lubrificantes através da medida de força de trefilação e com este parâmetro determinou a potência dispendida em cada passe visando encontrar a melhor lubrificação.

Esta foi conseguida com o par cal-sabão. Entre as conclusões importantes deste trabalho pode-se destacar:

-- A força de trefilação independe da velocidade na faixa de 10^{-3} m/s a 2,4 m/s.

- Para o arame utilizado, ABNT1015, o sabão tem melhores condições de lubrificação do que o óleo e a graxa.

Boor /1.5/ também comparou lubrificantes utilizando sensores para medir a força de trefilação. Com este valor levantou curvas relacionando coeficiente de atrito (μ) em função da pressão média na parede da fieira (q_m) sendo que μ foi calculado pela expressão de Siebel para cálculo de força e q_m pela expressão de Pomp e Gesche.

Symmons, Stevens e Thompsom /1.6/ estudaram a lubrificação hidrodinâmica e revestimento do arame usando uma solução viscosa de polímeros. Analisaram parâmetros tais como tensão de cisalhamento desta solução, influência da velocidade e viscosidade deste tipo de lubrificação baseado na força de trefilação medida com o auxílio de sensores a base de extensômetros de resistência elétrica.

Lancaster /1.7/ estudou os fatores que limitam a velocidade de trefilação de arames registrando-a paralelamente com a força e concluiu que nenhuma restrição ocorre na trefilação, sob o ponto de vista de lubrificação e deformação do metal, em velocidades abaixo de 30 m/s. Nestas velocidades, até 30 m/s, ocorre um acréscimo na força de trefilação provavelmente devido a baixos níveis de atrito. O autor ainda afirma que trefilações industriais a esta velocidade, de 30 m/s, somente são possíveis se o equipamento consegue dissipar o calor gerado no arame e fieira.

A força de trefilação também é usada para determinação direta do coeficiente de atrito pelo método da fieira bi-partida como fizeram Yang /1.8/. Klein /1.9/ e Casanova /1.10/ utilizando duas células de carga.

2 - DESENVOLVIMENTOS RECENTES EM TREFILAÇÃO

Na busca de uma diminuição de força de trefilação ou na diminuição das condições de atrito proporcionando maiores graus de reduções, menor consumo de energia, maiores velocidades, maior produção, melhoria das propriedades mecânicas etc., são encontrados diversos trabalhos na literatura que não deixam de ser importantes pelo fato de possibilitarem alterações bruscas na forma convencional de trefilação.

Abaixo são descritos resumidamente alguns dos processos.

- Trefilação a quente

Este processo está sendo pesquisado e desenvolvido e é, em geral, usado para aços ligados que tem características de alta resistência e pequena capacidade de conformação à temperatura ambiente. Estes aços, caso fossem trefilados a frio, tornariam o processo anti-econômico devido ao elevado número de passes e recozimentos intermediários que seriam necessários. Um aumento na temperatura em que se realiza a conformação proporciona um aumento do limite de deformação plástica do material, ocorrendo ainda uma diminuição na tensão de escoamento e com isso a redução da força de trefilação /2.1/. (Fig.2.1)

- Resfriamento direto do arame em trefilação

Com a utilização de um sistema de resfriamento direto do arame /2.2/ é possível não só aumentar a velocidade de trefilação das máquinas atuais utilizando-se toda a potência mas também projetar novas máquinas para arames de aço com alto teor de carbono, alcançando velocidades 30% mais al-

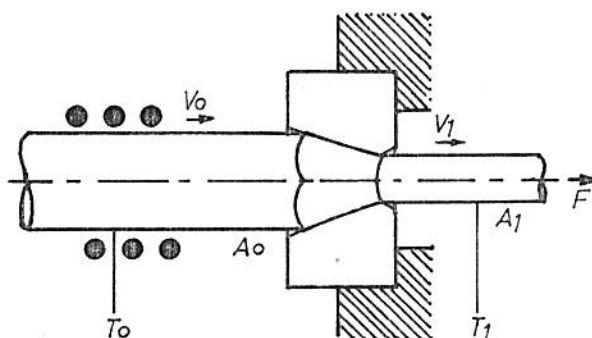


Fig. 2.1 - Processo de trefilação a quente

tas do que as existentes e sem aumento excessivo na temperatura do arame .

O sistema é adaptado na parede do monobloco da trefiladora (Fig.2.2) e expõe mais de 20 metros de arame ao contato direto com a água de resfriamento, o qual é mais que qualquer sistema presentemente em uso. As vantagens de uma máquina de trefilação ajustada com sistema de resfriamento direto do arame pode ser resumida como segue:

- Mais altas velocidades de trefilação.
- Reduz o número de passes com diâmetros menores dos monoblocos resultando numa máquina mais barata e menor.
- Arame com melhor qualidade.

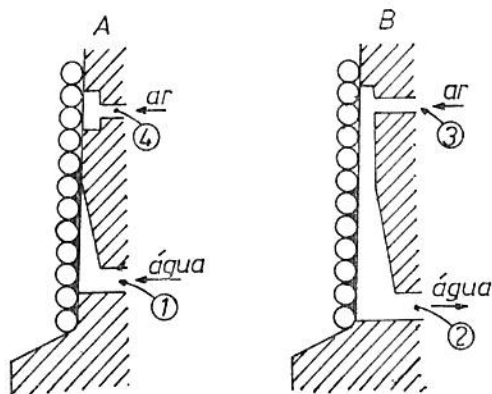


Fig. 2.2 - Sistema de Resfriamento Direto

Outra maneira de resfriamento direto de arame é com a utilização de um tubo de resfriamento (Fig.2.3) com comprimento adequado que possibilite uma efetiva transferência de calor. Esse sistema também é aplicado imediatamente após a trefilação e nos últimos passes de máquinas de trefilações múltiplas onde se tem elevadas temperaturas nos arames. O resfriamento com água provoca uma queda brusca de temperatura evitando mudanças nas propriedades mecânicas. Conforme Pawelski e Keuper /2.3/ um aumento na temperatura acerca de 300°C e um tempo de ação de menos de um segundo usualmente causa mudanças na ductilidade e resistência.

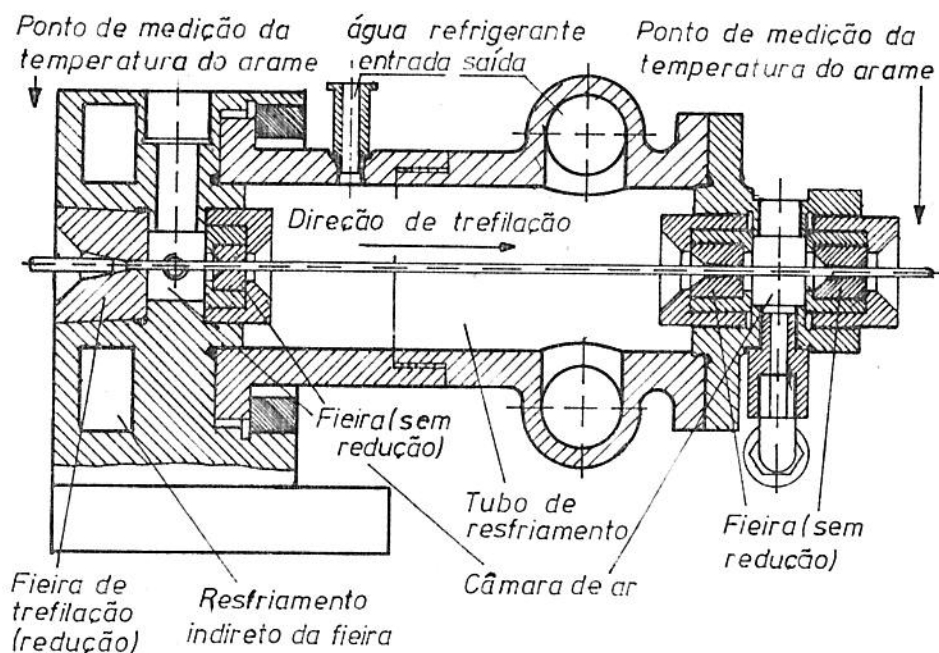


Fig. 2.3 - Esquema da Unidade de Resfriamento em Trefilação

- Novos Materiais para Fabricação de Fieiras

Modernamente tem sido desenvolvido fieiras de diamante sintético que podem substituir as fieiras convencionais feitas de carbeto de tungstênio ou de diamante /2:4/. As principais vantagens destas fieiras em relação as convencionais são:

- Custo inicial muito menor em relação as fieiras de diamante.

- A vida da fieira de acabamento é de 2 a 3 vezes maior que a da fieira fabricada de diamante natural.
 - Maior resistência a lascamentos ou fragmentações.
 - Mantêm sua forma redonda e não se ovalizam.
- Estudos Sobre o Perfil Interno da Fieira

Sabe-se que o perfil interno da fieira tem efeito marcante na quantidade de lubrificante que é conduzido para dentro da fieira.

As fieiras possuem, na maioria das vezes, uma forma ordinariamente convexa que difere dos perfis ideais das fieiras, formados a partir de um cone circular. Cálculos baseados na teoria elementar da plasticidade comprovam que ao se evitar perfis convexos consegue-se decréscimos na força de trefilação e portanto da energia da ordem de 10%. /2.5/

Outros autores /1.7/, entretanto, sugerem um perfil senoidal para se obter um produto mais resistente e com deformação mais uniforme associado também a uma menor força para deformar o material.

3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE LUBRIFICAÇÃO

3.1 - Lubrificantes

Os lubrificantes utilizados em trefilação podem, em geral, ser divididos em dois grandes grupos:

- Lubrificantes sólidos
- Lubrificantes líquidos, no caso de soluções ou emulsões sintéticas (óleos solúveis).

Os lubrificantes sólidos são a base de sabões, talco, mica, cal, grafite, dissulfetos de molibdênio e tungstênio, etc. Os sabões são os mais importantes e de uso mais comum. Basicamente a composição dos sabões são os estearatos de cálcio e sódio que podem ainda ser misturados com aditivos comuns tais como graxas, ácidos esteáricos, cal, etc e aditivos de extrema pressão/3.1/. Considerando a composição química, os sabões que tem demonstrado melhor desempenho em trefilação são os estearatos. Estes sabões são relativamente duros e de elevado ponto de fusão, principalmente quando são de metais alcalinos terrosos. Destes, o mais difundido é o estearato de cálcio./3.2/

O uso de lubrificantes secos geralmente é restrito a arames de aço com diâmetros maiores que 0,5mm. Arames com diâmetros menores que esses são normalmente trefilados com soluções úmidas ou solúveis (algumas sintéticas) de sabões em água /3.3/.

Os lubrificantes líquidos, por sua vez, são de natureza animal, vegetal ou mineral. Além de lubrificar, eles tem a função de remover o calor que é gerado a altas velocidades de trefilação. Seu uso se estende desde a trefilação de barras até a trefilação de fios finos. Para o caso de trefilação de arames de aço, suas composições químicas podem ser enriquecidas pela adição de sódio, alumínio e potássio em pequenas quantidades/1.4/.

A partir de 1964, começou-se a desenvolver a utilização de lu

brificantes a base de soluções sintéticas; como exemplo cita-se o teflon que causa um coeficiente de atrito mais baixo em relação a outras substâncias utilizadas. O teflon pode ser usado em temperaturas na faixa de - 240 a 260°C /3.3/. Este lubrificante, entretanto, não é aplicado comumente em trefilação.

As vantagens dos fluídos a base de sintéticos sobre os sabões gordurosos segundo diversos pesquisadores /1.6/ /3.4 /, /3.13/ são:

- Sistema de limpeza
- Fácil manuseio
- Longa vida útil da solução.
- Boa lubrificação.
- Operam sobre uma faixa controlada pelo pH.

Segundo experimentos realizados para uma trefilação de cobre /3.4/, os sintéticos são mais econômicos do que os sabões gordurosos.

3.2 Lubrificação

Os principais objetivos da lubrificação na trefilação de arame são os seguintes:

- Prevenir o desgaste das fieiras
- Obter um baixo coeficiente de atrito
- Obter uma máxima deformação possível do arame visando uma maior produtividade.

Existem três formas de lubrificação classificadas de acordo com a espessura da camada lubrificante.

A melhor lubrificação é a hidrodinâmica que consiste na formação de uma camada suficiente de lubrificante a tal ponto que se tenha uma completa separação de superfícies, resultando o mínimo de atrito. Nesse tipo de lubrificação tem-se um menor consumo de fieiras e a possibilidade de

elevadas velocidades de trefilação.

Uma outra forma de lubrificação é a "mista", na qual a espessura da camada do filme lubrificante não é suficiente para produzir a completa separação das superfícies. Ocorre desta maneira contato em alguns pontos. Nesse tipo de lubrificação, à medida que a viscosidade do lubrificante aumenta, uma maior quantidade de lubrificante entra para a zona de deformação, como consequência o coeficiente de atrito e a força de trefilação decrescem. Este tipo de lubrificação é bastante sensível à temperatura, às pressões e à velocidade /3.5/.

Uma terceira situação corresponde ao contato das superfícies ao longo de toda sua extensão, sem qualquer camada de lubrificante entre elas. Neste caso tem-se a lubrificação denominada "limite", onde haverá um máximo de atrito, produzindo temperaturas elevadas a ponto de impedir a trefilação /5.5/.

Pode-se também evitar o contato entre a fiação e o material a ser trefilado através de lubrificação hidrostática onde se tem óleo que é submetido a pressão por meio de compressores ou bombas de alta pressão. Experiências /3.6/ comprovam que a lubrificação com óleo sob pressão pode ser mais eficiente que o melhor lubrificante considerando as mesmas condições de lubrificação.

A lubrificação que normalmente ocorre nos processos de trefilação é a mista. /3.5/.

Neste trabalho, as experiências foram desenvolvidas com arame de aço baixo carbono e utilizaram-se sete lubrificantes sólidos (sabões) e um lubrificante pastoso a base de dissulfeto de molibdênio, por serem esses os que normalmente são indicados pelos fornecedores de lubrificantes para trefilação e utilizados nas indústrias que trabalham com este tipo de material. Devido a este fato, neste estudo dá-se ênfase apenas a este tipo de lubrificação.

3.3 Propriedades dos Lubrificantes para Trefilação a seco

Por trefilação a seco entende-se a realizada através de via seca com a utilização de sabões cuja função é, entre outras, provocar no material a formação de uma camada residual de lubrificante.

O mecanismo da formação desta camada, necessária a uma boa lubrificação, depende além de aspectos físicos, de fatores físico-químicos.

A capacidade de aderência de um sabão por uma superfície metálica depende, em grande parte, das características químicas do mesmo e das do porta-lubrificante. Sob este aspecto dois fatores devem ser considerados: a reatividade do sabão com a superfície e a sua polaridade /3.5/. A polaridade de um lubrificante é uma espécie de magnetismo inerente em certas configurações moleculares. A aplicação de um lubrificante polar, ou superficialmente ativo, para a deformação de um arame, resulta numa redução mais uniforme de metal em toda a sua seção transversal e o escoamento plástico na camada superficial é mais rápido do que com lubrificantes não polares.

Existem aditivos que possuem alto poder reativo e que são usados para aumentar a reatividade de um sabão. Estes aditivos são conhecidos por extrema pressão (EP) e reagem com a superfície do metal formando um filme resistente que reduz o atrito. Os principais aditivos são: fósforo, enxofre, cloro, grafite, dissulfeto de molibdênio e compostos de alguns elementos cujo filme resultante da reação contém cloretos, sulfetos e fosfatos metálicos /3.3/.

Os sabões lubrificantes podem ser classificados como ricos (ou gordos) ou pobres (magros). Chamam-se sabões ricos aqueles que são mais moles e tem menor ponto de fusão. A riqueza de um sabão cresce principalmente com o seu teor em sais graxos. Quanto mais alto o teor de cal e outros aditivos de alto ponto de fusão mais pobre é o sabão. De um modo geral, se

outros fatores são mantidos constantes, os lubrificantes ricos produzem camadas finas flexíveis, enquanto que os lubrificantes pobres produzem camadas grossas e mais quebradiças. /3.5/

Estudos recentes /3.7/, visando a otimização da técnica de trefilação hidrodinâmica através de fieiras duplas, tem sido desenvolvidas para se determinar as propriedades reológicas dos lubrificantes, entre as quais podemos citar a resistência e a viscosidade dos vários tipos de sabões, assim como sua dependência com a temperatura e gradiente de velocidade de cisalhamento. Utilizando-se dois tipos de reômetros, um equipamento de extrusão reversa em um extrusômetro determinaram-se as curvas de escoamento para o estearato de cálcio, sódio e uma mistura de sódio e cálcio. De acordo com estas experiências, concluiu-se que a viscosidade do estearato de cálcio (3000 Pa.S) é muito mais elevada que a do estearato de sódio (200Pa.S).

Para se obter uma lubrificação adequada devem-se considerar os seguintes parâmetros: propriedades físicas e químicas do material, preparação da superfície do mesmo, redução de seção, porta-lubrificante, número de passes, velocidade de trefilação, geometria da fieira e sua refrigeração, condições de superfície e tipos de acabamento desejado e outros; por exemplo, para suportar elevadas temperaturas e pressões escolhe-se lubrificantes que possuam elevada viscosidade e ponto de fusão.

3.4 - Características dos Sabões; Importância da Preparação do Fio-máquina, Velocidade, Temperatura e Pressão na Trefilação.

3.4.1 - Características dos Sabões

Com relação às características dos sabões, deve-se acrescentar que a granulometria é analisada em função das bitolas dos arames.

Em geral utilizaram-se sabões com maior tamanho de grão para fio-máquina ou bê tolas maiores e sabões com grão menores para arames mais finos.

A lubrificação na trefilação é tanto melhor quanto maior a quaridade de lubrificante que passa pela fieira, e como consequência maior o filme residual no arame, obtendo-se menor desgaste nas fieiras; entretanto quando se deseja uma superfície limpa e brilhante no arame deve ser usada uma camada mais delgada de lubrificante o que acarretará um desgaste mais acentuado na fieira /3.8/.

3.4.2 - Preparação do Fio-máquina

A eficiência do lubrificante está diretamente ligada à preparação a que o fio-máquina é submetido antes da trefilação. O processo da preparação está descrito a seguir.

O fio-máquina sofre convencionalmente uma decapagem química em ácido sulfúrico ou clorídrico, sendo após lavado em tanques de água. Para neutralizar os resíduos de ácido não eliminados na lavagem, o material é mergulhado numa solução alcalina que serve como porta lubrificante, facilitando a aderência do lubrificante ao fio no instante de trefilar. Este banho também protege o fio de uma oxidação posterior. As soluções mais comumente utilizadas na neutralização são as seguintes: hidróxido de cálcio que atua como filme protetor anti-riscos, bórax e fosfato; sendo que a fosfatização é indicada para severas condições de trefilação, especialmente para a trefilação de tubos.

Pode-se, entretanto, utilizar outros processos de preparação de fio-máquina tais como um ligeiro enferrujamento que funciona como base de retenção e de carregamento de lubrificante. Esse processo, contudo, está sendo substituído pois necessita elevado tempo de preparação e apresenta dificuldades na obtenção de uma superfície uniforme.

A Fig. 3.1 Apresenta o fluxograma desta preparação

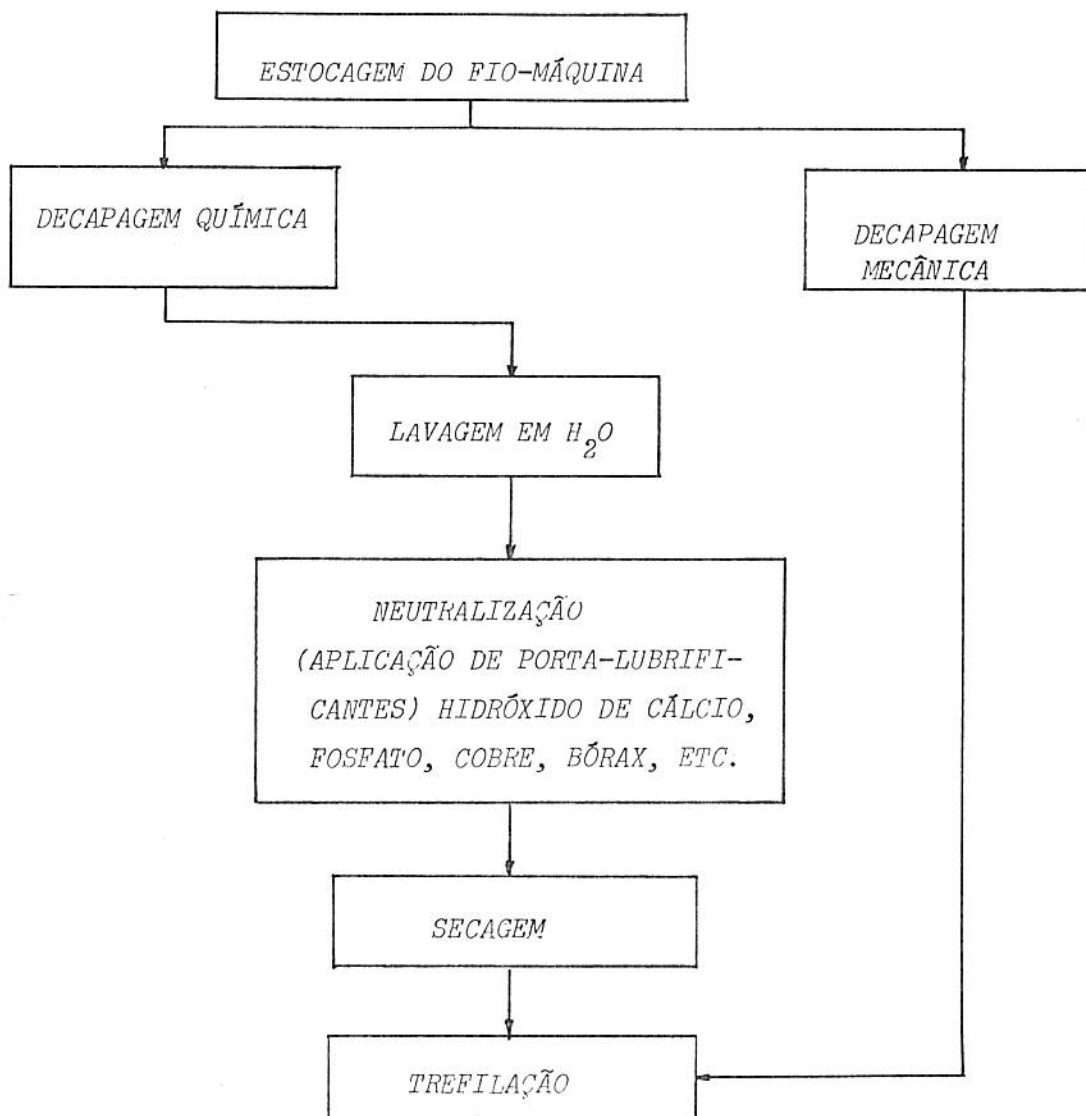


Fig. 3.1 - Fluxograma de preparação do fio-máquina

A decapagem química pode ser substituída por uma decapagem mecânica que consiste na retirada de carepas (óxidos) da superfície do metal por meio de flexão do fio através de polias, colocadas de maneira que se assegure flexão em todas as direções. Um material decapado mecanicamente apresenta uma rugosidade de superfície aproximadamente duas vezes mais alta que a do material decapado quimicamente. A decapagem mecânica requer a formação de

um filme lubrificante com uma camada mais espessa e o carregamento do lubrificante é feito pela própria rugosidade da superfície. Deve-se, neste caso, utilizar sabões com elevadas viscosidade e ponto de fusão, devido às temperaturas mais elevadas que ocorrem neste processo [3.5].

3.4.3 - Pressão, Temperatura e Velocidade na Trefilação

Durante a trefilação de arames, são experimentadas pressões de superfície na ordem de 500N/mm^2 para aços baixo carbono e 4000N/mm^2 para aços alto carbono endurecidos. O capítulo 5 apresenta uma das maneiras de se calcular esta pressão. Uma faixa geral de $800 - 2600\text{N/mm}^2$ cobre a maioria das condições de trefilação e quando são comparadas às pressões normais em mancais de rolamento (30 a 100N/mm^2), torna-se evidente que os requisitos de lubrificantes para trefilação excede em muito àqueles dos lubrificantes para mancais. Além disso, temperaturas maiores que 250°C crescerão no interior da fieira, e nessas condições deverá ser mantido um filme contínuo de lubrificante [3.9]. Durante experimentos realizados com aços alto e baixo carbono com velocidade de $0,5$ e 15m/s respectivamente, foi constatado que a temperatura aumenta a grosso modo com a raiz cúbica da velocidade de trefilação [3.3].

A influência da velocidade de trefilação sobre a espessura da camada lubrificante, em estudo desenvolvido por Wistreich [3.10], e para um mesmo tipo de lubrificante mostrou a variação dada pela Fig. 3.2. ou seja, quanto maior a velocidade menor a espessura do filme lubrificante.

3.5 - Espessura da Camada Lubrificante

Para se obter uma camada espessa de lubrificante, pode-se utilizar dispositivos como: Fieiras duplas e Fieiras de pressão.

A fieira dupla consiste de uma fieira guia (de entrada) com diâmetro 15% maior que a bitola de entrada do arame colocado justaposta à fieira de trabalho.

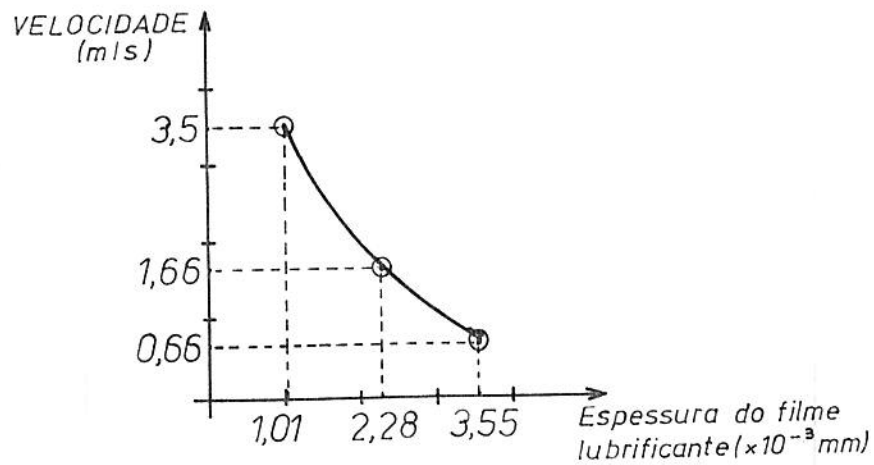


Fig. 3.2 - Influência da velocidade sobre a camada lubrificante

ra de trabalho. Com este dispositivo conseguem-se pressões de $7,0N/mm^2$ no sabão ocorrendo um aumento de vida da fieira na ordem de 20% /3.5/.

A fieira de pressão consiste de um bocal com uma parte cônica e outra reta (denominada paralelo) sendo que o bocal é acoplado a uma porca depósito que possui alguns furos para retorno do sabão. Este dispositivo é colocado à frente da fieira, colocando-se ainda entre os dois, juntas de vedação. O sabão é depositado na porca e fortemente pressionado e é amolecido devido a influência da temperatura, tornando-se um fluido pastoso. Obtém-se desta maneira uma sensível melhora na lubrificação com filmes de lubrificantes relativamente espessos. Com este dispositivo consegue-se maior tempo de utilização das fieiras /3.5/.

A Fig. 3.3 ilustra uma fieira de pressão.

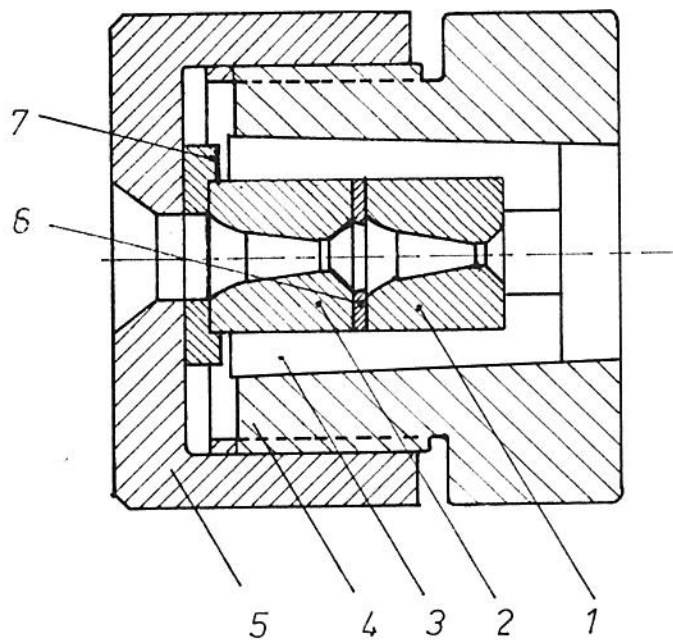


Fig. 3.3 - Fieira de Pressão de Construção Soviética:

1 - fieira de trabalho; 2 - fieira de pressão;
 3 - suporte de aço; 4 - corpo de aço; 5 - porca
 externa; 6 - anel de vedação; 7 - anel de apoio

Pesquisas tem sido desenvolvidas /3.11/ para determinar experimentalmente a espessura média da camada de lubrificante na zona de deformação, com a utilização de uma fieira segmentada em 3 seções (Fig. 3.4). Desta maneira é possível avaliar as condições de atrito, a magnitude deste e a velocidade de escoamento do lubrificante no processo de trefilação.

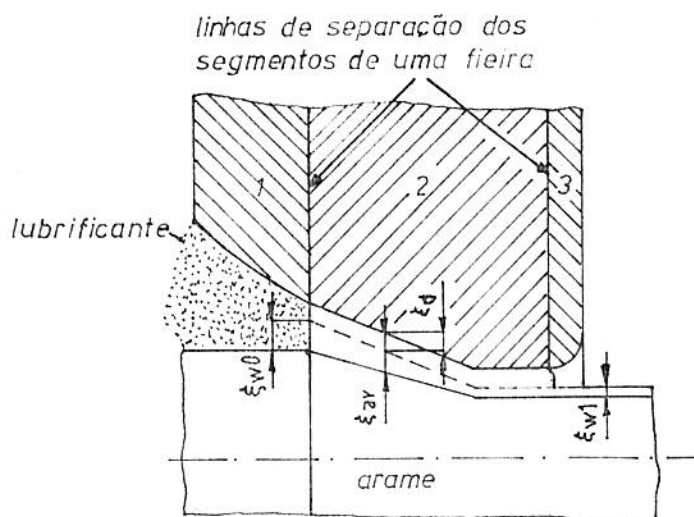


Fig. 3.4 - Zona de deformação em uma fieira segmentada/3.11/

- 1 - zona de admissão e conicidade.
- 2 - zona de trabalho da fieira segmentada (conicidade de trabalho e comprimento paralelo)
- 3 - conicidade inversa e saída

O valor da espessura média da camada lubrificante entre a fieira e o arame pode ser determinado por:

$$\mathcal{E}_{av} = \mathcal{E}_d + \mathcal{E}_{w_1} (1 + d_0 / d_1) / 2 \quad \text{onde:}$$

\mathcal{E}_d é a espessura da camada lubrificante retida na fieira.

\mathcal{E}_{w_1} é a espessura de lubrificante na superfície do arame após a trefilação

d_0 é o diâmetro antes da trefilação

d_1 é o diâmetro após a trefilação.

Os valores \mathcal{E}_d e \mathcal{E}_{w_1} foram determinados pelo método gravimétrico.

As análises dos resultados obtidos com estes experimentos indicaram que a espessura da camada lubrificante na zona de deformação decresce a medida que o arame vai sendo trefilado, com um correspondente aumento no coeficiente de atrito, que varia desde 0,05 a 0,08 para as condições de trefilação testadas. Também foi verificado que, com um aumento na velocidade, ocorre um decréscimo na rugosidade superficial do arame, nos múltiplos passes de trefilação.

3.6 - Como Detectar Falhas de Lubrificação

Sabe-se que os lubrificantes são, geralmente, pobres condutores elétricos se comparados com os materiais usados nos arames e fieiras. Utilizando-se as propriedades elétricas do arame, fieira e lubrificante foi projetado /3.12/ um instrumento para detectar falhas de lubrificação na trefilação de arames. O princípio deste transdutor está baseado na determinação da impedância elétrica Z entre o arame e fieira pela passagem de uma corrente alternada I e medindo a queda de voltagem U , conforme Fig. 3.5.

Quando ocorre falha de lubrificação e conseqüentemente o contato arame-fieira há uma significativa queda de resistência ou curto circuito.

Com a utilização deste detector, pode-se monitorar a lubrificação e avaliar parâmetros de qualidade. Este aparelho pode ser acoplado a um micro-processador externo o que torna possível:

- *Predizer a vida da fieira*
- *Estimar a qualidade do arame pela análise do sinal da lubrificação e ainda,*
- *Avaliar sistemas de lubrificação e técnicas de preparação de superfície.*

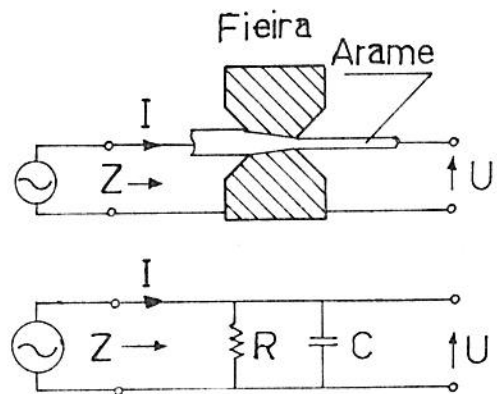


Fig. 3.5 - Princípio para medir impedância elétrica Z entre o arame e fieira /3.12/

4 - MODELOS TEÓRICOS PARA CÁLCULO DE FORÇA

4.1 - Introdução

- Na literatura técnica sobre trefilação encontra-se uma grande quantidade de modelos para cálculo de força. A grande maioria destes modelos está baseada na Teoria Elementar da Plasticidade ou na Teoria do Limite Superior /4.1/. Entre os modelos mais citados encontra-se: Sachs /4.2/, Siebel /4.3/, Gelegi /4.4/, Teoria dos Discos /4.5 - 4.6/. Baldner /4.7/, em seu trabalho, apresenta 46 modelos teóricos empíricos de cálculo de força. Todas essas fórmulas de cálculo apresentam soluções divergentes, apesar de estarem fundamentadas, em geral, nas mesmas variáveis: ângulo de fiação, o coeficiente de atrito entre o material trefilado e a parede da fiação, áreas, reduções de áreas e tensão de escoamento (sendo normalmente usado um valor médio entre a tensão de escoamento na entrada e na saída da fiação).

Este capítulo preocupa-se em descrever o Modelo dos Discos sendo ainda citados outros modelos teóricos de cálculo de força que serão usados no cap. 8 para comparação.

4.2 - Modelo Proposto: Modelo dos Discos

O modelo dos Discos é deduzido a partir da Teoria Elementar da Plasticidade e, em conjunto com o Modelo dos Tubos e das Tiras, que estão baseados no mesmo princípio, abrangem a grande totalidade dos processos de conformação mecânica. A grande importância desse método é que permite fazer uma avaliação sobre o que acontece internamente na zona de deformação. Esse modelo não tem a precisão do Método dos Elementos Finitos mas tem sua vanta

gem na simplicidade e na utilização do computador e não exige grande capacidade de memória.

Para o desenvolvimento da "Teoria dos Discos", considera-se simetria axial e devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- as ferramentas que efetuam a conformação possuem simetria.
- as massas e forças de inércia podem ser desprezadas.
- o atrito entre ferramenta e material é constante.
- a tensão de escoamento K_f é dada em função da deformação ψ , da velocidade de deformação $\dot{\psi}$ e da temperatura do arame ou barra a ser trefilada.

A Fig. 4.1 ilustra como pode ser dividida em discos uma zona de deformação em um processo de conformação mecânica.

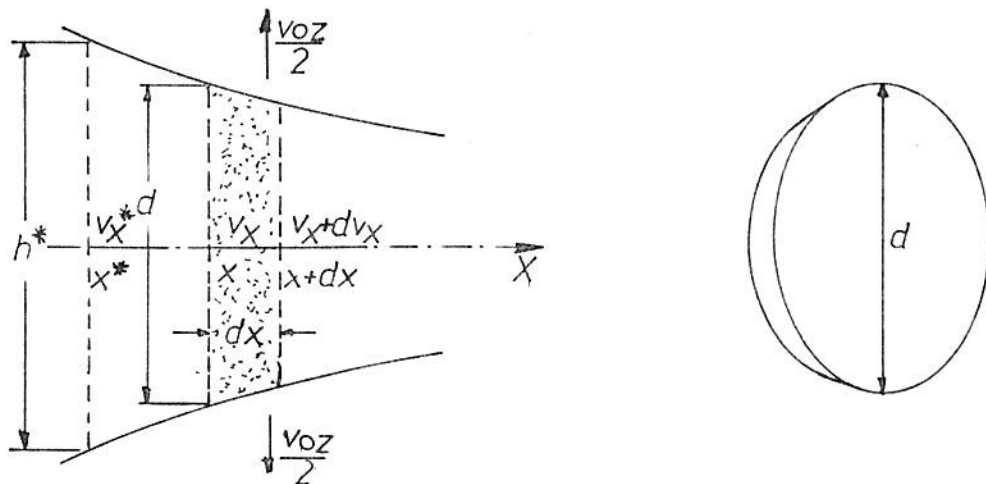


Fig. 4.1 - Modelo dos discos

Analisando as tensões em um Disco (Fig.4.2), tem-se como resultado das forças atuantes na direção η .

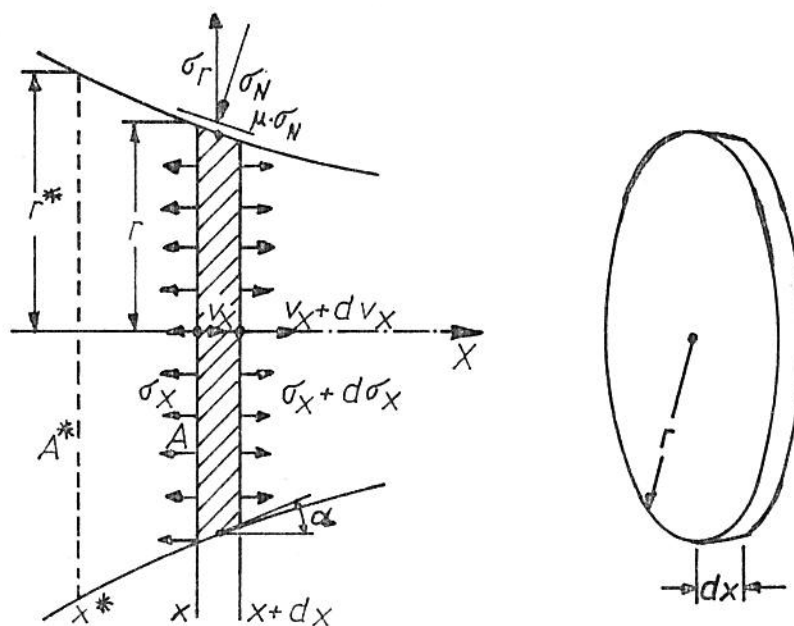


Fig. 4.2 - Condição de Equilíbrio num Disco infinitesimal

$$dF_{r_{\text{result.}}} = dF_r - \mu dF_n \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.1)$$

ou

$$dF_{r_{\text{result.}}} = dF_n \cdot \text{cos } \alpha - \mu dF_n \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.2)$$

e a condição de equilíbrio na direção x será:

$$F_x - (F_x + dF_x) + \mu dF_n \text{cos } \alpha + dF_n \text{sen } \alpha = 0$$

$$dF_x = dF_n (\text{sen } \alpha + \mu \text{cos } \alpha) \quad (4.3)$$

Simplificando o valor da dF_n de (4.2) tem-se:

$$dF_n = \frac{dF_{r_{\text{result.}}}}{\text{cos } \alpha - \mu \text{sen } \alpha} \quad (4.4)$$

Substituindo na eq. (4.3) o valor de dF_n da eq. (4.4) resulta:

$$dF_x = dF_{r_{\text{result.}}} \cdot \frac{\text{sen } \alpha + \mu \text{cos } \alpha}{\text{cos } \alpha - \mu \text{sen } \alpha} \quad (4.5)$$

dividindo o numerador e o denominador da expressão (4.5) por $\text{cos } \alpha$ tem-se:

$$dF_x = dF_{r_{\text{result.}}} \cdot \frac{(\text{tg } \alpha) + \mu}{(1 - \mu \text{tg } \alpha)} \quad (4.6)$$

como $\mu = \text{tg } \rho$, onde ρ é o ângulo de atrito, substitui-se o valor de μ na expressão (4.6) obtendo-se:

$$dF_x = dF_{r_{\text{result.}}} \cdot \text{tg } (\alpha + \rho) \quad (4.7)$$

Aplicando o conceito de tensões vem:

$$F_x = \sigma_x \cdot \pi \cdot R^2 \quad (4.8)$$

derivando-se a expressão (4.8) em função de x obtém-se:

$$\frac{dF_x}{d_x} = \bar{\eta} \left[\sigma_x \cdot 2R \cdot \frac{dR}{d_x} + R^2 \cdot \frac{d\sigma_x}{d_x} \right] \quad (4.9)$$

e

$$dF_x = - \sigma_R \cdot 2\bar{\eta} R d_x \quad (4.10)$$

Substituindo os valores de (4.10) em (4.7), tem-se:

$$dF_x = - \sigma_R \cdot 2\bar{\eta} R d_x \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho)$$

e

$$\frac{dF_x}{d_x} = - \sigma_R \cdot 2\bar{\eta} R \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \quad (4.11)$$

igualando-se as expressões (4.9) e (4.11) vem:

$$\bar{\eta} \cdot \left[\sigma_x \cdot 2 \cdot R \frac{dR}{d_x} + R^2 \frac{d\sigma_x}{d_x} \right] = - \sigma_R \cdot 2\bar{\eta} R \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \rho)$$

simplificando os termos, resulta:

$$R \frac{d\sigma_x}{d_x} + 2\sigma_x \frac{dR}{d_x} + 2\sigma_R \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad (4.12)$$

A hipótese da máxima tensão de cisalhamento de Tresca diz que:

$$\sigma_x - \sigma_R = \pm K_f \text{ ou } \sigma_R = \sigma_x \pm K_f$$

Substituindo-se este termo na expressão (4.12) obtém-se:

$$R \frac{d\sigma_x}{d_x} + 2\sigma_x \frac{dR}{d_x} + 2(\sigma_x \pm K_f) \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad (4.13)$$

rearranjando-se a expressão (4.13) resulta:

$$R \frac{d\sigma_x}{dx} + 2 \sigma_x \frac{dR}{dx} + 2 \sigma_x \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \pm 2 K_f \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad (4.14)$$

dividindo a expressão (4.14) por R obtêm-se:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{R} \sigma_x \frac{dR}{dx} + \frac{2}{R} \sigma_x \operatorname{tg}(\alpha + \rho) \pm \frac{2}{R} K_f \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad (4.15)$$

Substituindo a relação geométrica $\frac{dR}{dx} = \pm \operatorname{tg} \alpha$ na expressão (4.15) obtêm-se finalmente:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{R} \left[\operatorname{tg}(\alpha + \rho) - \operatorname{tg} \alpha \right] \sigma_x \pm \frac{2}{R} K_f \operatorname{tg}(\alpha + \rho) = 0 \quad (4.16)$$

Usa-se o sinal (-) quando durante a deformação o raio R diminui

A solução da equação diferencial (4.16) fornecerá o valor de σ_x que na saída da fieira conduzirá à força de trefilação. A solução analítica desta equação é trabalhosa mas pode ser solucionada de maneira simplificada com a utilização de processos numéricos como por exemplo:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta x} = \frac{\sigma_{x_{i+1}} - \sigma_{x_i}}{X_{i+1} - X_i} = \frac{\sigma_{x_{i+1}} - \sigma_{x_i}}{B}$$

obtêm-se desta forma, uma expressão simplificada do modelo:

$$\sigma_{x_i} = \frac{\frac{2B}{R_i} \cdot k_{f_i} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i + \rho) - \sigma_{x_{i+1}}}{\frac{2B}{R_i} \left[\operatorname{tg}(\alpha_i + \rho) - \operatorname{tg} \alpha_i \right] - 1} \quad (4.17)$$

Sendo i o número do disco em análise.

Para o cálculo da força, teremos: (4.18)

$$F = n \cdot A_n$$

Devido ao fato de considerar-se constantes as tensões atuantes ao longo de um disco, as mesmas são calculadas não levando-se em consideração a influência da "deformação redundante" provocada pelo processo interno de deformações cisalhantes no material. Estas deformações provocam um trabalho de deformação plástica chamado de "trabalho redundante". Para o modelo dos discos apresentar resultados mais próximos dos valores medidos deve-se acrescentar a parcela referente ao trabalho redundante. A mesma pode ser considerada diretamente na expressão (4.18) através de um fator multiplicativo semi-empírico ϕ tal como indicado na literatura / 4. 1/.

Então, para o cálculo da força de trefilação tem-se:

$$F = \sqrt{n} \cdot A_n \cdot \phi \quad (4.19)$$

O método para se avaliar o trabalho redundante sugerido pela literatura /4.9/ fornece o valor de ϕ como sendo:

$$\phi = 0,88 + 0,78 \left[\frac{d_0 + d_1}{d_0 - d_1} \left(\frac{1 - \cos \alpha}{2 \sin \alpha} \right) \right]$$

4.3 - Outros Modelos

4.3.1 - Modelo de Siebel

Siebel desenvolveu em 1932 uma expressão bastante simples e eficiente que leva em consideração o trabalho total necessário para trefilação que pode ser dividido em três parcelas: uma representa a força ideal de trefilação, a outra a influência do atrito e a terceira, a força de cisalhamento interno. Esta consideração, em geral, é usada em todos os modelos teóricos de cálculo de força. A expressão tem a seguinte formulação:

$$F = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \rho_A \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\rho_A} \right) \quad (4.20)$$

4.3.2 - Modelo de Lewis e MacLellan /4.7/

$$F_1 = (A_0 - A_1) \cdot (1 + \mu \cot \alpha) \cdot k_{fm} \quad (4.21)$$

4.3.3 - Modelo de Sachs

O modelo de Sachs foi desenvolvido a partir da Teoria Elementar da elasticidade /1.3/. Este modelo de cálculo de força foi posteriormente corrigido por Kärber e Eichinger com a adição da parcela devido ao cisalhamento interno e é dado por:

$$F = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] + 0,77 \alpha \right\} \quad (4.22)$$

4.3.4 - Modelo de Geleji /4.4/

$$F_1 = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \left[\frac{\frac{A_0 - A_1}{A_1} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \cdot \left(1 - \frac{0,77}{2} \cdot \alpha \right)}{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_0 - A_1}{A_1} \right) \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} + 0,77 \alpha \right] \quad (4.23)$$

4.3.5 - Modelo de Palmov /4.7/

$$F_1 = A_1 \cdot k_{fm} \cdot \left(1 + \frac{2 \tan \alpha}{\mu} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{\mu}{2 \tan \alpha}} \right] \quad (4.24)$$

4.3.6 - Modelo de Davis - Dokos /4.7/

$$F = A_1 \cdot k_{fo} \cdot \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha}\right) \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{\mu \cot \alpha}\right) \cdot \left(1 - \frac{k}{k_{fo}} \cdot \frac{1}{\mu \cot \alpha}\right) + \right.$$

$$\left. \frac{k}{k_{fo}} \cdot \ln \frac{A_0}{A_1} \right] \text{ onde } k = \frac{k_{f1} - k_{fo}}{\ln \frac{A_0}{A_1}} \quad (4.25)$$

5 - Considerações Sobre os Parâmetros Importantes de Trefilação

5.1 - Coefficiente de Atrito

A precisão dos modelos teóricos está diretamente vinculada a determinação do coeficiente de atrito. A determinação experimental deste coeficiente é bastante difícil. Alguns autores como Wistreich /5.1/ e Lueg /5.2/ mostram que é possível uma variação entre 0,02 e 0,1 para aços com 0,58 % C.

Siebel /4.3/ e Druckfielá /5.3/ fixaram um coeficiente de atrito médio constante e igual a 0,05 considerando boas condições de lubrificação. Utilizaram nas experiências aços com 0,06 e 0,53% C.

Existem métodos práticos para a determinação do coeficiente de atrito. Em suas dissertações de mestrado, Klein /1.9/ e Casanova /1.10/ basearam-se no método desenvolvido por Mac Lellan /5.4/, posteriormente corrigido por Wistreich e utilizaram fôrças bi-partidas axialmente para determinação do coeficiente de atrito a partir da medição simultânea da força normal e da força de trefilação, com o auxílio de sensores a base de extensômetros de resistência elétrica.

No cálculo do coeficiente de atrito usando o método da fôrça bi-partida, Mac Lellan e Wistreich não consideram a porção paralela da fôrça. Yang /1.8/, por sua vez, considera esta porção paralela utilizando um simples dinamômetro com extensômetros de resistência elétrica. De acordo com este autor é apreciável a diferença entre os coeficientes de atrito calculados com e sem a porção paralela. A Fig. 5.1 ilustra como foi desenvolvido o método de cálculo.

O coeficiente de atrito pode ser obtido desde que sejam conhecidas as forças de separação F_r e a força normal F . Pode-se obter estes valores utilizando-se sensores de força. Pela solução simultânea das

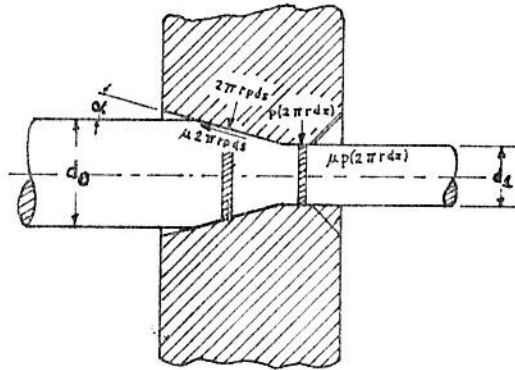


Fig. 5.1 - Esquema de trefilação de arames mostrando forças aplicadas em tiras infinitesimais nas porções cônicas e paralela da fieira/1.3/

equações obtidas com o equilíbrio de forças nas direções longitudinais e transversais e fazendo-se algumas simplificações, obtém-se:

$$\mu = \frac{\Delta A \cot \alpha + \pi d_1 l_1 - \pi \left(\frac{F_1}{F} \right) \Delta A}{\left(\frac{F_1}{F} \right) \pi \left(\Delta A \cot \alpha + \pi d_1 l_1 \right) + \Delta A} \quad (5.1)$$

onde: $\Delta A = A_0 - A_1$

A equação (5.1) calcula o coeficiente de atrito considerando-se a parte paralela da fieira. Esta expressão pode ser utilizada no cálculo de μ tanto em análises teóricas como experimentais.

Pode-se também a partir de testes simulativos /1.1/ tais como: testes de compressão de anéis, trefilação de barras chatas, trefilação de tiras, compressão com torção etc., determinar-se a magnitude do atrito

to; entretanto os valores deste coeficiente são mais representativos para aqueles testes que simulam melhor o processo de conformação em estudo.

Neste trabalho segue-se o proposto por Siebel e Druckfield considerando-se um coeficiente de atrito médio $\mu = 0,05$ em todos os modelos teóricos para fins de comparação com a força medida.

5.2 - Resistência ao Escoamento

A resistência ao escoamento ou simplesmente tensão de escoamento pode ser calculada pela média entre a tensão de escoamento na entrada e na saída da fiação, ou seja:

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} \quad (5.2)$$

onde k_{f0} e k_{f1} são extraídos diretamente da curva de escoamento (Fig. 6.2), considerando-se a deformação logarítmica em área para cada passe. Este procedimento é adotado na maioria dos modelos teóricos de cálculo de força; entretanto quando se deseja um cálculo mais preciso da resistência ao escoamento pode ser usado o conceito de trabalho específico /5.10/.

$$W = \int_{\varphi}^{\varphi_n} k_f \cdot d\varphi \quad (5.3)$$

Esta integral representa a área sob a curva $k_f = f(\varphi)$ da Fig. 6.2 e significa a energia necessária para promover a deformação a cada elemento. Então, para se obter a tensão de escoamento média, divide-se o trabalho específico pela variação de deformações correspondente, ou seja:

$$k_{fm} = \frac{1}{\varphi_1 - \varphi_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} k_f \cdot d\varphi \quad (5.5)$$

Neste trabalho usa-se o valor da tensão de escoamento média k_{f_m} , dado pela eq. 5.2, pois na faixa de deformação (diâmetro 3,00 até 1,57 mm) em que foram realizados os experimentos, a curva de escoamento (Fig 6.2) tende a uma reta. Obtem-se, desta maneira, valores de k_{f_m} com boa precisão.

Para se construir uma curva de escoamento existem vários métodos, entre os quais podemos citar: ensaio de compressão, ensaio de tração conforme Siebel, construção de curvas através de dados obtidos no ensaio de tração e ensaios de tração após sucessivas deformações.

Entre estes métodos, o que mais se adapta à determinação de curvas é o ensaio de compressão; entretanto, neste ensaio, deve-se ter boa lubrificação entre a matriz e o corpo de prova, procurando-se manter um estado uniaxial de tensões. Já o ensaio de tração é o mais simples para se obter curvas de escoamento, porém é limitado pelo grau de deformação relativamente pequeno ($\psi = 0,2$ a $0,3$), pois após iniciado a estrição não se tem mais um estado uniaxial de tensões. Um outro método baseado no ensaio de tração é o apresentado por Kopp /5.6/ e pode ser calculado pela expressão:

$$k_f = k_{f_0} \cdot \psi^n, \text{ onde:}$$

$$n = l_n (1 + A_{hom}) \text{ é a taxa de encruamento.}$$

Esta taxa também é expressa por:

$$n = \psi_{hom}$$

A tensão de escoamento inicial é dada por:

$$k_{f_0} = \sigma_B \cdot \left(\frac{l}{n} \right)^n$$

A_{hom} por sua vez é estipulado por:

$$A_{hom} = 2 \mathcal{S}_{10} - \mathcal{S}_5 \text{ sendo}$$

\mathcal{S}_{10} - deformação relativa de um corpo de prova normalizado
 $l_0 = 10 \cdot d_0$

ϵ = deformação relativa de um corpo de prova normalizado

$$\epsilon_0 = 5 \cdot d_0$$

A_{hom} e ϵ_{hom} são deformações correspondentes à deformação máxima dentro da zona de deformação homogênea e σ_B é a tensão máxima.

5.3 - Ângulos das Fieiras

A geometria da ferramenta e principalmente o ângulo da fieira tem grande influência na qualidade de lubrificante que é conduzido para o interior da mesma. Este parâmetro está presente em todos os modelos teóricos de cálculo de força.

Em geral, ângulos pequenos de fieiras provocam um valor elevado para a tensão total de trefilação com predominância do atrito. À medida que o ângulo da fieira aumenta atinge-se um ângulo "ótimo" de fieira com a diminuição do efeito atrito e da tensão total. Entretanto, se este ângulo continuar a aumentar podem ocorrer defeitos no material com a formação de uma "zona morta" e posterior descascamento [5.7].

No presente trabalho usaram-se ângulos de fieiras normalmente utilizados no processo de trefilação industrial. Para medir os ângulos das fieiras utilizadas no presente trabalho, utilizou-se um projetor de perfil, onde foram projetadas as imagens de um calibre de chumbo respectivo a cada fieira, obtido através de compressão. Estes ângulos podem ser vistos na tabela 5.1 a baixo.

| Diâmetro da Fieira (mm) | Semi-ângulo da fieira (grau) |
|----------------------------|---------------------------------|
| 2,65 | 8,0 |
| 2,32 | 9,5 |
| 2,20 | 6,5 |
| 1,90 | 8,0 |
| 1,75 | 9,5 |
| 1,57 | 7,0 |

Tab. 5.1 - Semi-ângulos das fieiras com seus respectivos diâmetros

5.4 - Pressão Média na Parede da Fieira

É pressão atuante na parede da fieira durante a trefilação. Este parâmetro é útil na análise de lubrificantes uma vez que leva em consideração força, geometria e atrito. Uma das maneiras de se calcular este parâmetro é através da expressão de Pomp e Gesche /5.8/ dada por:

$$q_m = \frac{F \cdot \operatorname{sen} \alpha}{(A_0 - A_1) \operatorname{sen} (\alpha + \rho)} \quad (5.6)$$

A Fig. 5.2 mostra um esquema de trefilação com a pressão média atuante.

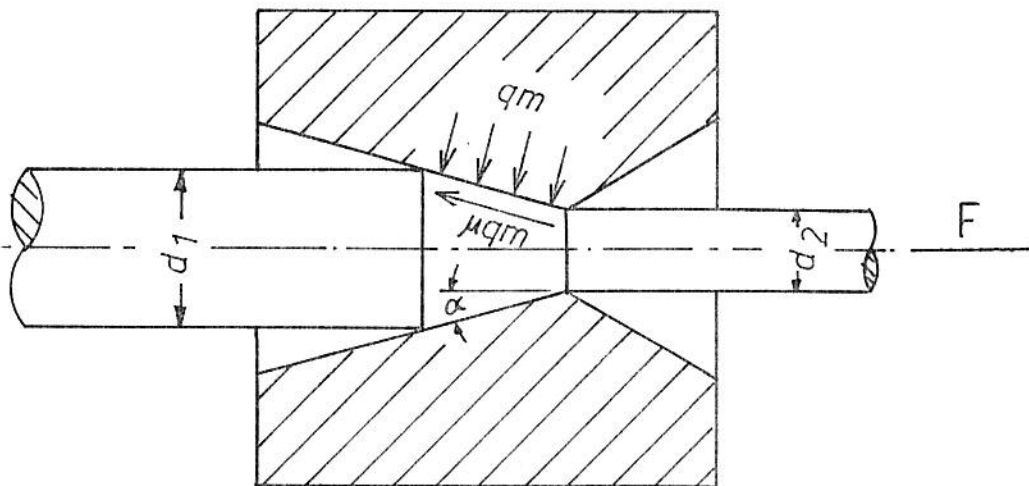


Fig. 5.2 - Esquema de Trefilação com a pressão média atuante

6 - Análise Experimental

6.1 - Obtenção da Curva de Escoamento

6.1.1 - Método Utilizado

Devido ao fato de se estar trabalhando com arame, escolheu-se para a obtenção da curva de escoamento o método baseado nos ensaios de tração após sucessivas deformações, isto é, determinou-se para cada passe de trefilação a tensão convencional de escoamento, juntando-se essas em função da deformação conforme Fig. 6.1.

Como a matéria-prima original para os estudos tratava-se de um arame trefilado com diâmetro 3,00 mm, encruado, com uma deformação em área $\Psi = 1,21$ desde o fio-máquina com 5,5 mm, recozeu-se o mesmo em uma temperatura de 950°C durante quinze minutos visando-se uma microestrutura o mais próximo possível do fio-máquina original e assim obter o primeiro ponto da curva, correspondente a $\Psi = 0$.

O arame recozido foi decapado quimicamente com ácido clorídrico com concentração 20% em volume, lavado em água e neutralizado com NaOH para eliminar os resíduos de ácido remanentes. Após foi trefilado desde 3,00 até 1,74 mm em 4 passes perfazendo um $\Psi = 1,08$ obtendo-se com isso a primeira parte da curva de escoamento.

Como o arame inicial já havia sido trefilado desde o fio-máquina com 5,50 até 3,00 mm, continuou-se a trefilação até 1,57 mm em 6 passes sem recozimento intermediário, obtendo-se a segunda parte da curva perfazendo um $\Psi_{total} = 2,50$ correspondente a redução desde o fio-máquina 5,50 mm até 1,57 mm.

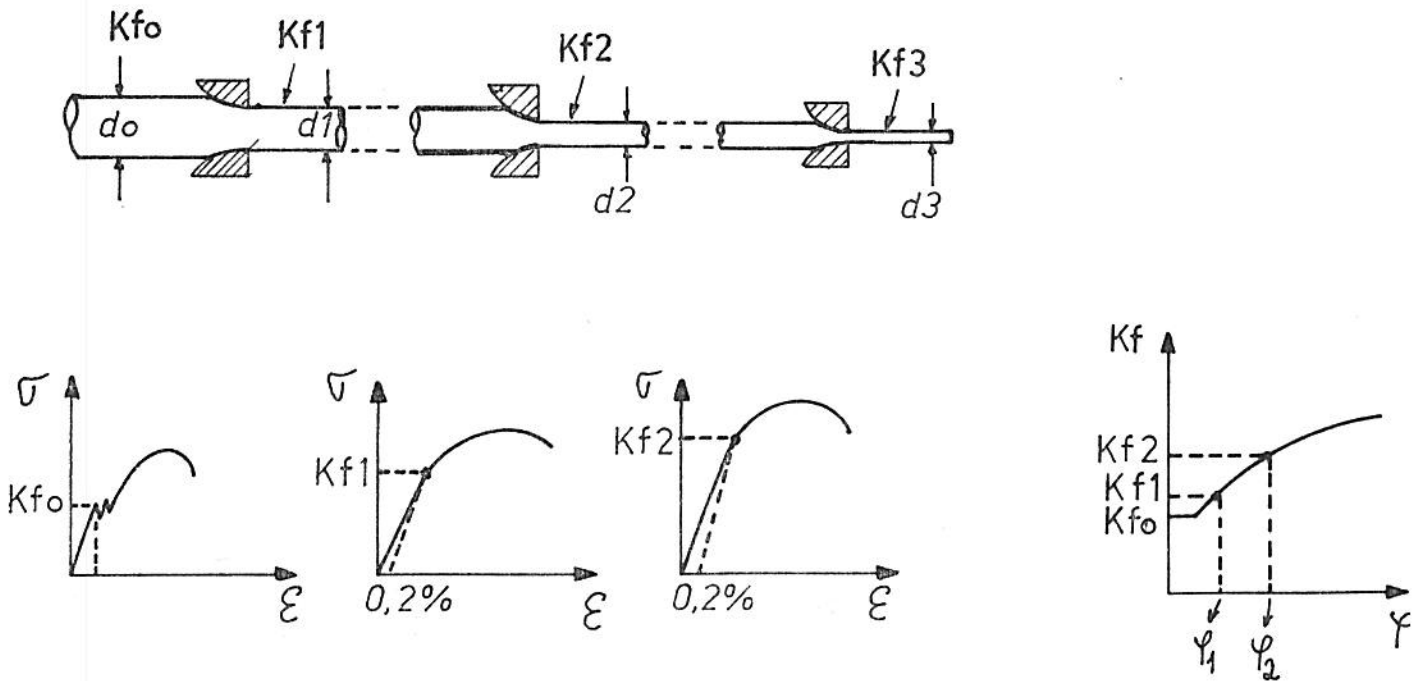


Fig. 6.1 - Construção de Curvas de Escoamento através de deformações sucessivas $\beta.2 /$

6.1.2 - Resultados Obtidos

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram o levantamento das tensões de escoamento (k_f) obtidos através dos ensaios de tração. Com estes dados levantamos

Tab. 6.1 - Dados de k_f e φ obtidos a partir do arame recozido com diâmetro 3,00 mm.

| Nº Passe | Redução de diâmetro (mm) | $\varphi = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | φ acumulado | $k_f (N/mm^2)$ |
|----------|--------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------|
| Recozido | 3,00 | 0 | 0 | 270 |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 0,248 | 520 |
| 2 | 2,65 - 2,20 | 0,372 | 0,620 | 670 |
| 3 | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 0,913 | 700 |
| 4 | 1,90 - 1,75 | 0,164 | 1,08 | 720 |

Tab. 6.2 - Dados de k_f e φ obtidos a partir do arame encruado com diâmetro 3,00 mm

| Nº passe | Redução de diâmetros (mm) | $\varphi = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | $\sum \varphi$ | $k_f (N/mm^2)$ |
|------------|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| Mat. Inic. | 3,00 | 0 | 1,210 | 787 |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 1,460 | 800 |
| 2 | 2,65 - 2,36 | 0,232 | 1,690 | 915 |
| 3 | 2,36 - 2,20 | 0,140 | 1,830 | 920 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 2,120 | 925 |
| 5 | 1,90 - 1,75 | 0,164 | 2,290 | 935 |
| 6 | 1,75 - 1,57 | 0,217 | 2,500 | 950 |

ta-se a curva $k_f \times \phi$ (tensão de escoamento em função do grau de deformação logarítmica em área) que é mostrada na Fig. 6.2 . Cada ponto de medida foi obtido com 3 ensaios de tração repetitivos com imprecisão $\pm 5\%$.

Para se comparar os valores obtidos através de experimentos com a literatura, a Fig. 6.2 apresenta ainda a curva de um aço semelhante (Ck10). A diferença máxima entre as duas curvas é de aproximadamente 15% que pode ser justificada considerando as diferenças nas composições químicas dos dois aços citados e imprecisões de medidas nos métodos de obtenção destas curvas.

A análise da composição química do material de teste foi feita através de via úmida apenas para três elementos e revelou:

| | |
|----------|-------|
| Carbono | 0,10% |
| Manganês | 0,38% |
| Silício | 0,11% |

A porcentagem dos elementos analisados estão dentro da tolerância admitida pela Norma técnica ABNT para o aço 1010, cuja composição química junto com a do aço Ck10 é apresentada na tabela 6.3

Para facilitar a utilização do modelo dos discos, fornece-se a curva da Fig. 6.2 a um programa de computador (Apêndice B) que interpreta esta curva a partir dos dados iniciais e incrementa a resistência ao escoamento, dentro da faixa de um determinado grau de redução, conforme o número de discos optados pelo operador.

6.2 - Medições de Força

6.2.1 - Descrição dos Equipamentos

A força de trefilação é medida utilizando-se uma célula de carga (Apêndice A) que é colocada no interior da caixa de sabão da trefiladora industrial com um monobloco de capacidade 10HP.

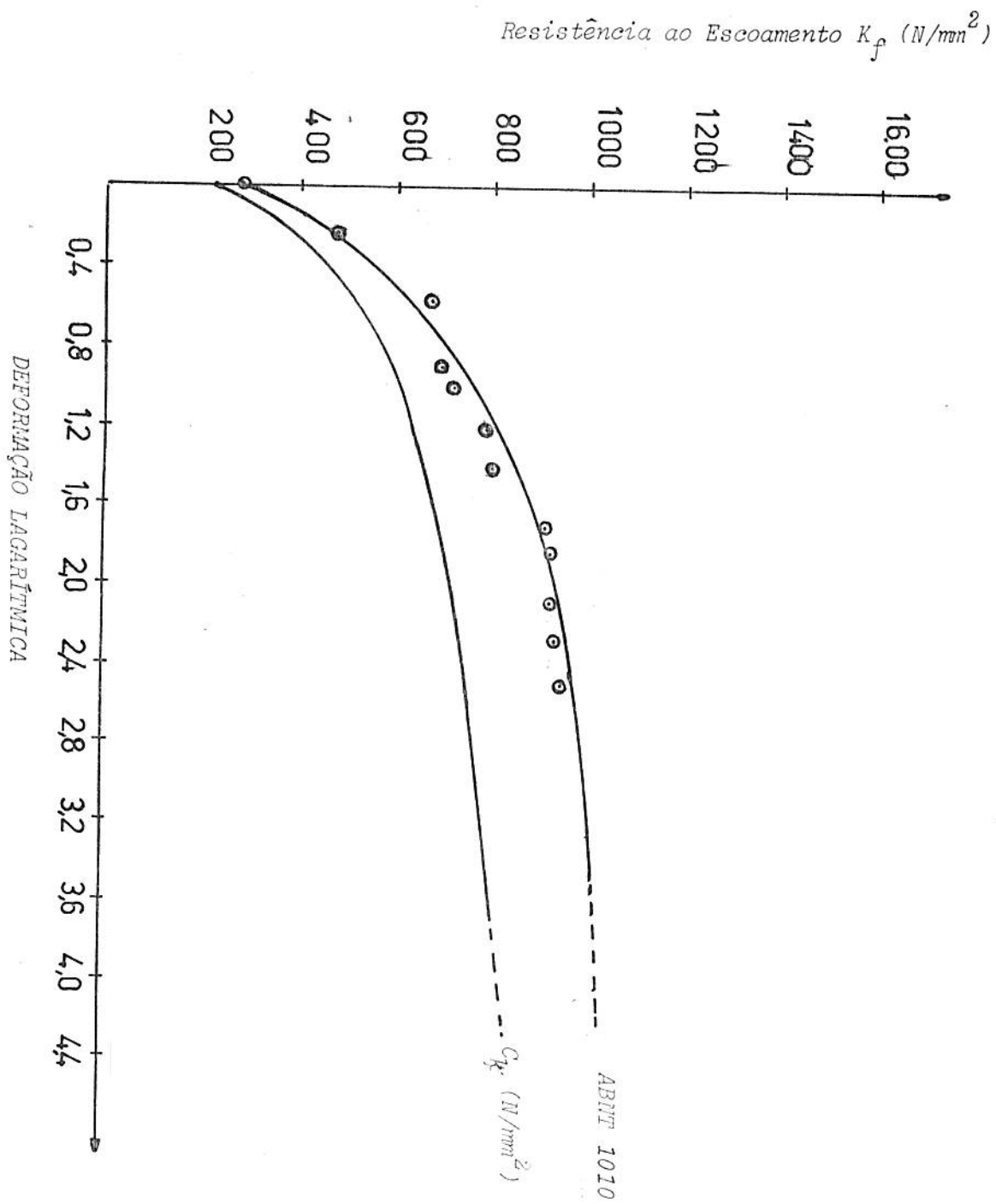


Fig. 5.2 - Curvas de Escoamento

Tab. 6.3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS ABNT 1010 E Ck10 (DIN)

| ABNT 1010 | | Ck 10 (DIN) |
|------------------|--------------|--------------|
| Carbono | 0,08 a 0,13% | 0,07 a 0,13% |
| Manganês | 0,30 a 0,60% | 0,30 a 0,60% |
| Silício | 0,10 a 0,20% | 0,15 a 0,35% |
| Enxôfre (Máximo) | 0,040% | 0,035% |
| Fósforo (Máximo) | 0,050% | 0,035% |

A Fig. 6.3 ilustra a montagem dos equipamentos.

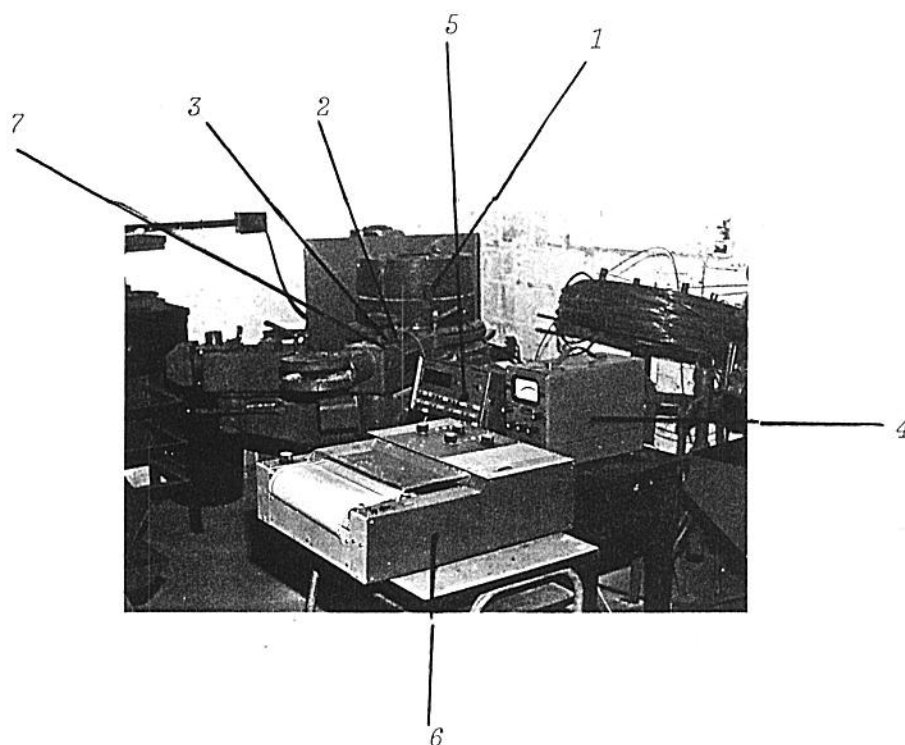


Fig. 6.3 - Esquema de Montagem da Experiência.

- 1 - Monobloco da trefiladora
- 2 - Célula de carga
- 3 - Fieira
- 4 - Ponte amplificadora
- 5 - Multímetro digital
- 6 - Registrador
- 7 - Sabão lubrificante

6.2.2 - Procedimento Experimental

O material dos testes é um aço ABNT 1010, que já havia sido trefilado desde o fio-máquina (5,50 mm) até 3,00 mm, estando portanto, encruado com uma deformação total $\varphi = 1,21$. A quantidade de arame trefilado em cada passe foi em torno de dez metros. Uma observação importante é que es

te fio-máquina foi submetido a decapagem química.

A partir do diâmetro 3,00 mm, este material foi retrefilado até o diâmetro 1,57 mm em 6 passes sem recozimento intermediário na primeira série de testes; após foi feita a mesma redução em 4 passes na segunda e terceira série para testar a eficiência dos lubrificantes em condições mais severas de trefilação. Também realizou-se uma quarta série para verificar-se a influência do filme residual de lubrificante.

A velocidade de trefilação medida com o auxílio de um tacômetro digital foi de 1,1 m/s, constante em todos os passes.

Foram testados cinco lubrificantes do tipo sabões a base de estearatos cujos nomes comerciais são:

- Imbralub BS/CIM
- Imbralub BS/CFE
- Imbralub BS/SEX
- Polimet
- Dri lube - 1600

e um lubrificante pastoso a base de dissulfeto de molibdênio (Molykote G) diluído em óleo sintético. Além destes usou-se como lubrificante estearato de cálcio sem aditivos e Polietileno glicol - 4000 que é um lubrificante com aspecto de cêra e não propriamente indicado para trefilação. Foram testados ainda os porta-lubrificantes bórax e fosfato.

6.2.3 - Resultados Obtidos

As três primeiras séries de testes foram realizadas com a célula de carga (T - 5000) simplesmente anteposta a fieira. Com a utilização da célula nesta posição deve-se considerar a imprecisão do sistema de medida de $\pm 5\%$. Esta imprecisão foi obtida com calibrações da célula em várias posições.

Na primeira série de testes utilizaram-se cinco sabões lubrificantes testados em 6 passes sem recozimento intermediário. Os resultados podem ser vistos na tabela 6.4 e figura 6.4.

Tab. 6.4 - Valores de força com as respectivas imprecisões
(1ª série de testes)

| Nº do passe | Redução de diâmetros (mm) | $\psi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | Lubrificante/Força (N) | | | | |
|-------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|------------|-----------------|---------------|
| | | | Imbralub BS/CIM | Imbralub BS/CFE | Polimet | Imbralub BS/SEX | Dri Lube-1600 |
| 1º | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 2000 ± 100 | 2175 ± 109 | 2037 ± 102 | 2087 ± 104 | 2000 ± 100 |
| 2º | 2,65 - 2,32 | 0,265 | 1675 ± 84 | 1875 ± 94 | 1675 ± 84 | 1775 ± 89 | 1592 ± 80 |
| 3º | 2,32 - 2,20 | 0,106 | 925 ± 46 | 1050 ± 52 | 1000 ± 50 | 1050 ± 52 | 925 ± 46 |
| 4º | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 1287 ± 64 | 1250 ± 62 | 1225 ± 61 | 1287 ± 64 | 1162 ± 58 |
| 5º | 1,90 - 1,75 | 0,164 | 750 ± 37 | 719 ± 36 | 775 ± 39 | 750 ± 37 | 750 ± 37 |
| 6º | 1,75 - 1,57 | 0,217 | 775 ± 39 | 719 ± 36 | 762 ± 38 | 750 ± 37 | 775 ± 39 |

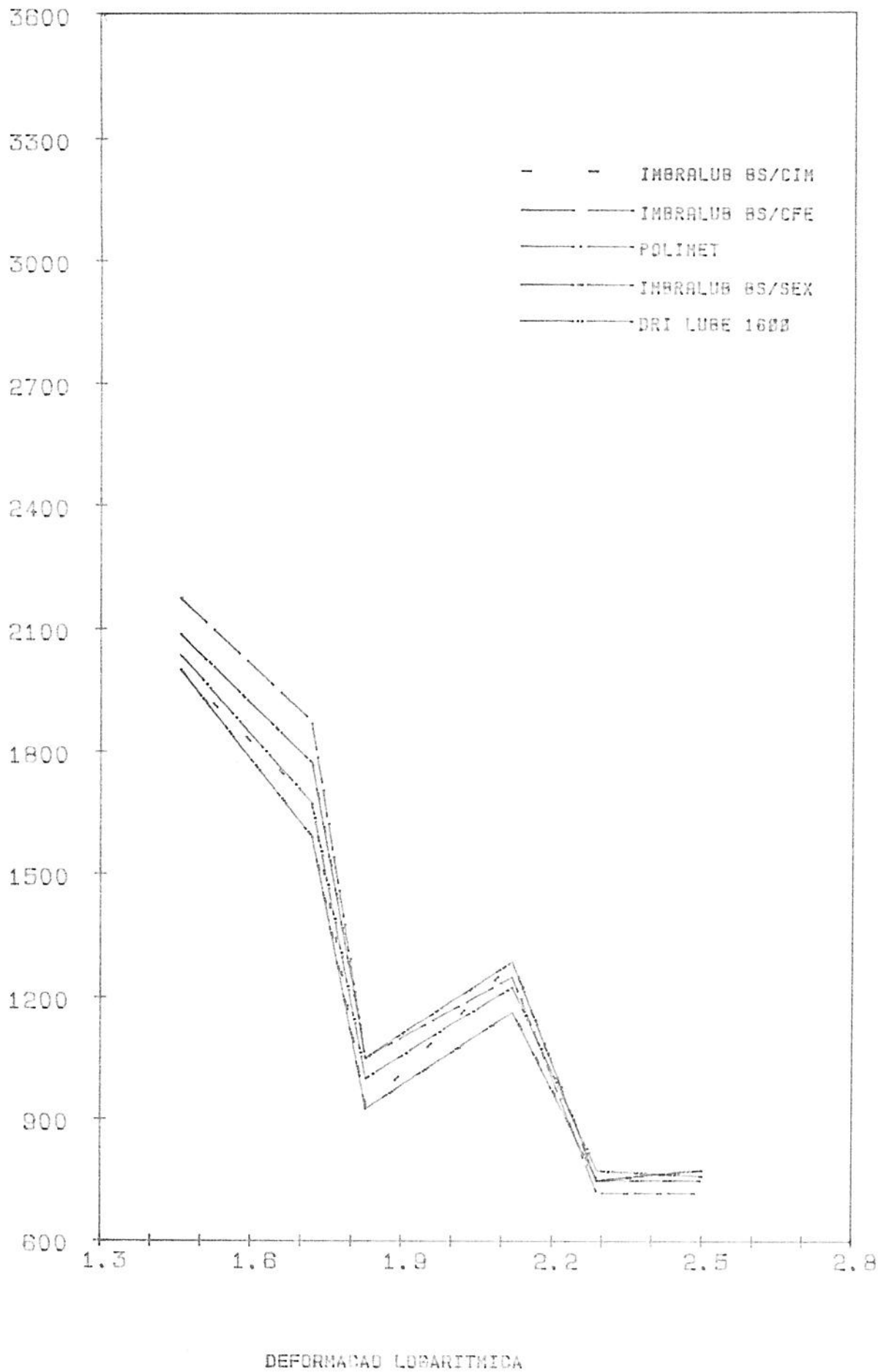


Fig. 6.4 - Valores de Força Medidos (1ª série)

Uma segunda série de ensaios foi realizada com o objetivo de testar o comportamento do lubrificante em condições mais severas de trefilação; ou seja, aumentaram-se as reduções em área, trefilando-se o arame desde 3,00 até 1,57 mm em quatro reduções.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 6.5 e figura

6.5.

Tab. 6.5 - Valores de força com as respectivas imprecisões
(2ª série de testes)

| Nº do passe | Redução de diâmetros (mm) | $\varphi_A (= \ln \frac{A_0}{A_1})$ | LUBRIFICANTE / FORÇA (N) | | | | | |
|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|------------|--------------------|-------------------|----------------|
| | | | IMBRALUB BS/CIM | IMBRALUB BS/CFE | PPOLIMET | IMBRALUB BS/SEX | DRI LUBE- 1600 | MOLYKOTE- G |
| 1ª | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 2075 ± 104 | 2012 ± 101 | 2275 ± 114 | 2137 ± 107 | 1987 ± 99 | 2137 ± 107 |
| 2ª | 2,05 - 2,32 | 0,266 | 1800 ± 90 | 1750 ± 87 | 1912 ± 96* | 1850 ± 92 | 1837 ± 92 | 2125 ± 106 |
| 3ª | 2,32 - 1,90 | 0,399 | 1675 ± 84 | 1600 ± 80 | 1625 ± 81 | 1925 ± 96 | 1675 ± 84 | 1875 ± 94 |
| 4ª | 1,90 - 1,57 | 0,382 | 1175 ± 59 | 1112 ± 57 | 1125 ± 56 | 1312 ± 66 | 1112 ± 57 | 1312 ± 66 |

Obs.: Riscos eventuais na fiada e material

FORÇA (N)

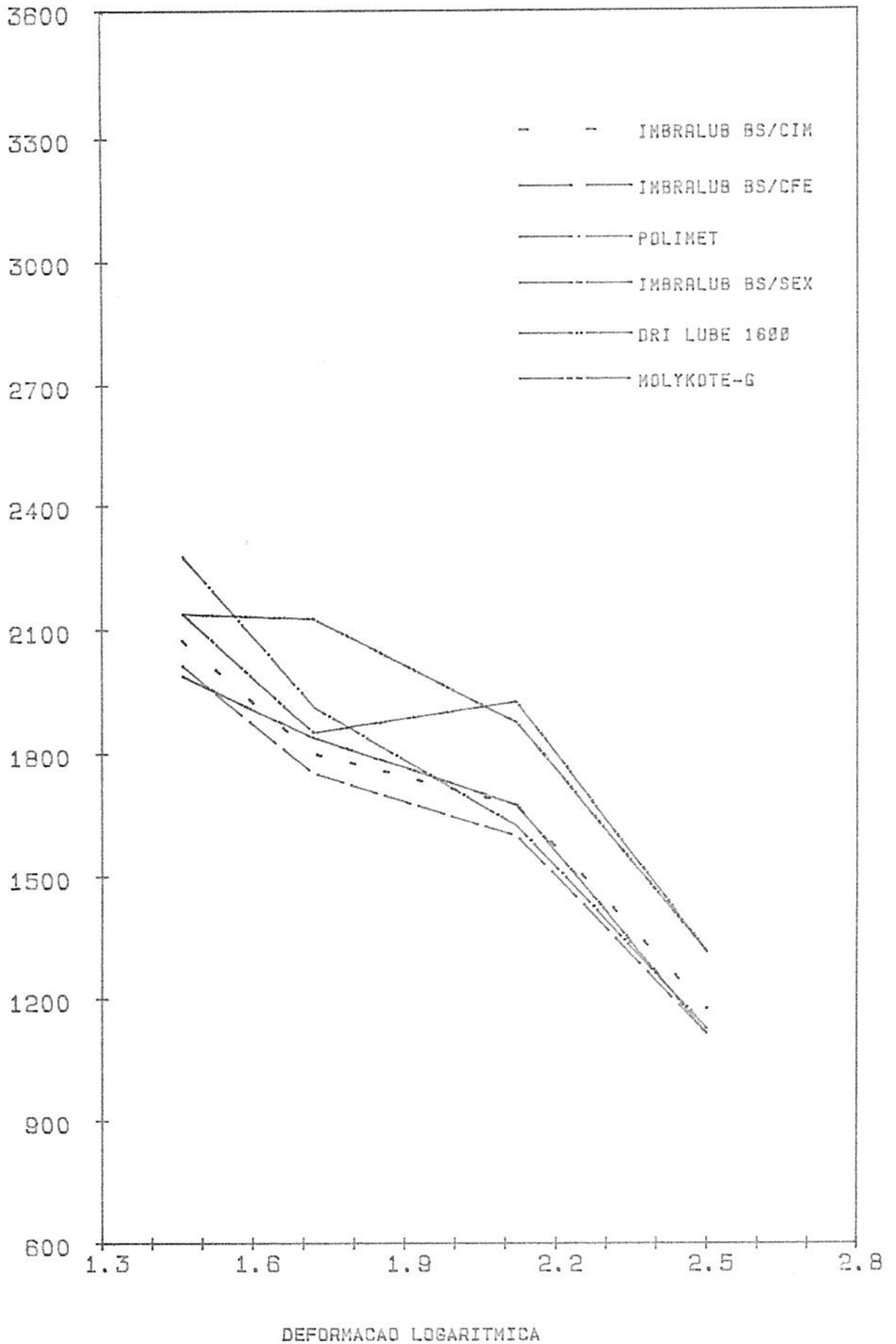


Fig. 6.5 - Valores de Força Medidos (2ª Série)

Utilizando-se as mesmas reduções da segunda série de ensaios foi realizada uma terceira série com os seguintes experimentos:

- Aplicou-se dois tipos de fosfatização (uma com rugosidade média e outra com rugosidade fina) nos arames com diâmetro 3,00 mm com o objetivo de melhorar a lubrificação durante a trefilação; pois, conforme visto no capítulo 3, a fosfatização é um porta-lubrificante muito eficiente. Para estes arames utilizou-se o lubrificante Imbralub BS/CFE.
- Sabe-se que o estearato de cálcio é a base da composição química de alguns sabões comerciais que ainda contém certos aditivos; nesta série de ensaios utilizou-se estearato de cálcio na forma pura (sem aditivos) para análise de seu comportamento frente a lubrificantes comerciais.
- Num terceiro experimento desta série utilizou-se polietileno-glicol 4000 que é uma mistura de etilenoglicóis e é indicado como lubrificante para outros fins.

Os resultados desta terceira série de ensaios podem ser vistos na tabela 6.6 e Fig. 6.6.

Nos experimentos das séries anteriores detectou-se que pequenos deslocamentos da posição da fieira com relação a célula de carga provocou maiores imprecisões no sistema de medida, isto é, fez com que as leituras dos registros fossem efetuadas com imprecisão de $\pm 5\%$. Para corrigir este fato, fixou-se a célula de carga em uma placa e utilizou-se um tubo para a fieira deslizar em seu interior, conforme fig. 6.7 Desta forma ocorreu um perfeito acoplamento com a fieira comprimindo a célula de carga homogeneamente. Observou-se que, nestas condições, a imprecisão do sistema dimi-

nuia para $\pm 2\%$ com base nos registros e calibração do sensor em uma só posição. Com este procedimento realizou-se a quarta série de testes.

Tab. 6.6 - Valores de Força com as respectivas imprecisões
(3ª série de testes)

| Nº do Passe | Redução de diâmetros (mm) | $\psi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | LUBRIFICANTE / FORÇA (N) | | | |
|-------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| | | | ESTEARATO DE CÁLCIO | POLIETILENO GLICOL-4000 | IMB, BS / CFE | |
| | | | | | FOSFATIZAÇÃO MÉDIA | FOSFATIZAÇÃO FINA |
| 1ª | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 2050 \pm 102 | 1975 \pm 99 | 2125 \pm 106 | 2125 \pm 106 |
| 2ª | 2,65 - 2,32 | 0,266 | 1650 \pm 82 | 1725 \pm 86 | 1812 \pm 91 | 2055 \pm 103 |
| 3ª | 2,32 - 1,90 | 0,399 | 1700 \pm 85 | 1650 \pm 82 | 1750 \pm 87 | 1800 \pm 90 |
| 4ª | 1,90 - 1,57 | 0,382 | 1162 \pm 58 | 1200 \pm 60 | 1280 \pm 64 | 1312 \pm 66 |

Obs.: - Fosfatização média: 4,34 a 7,61 gr/m²

- Fosfatização fina : 1,09 a 4,34 gr/m²

FORÇA (N)

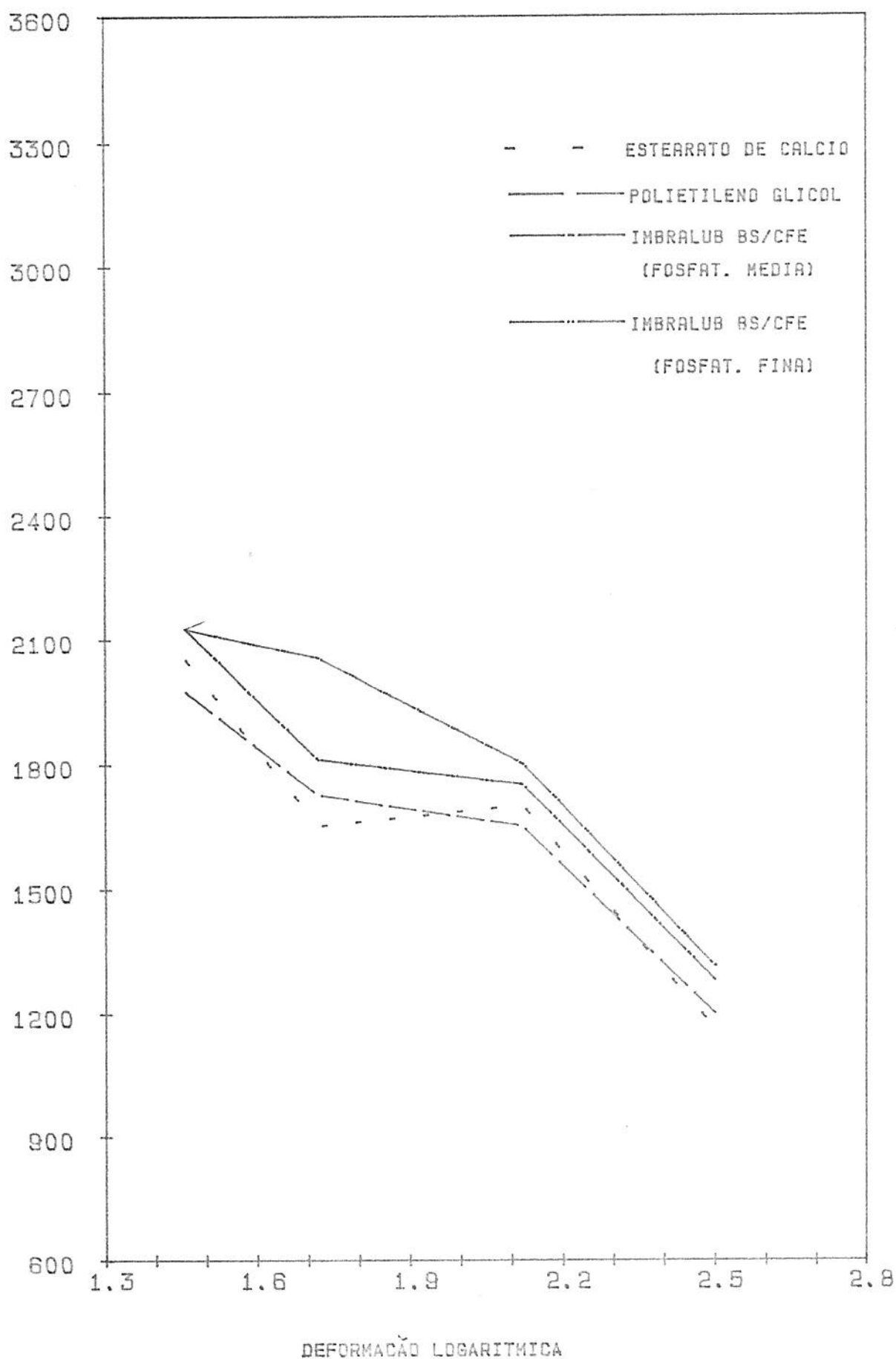


Fig. 6.6 - Valores de Força Mediões (3ª Série)

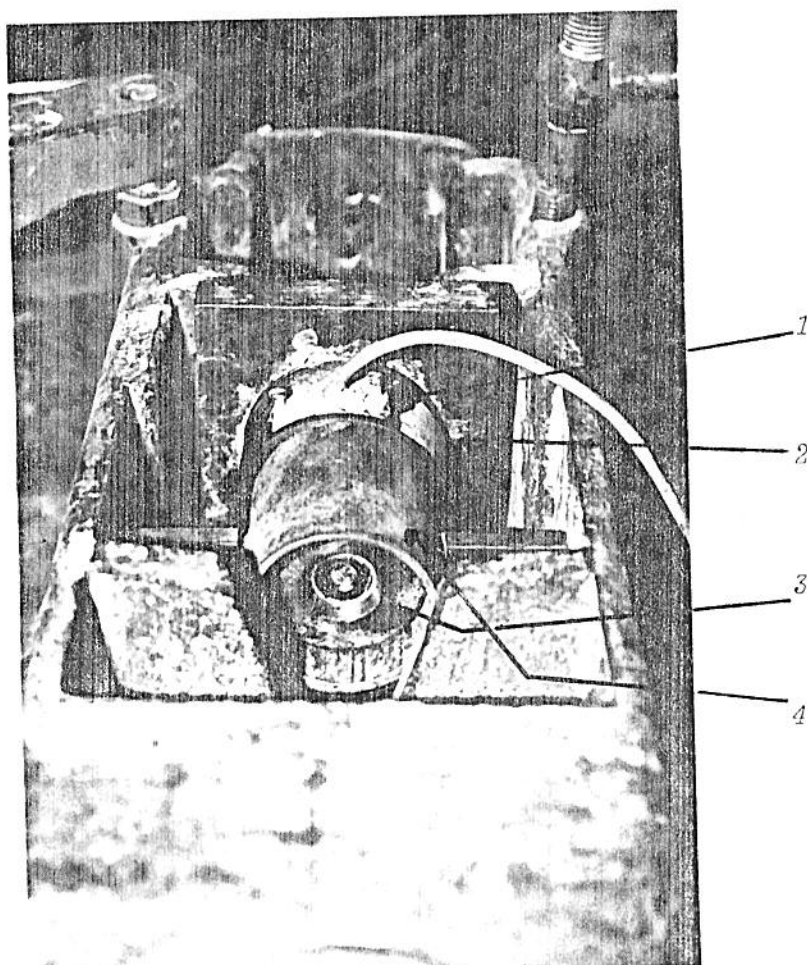


Fig. 6.7 - Montagem do Sistema de Medição

- 1 - Célula de carga*
- 2 - Placa suporte*
- 3 - Fieira*
- 4 - Tubo*

Esta série teve como objetivo, além de diminuir a imprecisão do sistema de medida, testar a influência do filme lubrificante conseguidos nos passes de trefilação anteriores, isto é, desde 5,00 até 3,00mm. Os testes foram realizados com a retirada deste filme residual através de um lixamento manual usando-se lixas de granulometria 600.

Após foram aplicados os seguintes lubrificantes em 4 passes de trefilação: imbralub BS/SEX e drilibe 1600. Imbralub BS/CM e Imbralub BS/CFE.

Aplicou-se também os porta-lubrificantes bórax e fosfato ao arame 3,00 mm lixado da mesma maneira descrita anteriormente. Usou-se como lubrificantes nestes casos, imbralub bs/cfe. A aplicação de bórax e fosfato está descrita a seguir:

- Procedimento para fosfatização

1. Desengraxe

agente desengraxante utilizado: percloroetileno

2. Decapagem

decapagem realizada com solução de HCl 10%, contendo 5 cc/l de arkopal e 1 g/l de butinodiol como inibidor

3. Fosfatização

Foi utilizado fosfato de zinco com concentração igual a 5% a uma temperatura superior a 80°C em um tempo correspondente a 30 minutos.

4. Neutralização

Utiliza-se nesta etapa uma solução de bórax 5%, sendo o tempo de imersão equivalente a 5 minutos.

5. Secagem

Secagem realizada mediante a ação de ar quente .

Obs.: Entre as etapas 1,3,2 e 4 acima descritas ocorre uma operação de lavagem.

- Procedimento para aplicação de bórax

1. Desengraxe

Desengraxe químico alcalino a 80°C durante 10 minutos.

2. Decapagem

Igual a aplicada para fosfatização.

3. Aplicação de Bórax.

Aplicou-se bórax com concentração 20% a uma temperatura superior a 80°C em um tempo correspondente a 30 minutos.

4. Secagem

Secagem realizada mediante a ação de ar quente.

A tabela 6.7 ilustra os resultados obtidos nesta série. A Fig. 6.8 mostra os resultados da força medida em função das reduções adotadas.

A fim de ilustrar alguns registros de força vê-se nas figuras 6.9 a 6.14 os resultados da 1^a série para o lubrificante Dri Lube 1600.

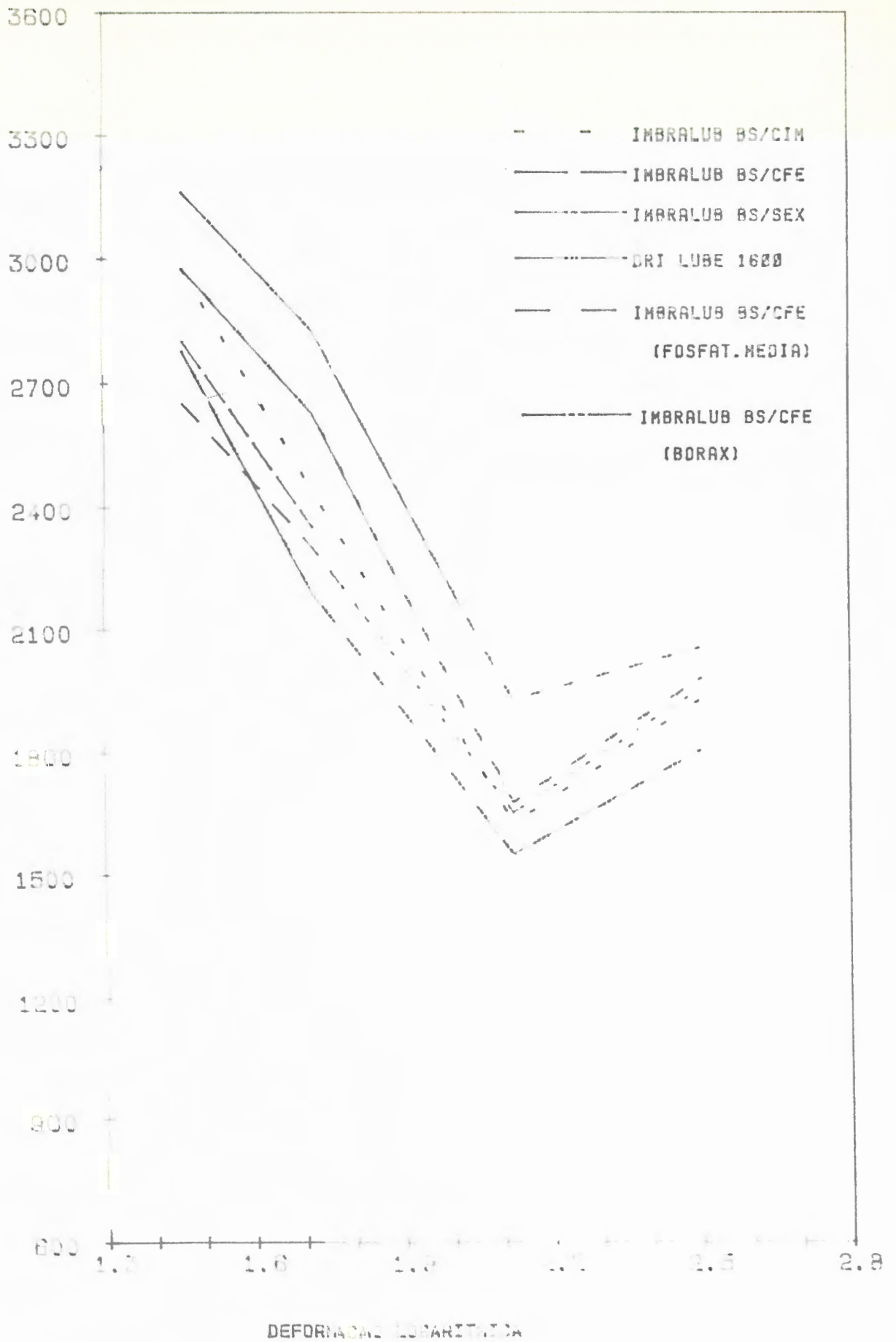
Tab. 6.7 - Valores de força com as respectivas imprecisões

(4ª série de testes)

| Nº de passe | Redução de diâmetros (mm) | $\varphi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | LUBRIFICANTE / FORÇA (N) | | | | | |
|-------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------|------------|---------------|-----------------|-----------|
| | | | IMB. BS/CIM | IMB. BS/CFE | IMB.BS/SEX | DRI LUBE 1600 | IMB. BS/CFE | |
| | | | | | | | FOSFATIZ. MÉDIA | BÓRAX |
| 1ª | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 2975 ± 59 | 2800 ± 56 | 3162 ± 63 | 2975 ± 59 | 2650 ± 53 | 2775 ± 55 |
| 2ª | 2,65 - 2,32 | 0,266 | 2437 ± 49 | 2350 ± 47 | 2825 ± 56 | 2625 ± 52 | 2300 ± 46 | 2187 ± 44 |
| 3ª | 2,32 - 2,20 | 0,106 | 1625 ± 32 | (*) | 1925 ± 38 | 1675 ± 33 | 1650 ± 33 | 1550 ± 31 |
| 4ª | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 1925 ± 38 | (*) | 2050 ± 41 | 1975 ± 39 | 1950 ± 39 | 1800 ± 36 |

(*) Não realizaram-se medições

FORÇA (N)



DEFORMAÇÃO LOGARITMICA

Fig. 6.8 - Valores de Força Medidos (4ª Série)

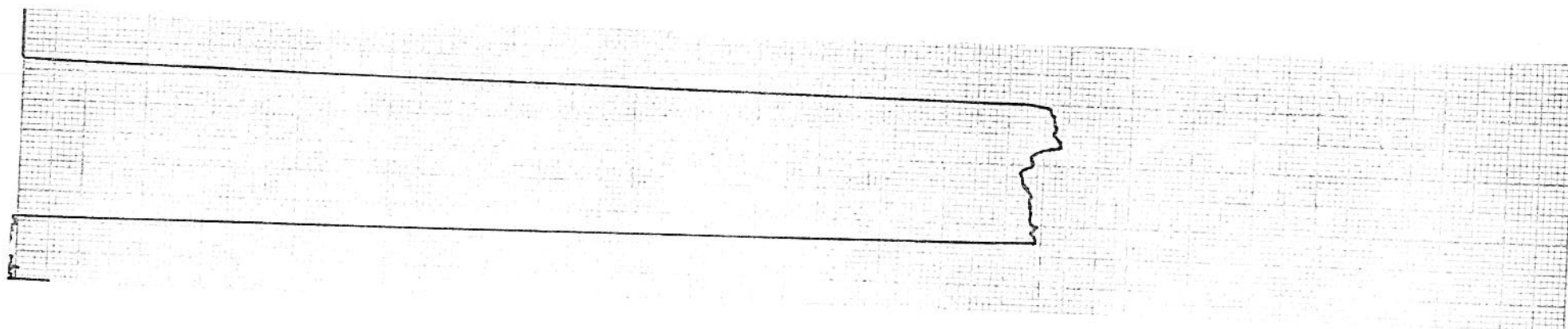


Fig. 6.9 - Lubrificante Dri Lube - 1600, 1^o passe: 3,00 2,65 mm

Fundo de Escala: 500 mV

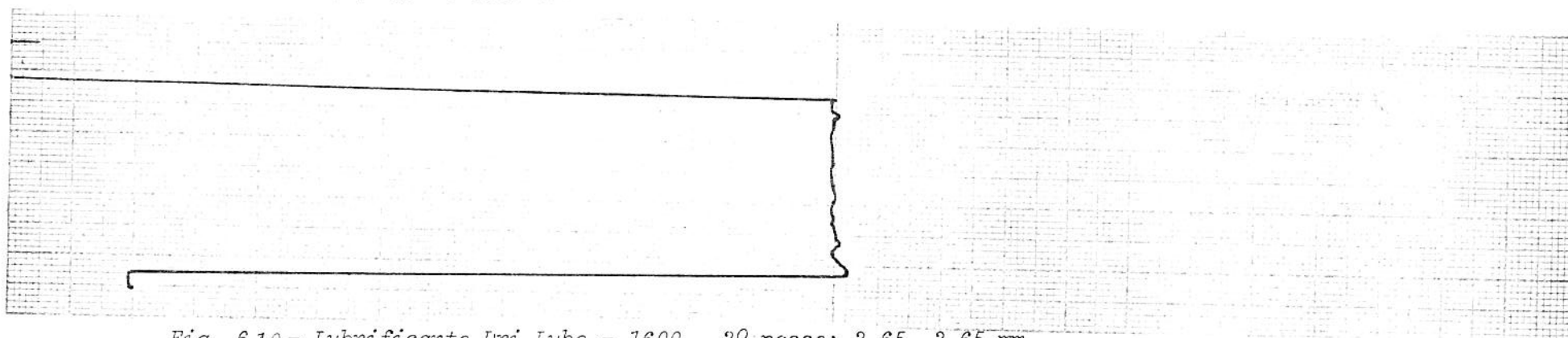


Fig. 6.10 - Lubrificante Dri Lube - 1600, 2^o passe: 2,65 2,65 mm

Fundo de Escala: 500 mV



Fig. 6.11 - Lubrificante: Dri Lube 1600 , 30° passe: 2,32 2,20 mm

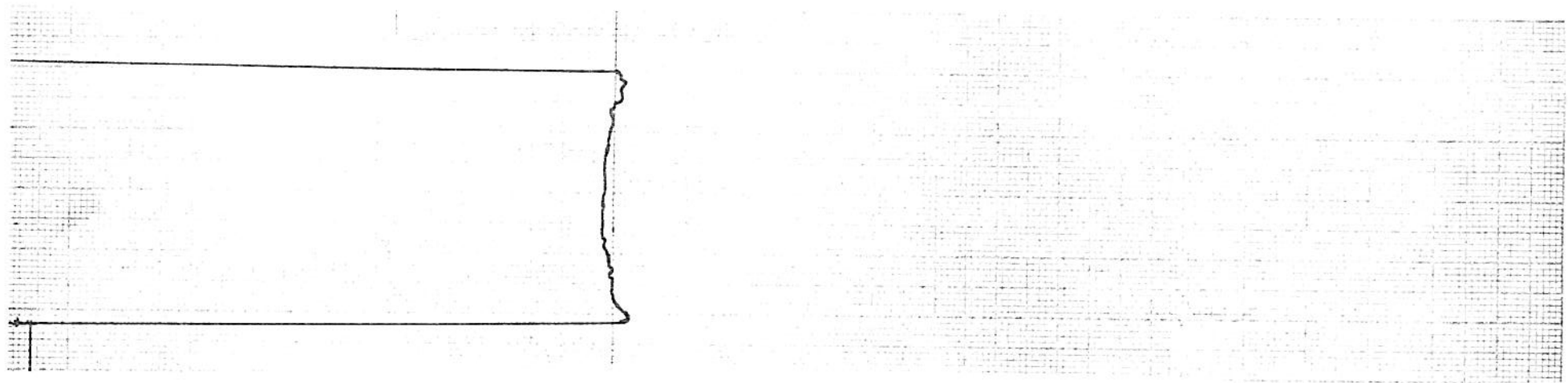


Fig. 6.12 - Lubrificante: Dri Lube 1600 , 40° passe: 2,20 1,90 mm

Fundo de Escala: 500 mV



Fig. 6.13 - Lubrificante: Dri Lube - 1600 , 5^o passe: 1,90 1,75 mm

Fundo de Escala: 500 mV



Fig. 6.14 - Lubrificante: Dri Lube - 1600 , 6^o passe: 1,75 1,57 mm

Fundo de Escala: 500 mV

7 - Análises Gerais do Arame e do Lubrificante

7.1 - Objetivo dos Testes

Os testes a seguir foram realizados para se ter uma idéia e garantia da qualidade do arame ao longo de todo o rolo. A constância de qualidade do material é fundamental para a comparação de forças medidas com os diferentes lubrificantes.

7.2 - Ensaio Propostos

7.2.1 - Ensaio de tração

Realizaram-se ensaios de tração em corpos de prova obtidos em cada passe de trefilação da segunda e terceira série de testes. Para fins de comparação entre os corpos de prova dos respectivos diâmetros, deu-se ênfase a força e tensão máxima suportada pelo arame. As figuras 7.1 e 7.2 ilustram sequências de testes de tração realizados em corpos de prova da matéria-prima (arames com diâmetro 3,00 mm) e arames com diâmetro 2,66 mm obtidos na trefilação da segunda série de testes com 5 tipos de sabões lubrificantes.

A Fig. 7.3 apresenta a comparação entre as tensões máximas medidas nos ensaios de tração nos oito lubrificantes utilizados, considerando deformações relativas (ϵ) e verdadeiras (ψ) em área desde o arame com diâmetro 3,00 mm.

7.2.2 - Ensaio de Dureza

Utilizando-se o mesmo procedimento adotado no ensaio de tração, foram extraídos corpos de prova e embutiu-se os mesmos, devido suas pe-

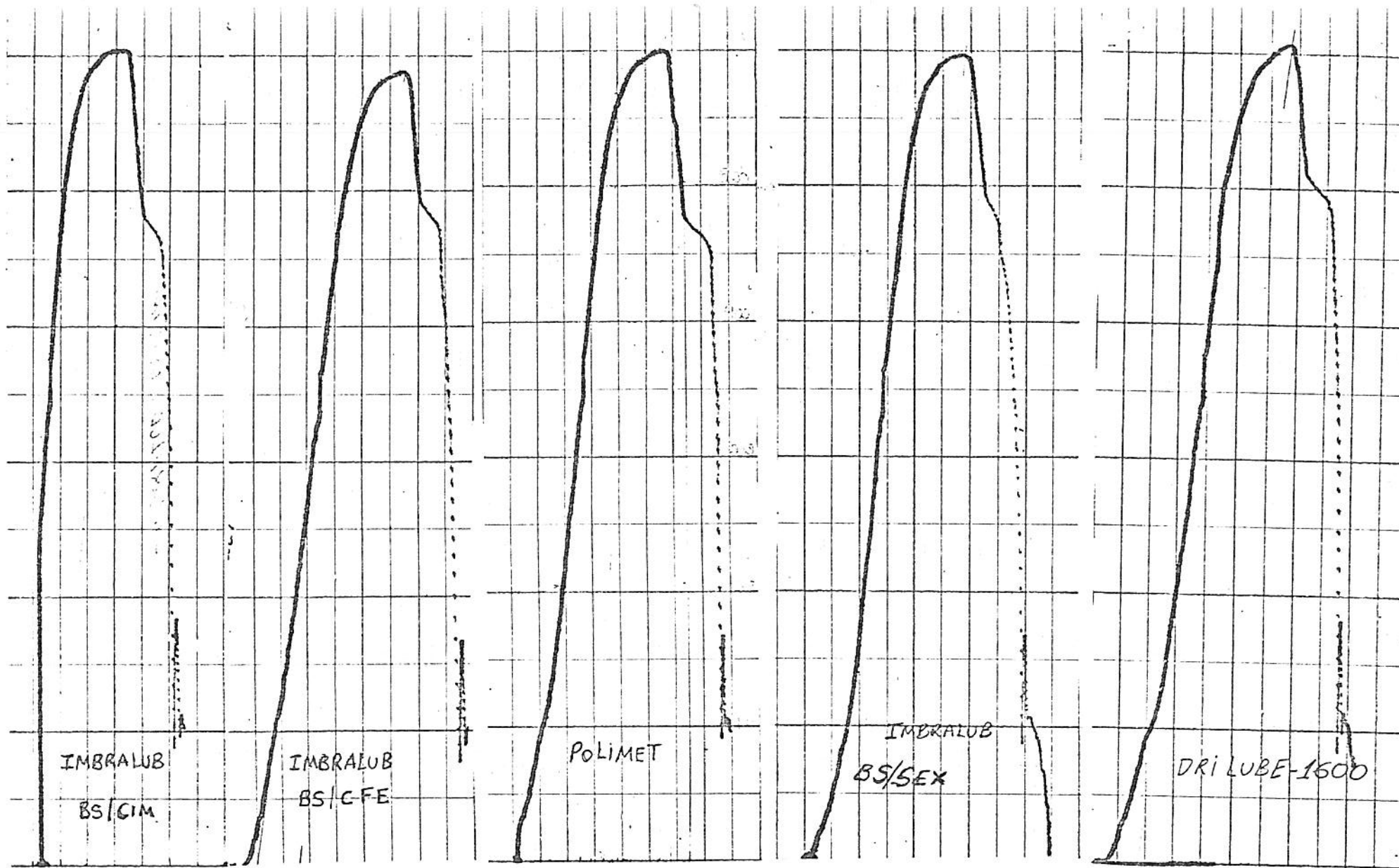


Fig. 7.1 - Testes de Tração com os Cinco Corpos de Prova Considerando os Lubrificantes ($d_o = 3,0 \text{ mm}$)

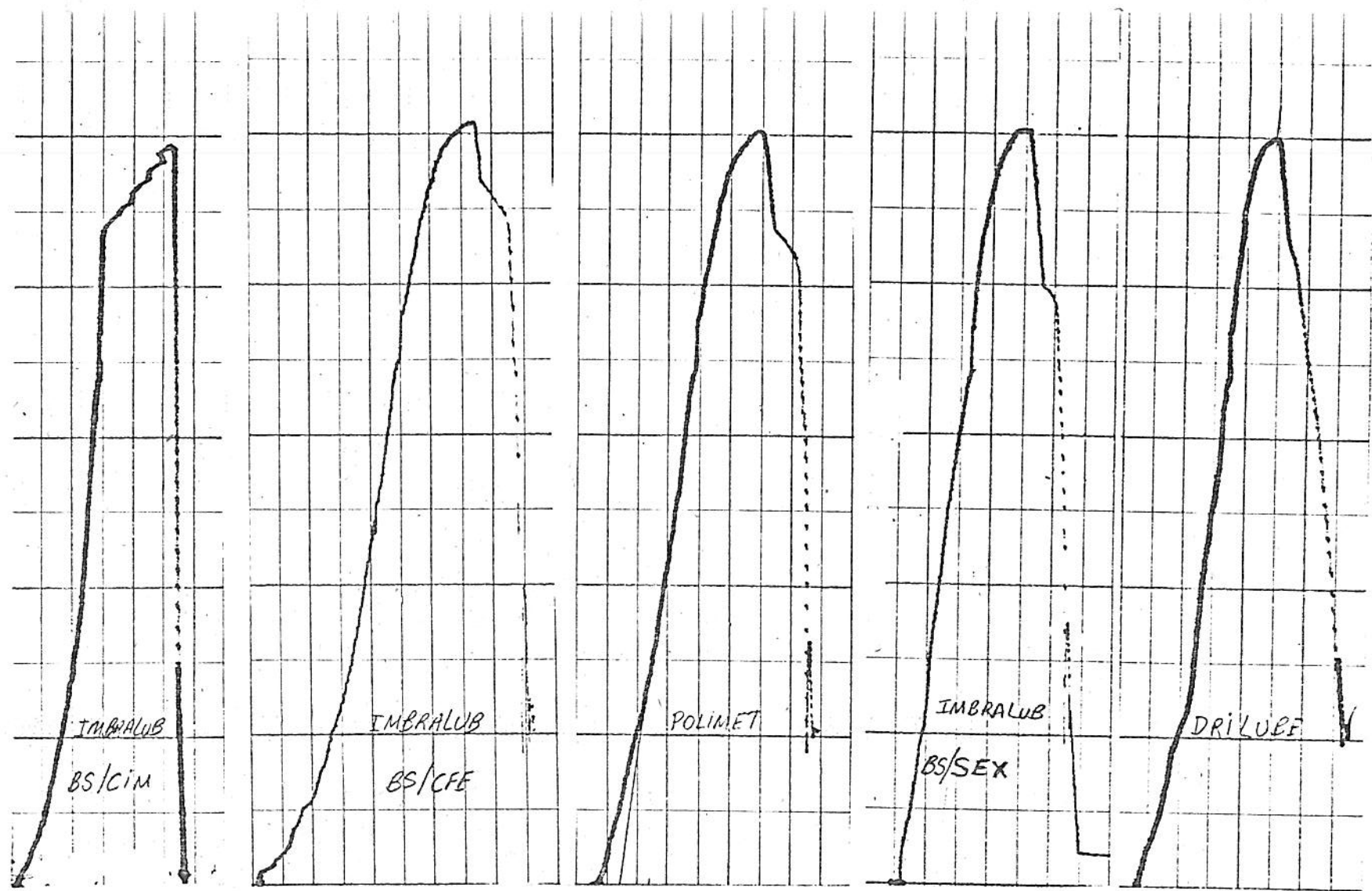


Fig. 7.2 - Testes de tração com o arame 2,66 mm considerando os lubrificantes

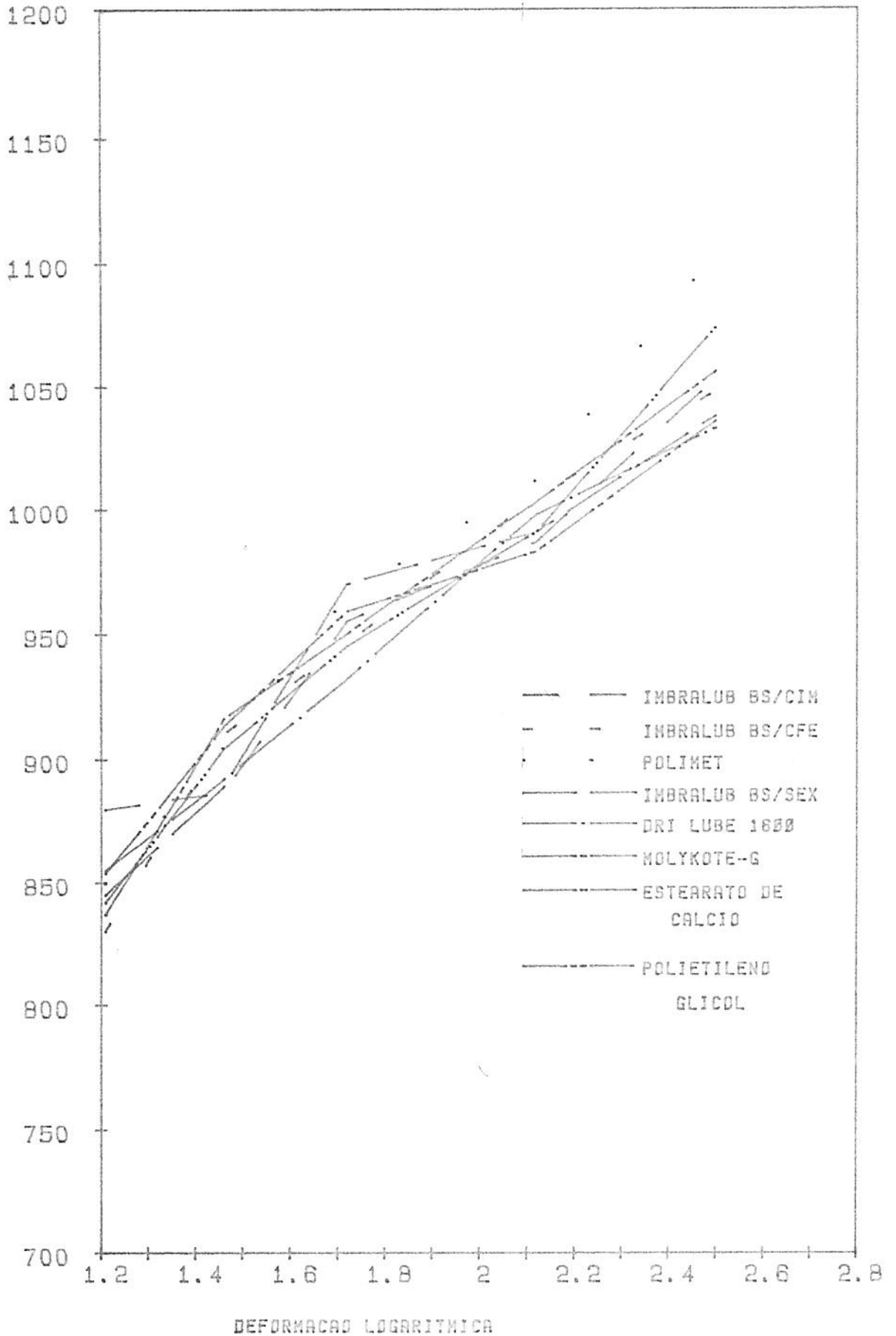
TENSÃO MÁXIMA (N/MM²)

Fig. 7.3 - Comparação entre as tensões máximas nos 8 lubrificantes (2ª série e 3ª série)

quenas dimensões, para ensaios de dureza. A Fig. 7.4 ilustra a maneira de embutimento utilizada.

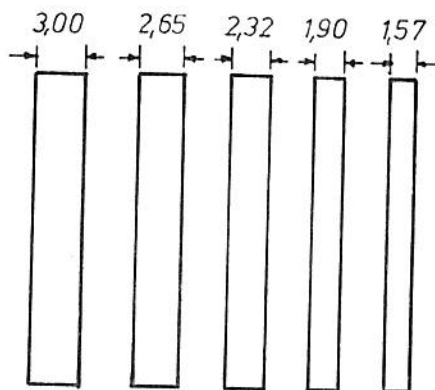


Fig. 7.4 - Corpos de Prova embutidos em Seções Longitudinais

O aparelho utilizado foi um microdurômetro Leitz Wetzlar com escala vickers e a carga foi de 100 gramas. Escolheram-se seções longitudinais para se fazer medições de dureza, devido a problemas de escorregamento da pirâmide quando utilizaram-se seções transversais.

Por se tratar apenas de comparações do material ao longo do rolo, não realizaram-se medições de dureza em todos os corpos de prova da 2^a série de testes, escolhendo-se aleatoriamente o lubrificante Imbralub BS/CIM e Molykote-G para representar todos os passes. Entretanto, estes testes foram realizados em todos os corpos de prova com diâmetro 3.00 mm dos diversos lubrificantes desta série. Para a 3^a série de testes foram feitas medições em todos os corpos de prova.

As tabelas 7.1 e 7.2 apresentam a comparação entre as medidas obtidas no ensaio de dureza e os limites de resistência obtidos nos ensaios de tração.

Nota-se nestas tabelas que existe pouca diferença nas medidas de dureza nos arames com diâmetro 3,00 mm que posteriormente foram trefilados com os lubrificantes Imbralub BS/CIM, Imbralub BS/CFE , Imbralub Sex, Dri Lube-1600, Molykote-G e estearato de cálcio; sendo que as diferenças mais acentuadas estão nos arames 3,00 mm trefilados com os lubrificantes Polimet e Polietileno Glicol-4000.

Também observa-se que não existe uma diferença nítida entre as tensões máximas obtidas nos ensaios de tração com os arames de diâmetros 3,00 mm e os arames com bitolas menores.

Analisando-se as durezas obtidas com os arames trefilados com os diversos lubrificantes, pode-se observar o efeito do encruamento no material, pois, a medida que o material vai sendo trefilado, ocorre deformações nos seus grãos que ficam mais alongados e conseqüentemente sua dureza e resistência mecânica aumentam. As Figuras 7.5 a 7.8 ilustram este fenômeno.

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios de tração e de dureza, pode-se concluir que o material é homogêneo para efeitos de análise de lubrificantes. A única diferença sensível está nas medições de dureza efetuadas nos arames com diâmetros 3,00 mm e que posteriormente foram trefilados com os lubrificantes polietileno glicol-4000 e polimet; entretanto estas diferenças podem ser justificadas pelas próprias imprecisões do sistema de medida ou mesmo alguma imperfeição casual no material.

Tab. 7.1 - Comparação entre as propriedades do material
(2ª Série de testes)

| PROPRIEDADES | LUBRIFICANTE / DIÂMETROS (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|---------|------|------|-----------------|------|------|--------------------|------|---------------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|---|------|------|
| | IMBRALUB BS/CIM | | | | | IMBRALUB BS/CFE | | | | POLIMET | | | IMBRALUB SEX | | | DRI LUBE - 1600 | | MOLY KOTE - G | | | | | | | | | | | | |
| | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | | | | | | | | | | |
| DUREZA (HV) | 252 | 259 | 267 | 283 | 289 | 236 | | | | | 230 | | | | 253 | | | | | | 250 | 253 | 260 | 286 | 327 | | | | | |
| TENSÃO MÁXIMA ENSAIO DE TRAÇÃO N/mm ² | 880 | 887 | 955 | 987 | 1053 | 830 | 910 | 946 | 1005 | 1048 | 850 | 905 | 965 | 995 | 1105 | 845 | 889 | -- | 991 | 1038 | 855 | 892 | 932 | 998 | 1033 | 867 | 916 | - | 1003 | 1056 |

Tab. 7.2 - Comparação Entre as Propriedades do Material

(3^a Série de Testes)

| PROPRIEDADES | LUBRIFICANTES / DIÂMETROS (mm) | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------|---------------------------|------|------|------|------|----------------------------|------|------|------|------|
| | IMBRALUB BS/CFE (ARAME COM FOSFATI ZAÇÃO MÉDIA) | | | | | ESTEARATO DE CÁLCIO | | | | | POLIETILENO GLICOL 4000 | | | | |
| | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 | 3,00 | 2,65 | 2,32 | 1,90 | 1,57 |
| DUREZA (HV) | 241 | 266 | 269 | 277 | 280 | 266 | 269 | 270 | 281 | 292 | 181 | 231 | 245 | 278 | 301 |
| TENSÃO MÁXIMA ENSAIO DE TRAÇÃO N/mm ² | - | - | - | - | - | 842 | 904 | 945 | 991 | 1074 | 854 | 913 | 959 | 983 | 1036 |

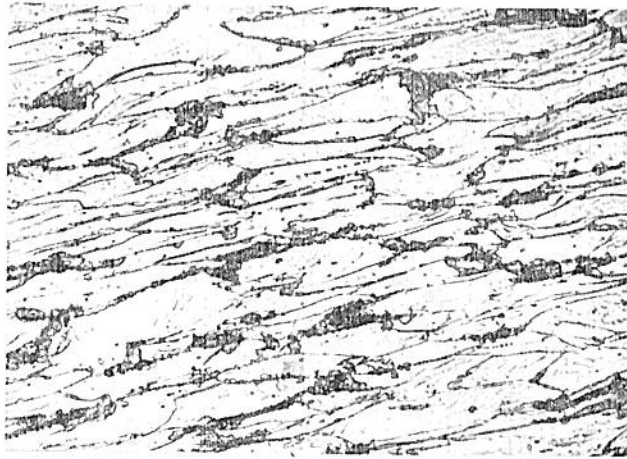


Fig. 7.5 - Arame com diâmetro 3,00 mm - Corte longitudinal
Grãos claros de ferrita e grãos escuros de perlita
Ataque: Nital 2%
Aumento: 500 X



Fig. 7.6 - Arame com diâmetro 2,65 mm - Corte longitudinal
Grãos claros de ferrita e grãos escuros de perlita
Ataque: Nital 2%
Aumento: 500 X

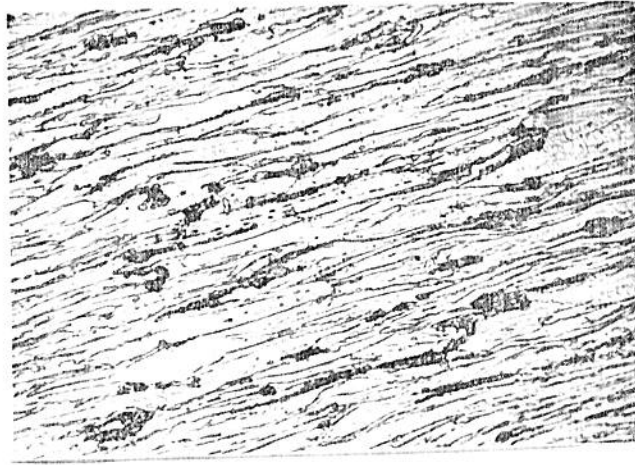


Fig. 7.7 - Arame com diâmetro 1,90 mm - Corte longitudinal

Ataque: Nital 2%

Grãos claros de ferrita e grãos escuros de perlita

Aumento: 500 X

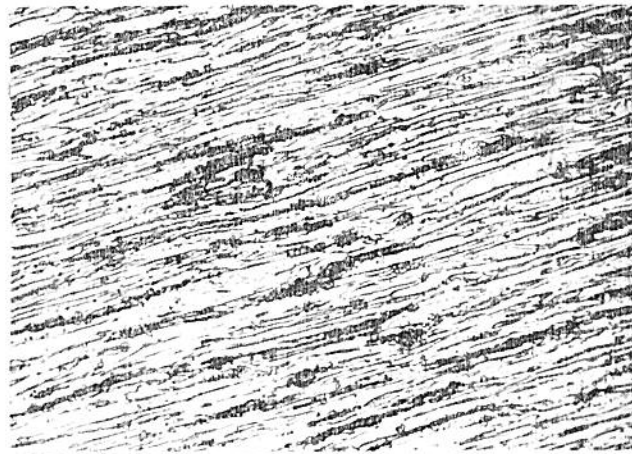


Fig. 7.8 - Arame com diâmetro 1,57 mm - Corte longitudinal

Ataque: Nital 2%

Grãos claros de ferrita e grão escuros de perlita

Aumento: 500 X

7.2.3 - Medições de Rugosidade nos Arames Trefilados

Sabe-se o acabamento superficial de um determinado material exerce influência direta sobre a lubrificação; no caso específico de trefilação a seco, a rugosidade é responsável pelo arraste de lubrificante para dentro da fieira.

O objetivo ao teste de rugosidade nos arames foi o de se analisar o comportamento da mesma durante a trefilação, fazendo-se uma análise entre as rugosidades obtidas com diversos lubrificantes da segunda série e polietileno glicol da terceira. Esta análise indica se ocorre ou não decréscimo na camada residual de lubrificante ao longo dos passes de trefilação e alisamento da superfície do arame.

Os testes de rugosidade foram realizados em um rugosímetro Taylor-Hobson modelo Talysrtf-4 no sentido longitudinal dos corpos de prova obtidos em cada passe de trefilação usando como lubrificantes: Imbralub bs/cfe, Dri Lube-1600, Malykote-G e ainda o porta-lubrificante fosfato de zinco. Foram realizadas três medidas em cada corpo de prova e efetuou-se uma média entre elas. (Tab 7.3).

Observou-se que a matéria-prima dos testes apresentava diferenças sensíveis nos valores de rugosidade medidos em dois pontos diametralmente opostos.

Considerou-se para a análise os maiores valores, porque na trefilação a seco é a maior rugosidade que tem efeito mais significativo na lubrificação. Esta diferença de rugosidade não é eliminada ao longo dos passes de trefilação. Deve ser, portanto, oriunda do processo de tratamento químico a que o fio-máquina é submetido, com a solução de bórax não se depositando uniformemente durante a neutralização, ou mesmo durante a trefilação com o arame sendo submetido a tensões ao passar pela fieira formando um ângulo com esta (Fig. 7.9) ou ao ser enrolado pelo tambor. Este fato pode não ser benéfico na lubrificação a seco pois tem-se em uma mesma região do arame uma superfície com

rugosidade aproximadamente $0,50 \mu_m$ que favorece a maior retenção de lubrificante e outra com rugosidade menor (em torno de $0,15 \mu_m$) onde possivelmente as condições de lubrificação não sejam tão boas; ou seja, nestas condições não se tem um filme uniforme de lubrificante. Segundo Schey /7.1/, a rugosidade é benéfica para lubrificantes sólidos, se a combinação de aspereza e elevação de ondulações é menor do que a espessura do filme lubrificante. Esta afirmação é válida para rugosidade orientadas perpendicularmente à direção de deslizamento ou orientadas aleatoriamente. O filme lubrificante é retido pela rugosidade da superfície. Os resultados das medições de rugosidade estão na Tab. 7.3.

Tab. 7.3 - Medições de rugosidade no sentido longitudinal

| DIÂMETROS (mm) | RUGOSIDADE MÉDIA R_a (μ_m) / LUBRIFICANTE | | | | | |
|-------------------|---|-------------------|---------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| | IMBRALUB BS/CFE | DRI LUBE- 1600 | MOLYKOTE G | POLIETILENO GLICOL 4000 | IMB. BS/ CFE | |
| | | | | | FOSFATIZ. MÉDIA | FOSFATIZ. FINA |
| 3,00 | 0,40 | - | 0,74 | - | 2,40 | 1,30 |
| 2,66 | 0,59 | 0,52 | 0,44 | 0,75 | 2,20 | 1,85 |
| 2,32 | 0,83 | 0,62 | 0,44 | 0,64 | 1,40 | 1,10 |
| 1,90 | 0,72 | 0,46 | 0,60 | 0,55 | 1,80 | 1,15 |
| 1,57 | 0,70 | 0,22 | 0,58 | 0,81 | - | 0,52 |

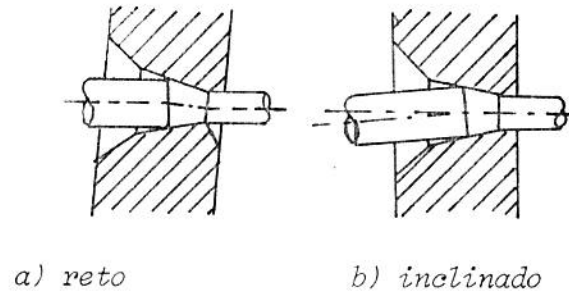


Fig. 7.9 Posições possíveis do arame em relação a fieira /7.2/

7.2.4 - Medições de Granulometria dos Sabões

Sabe-se que, conforme descrito no capítulo 3, a escolha correta de um sabão lubrificante está diretamente relacionada a bitola do material a ser trefilado. Considerando-se este aspecto foram realizadas medições de granulometria em todos sabões lubrificantes utilizados nos testes com a finalidade de facilitar a análise das medições de força de trefilação nos diversos passes.

Para medir a granulometria dos sabões utilizou-se um sistema de peneiras com um sistema vibratório com os seguintes tamanhos de malhas em mesh:

6 , 12 , 20 , 30 , 40 , 50 , 70 , 100 , 140 , 200 e 270.

O tamanho da granulometria média dos sabões foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=0}^{n_p} \phi_i \cdot \bar{d}_i}{100}$$

onde:

\bar{D} = diâmetro médio do sabão

ϕ_i = Porcentagem retida nas peneiras

\bar{d}_i = Média entre o diâmetro da peneira em que ficou retido o sabão e o da peneira imediatamente maior.

n_p = Número de peneiras

Os resultados de granulometria média podem ser vistos na tabela 7.4 que contém ainda a classificação do tamanho das partículas segundo Wistreich / 3.10/.

Tab. 7.4 - Medições de granulometria com suas respectivas classificações.

| LUBRIFICANTE | GRANULOMETRIA | | CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS |
|-------------------------|---------------|------|---|
| | MICRONS | MESH | |
| DRI LUBE 1600 | 319 | ~ 50 | FINO |
| POLIMET | 448 | ~ 40 | MÉDIO |
| IMBRALUB SEX | 694 | ~ 25 | MÉDIO |
| IMBRALUB BS/CIM | 860 | ~ 20 | MÉDIO |
| IMBRALUB BS/CFE | 913 | ~ 20 | MÉDIO |
| ESTEARATO DE CÁLCIO | 1030 | ~ 15 | GROSSO |
| POLIETILENO-GLICOL 4000 | 1408 | ~ 12 | GROSSO |

8 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1 - Análise dos Modelos Teóricos com a Força Medida

A análise dos modelos teóricos com a força medida é realizada para cada série de testes e resulta no seguinte:

Na primeira série de testes, a tabela 8.1 contém os resultados dos modelos teóricos e o das forças medidas com os diversos lubrificantes; estes resultados também são apresentados em forma de figura para melhor interpretação. As figuras 8.1-a, 8.1-b, 8.1-c, 8.1-d e 8.1-e são elaboradas contendo, cada uma, os resultados de força calculados pelos modelos teóricos comparadas com a força medida para cada lubrificante. Por último tem-se a figura 8.1-f que contém uma comparação entre as forças medidas com os diversos lubrificantes. Nesta série os modelos teóricos que mais se aproximam das forças medidas são os de Siebel, Sachs, Geleji e Discos com a correção da parcela de trabalho redundante, seguido do modelo de Lewis-Mac Lellan. Os modelos teóricos que apresentam maiores discrepâncias são: Palmov e Davis - Dokos.

Para a segunda e terceira série de testes, tem-se os respectivos resultados nas tabelas 8.2 e 8.3. De maneira análoga à primeira série, a tabela 8.2 é também interpretada em figuras correspondentes à segunda série de testes. Estas figuras são 8.2-a, 8.2-b, 8.2-c, 8.2-d, 8.2-e e 8.2-f. A figura 8.2-g contém somente os resultados de força medida. A tabela 8.3, por sua vez, é interpretada nas figuras 8.3-a, 8.3-b, 8.3-c e 8.3-d. A figura 8.3-e contém somente os resultados de força medida. Nestas duas séries, os modelos teóricos que mais se aproximam das forças medidas são os de Siebel, Sachs, Discos e Lewis-Mac Lellan, que nos dois últimos passes, com reduções mais severas, transforma-se de um modelo de precisão média a boa precisão.

O modelo de Geleji; nestas séries, comporta-se com precisão média e os modelos que apresentam maiores discrepâncias são os de Palmov e Davis - Dokos.

Para a quarta série de testes tem-se a tabela 8.4 que é interpretada nas figuras 8.4-a, 8.4-b, 8.4-c, 8.4-d, 8.4-e, e 8.4-f, sendo que a figura 8.4-g contém somente os valores de força referente aos diversos lubrificantes. Nesta série, os modelos teóricos mais precisos comprovados nas outras séries, apresentavam valores em torno de 40% a menos do que a força real. Isto é devido ao coeficiente de atrito utilizado conforme Siebel de 0,65 /4.3/, considerando-se ótimas condições de lubrificação. Sabe-se que este coeficiente de atrito, para as condições de lubrificação utilizadas nos experimentos varia na faixa 0,04 a 0,10. Como nesta série raspou-se o filme residual de lubrificante com lixa 600, elevou-se portanto o coeficiente de atrito, cujo acréscimo pode ser calculado pela expressão de Siebel (4.20) para cálculo de força, onde isolando-se μ tem-se:

$$\mu = -\alpha + \left(\frac{F_1 \cdot \alpha}{A_1 \cdot K_{f_m}} - \frac{2}{3} \alpha^2 \right) \cdot \frac{1}{\varphi_H} \quad (8.1)$$

sendo F_1 a força medida experimentalmente.

De acordo com cálculos efetuados e para valores de força medidos com os diferentes lubrificantes, constata-se que o coeficiente de atrito nesta série chega a ser bem maior que o estipulado. Este fato comprova a importância do filme residual de lubrificante conseguido nos primeiros passes de trefilação que com a utilização de reduções adequadas conserva-se ao longo dos passes. Apenas para ilustrar este fato, a tabela 8.5 apresenta valores de μ calculados através da expressão (8.1) usando-se a força de trefilação medida com o lubrificante Dri Lube 1600 na 1^a e 4^a série; respectivamente com e sem o filme residual de lubrificante. Uma observação importante nesta tabela é a referente a lubrificação da fieira com diâmetro de saída 2,20 mm que com um menor ângulo provoca um aumento no coeficiente de atrito.

Todos estas análises foram feitas considerando-se para os modelos teóricos um coeficiente de atrito $\mu = 0,05$ e boas condições de trefilação; entretanto sabe-se, através de cálculos (eq. 8.1), que este coeficiente, para as condições de lubrificação utilizadas nos experimentos, varia entre 0,04 e 0,10. Então, caso fosse utilizado um coeficiente de atrito maior que 0,05, os modelos teóricos aproximariam-se mais da força medida. Este fato com prova que na prática industrial de trefilação, desde que não se utilize dispositivos tais como fieiras de pressão para se obter lubrificação hidrodinâmica, tem-se lubrificação mista com coeficiente de atrito, geralmente maior que 0,05.

8.2 - Considerações sobre Modelo dos Discos

Observa-se que os modelos de força que incluem em sua formulação as três parcelas necessárias para deformar o material são os mais precisos. Estas três parcelas são: parcela de força referente a deformação homogênea, parcela devido ao atrito e parcela devida ao cisalhamento interno.

O modelo dos Discos tal como é deduzido na literatura /4.5/ não inclui a parcela de cisalhamento interno do material que é da ordem de 30% da força total para deformar o material. Neste trabalho adiciona-se o termo referente ao trabalho redundante deduzido por Johnson e Rowe (8.1) e o modelo dos discos torna-se um modelo de boa precisão. Um procedimento semelhante foi apresentado por Cetlim (4.1) para o método dos blocos.

O interesse numa exploração do Modelo dos discos dá-se ao fato de que o mesmo permite ir um pouco mais além do que simplesmente calcular forças. Pode-se prever algo ainda sobre a distribuição de tensões na zona de deformação. Pode-se também projetar perfis adequados da fieira tais como senoidais, retos côncavos, sempre visando a diminuição de força e conseqüentemente de energia, a fim de se otimizar o processo.

A figura 8.5 ilustra a variação das tensões radiais σ_r e longitudinais (σ_x) que ocorrem internamente na zona de deformação (interior da fieira).

Em uma primeira análise, considerando-se os pequenos ângulos envolvidos na trefilação, uma tensão radial média (σ_r média) obtido pelo modelo dos discos, deveria ser igual a pressão média (q_m) dada pela expressão (5.6); entretanto isso não ocorre porque no modelo dos discos não está considerado a influência do trabalho redundante. Desta maneira os valores de σ_r são em média 30% mais baixos do que os valores de q_m . A tabela 8.6 apresenta os valores de pressão média para alguns lubrificantes.

As tabelas 8.7 e 8.8 apresentam os cálculos de força obtidos pelo modelo dos discos.

Tab. 8.5 - Valores de Coeficiente de Atrito com e sem Filme Residual de Lubrificante.

| Nº PASSE | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | φ_A (= $\ln A_0/A_1$) | SEMI-ÂNGULO α (GRAUS) | μ MÉDIO ESTIPU- LADO | DRI LUBE-1600 | |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | | μ 1ª série | μ 4ª série |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 8 | 0,050 | 0,056 | 0,146 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,265 | 9,5 | 0,050 | 0,044 | 0,185 |
| 3 | 2,32 - 2,20 | 0,106 | 6,5 | 0,050 | 0,103 | 0,289 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 8,0 | 0,050 | 0,033 | 0,148 |

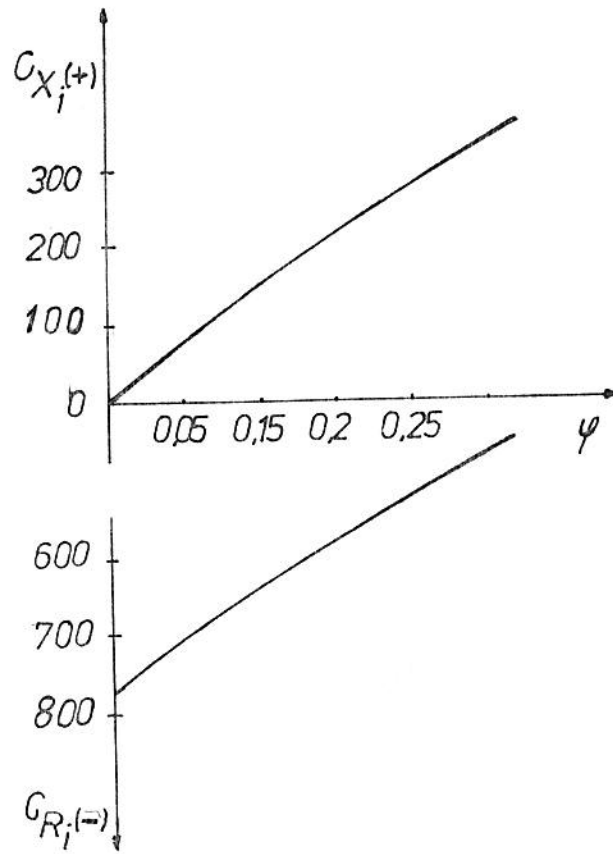


Fig. 8.5 - Representação da variação da tensão na zona de deformação

8.3 - Análise de Lubrificantes

Considerando-se as condições em que foram testados os lubrificantes, isto é, geometria da fieira, velocidade de trefilação e características do material tais como: composição química, homogeneidade, bitola, aparência externa, etc, pode-se fazer comparações dos mesmos em função dos resultados obtidos de força medida, tensão de trefilação, granulometria e rugosidade superficial do arame.

- Na primeira, segunda e terceira série não se nota diferenças sensíveis nas forças medidas com os diversos lubrificantes, sendo que as maiores discrepâncias entre eles estão na faixa entre 7 e 15%. Também observa-se que o comportamento dos lubrificantes não é uniforme; por exemplo, na primeira série de testes o lubrificante Dri Lube-1600 apresentou menores valores de forças nas quatro primeiras reduções e nas duas últimas o melhor lubrificante foi Imbralub BS/CFE, na segunda e terceira série o lubrificante Polietileno Glicol 4000 apresenta menores valores de força nas três primeiras reduções e na última é ultrapassado pelos lubrificantes Imbralub BS/CFE e Dri Lube-1600. Isto pode ser explicado por três motivos:

- A matéria-prima dos testes apresenta diferenças sensíveis na rugosidade e conseqüentemente no filme residual de lubrificante em uma mesma região do arame.

- A adição de mais lubrificante com características semelhantes em um arame que já possui um filme residual de lubrificante tem pouco efeito com relação a redução de força.

- A imprecisão da célula de carga simplesmente anteposta a fieira é de $\pm 5\%$, o que também dificulta uma análise mais apurada dos lubrificantes.

Em vista disto, considerando-se a granulometria dos sabões, bitolas e estado do material, todos os lubrificantes testados, com exceções do Molykote G e Imbralub BS/SEX, são eficientes desde que conservadas as condições básicas de lubrificação. Não existe, contudo, uma clara tendência que justifique que o sabão com menor granulometria deva ser usado para menores bitolas

nores bitolas de arames, conforme citado na literatura 3.5.

Duas observações importantes são as referentes aos lubrificantes ImbralubBS/SEX e Molykote-G, que apresentaram em alguns casos, valores de forças superiores aos outros lubrificantes. Isto pode ser justificado para estes lubrificantes que, por suas próprias características, são indicadas para materiais onde deseja-se acabamento brilhante e não especificamente para reduzir a força; já o Molykote-G é indicado pelos fornecedores para trefilação desde que acompanhado com sabão a base de dissulfeto de molibdênio.

Comparando-se os resultados de força obtidos na 2^a e 3^a série de testes com o arame não tratado e o fosfatizado e lubrificado com Imbralub BS/CFE, observa-se que, mesmo com a aplicação de fosfato, as forças medidas são maiores. Isto comprova que a fosfatização aplicada em cima de filme de lubrificante em um arame já deformado, não causa benefício na lubrificação.

Também é notado na terceira série que o arame com fosfatização média entre (4,34 a 7,61 gr/m²) apresentou menores valores de força do que o arame com fosfatização fina (entre 1,09 a 4,34 gr/m²). Este fato concorda razoavelmente bem com a literatura /7.1/, pois o arame com maior rugosidade transporta maior quantidade de lubrificante para dentro da fieira. Outra observação nesta série é a referente ao desempenho do lubrificante Polietileno-glicol 4000; um lubrificante não específico para trefilação e que, mesmo com uma granulometria grosseira, apresentou características boas de lubrificação em todos os passes. Isto pode comprovar a eficiência dos lubrificantes a base de materiais sintéticos.

Analisando-se a quarta série de testes, observou-se que quando se elimina a película residual de lubrificante, os valores de força são bem maiores, em virtude do atrito ser maior. Porém, mesmo nestas condições de testes que fogem da prática industrial de trefilação, o lubrificante que mostra melhor desempenho é o Imbralub BS/CFE nos dois primeiros passes e Imbralub BS/CIM nos dois últimos. As diferenças de força medida entre os lubrificantes

desta série nos diversos passes, de um modo geral, situa-se na faixa entre 3 e 17%. Exclui-se desta análise o arame submetido a tratamento químico.

Outra observação importante na quarta série de testes é que com a aplicação dos porta-lubrificantes fosfato e bórax em um arame sem filme lubrificante, consegue-se diminuir a força de trefilação possibilitando que maior quantidade de lubrificante seja arrastado para o interior da fibra. Nota-se, ainda, que um filme residual de lubrificante começa a aderir-se ao arame durante os passes de trefilação causando um decréscimo na força. Isto comprova a eficiência de fosfato e bórax aplicados, neste caso, em um arame já bastante deformado. Dos dois porta-lubrificantes o que mostrou melhor desempenho foi o Bórax; isto pode ser justificado pelo fato de que a fosfatação é indicada como efetiva a altas velocidades, altas deformações e para aços com alto conteúdo de carbono.

As tabelas 8.9 a 8.12 e figuras 8.9 a 8.12 contêm as tensões de trefilação para as quatro séries testadas. As análises de lubrificantes podem ser realizados através destas tensões e provavelmente fornecem os mesmos resultados obtidos com a análise de força; entretanto, são aqui citadas para dar uma idéia sobre a energia que está sendo consumida em cada passe. Por exemplo, na primeira série de testes Fig. (8.9) é visível o decréscimo da tensão no terceiro e quinto passe, consumindo em média 21% da potência do equipamento. Este fato comprova que estas reduções são anti-econômicas.

Na tabela 8.6 procura-se mostrar a possível interligação entre os parâmetros que estão diretamente envolvidos no processo de trefilação. Para efeitos de comparação, contêm resultados apenas da segunda série de testes, com exceção do polietileno glicol.

Analisando-se a tab. 8.6 observa-se que a tendência geral é que os arames que apresentam maiores rugosidades nas camadas de filmes lubrificantes são trefilados com menores forças e os arames com menores rugosidades geralmente exigem maiores forças para serem trefilados. Uma exceção desta análise é a referente ao lubrificante pastoso Molykote-G que da maneira que foi utilizado, diluído em óleo sintético, não apresentou boas características de lubrificação. O rendimento deste produto poderia ser melhor desde que fosse acompanhado com sabão a base de dissulfeto de Mobidênio; entretanto esta hipótese não foi testada.

Observa-se também, na tab. 8.6, que a pressão média na parede da fieira aumenta com reduções menores. Este fato já foi observado em trabalhos anteriores: Westreich /5.1/, Klein /1.9/ e Casanova/1.10/. Comparando-se apenas os lubrificantes contidos nesta tabela, constata-se que o lubrificante Polietileno Glicol-4000 apresentou a menor pressão média nos três primeiros passes e conseqüentemente a melhor lubrificação. No último passe os melhores lubrificantes foram Imbralub BS/CFE e DRI LUBE-1600. Constata-se também que o Molykote-G apresentou os maiores valores de pressão média e conseqüentemente a pior lubrificação.

Pela análise de dureza e resistência à tração do material, considerando-se as imprecisões do Sistema de medição, constata-se que a matéria-prima do lubrificante Molykote-G apresenta maior dureza e resistência mecânica que a dos outros lubrificantes. Esta característica conserva-se nas reduções posteriores.

Tab. 8.6 - Parâmetros envolvidos na trefilação
(2ª Série de Testes)

| DIÂMETRO D ₀ ARAME (mm) | $\psi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | LUBRIFICANTE | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO N/mm ² | DUREZA (HV) | FORÇA MEDI- DA (N) | TENSÃO DE TREFI- LAÇÃO N/mm ² | PRESSÃO MÉDIA qm (N/mm ²) | RUGOSIDADE Ra (μm) |
|--|--------------------------------|----------------|--|----------------|-----------------------------|--|---|-----------------------|
| 3,00 | 1,21 | IMB. BS/CFE | 830 | - | - | - | - | 0,40 |
| | | MOLYKOTE | 837 | 250 | - | - | - | 0,74 |
| | | DRI LUBE 1600 | 855 | 256 | - | - | - | - |
| | | POLIET. GLICOL | 854 | 181 | - | - | - | - |
| 2,65 | 0,2481 | IMB. BS/CFE | 910 | - | 2012 | 365 | 957 | 0,59 |
| | | MOLYKOTE | 916 | 253 | 2137 | 387 | 1016 | 0,44 |
| | | DRI LUBE 1600 | 892 | - | 1987 | 360 | 945 | 0,52 |
| | | POLIET. GLICOL | 913 | 231 | 1975 | 358 | 939 | 0,75 |
| 2,32 | 0,2660 | IMB. BS/CFE | 946 | - | 1750 | 414 | 1047 | 0,83 |
| | | MOLYKOTE | - | 260 | 2125 | 503 | 1107 | 0,44 |
| | | DRI LUBE 1600 | 932 | - | 1837 | 434 | 1099 | 0,62 |
| | | POLIET. GLICOL | 959 | 245 | 1725 | 394 | 871 | 0,64 |
| 1,90 | 0,3994 | IMB. BS/CFE | 1005 | - | 1600 | 564 | 849 | 0,72 |
| | | MOLYKOTE | 1003 | 286 | 1875 | 661 | 1021 | 0,60 |
| | | DRI LUBE 1600 | 998 | - | 1675 | 591 | 888 | 0,46 |
| | | POLIET. GLICOL | 983 | 278 | 1650 | 582 | 875 | 0,55 |
| 1,57 | 0,3816 | IMB. BS/CFE | 1025 | - | 1112 | 574 | 880 | 0,70 |
| | | MOLYKOTE | 1056 | 327 | 1312 | 678 | 1038 | 0,58 |
| | | DRI LUBE 1600 | 1033 | - | 1112 | 574 | 880 | 0,22 |
| | | POLIET. GLICOL | 1036 | 301 | 1200 | 620 | 949 | 0,81 |

DADOS GERAIS PARA TODOS OS PASSOS

| ABSCISSAS | ORDEMADAS |
|-----------|-----------|
| 1,2 | 785 |
| 1,7 | 815 |
| 1,8 | 817 |
| 1,9 | 875 |
| 2 | 908 |
| 2,2 | 920 |
| 2,4 | 945 |
| 2,6 | 970 |

COEFICIENTE DE ATRITO : .05

FIEIRA NUMERO : 1 SEMI-ANGULO : 8

DIAMETRO INICIAL : 2 DIAMETRO FINAL : 2.65

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|------------------------------|-------|----------|------------------|---------------|
| 1 | 0 | 772.7107 | 29.8172 | -719.0935 |
| 2 | .0234 | 777.6698 | 49.3129 | -728.3059 |
| 3 | .0472 | 782.611 | 71.2497001 | -708.3913 |
| 4 | .0712 | 787.6363 | 99.1219 | -688.2011 |
| 5 | .0955 | 792.6456 | 121.864 | -667.7817 |
| 6 | .1202 | 797.6717 | 150.5503 | -647.1215 |
| 7 | .1451 | 802.7116 | 176.1956 | -626.219 |
| 8 | .1703 | 807.771 | 202.7046 | -605.0595 |
| 9 | .1958 | 812.8498 | 229.1822 | -583.6677 |
| 10 | .2218 | 817.9418 | 255.6334 | -562.0584 |
| FORÇA NECESSARIA : 1750.7154 | | | FI TOTAL : .2218 | |

Tab. 8.7 - Valores de Força obtidos pelo Modelo dos Discos (6 passes)
continua ...

FIEIRA NUMERO : 2 SEMI-ANGULO : 9.5

DIAMETRO INICIAL : 2.65

DIAMETRO FINAL : 2.32

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|-------|-------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 0 | 817.9418 | 28.4561 | -789.1957 |
| 2 | .025 | 822.8211 | 55.2516 | -767.5695 |
| 3 | .0504 | 827.7147 | 82.3406 | -745.3742 |
| 4 | .0761 | 832.6224 | 109.7287 | -722.8937 |
| 5 | .1021 | 837.5439 | 137.4219 | -700.1221 |
| 6 | .1285 | 842.4788 | 165.4261 | -677.0528 |
| 7 | .1553 | 847.427 | 193.7178 | -653.6792 |
| 8 | .1824 | 852.3879 | 222.3933 | -629.9946 |
| 9 | .2098 | 857.3613 | 251.3693 | -605.892 |
| 10 | .2377 | 862.3466 | 280.6827 | -581.664 |

FORÇA NECESSARIA : 1528.93858

FI TOTAL : .2377

FIEIRA NUMERO : 3 SEMI-ANGULO : 6.5

DIAMETRO INICIAL : 2.32

DIAMETRO FINAL : 2.2

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|-------|-------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 0 | 862.3466 | 12.2136 | -849.133 |
| 2 | .0103 | 864.1882 | 26.1285 | -838.0597 |
| 3 | .0207 | 866.0313 | 39.0784 | -826.9528 |
| 4 | .0312 | 867.8759 | 52.0635 | -815.8124 |
| 5 | .0418 | 869.722 | 65.0841 | -804.6379 |
| 6 | .0524 | 871.5695 | 78.1401 | -793.4292 |
| 7 | .063 | 873.4185 | 91.2326 | -782.186 |
| 8 | .0737 | 875.2689 | 104.3609 | -770.908 |
| 9 | .0845 | 877.1206 | 117.5256 | -759.595 |
| 10 | .0953 | 878.9737 | 130.727 | -748.2467 |

FORÇA NECESSARIA : 912.075672

FI TOTAL : .0953

Tab. 8.7 cont.

FIEIRA NUMERO : 4 SEMI-ANGULO : 2

DIAMETRO INICIAL : 2.2

DIAMETRO FINAL : 1.9

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|-------------------------------|-------|----------|------------------|---------------|
| 1 | 0 | 978.9737 | 34.5521 | -844.3217 |
| 2 | .0274 | 893.6373 | 67.485 | -816.1524 |
| 3 | .0553 | 826.3086 | 100.6204 | -787.6883 |
| 4 | .0835 | 892.987 | 134.064 | -758.9231 |
| 5 | .1121 | 897.6719 | 167.8217 | -729.8502 |
| 6 | .1412 | 902.3624 | 201.8997 | -700.4628 |
| 7 | .1707 | 907.058 | 236.3042 | -670.7538 |
| 8 | .2006 | 911.7577 | 271.0417 | -640.716 |
| 9 | .231 | 916.4806 | 306.1188 | -610.2419 |
| 10 | .2618 | 921.1659 | 341.5423 | -579.6237 |
| FORCA NECESSARIA : 1135.62137 | | | FI TOTAL : .2618 | |

FIEIRA NUMERO : 5 SEMI-ANGULO : 9.5

DIAMETRO INICIAL : 1.9

DIAMETRO FINAL : 1.75

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|-------------------------------|-------|----------|------------------|---------------|
| 1 | 0 | 921.1659 | 19.5933 | -901.5727 |
| 2 | .0158 | 923.5563 | 38.6982 | -884.8581 |
| 3 | .0318 | 925.9468 | 57.9115 | -868.0352 |
| 4 | .0479 | 928.3374 | 77.2343 | -851.1026 |
| 5 | .0641 | 930.7279 | 96.669 | -834.0589 |
| 6 | .0805 | 933.118 | 116.2154 | -816.8026 |
| 7 | .097 | 935.5077 | 135.8754 | -799.3324 |
| 8 | .1136 | 937.8968 | 155.6502 | -782.2467 |
| 9 | .1304 | 940.2851 | 175.5411 | -764.7441 |
| 10 | .1474 | 942.6724 | 195.5485 | -747.1229 |
| FORCA NECESSARIA : 747.183827 | | | FI TOTAL : .1474 | |

FIEIRA NUMERO : 6 SEMI-ANGULO : 7

DIAMETRO INICIAL : 1.75

DIAMETRO FINAL : 1.57

| DISCO | FI | KFI | TENSAO LONG. | TENSAO RADIAL |
|-------------------------------|-------|----------|------------------|---------------|
| 1 | 0 | 942.6724 | 28.3772 | -914.2952 |
| 2 | .0286 | 945.0601 | 53.8747 | -888.8834 |
| 3 | .0415 | 948.4456 | 82.5086 | -864.939 |
| 4 | .0626 | 951.8286 | 111.2746 | -840.054 |
| 5 | .081 | 954.2087 | 139.1803 | -815.0285 |
| 6 | .1055 | 957.0855 | 167.2253 | -789.8682 |
| 7 | .1274 | 959.9584 | 195.4113 | -764.5472 |
| 8 | .1484 | 962.8271 | 223.7401 | -739.0871 |
| 9 | .1717 | 965.691 | 252.2132 | -713.4778 |
| 10 | .1942 | 968.5496 | 280.8326 | -687.7171 |
| FORCA NECESSARIA : 674.135154 | | | FI TOTAL : .1942 | |

DADOS GERAIS PARA TODOS OS PASSES

| Abcissas | Ordenadas |
|----------|-----------|
| 1.2 | 785 |
| 1.4 | 815 |
| 1.6 | 847 |
| 1.8 | 875 |
| 2 | 900 |
| 2.2 | 920 |
| 2.4 | 945 |
| 2.6 | 970 |

Coeficiente de Atrito : .05

FIEIRA NUMERO : 1

SEMI-ANGULO : 8

Diámetro Inicial : 3

Diámetro final : 2.65

| Disco | Fi | Kfi | Tensão Long. | Tensão radial |
|------------------------------|-------|----------|-----------------|---------------|
| 1 | 0 | 772.7107 | 24.6173 | -748.0935 |
| 2 | .0234 | 777.6688 | 48.3129 | -728.3559 |
| 3 | .0472 | 782.644 | 74.2497001 | -708.3943 |
| 4 | .0712 | 787.6363 | 98.4319 | -688.2044 |
| 5 | .0955 | 792.6456 | 124.264 | -667.7817 |
| 6 | .1202 | 797.6717 | 150.5583 | -647.1215 |
| 7 | .1451 | 802.7146 | 176.4956 | -626.219 |
| 8 | .1703 | 807.774 | 202.7046 | -605.0695 |
| 9 | .1959 | 812.8498 | 229.1622 | -583.6677 |
| 10 | .2218 | 817.9413 | 255.9334 | -562.0084 |
| Força Necessária : 1750.7154 | | | Fi Total: .2218 | |

Tab. 8.8 - Valores de Força Obtidos pelo Modelo dos Discos (4 passes)
continua ...

FIEIRA NUMERO : 2 SEMI-ANGULO : 9,5

Diámetro Inicial : 2,65

Diámetro final : 2,32

| Disco | Fi | Kfi | Tensao Long. | Tensao radial |
|-------|-------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 0 | 017,9418 | 29,4061 | -789,4897 |
| 2 | .025 | 022,8211 | 55,2516 | -767,5695 |
| 3 | .0504 | 027,7147 | 82,3408 | -745,3742 |
| 4 | .0761 | 032,6224 | 109,7297 | -722,8937 |
| 5 | .1021 | 037,5439 | 137,4218 | -700,1221 |
| 6 | .1285 | 042,4798 | 165,4261 | -677,0528 |
| 7 | .1553 | 047,427 | 193,7478 | -653,6792 |
| 8 | .1824 | 052,3879 | 222,3933 | -629,9946 |
| 9 | .2098 | 057,3613 | 251,3693 | -605,992 |
| 10 | .2377 | 062,3466 | 280,6827 | -581,664 |

Força Necessaria : 1528,33856

Fi Total : .2377

FIEIRA NUMERO : 3 SEMI-ANGULO : 8

Diámetro Inicial : 2,32

Diámetro final : 1,9

| Disco | Fi | Kfi | Tensao Long. | Tensao radial |
|-------|-------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 0 | 062,3466 | 46,1748 | -816,1718 |
| 2 | .0365 | 068,7987 | 68,9693 | -779,9295 |
| 3 | .0737 | 075,2688 | 132,3112 | -742,9578 |
| 4 | .1116 | 081,7557 | 176,2147 | -705,5411 |
| 5 | .1503 | 088,2578 | 220,6946 | -667,5634 |
| 6 | .1897 | 094,7738 | 265,7664 | -629,0075 |
| 7 | .2299 | 091,3017 | 311,446 | -589,9557 |
| 8 | .271 | 097,8396 | 357,7502 | -550,3894 |
| 9 | .3129 | 014,3852 | 404,6963 | -509,589 |
| 10 | .3556 | 020,9362 | 452,3023 | -468,5939 |

Força Necessaria : 1377,3263

Fi Total : .3556

FIEIRA NUMERO : 4 SEMI-ANGULO : 7

Diámetro Inicial : 1,9

Diámetro final : 1,57

| Disco | Fi | Kfi | Tensao Long. | Tensao radial |
|-------|-------|----------|--------------|---------------|
| 1 | 0 | 020,9362 | 48,1262 | -872,81 |
| 2 | .035 | 026,1991 | 93,5148 | -832,6944 |
| 3 | .0707 | 031,4621 | 139,3882 | -792,1534 |
| 4 | .107 | 036,7236 | 185,5171 | -751,2065 |
| 5 | .144 | 041,9845 | 232,1485 | -709,823 |
| 6 | .1816 | 047,2339 | 279,2123 | -668,0216 |
| 7 | .22 | 052,4785 | 326,718 | -625,7605 |
| 8 | .2592 | 057,7129 | 374,6753 | -583,0376 |
| 9 | .2991 | 062,9342 | 423,0942 | -539,84 |
| 10 | .3399 | 068,1399 | 471,9852 | -496,1546 |

Força Necessaria : 960,17014

Fi Total : .3399

Tab. 8.1 - Quadro Comparativo Entre Força Calculada e Força Medida em
6 Passes (1ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | Ψ_A $= \ln \frac{A_0}{A_1}$ | FORÇA CALCULADA(N) / MODELOS TEÓRICOS | | | | | | | FORÇA MEDIDA(N)/ LUBRIFICANTES | | | | |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------|-------------------------|-------|--------|--------|-----------------|--------------------------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| | | | MODELO DOS DISCOS | SIEBEL | LEWIS E MACLELLAN | SACHS | GELEJI | PALMOV | DAVIS, DOKOS | IMBRA LUB BS/CIM | IMBRA LUB BS/CFE | POLI MET | IMBRA LUB BS/SEX | DRI LUBE |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 1751 | 1909 | 1695 | 1907 | 1826 | 1269 | 1430 | 2000 | 2175 | 2037 | 2087 | 2000 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2650 | 1528 | 1627 | 1414 | 1642 | 1562 | 1071 | 1187 | 1675 | 1875 | 1675 | 1775 | 1592 |
| 3 | 2,52 - 2,20 | 0,1062 | 812 | 758 | 536 | 786 | 765 | 426 | 497 | 925 | 1050 | 1000 | 1050 | 925 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,2932 | 1136 | 1250 | 1174 | 1233 | 1178 | 856 | 960 | 1287 | 1250 | 1225 | 1287 | 1162 |
| 5 | 1,90 - 1,75 | 0,1645 | 747 | 722 | 516 | 747 | 718 | 415 | 463 | 750 | 719 | 775 | 750 | 750 |
| 6 | 1,75 - 1,57 | 0,2169 | 874 | 710 | 626 | 709 | 682 | 469 | 463 | 775 | 719 | 762 | 750 | 775 |

FORÇA (N)

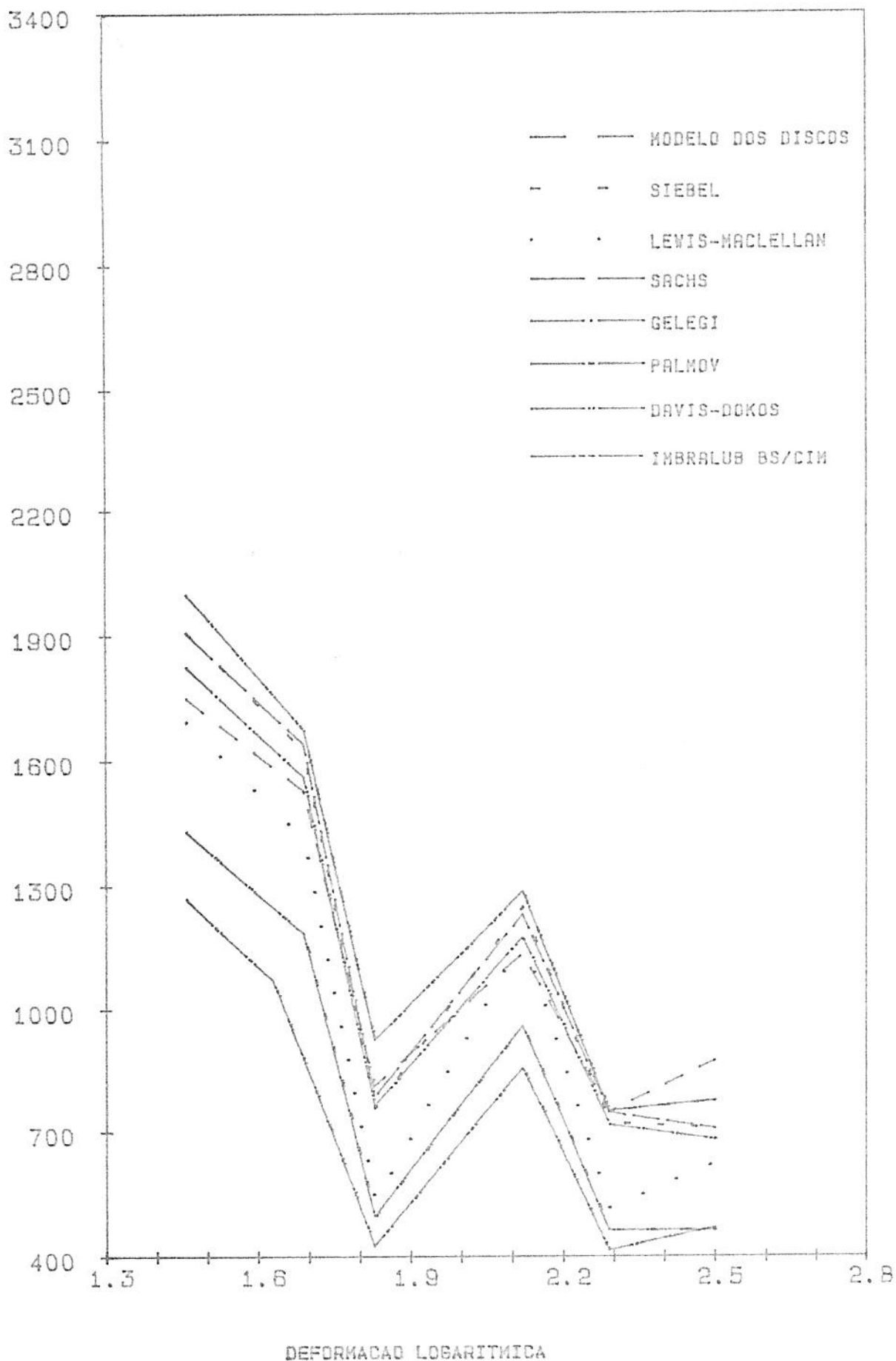


Fig. 8.1.-a Modelos Teóricos e Força Medida (IMB. BS/CIM, 1^a S.)

FORÇA (N)

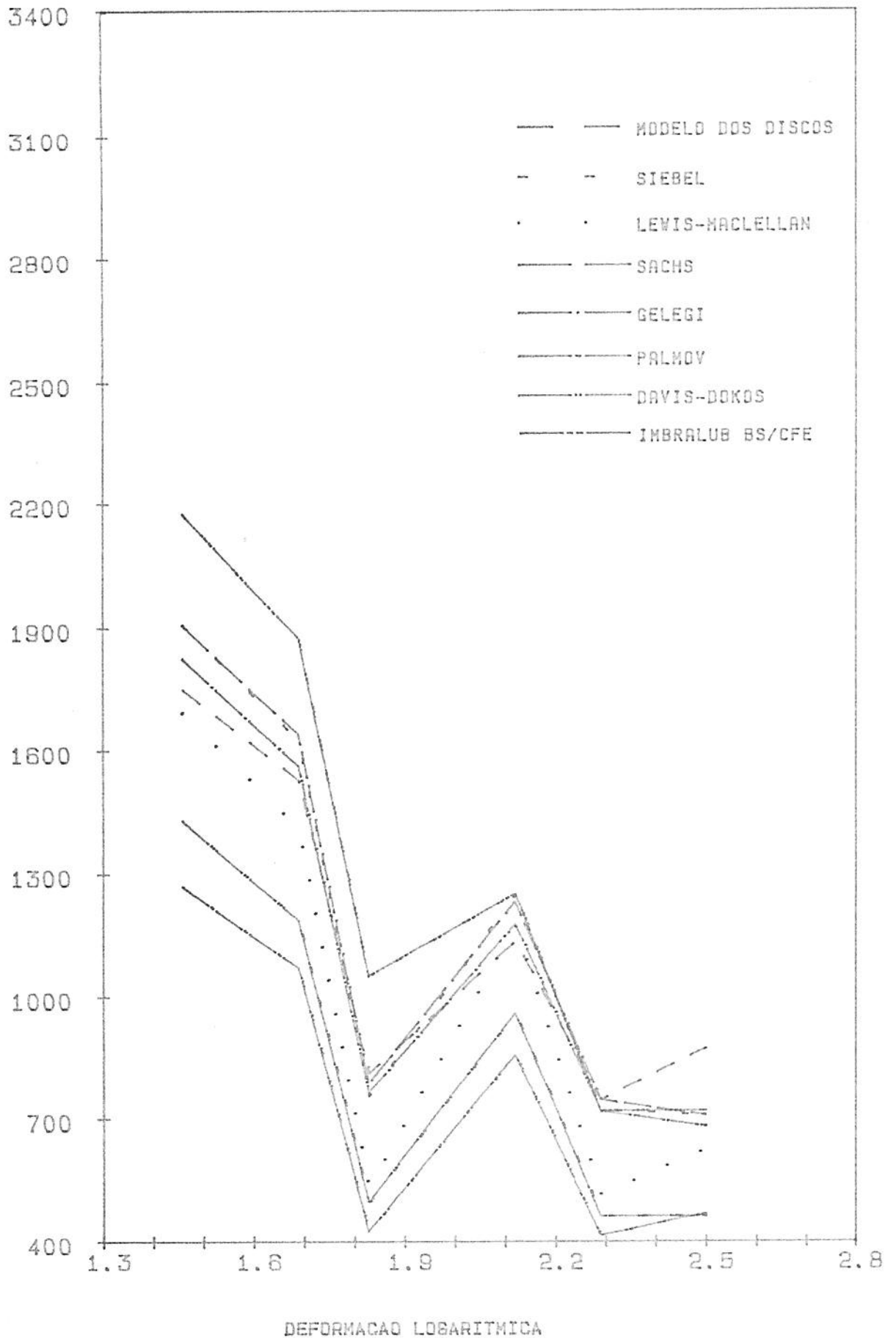
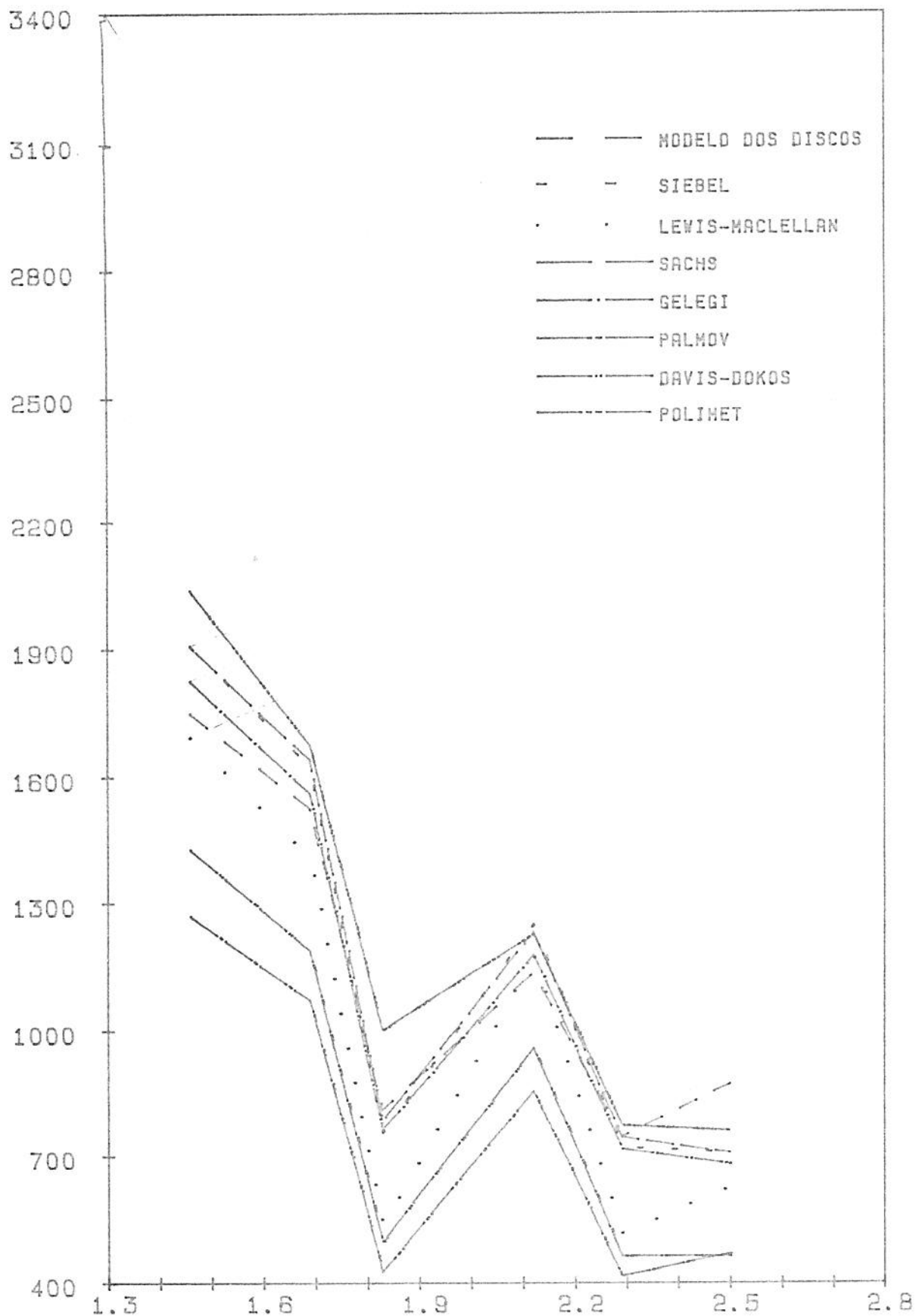


Fig. 8.1 -b Modelos Teóricos e Força Medida (IMB BS/CFE, 1ª Série)

FORÇA (N)



DEFORMAÇÃO LOGARITMICA

Fig. 8.1 -c Modelos Teóricos e Força Medida (POLIMET, 1ª S.)

FORÇA (N)

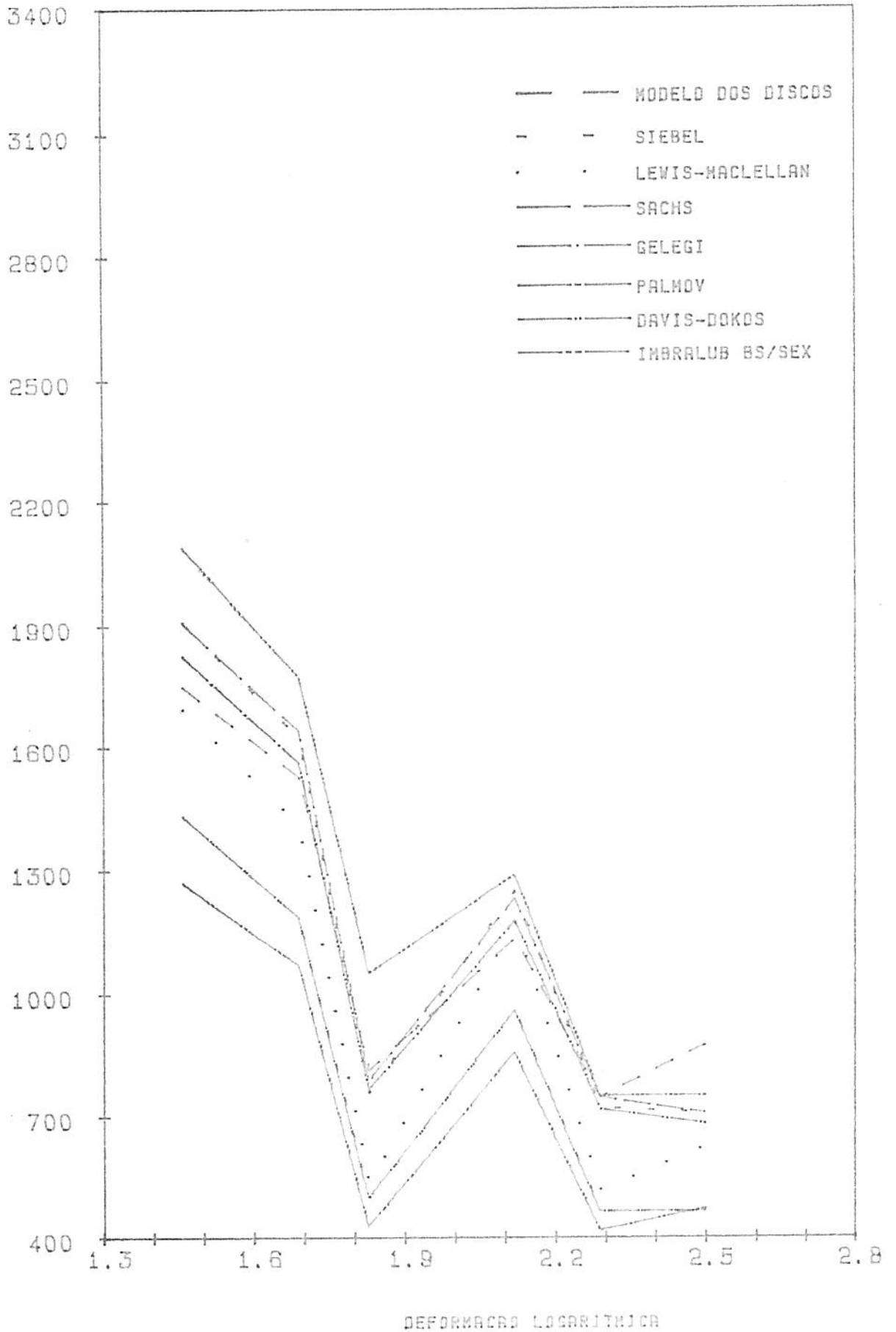


Fig. 8.1. d - Modelos Teóricos e Força Medida (IMB. BS/SEX, 1ª S.)

FORÇA (N)

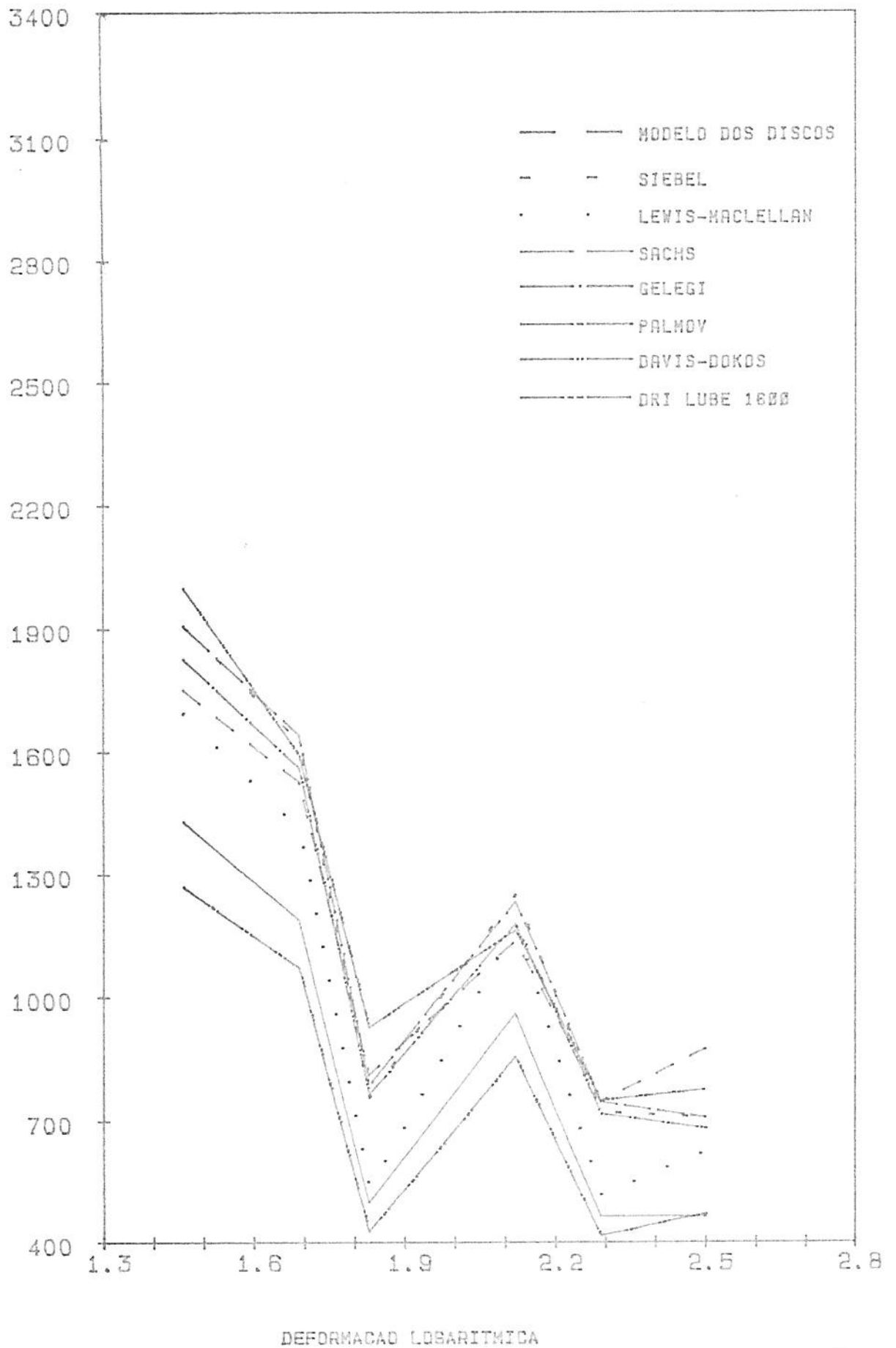


Fig. 8.1 -e Modelos Teóricos e Força Medidas (DRI LUBE 1600, 1^a S.)

FORÇA (N)

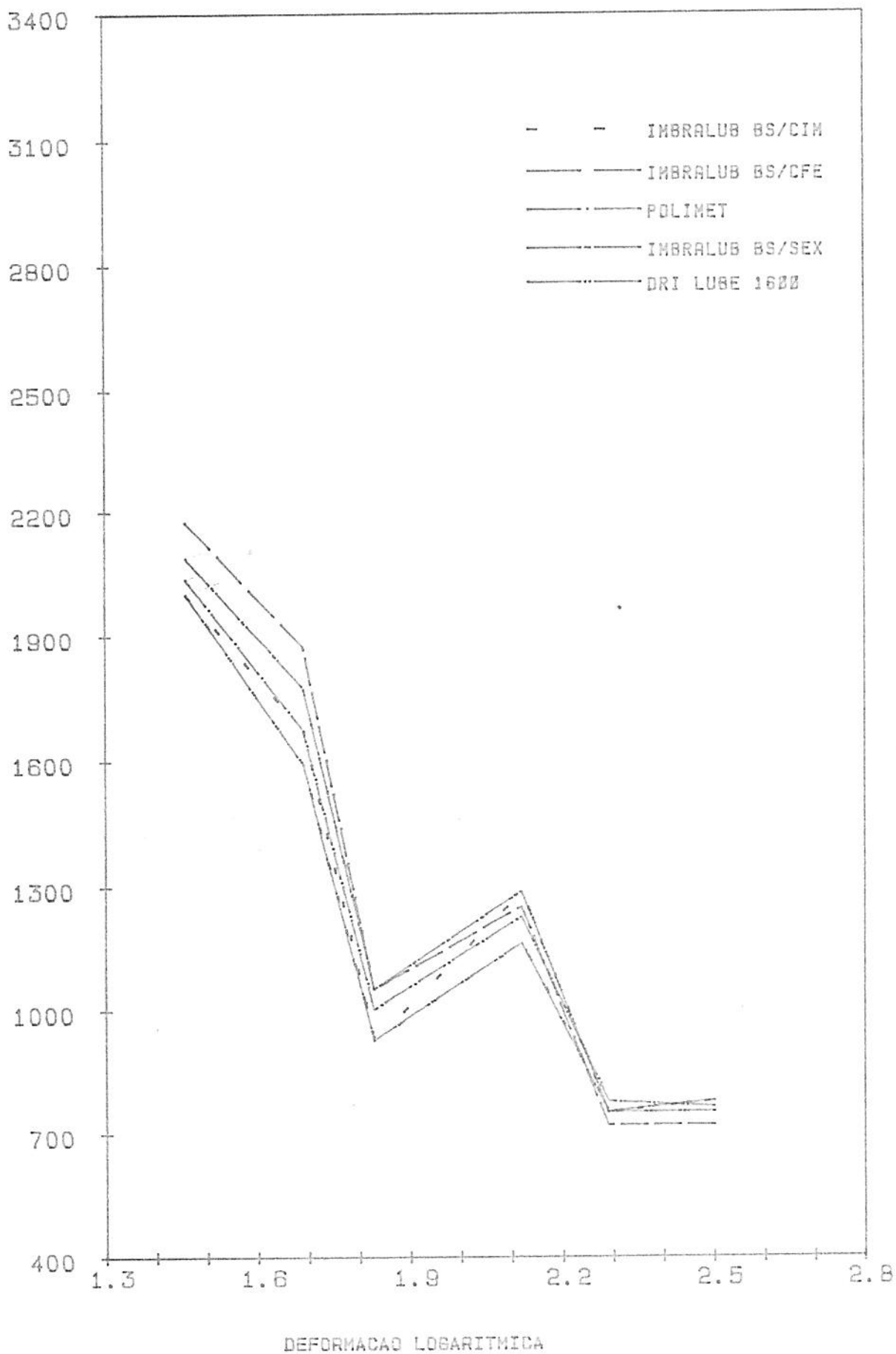


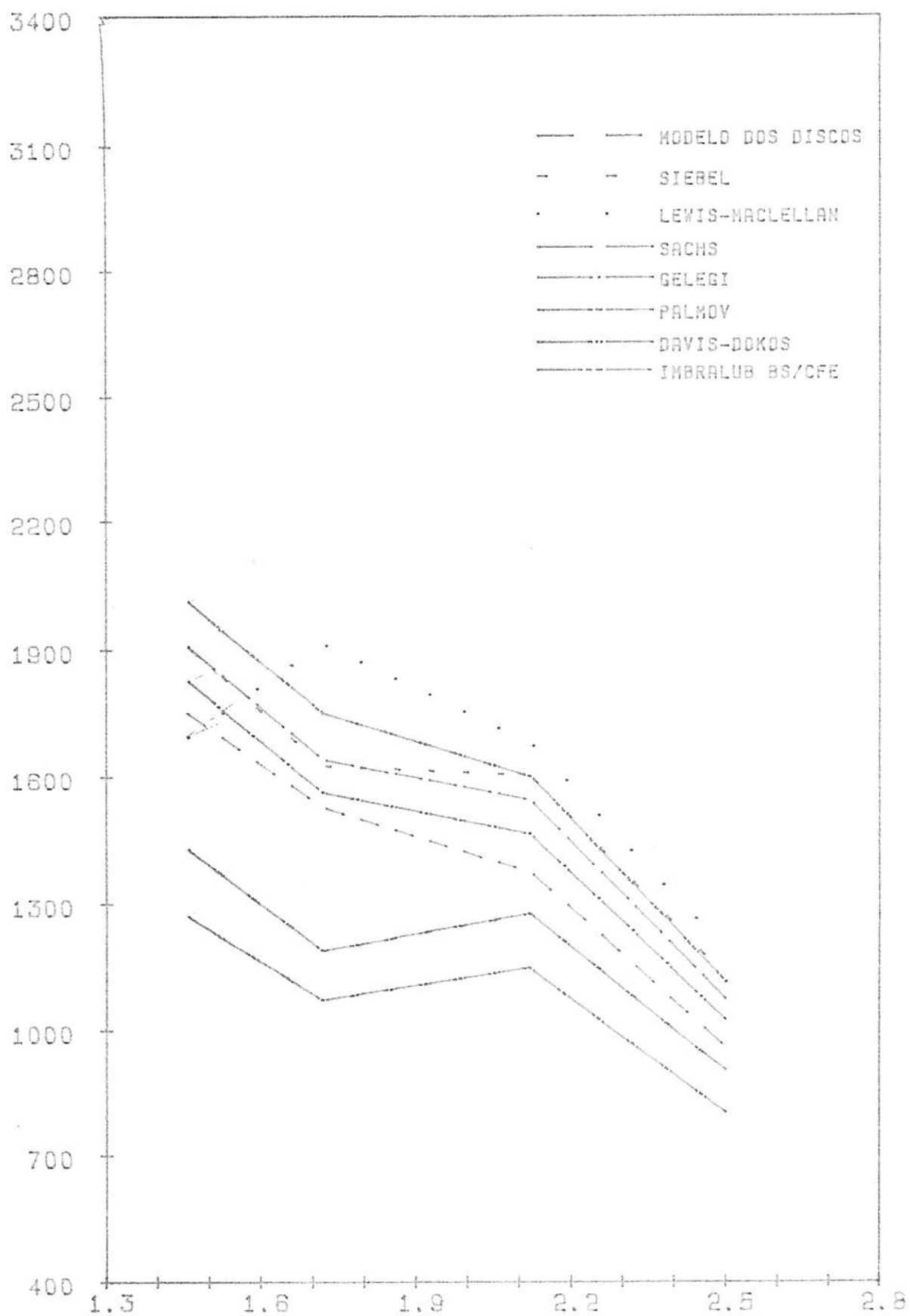
Fig.8.1. -f Valores de Força Medidos, (1ª Série)

Tab. 8.2 - Quadro Comparativo Entre a Força Calculada e Força Medida em 4 Passes
(2ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | Ψ_A $= \ln \frac{A_0}{A_1}$ | FORÇA CALCULADA (N) / MODELOS TEÓRICOS | | | | | | | FORÇA MEDIDA (N)/LUBRIFICANTES | | | | | |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|--|--------|-------------------------|-------|--------|--------|-----------------|--------------------------------|------------------------|---------|------------------------|-----------------|-----------------|
| | | | MODELO DOS DISCOS | SIEBEL | LEWIS E MACLELLAN | SACHS | GELEJI | PALMOV | DAVID, DOKOS | IMBRA LUB BS/CIM | IMBRA LUB BS/CFE | POLIMET | IMBRA LUB BS/SEX | DRI LUB 1600 | MOLYKO- TE G |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 1751 | 1909 | 1695 | 1907 | 1826 | 1269 | 1430 | 2075 | 2012 | 2275 | 2137 | 1987 | 2137 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2660 | 1528 | 1627 | 1414 | 1642 | 1562 | 1071 | 1187 | 1800 | 1750 | 1912 | 1850 | 1837 | 2125 |
| 3 | 2,32 - 1,90 | 0,3994 | 1377 | 1603 | 1680 | 1545 | 1465 | 1146 | 1275 | 1675 | 1600* | 1625 | 1925* | 1675 | 1875* |
| 4 | 1,90 - 1,57 | 0,3816 | 960 | 1124 | 1186 | 1073 | 1024 | 802 | 903 | 1175 | 1112 | 1125 | 1312 | 1112 | 1312 |

* Eventuais defeitos na fieira causando ranhuras no material

FORÇA (N)



DEFORMAÇÃO LOGARÍTMICA

Fig. 8.2-b Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CFE, 2^a S.)

FORÇA (N)

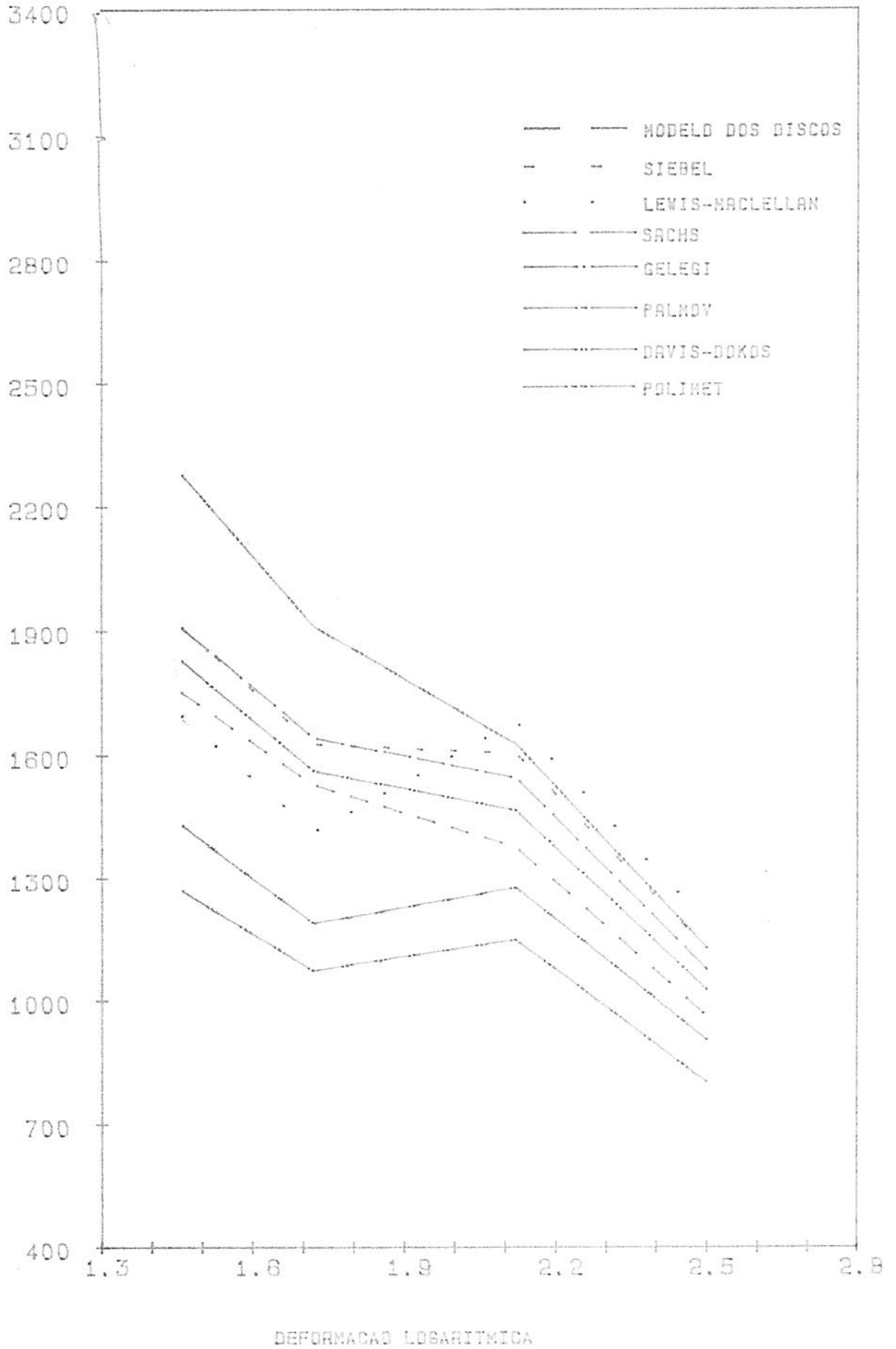


Fig. 8.2 -c Modelos Teóricos e Força Medida (POLIMET, 2ª S.)

FORÇA (N)

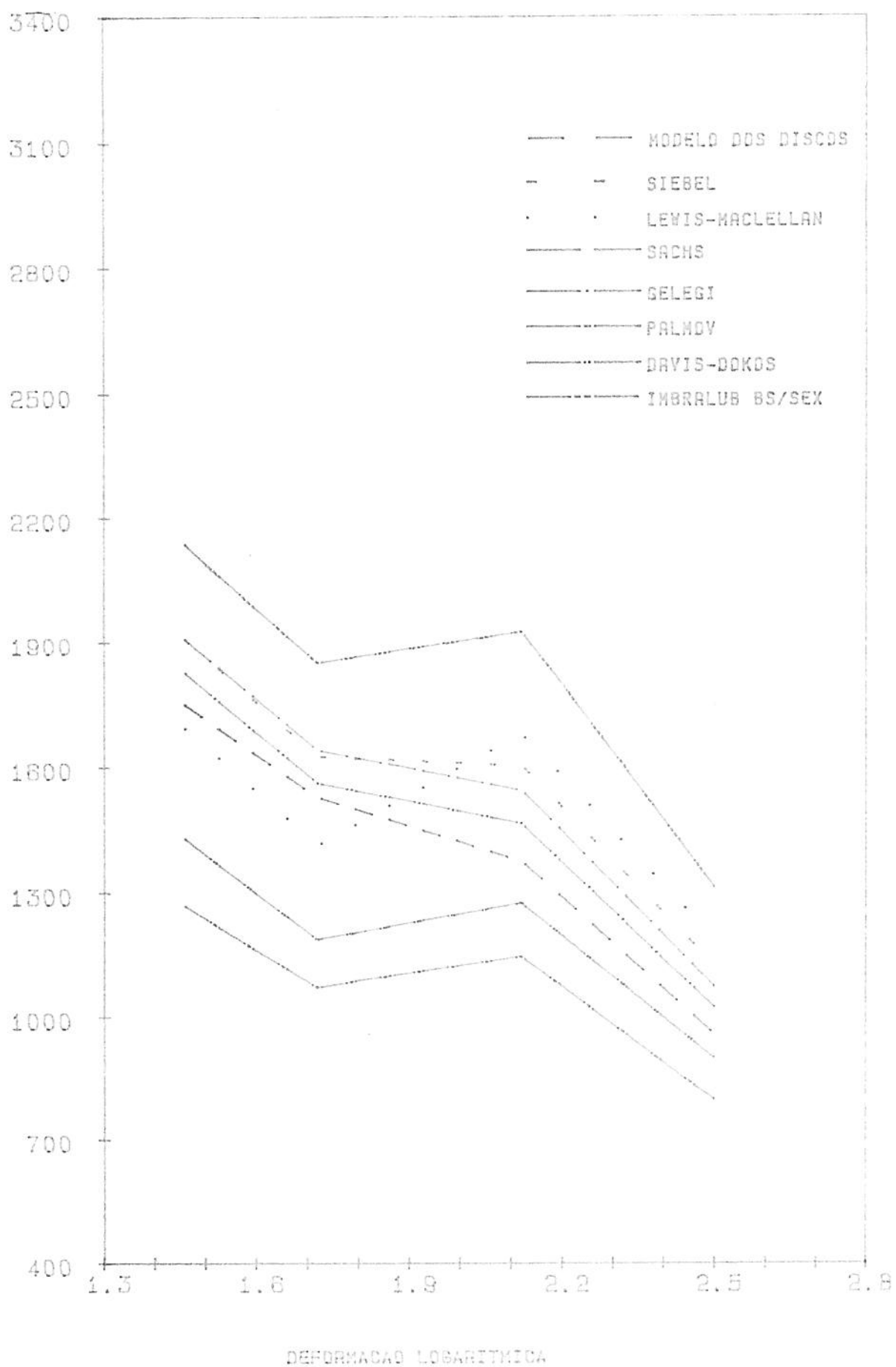


Fig. 8.2-d Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/SEX, 2^a S.)

FORÇA (N)

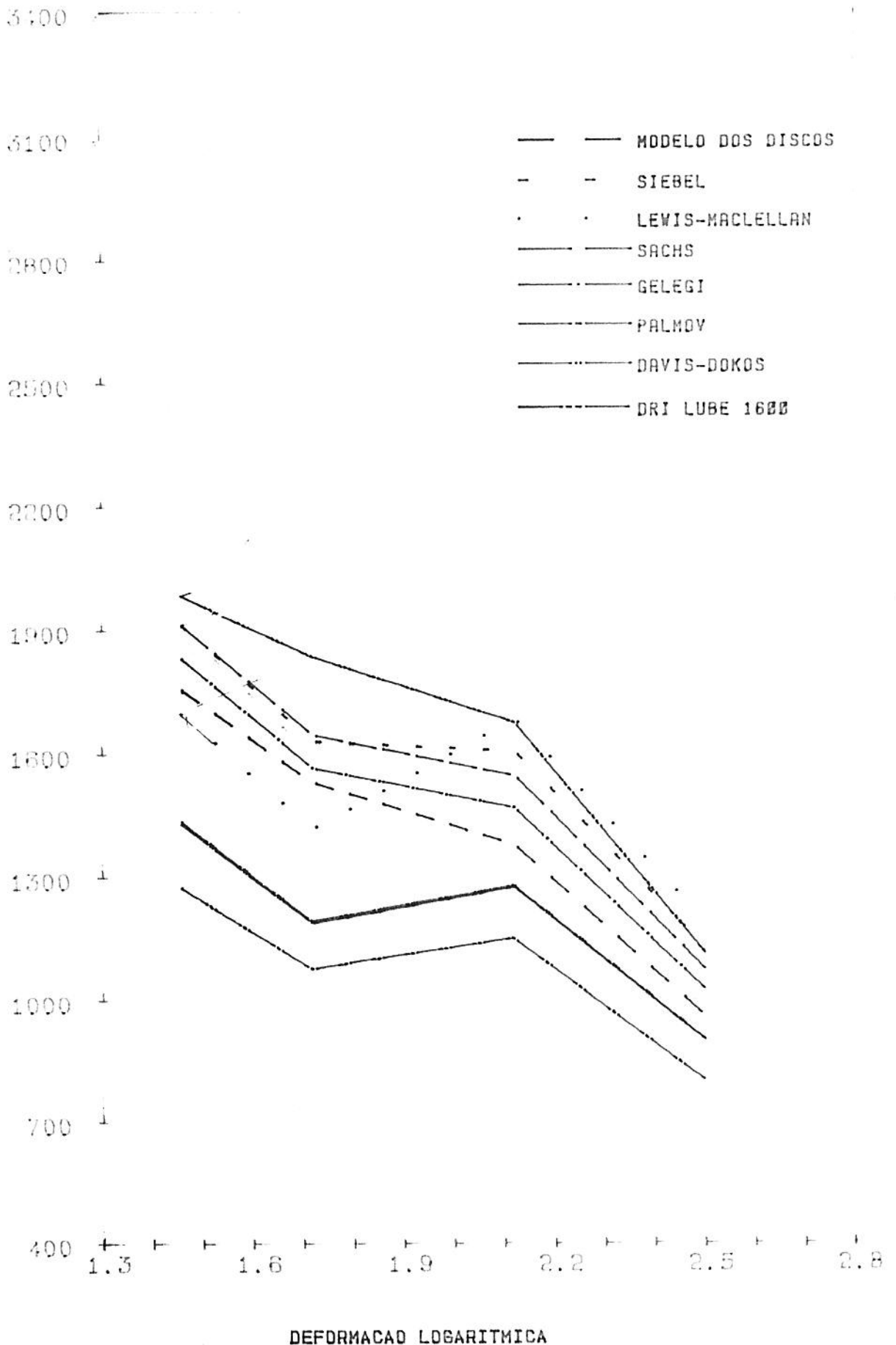
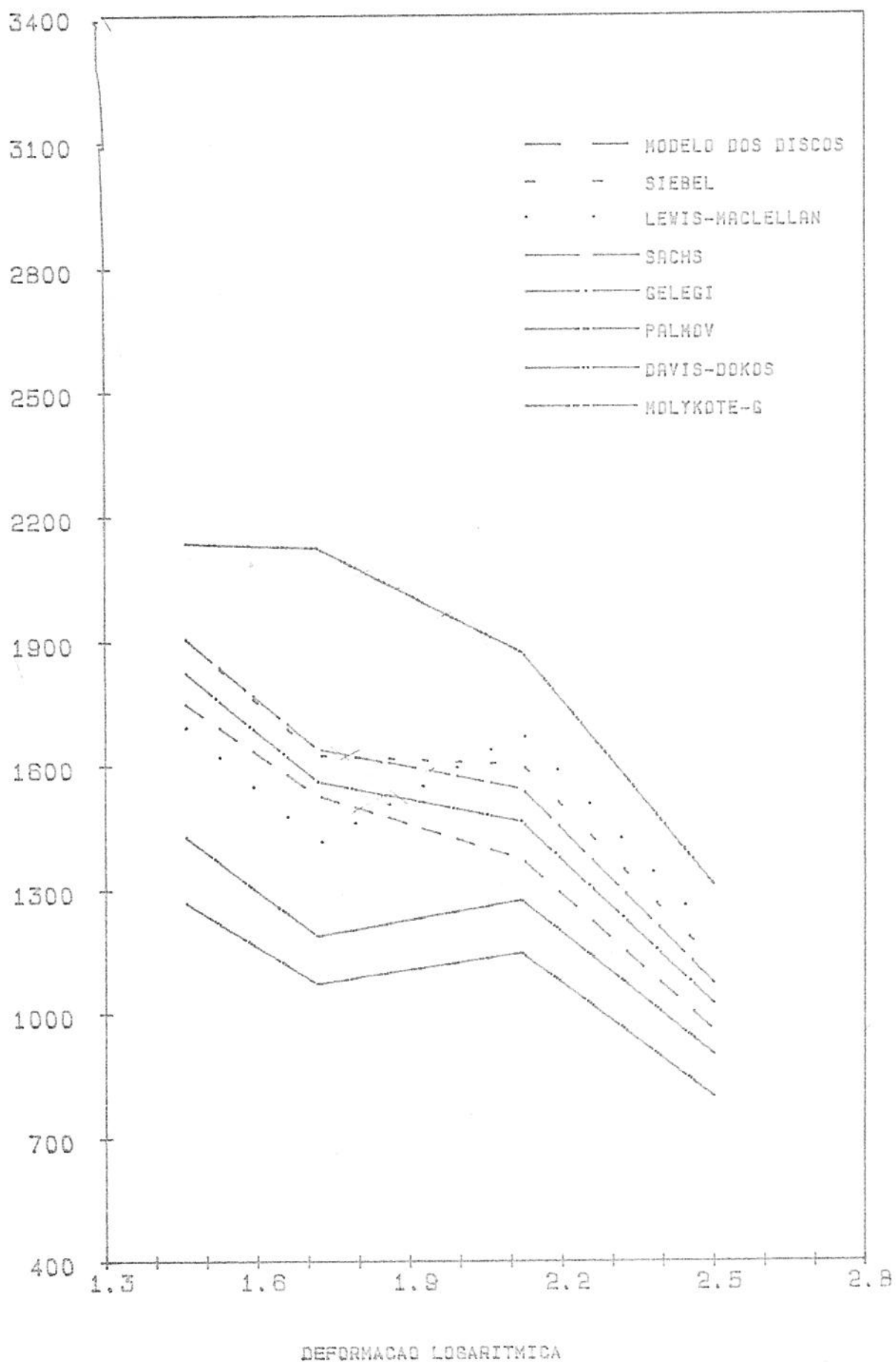


Fig. 8.2.-e Modelos Teóricos e Força Medida (DRI LUBE 1600, 2ª S.)

FORÇA (N)



FORÇA (N)

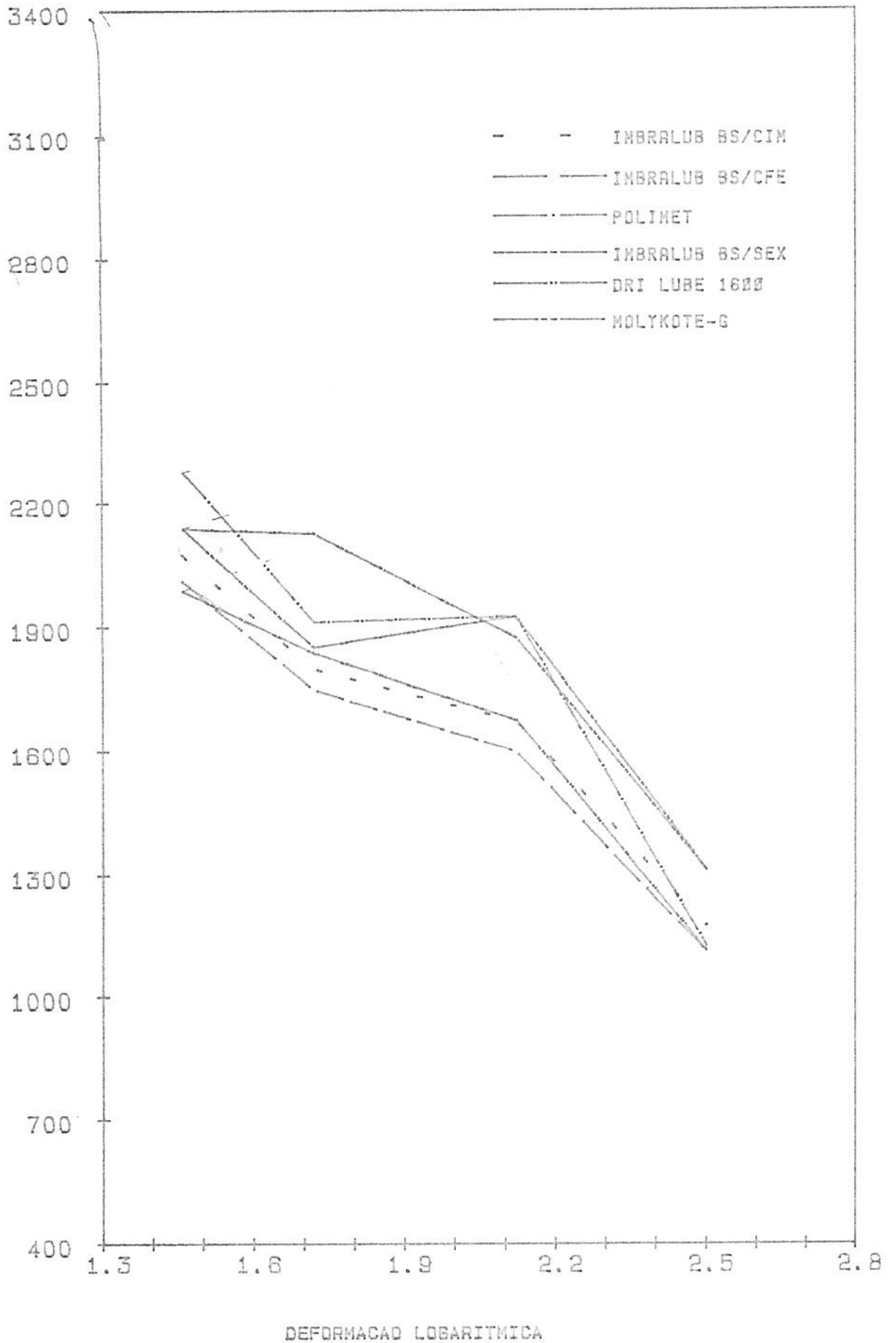


Fig. 8.2-g Valores de Força Medidos, 2ª Série)

Tab. 8.3 - Quadro Comparativo Entre a Força Calculada e a Força Medida em 4 Passes

(3ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | $\varphi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | FORÇA CALCULADA (N) / MOSELOS TEÓRICOS | | | | | | | FORÇA MEDIDA (N)/LUBRIFICANTES | | | |
|----------|---------------------------|-----------------------------------|--|--------|-------------------|-------|--------|--------|--------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| | | | MODELO DOS DISCOS | SIEBEL | LEWIS E MACLELLAN | SACHS | GELEJI | PALMOV | DAVIS, DOKOS | IMBRALUB BS/CFE | | ESTEARATO DE CÁLCIO | POLIETILENO GLICOL 4000 |
| | | | | | | | | | | FOSFATI ZAÇÃO MÉDIA | FOSFATI ZAÇÃO FINA | | |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 1751 | 1909 | 1695 | 1907 | 1826 | 1269 | 1430 | 2125 | 2125 | 2050 | 1975 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2660 | 1528 | 1627 | 1414 | 1642 | 1562 | 1071 | 1187 | 1812 | 2055 | 1650 | 1725 |
| 3 | 2,32 - 1,90 | 0,3994 | 1377 | 1603 | 1680 | 1545 | 1465 | 1146 | 1275 | 1750 | 1800 | 1700 | 1650 |
| 4 | 1,90 - 1,57 | 0,3816 | 960 | 1124 | 1186 | 1073 | 1024 | 802 | 903 | 1280 | 1312 | 1162 | 1200 |

FORÇA (N)

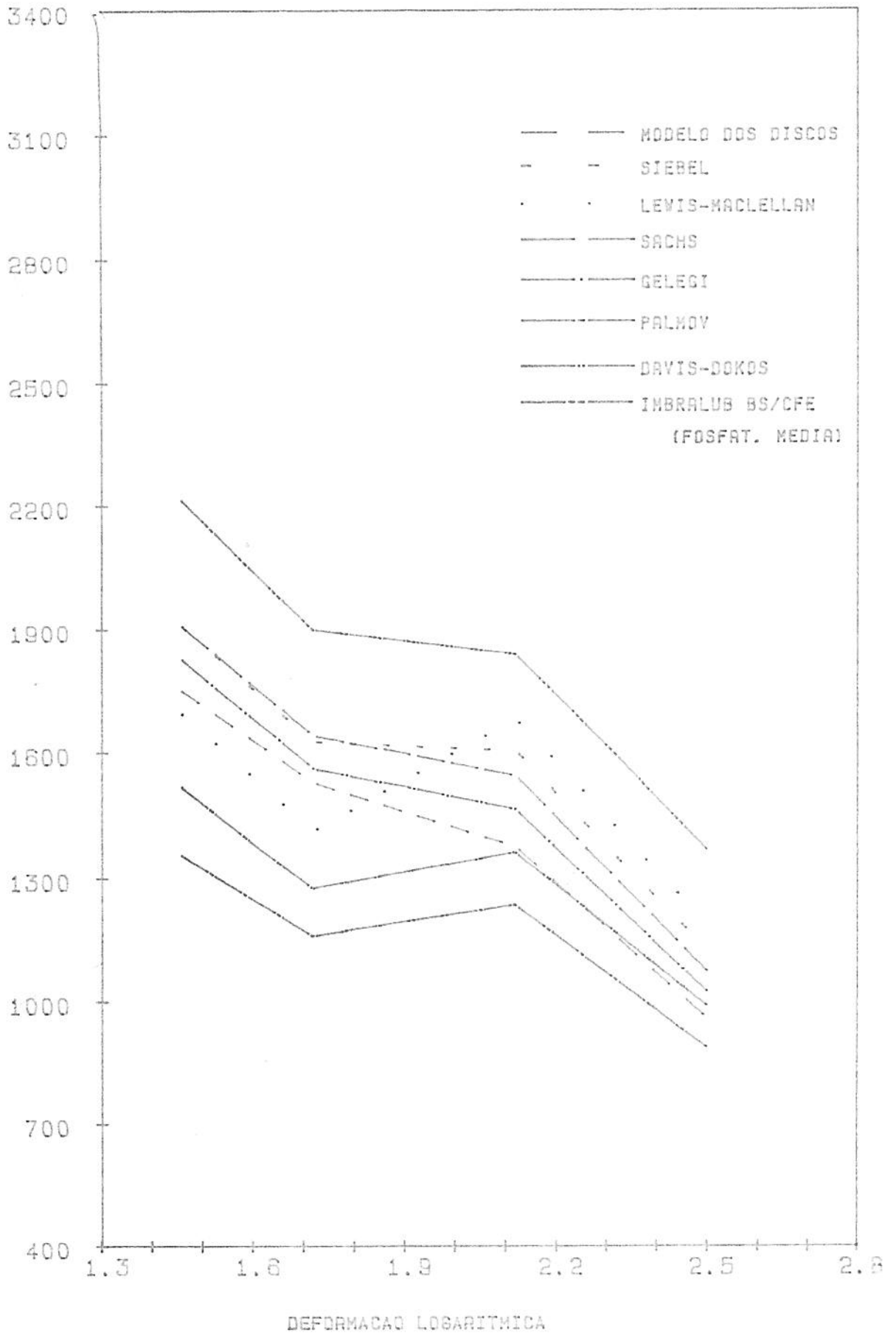


Fig. 8.3-a Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CFE/FOSFAT. MÉDIA, 3ª Série)

FORÇA (N)

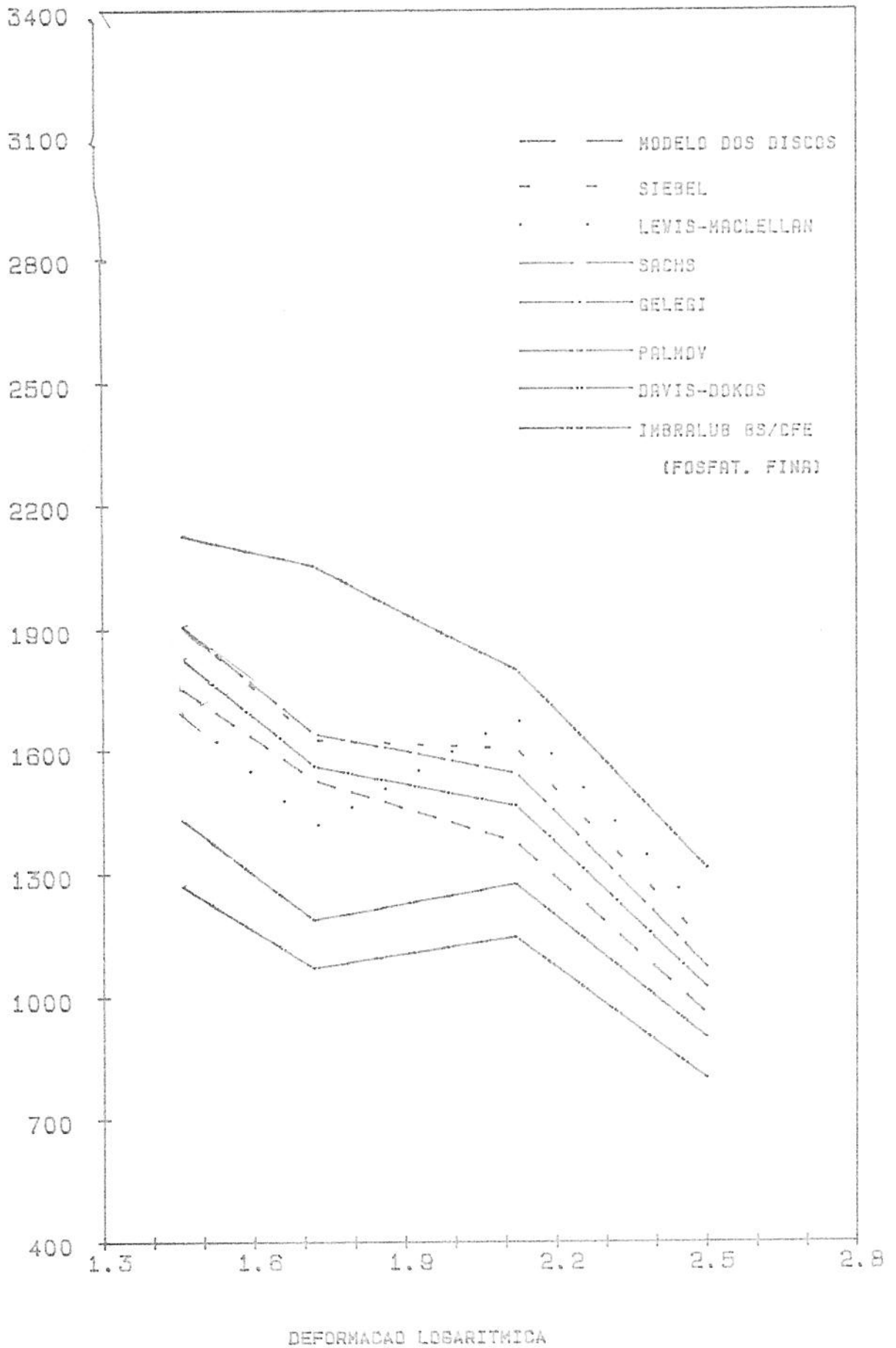


Fig. 8.3-b Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CFE/FOSFAT.FINA, 3ª Série)

FORÇA (N)

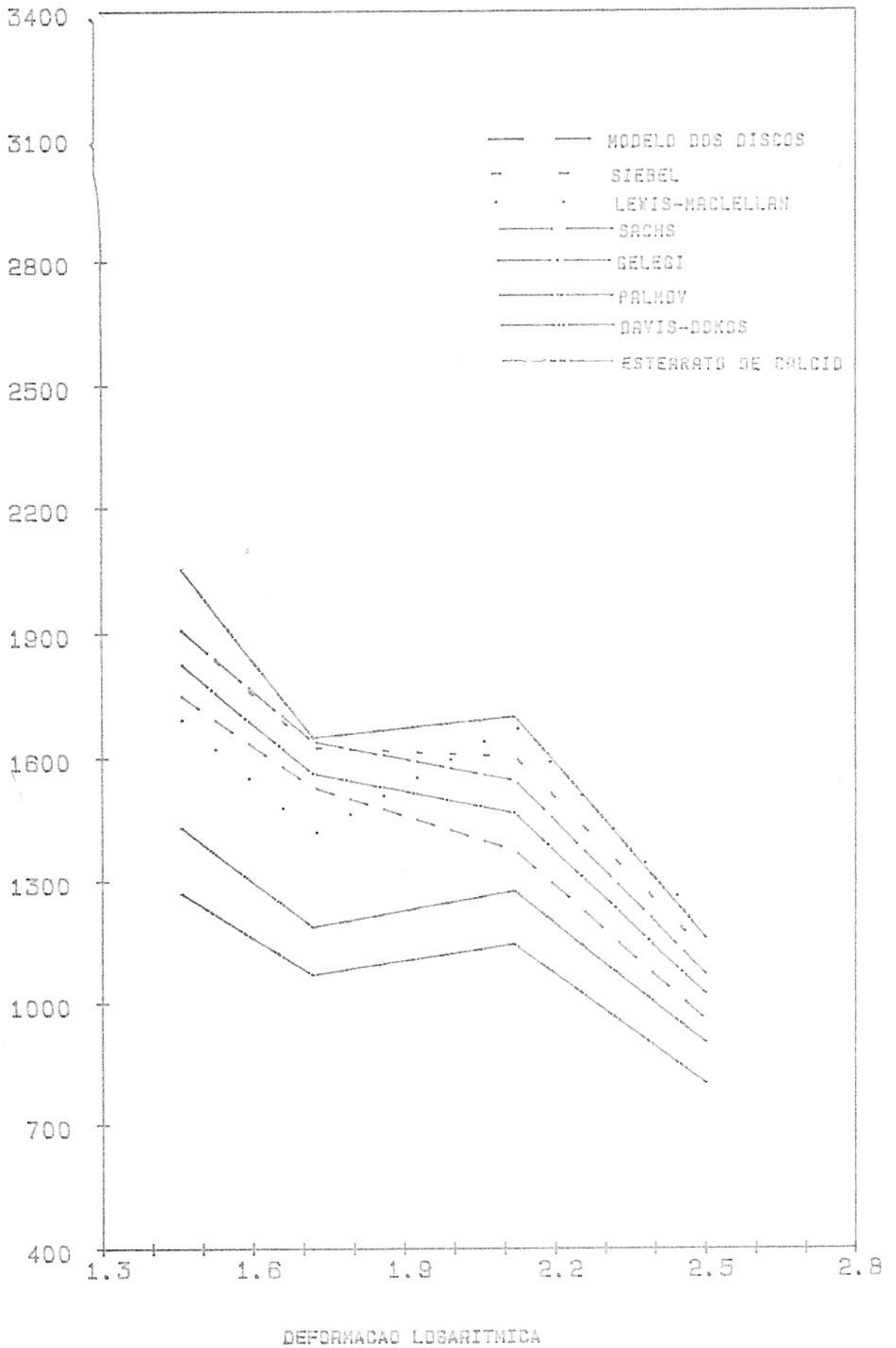


Fig. 8.3-e Modelos Teóricos e Força Medida (ESTEARATO CÁLCIO, 3^a S.)

FORÇA (N)

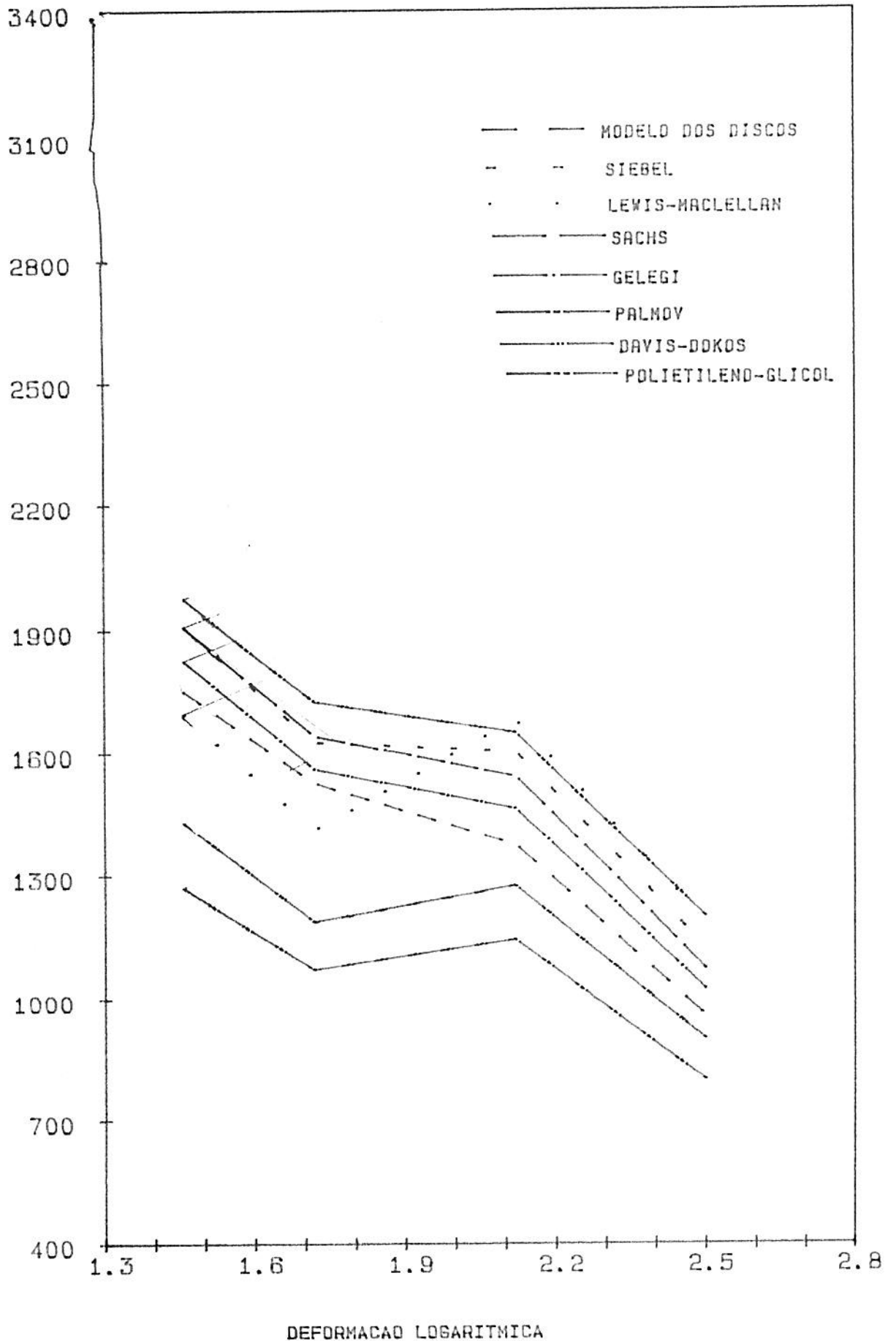


Fig. 8.3-d Modelos Teóricos e Força Medida (POLIETILENO GLICOL, 3^a S.)

FORÇA (N)

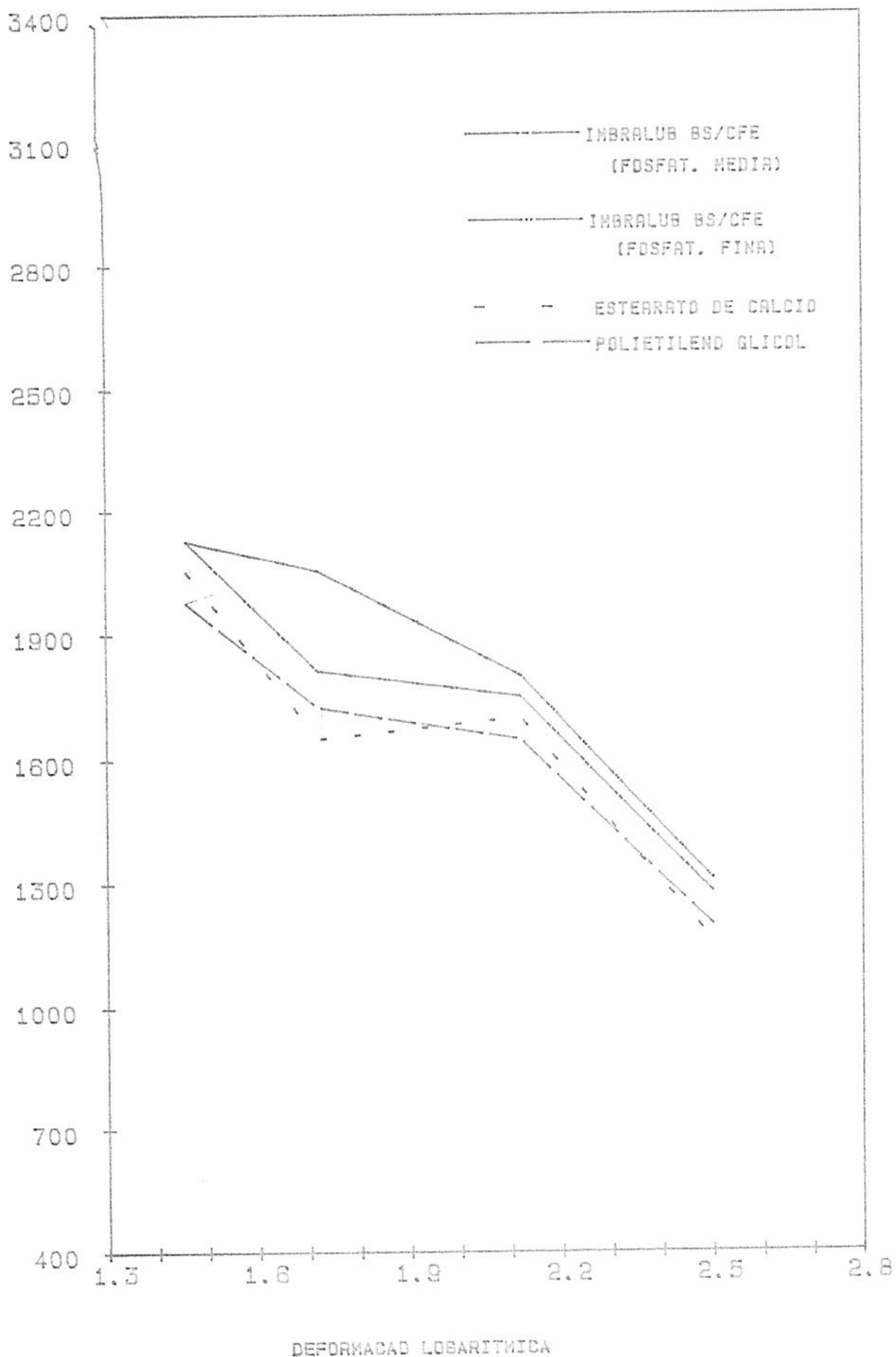


Fig. 8.3-e Valores de Força Medidos (3^a Série)

Tab. 8.4 - Quadro Comparativo Entre Força Calculada e Força Medida em 4 Passes
(4ª série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIAMETROS (mm) | ψ $A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | FORÇA CALCULADA (N)/MODELOS TEÓRICOS | | | | | | | FORÇA MEDIDA (N)/LUBRIFICANTES | | | | | |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------------------------|-------|--------|--------|----------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------|-------|
| | | | MODELO DOS DISCOS | SIEBEL | LEWIS- MACLEL- LAN | SACHS | GELEJI | PALMOV | DAVIS DOKOS | IMBRA LUB BS/CIM | IMBRA LUB BS/CFE | IMBRA LUB BS/SEX | DRI LUBE 1600 | IMB. BS/CFE | |
| | | | | | | | | | | | | | | FOSFATO | BÓRAX |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,248 | 1751 | 1909 | 1695 | 1907 | 1826 | 1269 | 1430 | 2975 | 2800 | 3162 | 2975 | 2650 | 2775 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,265 | 1528 | 1627 | 1414 | 1642 | 1562 | 1071 | 1187 | 2437 | 2350 | 2825 | 2825 | 2300 | 2187 |
| 3 | 2,32 - 2,20 | 0,106 | 812 | 758 | 538 | 786 | 765 | 426 | 497 | 1625 | - | 1925 | 1675 | 1650 | 1550 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,293 | 1136 | 1250 | 1174 | 1233 | 1178 | 856 | 960 | 1925 | - | 2050 | 1975 | 1950 | 1800 |

FORÇA (N)

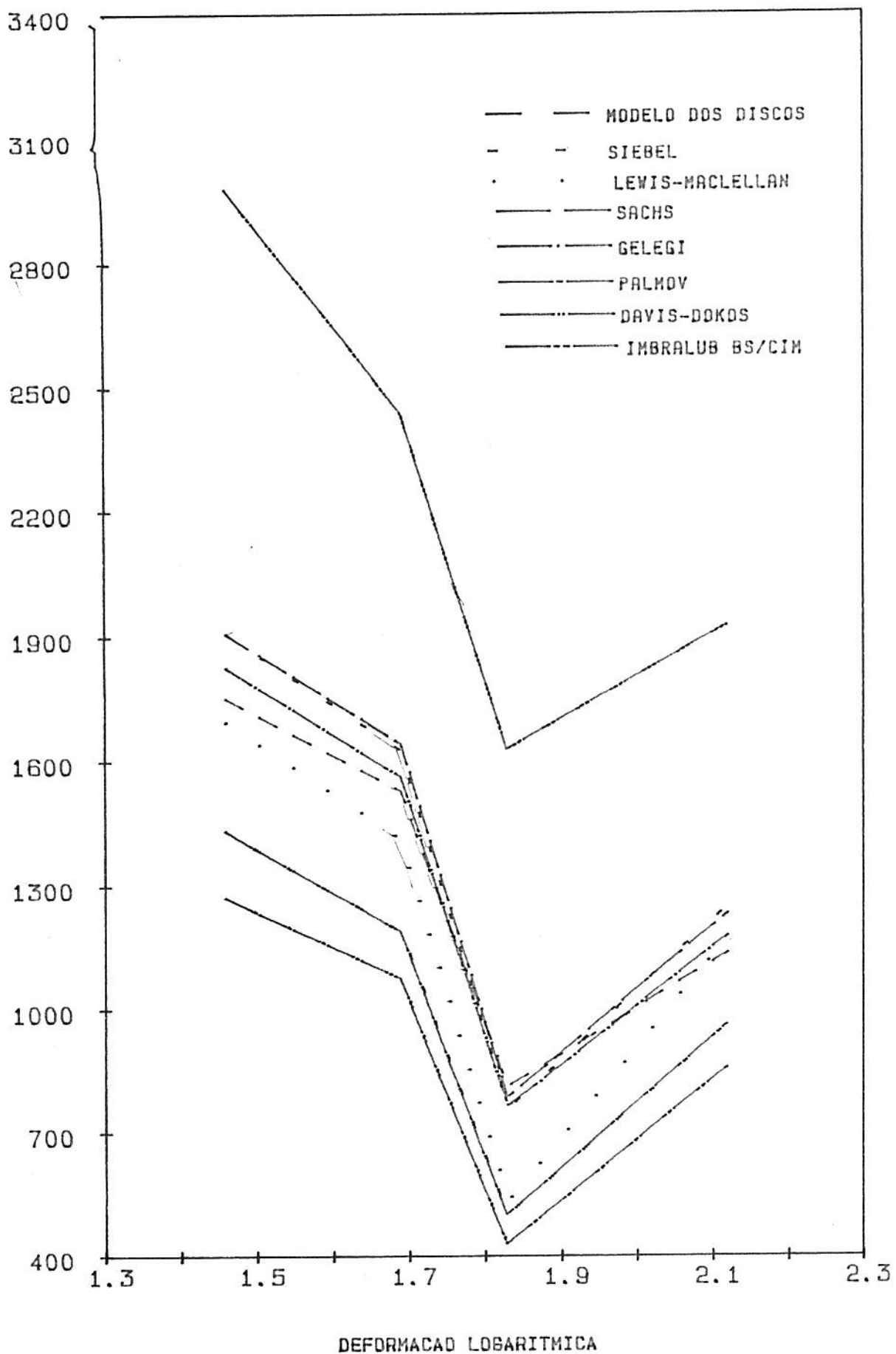


Fig. 8.4-a Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CIM, 4^a S.)

FORÇA (N)

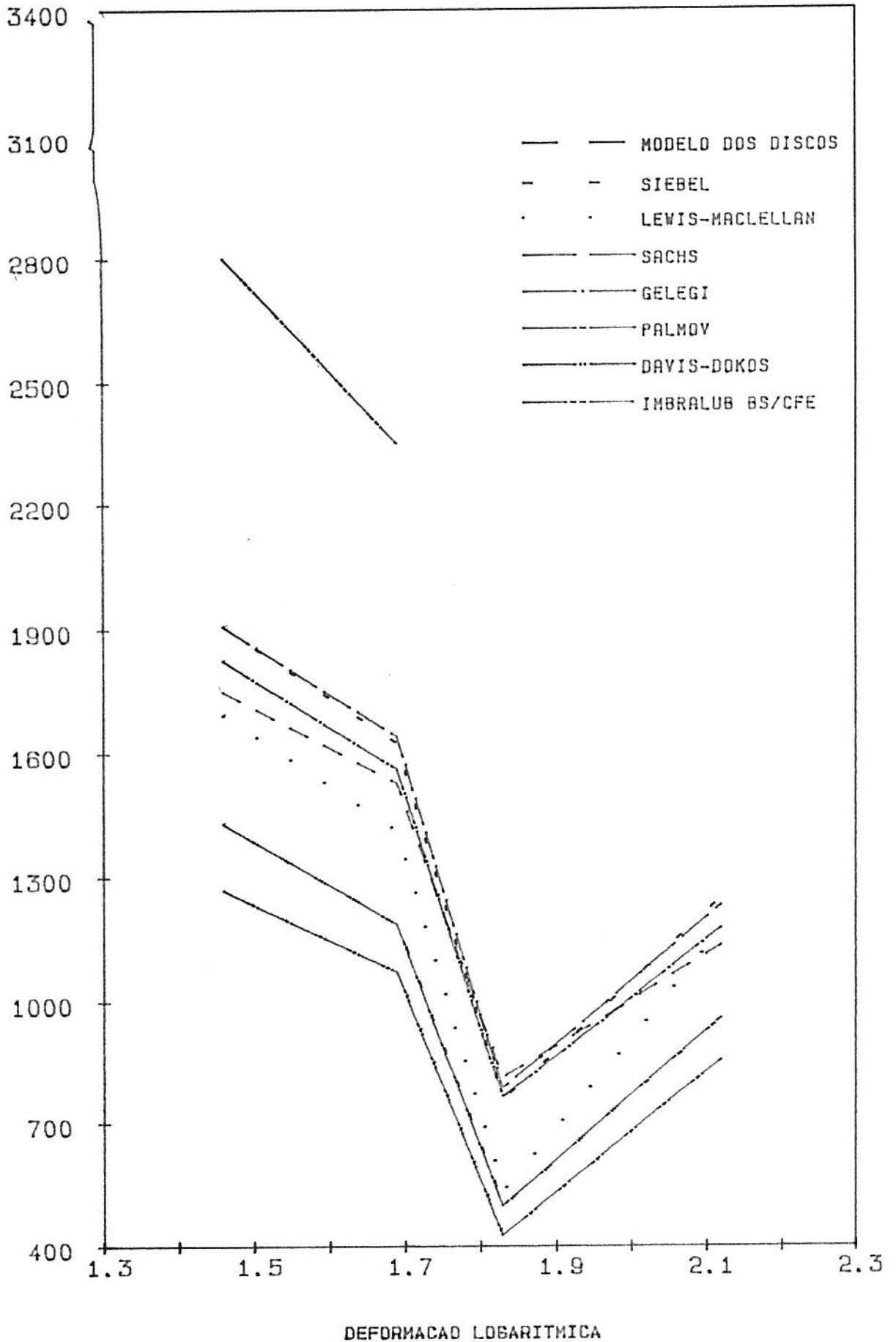


Fig. 8.4-b Modelos Teóricos e Força Medida (IMB:BS/CFE, 4^a S.)

FORÇA (N)

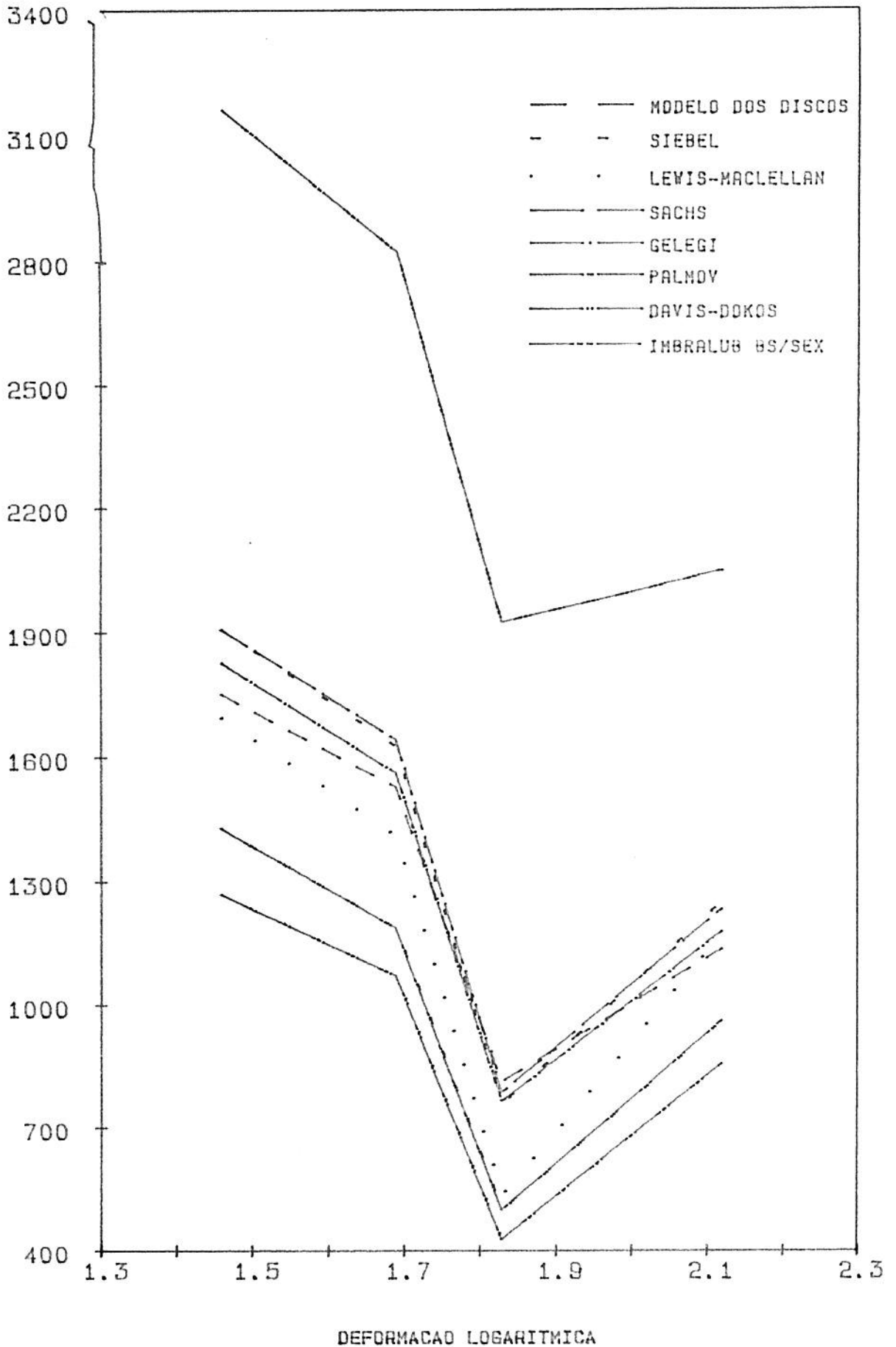


Fig. 8.4-c Modelos Teóricos e Força Medida (IMB. BS/SEX, $\frac{50}{4}$ S.)

FORÇA (N)

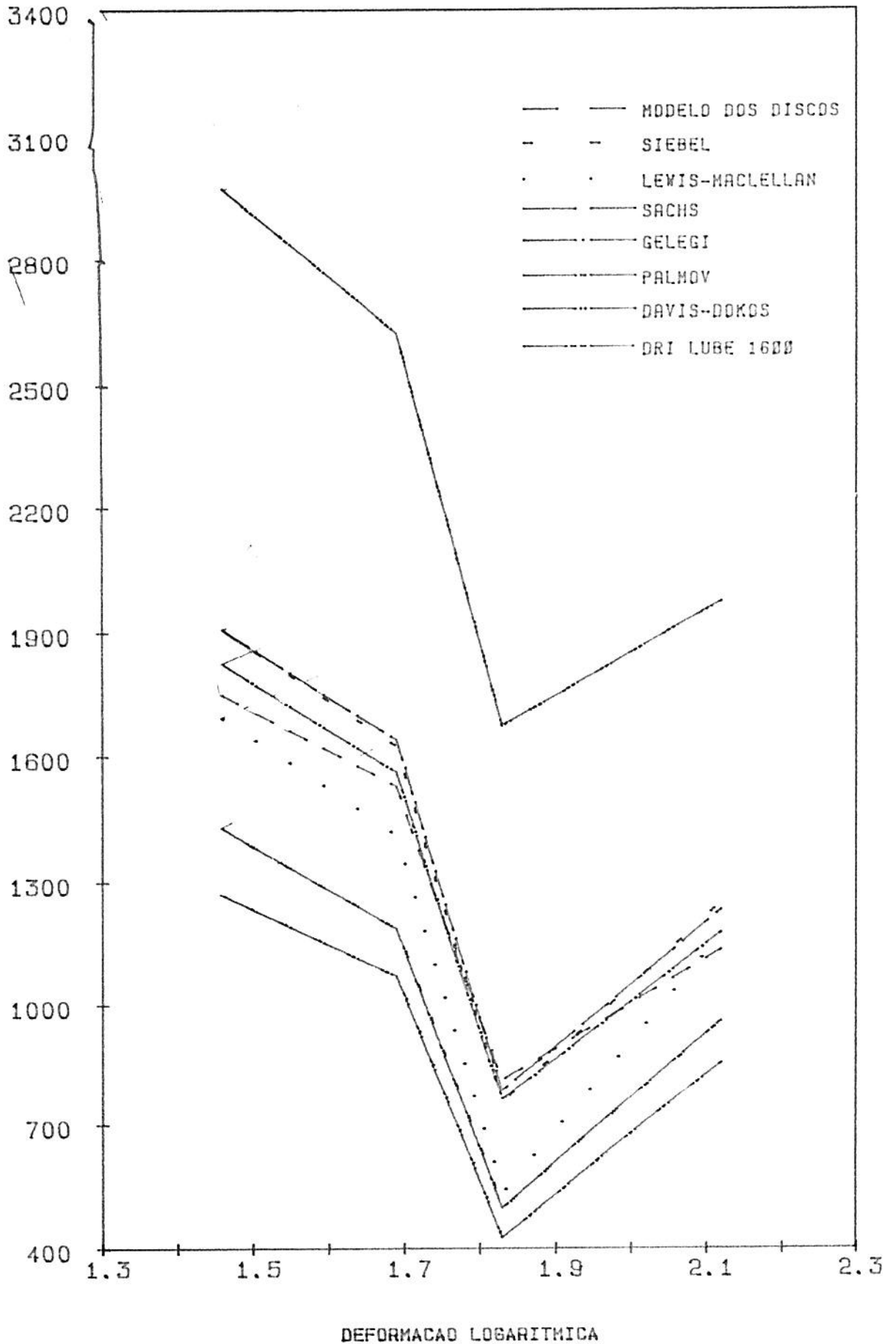


Fig. 8.4-d Modelos Teóricos e Força Medida (DRI LUBE 1600, 4^a S.)

FORÇA (N)

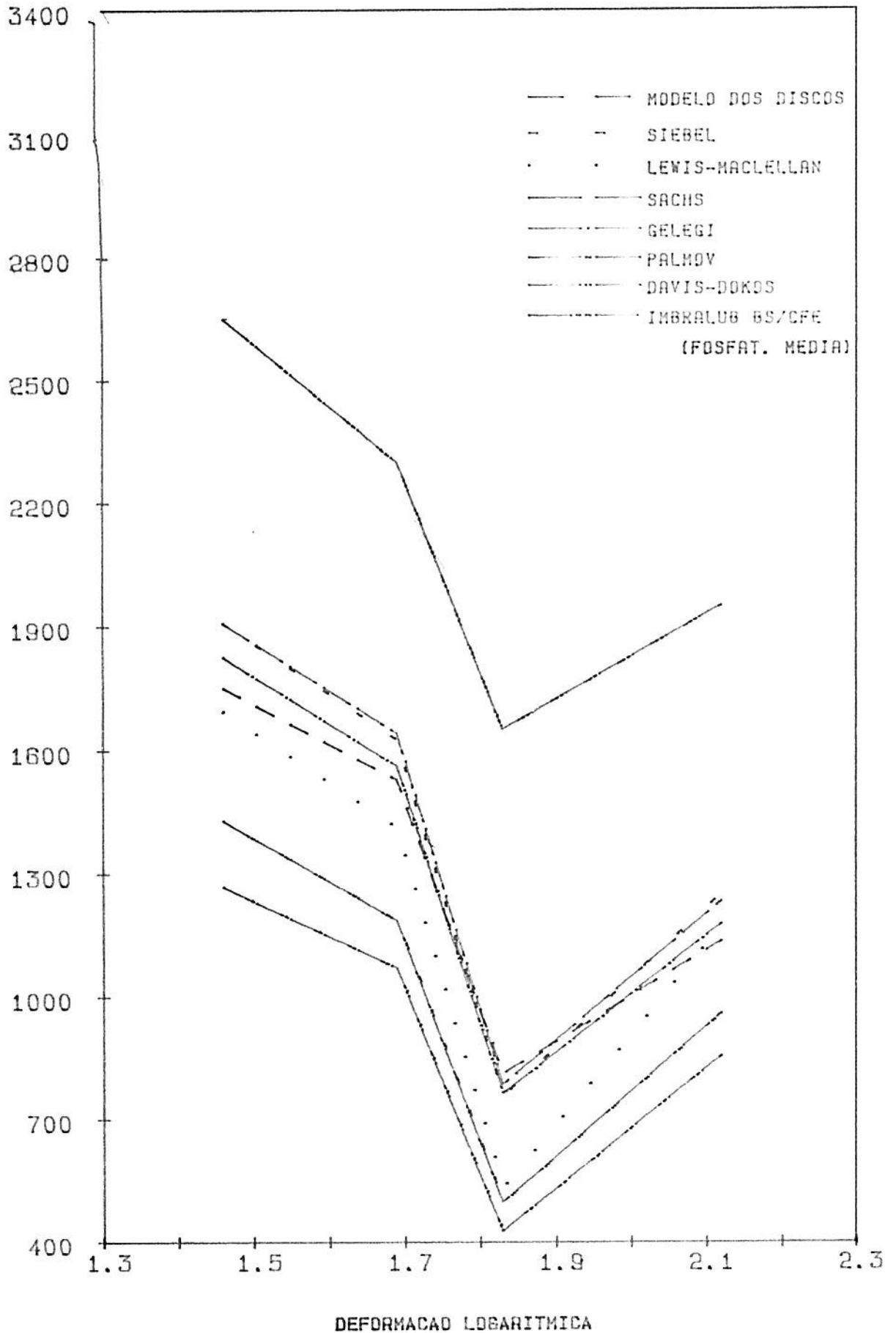


Fig. 8.4-e Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CFE/FOSFAT. MÉDIA, 4^a S.)

FORÇA (N)

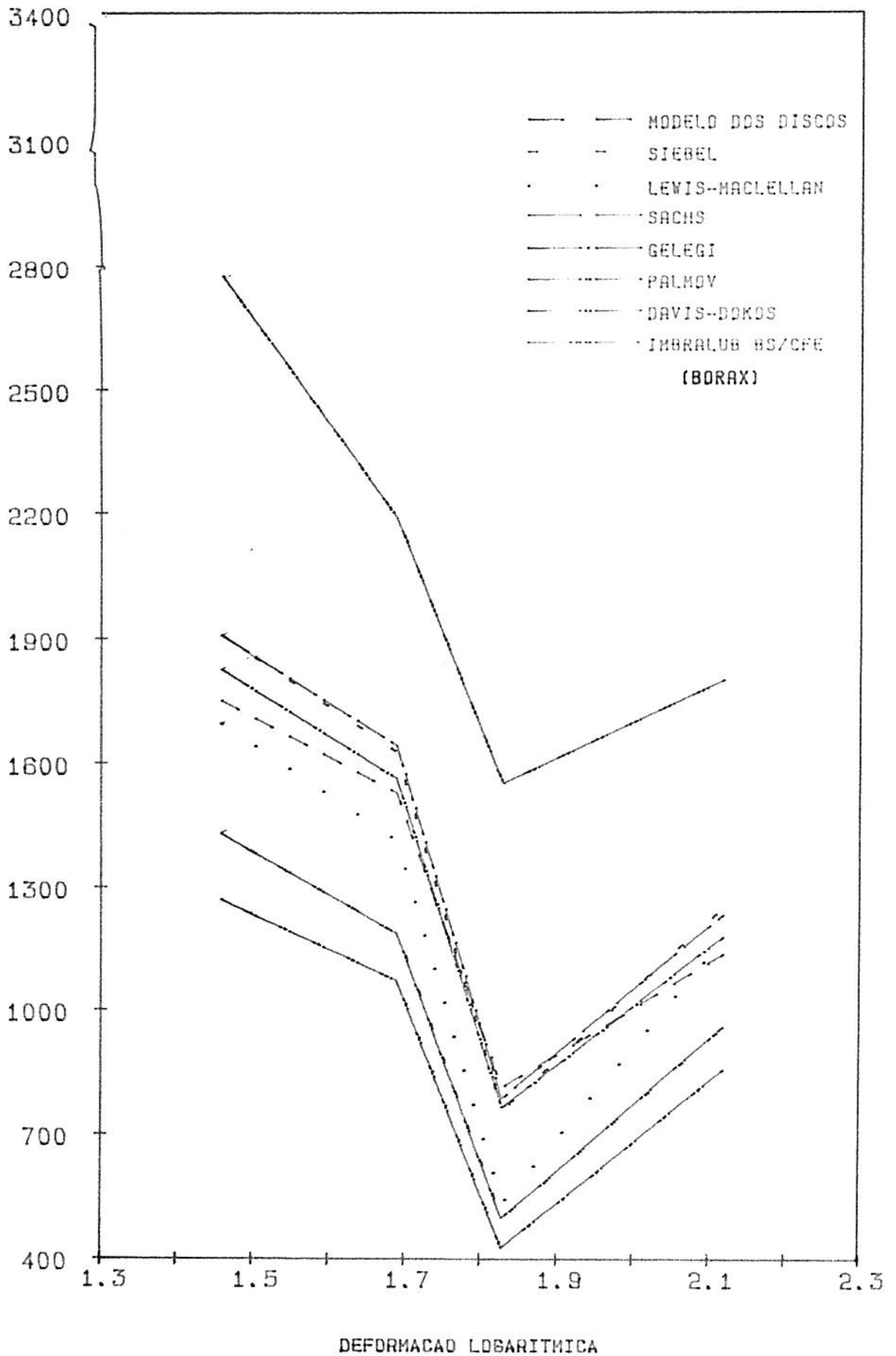


Fig. 8.4-f Modelos Teóricos e Força Medida (IMB.BS/CFE/BORAX, 4^a S.)

FORÇA (N)

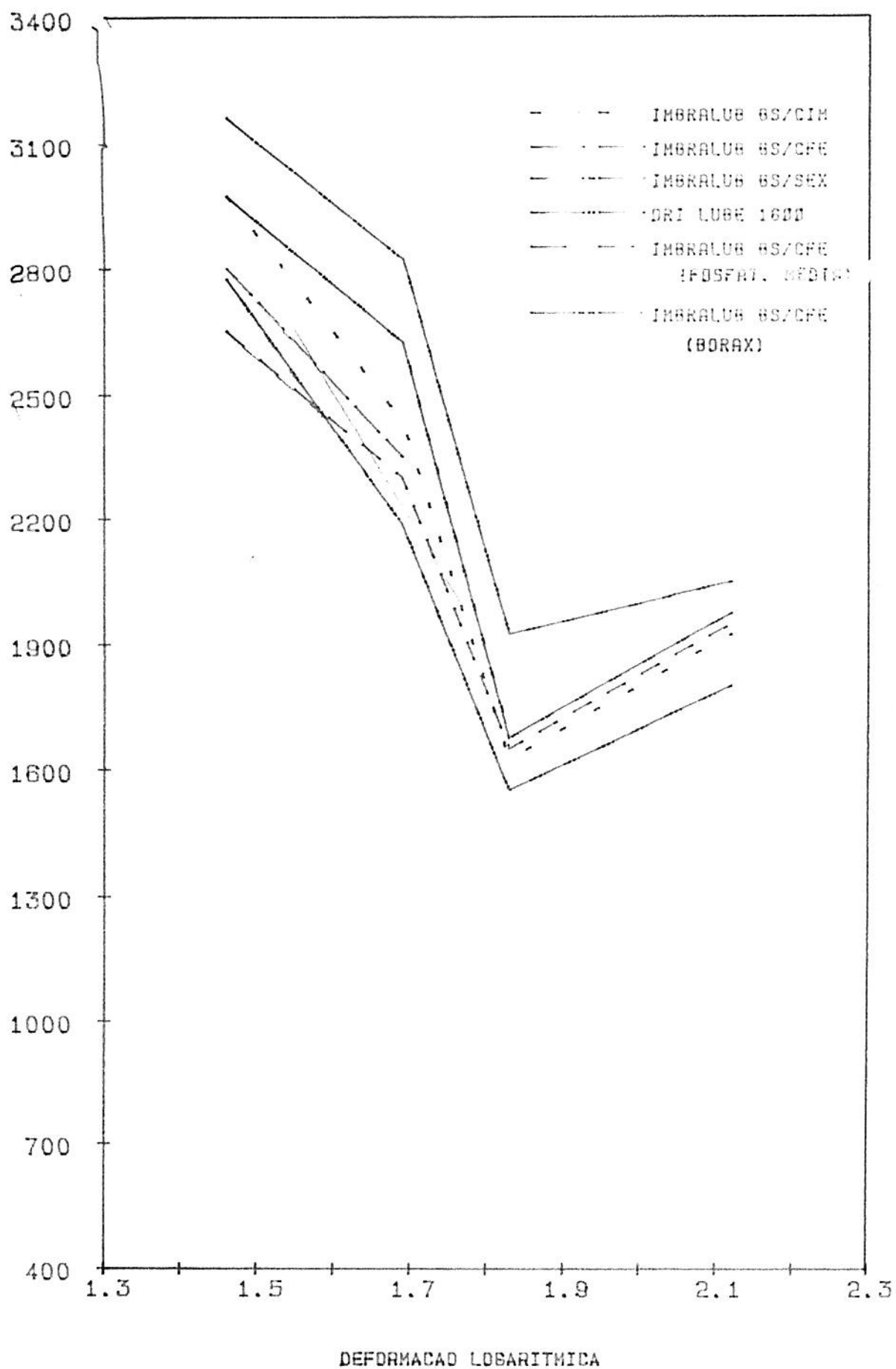


Fig. 8.4-g Valores de Força Medidos (4^a Série)

Tab. 8.9 - Quadro Comparativo Entre as Tensões de Trefilação para os Diversos Lubrificantes em 6 Passes
(1ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | ψ_A $= \ln \frac{A_0}{A_1}$ | K_{f1} N/mm ² | TENSÃO DE TREFILAÇÃO (N/mm ² / LUBRIFICANTE) | | | | |
|----------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|--------------------|---------|-----------------|----------|
| | | | | IMBRALUB BS/CIM | IMBRALUB BS/CFE | POLIMET | IMBRALUB SEX | DRI LUBE |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 825 | 363 | 394 | 369 | 378 | 363 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2650 | 865 | 396 | 444 | 396 | 420 | 377 |
| 3 | 2,32 - 2,20 | 0,1062 | 880 | 243 | 276 | 263 | 276 | 243 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,2932 | 915 | 454 | 441 | 432 | 454 | 410 |
| 5 | 1,90 - 1,75 | 0,1645 | 935 | 319 | 299 | 322 | 319 | 319 |
| 6 | 1,75 - 1,57 | 0,2169 | 960 | 400 | 371 | 394 | 387 | 400 |

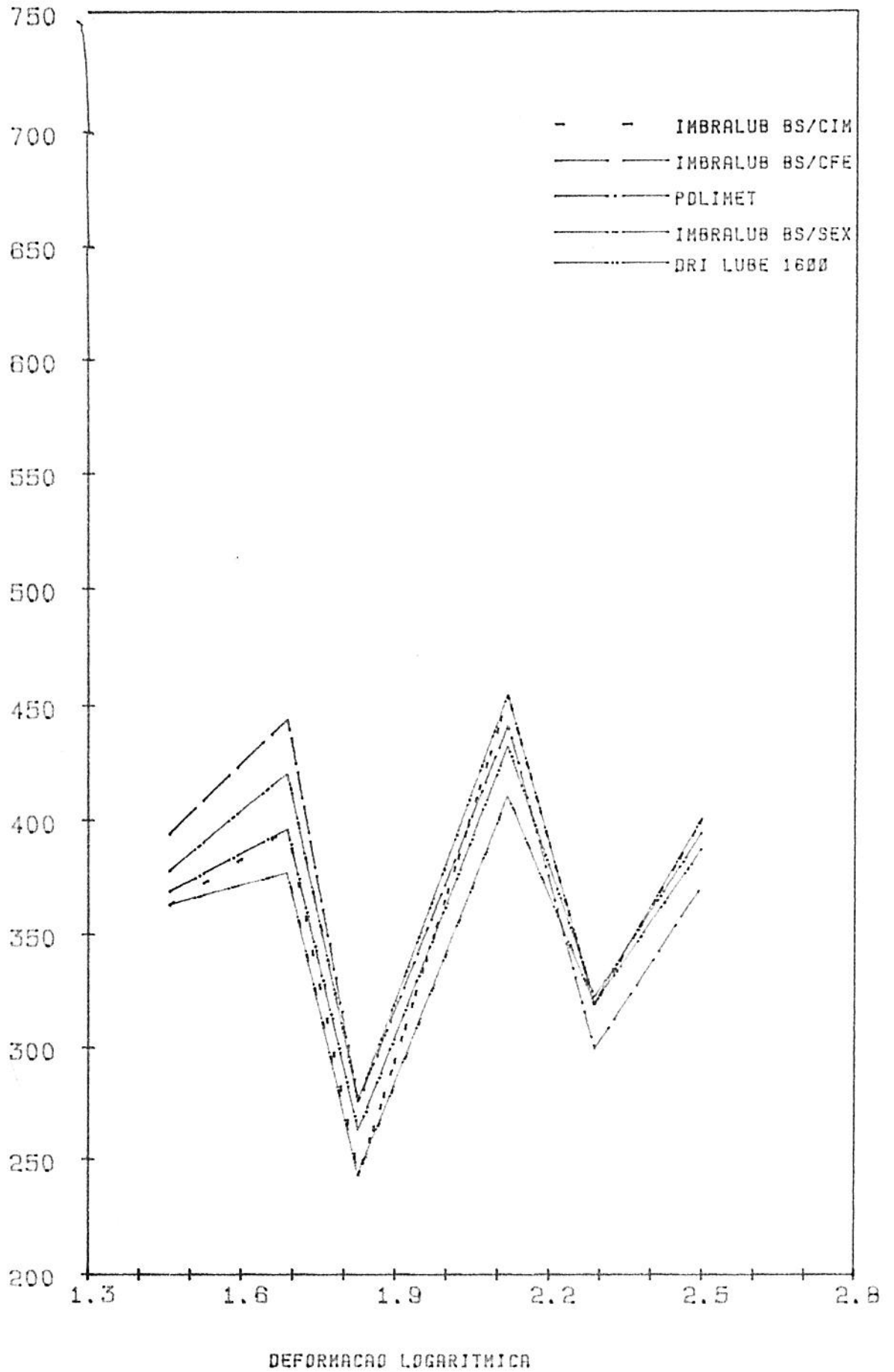
TENSÃO (N/MM²)

Fig. 8.6 Comparação entre Tensões de Trefilação (1^a Série)

Tab. 8.10 - Quadro Comparativo Entre as Tensões de Trefilação Para os
Diversos Lubrificantes em 4 Passes
(2ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | $\psi_A = \ln \frac{A_0}{A_1}$ | $K_{f_1} \text{ N/mm}^2$ | TENSÃO DE TREFILAÇÃO (N/mm ²) / LUBRIFICANTE | | | | | |
|----------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|-----------------|---------|--------------|---------------|------------|
| | | | | IMBRALUB BS/CIM | IMBRALUB BS/CFE | POLIMET | IMBRALUB SEX | DRI LUBE-1600 | MOLYKOTE G |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 825 | 376 | 365 | 413 | 387 | 360 | 387 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2650 | 865 | 426 | 414 | 452 | 438 | 434 | 503 |
| 3 | 2,32 - 1,90 | 0,3994 | 915 | 591 | 564 | 573 | 679 | 591 | 661 |
| 4 | 1,90 - 1,57 | 0,3816 | 960 | 607 | 574 | 581 | 678 | 574 | 678 |

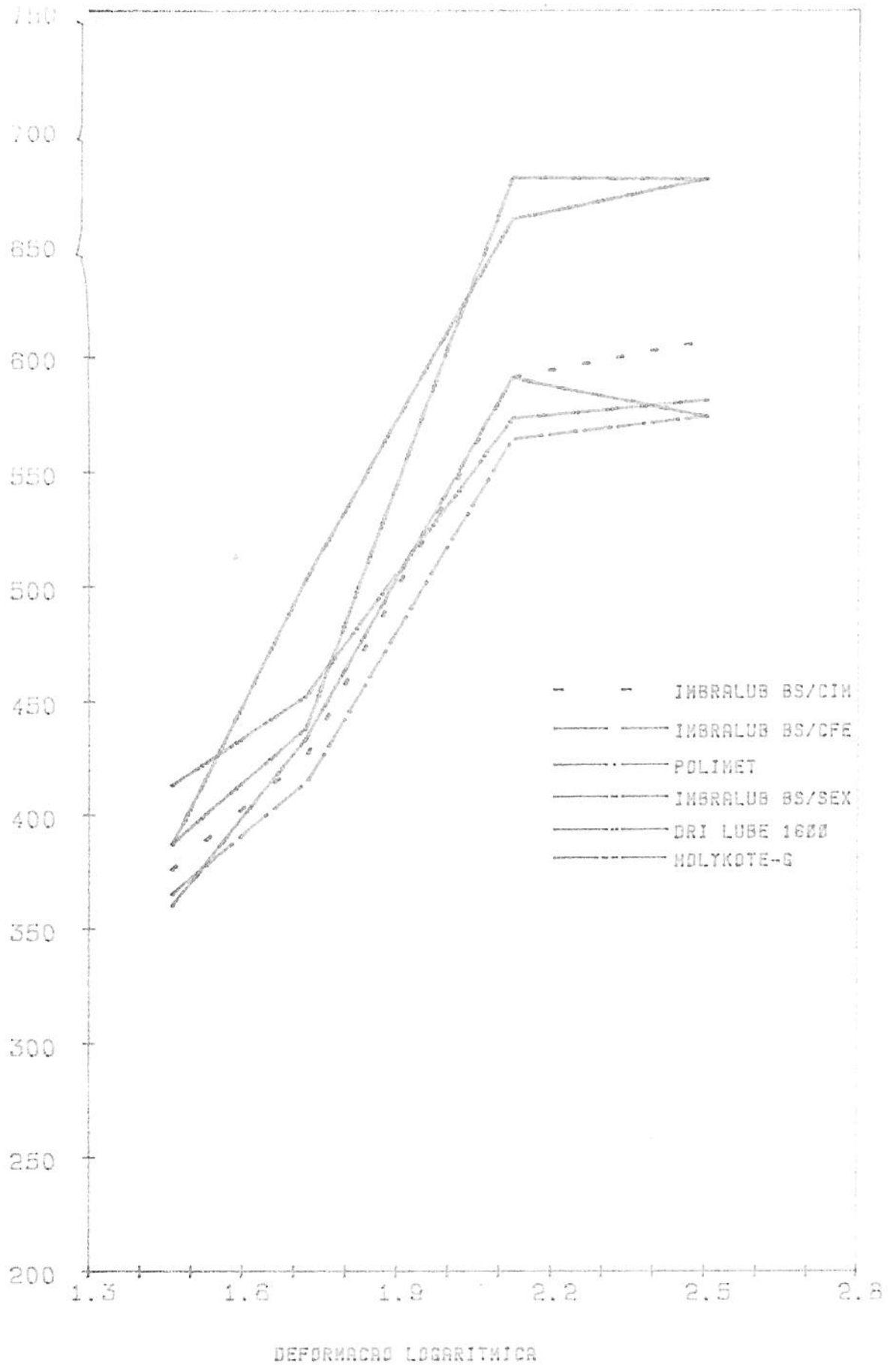
TENSÃO (N/MM²)

Fig. 8.7 - Comparação entre Tensões de Trefilação (2^a Série)

Tab. 8.11 - Quadro Comparativo Entre as Tensões de Trefilação Para os
Diversos Lubrificantes em 4 Passes
(3ª Série de Testes)

| PASSE N.º | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | ψ_A = $\ln \frac{A_0}{A_1}$ | K_{f1} N/mm ² | TENSÃO DE TREFILAÇÃO (N/mm ²) / LUBRIFICANTE | | | |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | | | | IMBRALUB BS/CFE | | ESTEARATO DE CÁLCIO | POLIETILENO GLICOL 4000 |
| | | | | FOSFATIZAÇÃO MÉDIA | FOSFATIZAÇÃO FINA | | |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 825 | 385 | 385 | 372 | 358 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2650 | 865 | 414 | 486 | 377 | 394 |
| 3 | 2,32 - 1,90 | 0,3994 | 915 | 617 | 635 | 600 | 582 |
| 4 | 1,90 - 1,57 | 0,3816 | 960 | 661 | 678 | 600 | 620 |

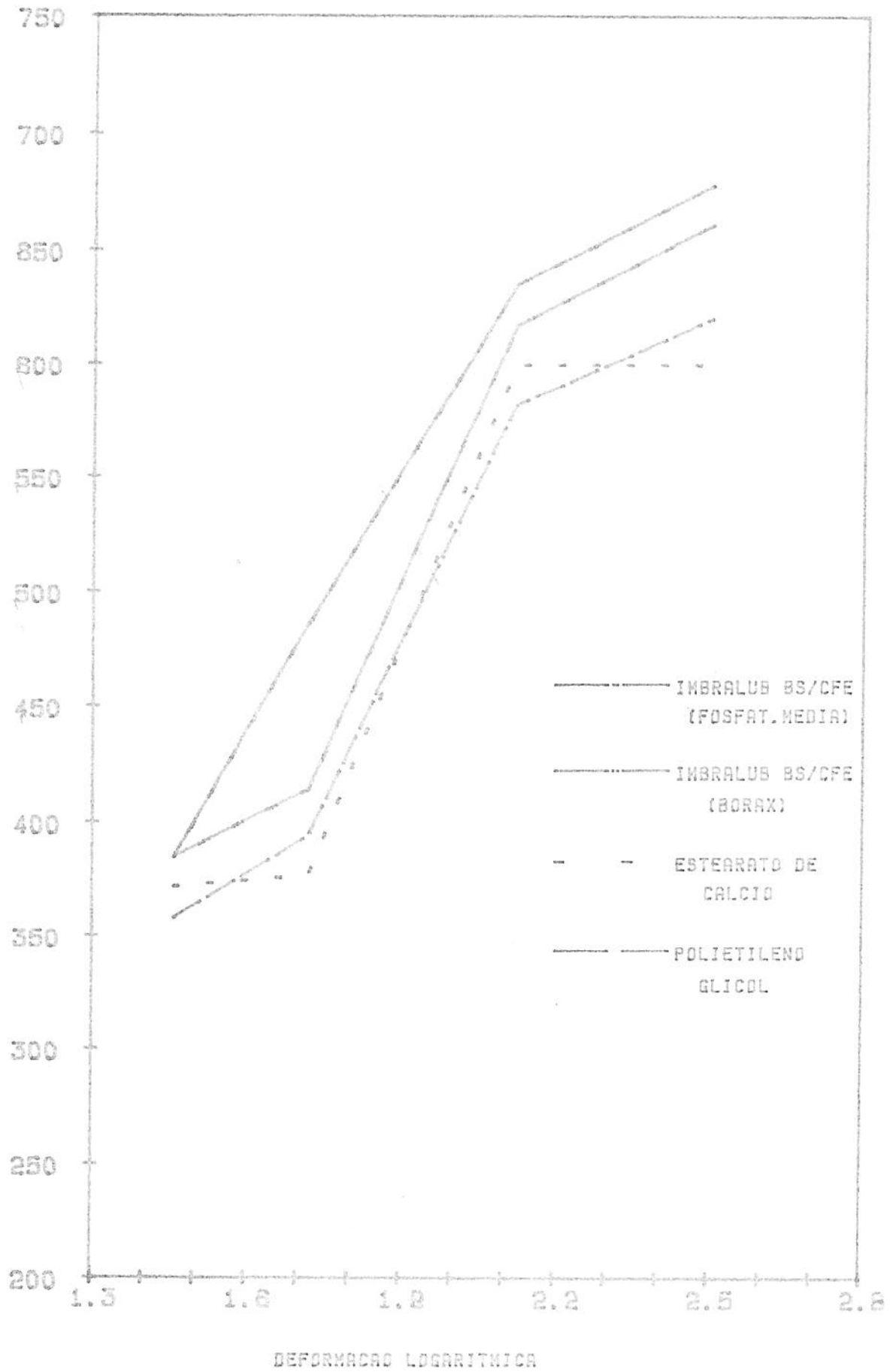
TENSÃO (N/MM²)

Fig. 8.8 Comparação entre Tensões de Trefilação (3^a Série)

Tab. 8.12 - Quadro Comparativo Entre as Tensões de Trefilação
 Para os Diversos Lubrificantes em 4 Passes
 (4ª Série de Testes)

| PASSE Nº | REDUÇÃO DE DIÂMETROS (mm) | ψ_A $= \ln \frac{A_0}{A_1}$ | K_{f1} (N/mm ²) | TENSÃO DE TREFILAÇÃO (N/mm ²) / LUBRIFICANTE | | | | | |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|-------------|----------|------------------|-------------|-------|
| | | | | IMB. BS/CIM | IMB. BS/CFE | IMB. SEX | DRI LUBE 1600 | IMB. BS/CFE | |
| | | | | | | | | FOSFAT. | BÓRAX |
| 1 | 3,00 - 2,65 | 0,2481 | 825 | 539 | 508 | 573 | 539 | 480 | 503 |
| 2 | 2,65 - 2,32 | 0,2650 | 865 | 576 | 556 | 668 | 621 | 544 | 517 |
| 3 | 2,32 - 2,20 | 0,1062 | 880 | 428 | - | 506 | 441 | 434 | 408 |
| 4 | 2,20 - 1,90 | 0,2932 | 915 | 679 | - | 723 | 697 | 688 | 635 |

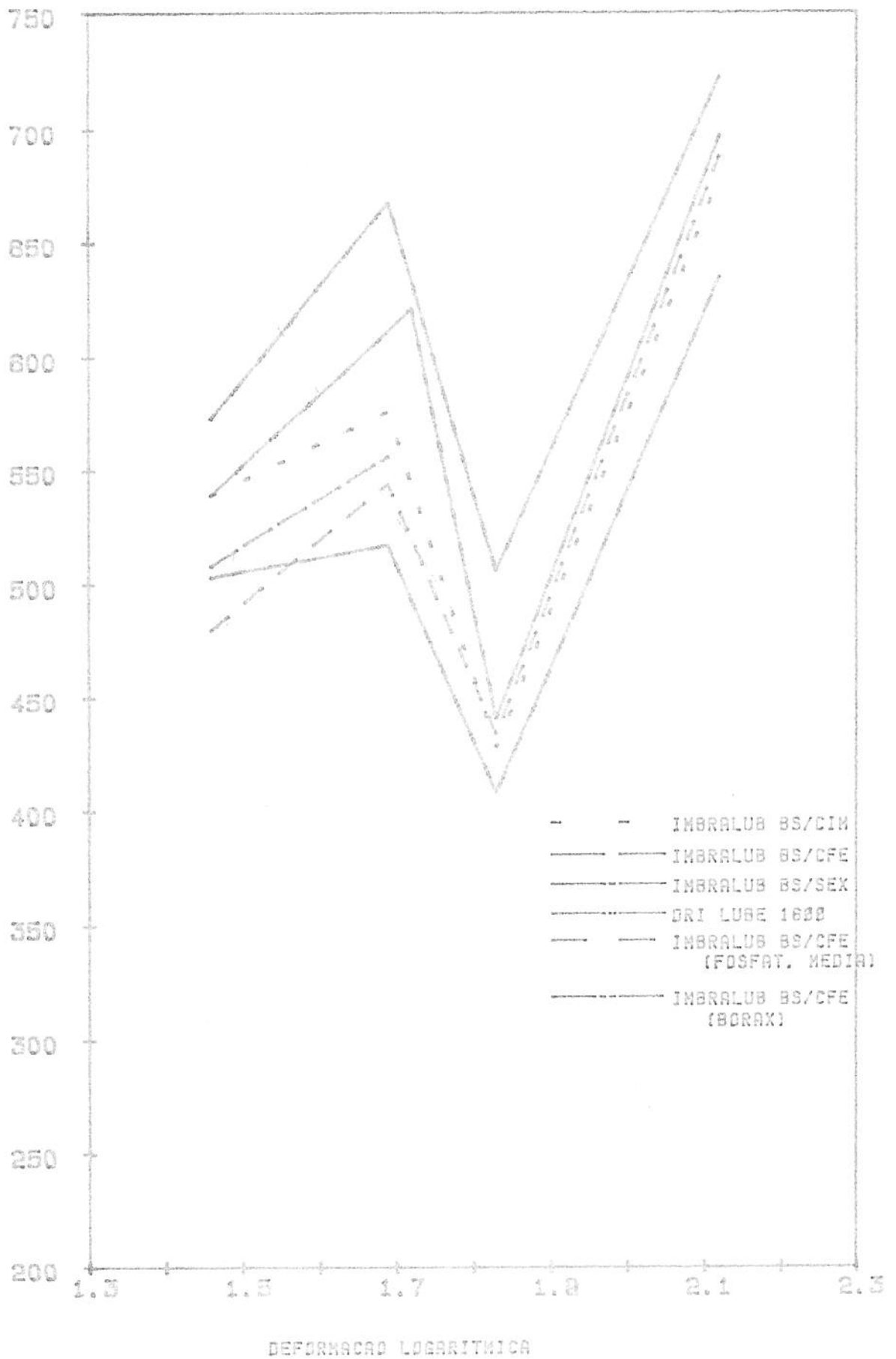
TENSÃO (N/MM²)

Fig. 8.9 Comparação entre Tensões de Trefilação (4^a Série)

9 - CONCLUSÕES

- É possível analisar lubrificantes medindo-se a força de trefilação desde que haja um bom acoplamento entre a fieira e a célula de carga, tal como o procedimento adotado na quarta série de testes com o sensor fornecendo uma imprecisão máxima de $\pm 2\%$.

- Dos modelos teóricos analisados, os que apresentam resultados mais próximos dos valores experimentais são os de Siebel, Sachs e Discos com a correção da parcela de cisalhamento interno, seguido de Lewis-Mac Lellan e Geleji. Os de maiores discrepâncias são os de Palmov e Davis-Dokos.

O modelo dos discos, desde que corrigido com a parcela de trabalho redundante, leva vantagem sobre os outros modelos porque possibilita fazer-se uma análise do comportamento do material no interior da fieira.

- Para cálculos práticos e rápidos da força de trefilação, os modelos de Siebel e Sachs são os mais precisos.

- O coeficiente de atrito utilizado nos cálculos (0,05) geralmente é baixo para as condições de lubrificação dos experimentos. O mesmo situa-se, para as três primeiras séries, numa faixa entre 0,04 e 0,10, de acordo com cálculos semelhantes aos apresentados na tabela 8.11. Na quarta série de testes, com a retirada do filme lubrificante, o coeficiente de atrito situa-se entre 0,14 e 0,29.

- Analisando-se os valores de força medidos na primeira, segunda e terceira série, constata-se que o comportamento dos lubrificantes não é uniforme, isto é, não existe uma tendência que mostre determinado lubrificante causando menores valores de força em todos os passes. Este fato é explicado por três motivos:

- diferenças sensíveis de rugosidade em uma mesma região do arame.
- o arame já possui um filme residual de lubrificante e a adição de mais lubrificante tem pouco efeito na força de trefilação mas é necessário para evitar o arrancamento do

filme e o desgaste excessivo das fieiras,

- A imprecisão da célula de carga simplesmente anteposta a fieira é de $\pm 5\%$, o que também dificulta uma análise mais apurada dos lubrificantes.

- É muito importante o filme residual de lubrificante conseguido nos primeiros passes de trefilação, pois se a redução for mal feita e o mesmo for arrancado tem-se uma excessiva elevação no coeficiente de atrito

- Ao se retirar o filme residual de lubrificante, quarta série de testes, observou-se que os lubrificantes começaram a apresentar tendências no comportamento de forças. O lubrificante que apresentou menores valores de forças nos dois primeiros passes foi o imbralub bs/cfe e nos dois últimos foi o imbralub bs/cim.

- A aplicação dos porta-lubrificantes fosfato e bórax são eficientes na redução de forças mesmo sendo aplicados em um arame encruado. Dos dois, o que mostrou melhor desempenho para as condições de teste e material foi o bórax.

- Quanto maior a rugosidade da camada de fosfato menor a força.

- Se a superfície de determinado material, no início da trefilação, não apresenta homogeneidade na rugosidade da camada lubrificante, a mesma não é eliminada ao longo dos passes de trefilação.

- Através da análise de rugosidade pode-se estimar as condições de lubrificação, pois a espessura do filme lubrificante está associado a esta rugosidade. A tendência geral é que as superfícies mais rugosas sejam trefiladas com menores forças. Este fato deve estar associado também ao ângulo da fieira.

- Com a velocidade de trefilação utilizada, não se conseguiu condições de lubrificação hidrodinâmica (μ entre 0,01 e 0,05 /9.1/), pois em alguns passes, o coeficiente de atrito chega a ser 0,1; exatamente o dobro do estipulado por Siebel.

10 - SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

- Fazer o mesmo estudo de lubrificantes para bitolas de arames desde o fio-máquina conservando-se, em cada série, geometria e reduções para facilitar a análise.
- Utilizar o processo de decapagem mecânica e analisar a espessura do filme lubrificante frente ao mesmo material decapado quimicamente.
- Levantar experimentalmente curvas tensões de trefilação em função das reduções para diferentes ângulos de fieira procurando-se determinar "ângulos ótimos" de fieiras. Com estes ângulos confeccionar as fieiras adequadas para as reduções propostas. Verificar também a influência do paralelo de calibração na geometria da fieira.
- Projetar um sensor semelhante ao descrito no capítulo três /3.11/ para medir a espessura do filme lubrificante neste parâmetro.
- Analisar os lubrificantes frente o desgaste de fieiras.
- Utilizar o modelo dos discos para determinar qual o perfil ótimo de fieira (reto, côncavo, convexo, senoidal etc.).
- Determinar o coeficiente de atrito na parte cônica e na parte paralela da fieira como fez Yang /1.8/ e usar este coeficiente nos modelos teóricos.
- Repetir os experimentos em maiores velocidades de trefilação e verificar sua influência na lubrificação e força; pois baixas velocidades de trefilação geralmente não promovem condições de lubrificação hidrodinâmica.

11 - BIBLIOGRAFIA

- /1.1/ LANGE, K. - "Handbook of Metal Forming". Mc Graw Hill Book Company 1985.
- /1.2/ JOHNSON, R.W.; ROWE, G.W. - "Evaluation of Coefficient of friction in wire and bar drawing". Reprinted from Tribology in Iron and Steel works, pg. 43 - 46. ISI publication 125.
- /1.3/ GERBASE, J.F. - "Método de Medição de força de trefilação de arames; Avaliação da variação do coeficiente de atrito em Trefilação de arame aço" Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1976.
- /1.4/ RIGONI, A. - "Comparação de Porta Lubrificantes e Lubrificantes na trefilação de arames de aço". Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1978.
- /1.5/ BOOR, U. - "Praxisnahe Prüfungen von Kühlschmierstoffen zum Stahldrahtziehen". Stahl u. Eisen 102 (1982) Nr.1, pg. 29 - 34.
- /1.6/ SYMONS, G.R.; STEVENS, A.J.; THOMPSON, P.J. - "Hydrodynamic lubrication and Coating of wire using a polymer melt during the drawing operation". Wire industry, June 1982, pg. 469 - 473.
- /1.7/ LANCASTER, P.R. - "The importance of die profile in wire drawing" Wire Industry, August 1975, pg. 589 - 595.
- /1.8/ YANG, C.T. - "On the mechanics of wire drawing". Journal of Engineering for Industry, November 1961, pg. 523 - 530.
- /1.9/ KLEIN, A.N. - "Método de determinação do coeficiente de atrito na trefilação de arames. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1979.
- /1.10/ CASANOVA, C.A.M. - "Avaliação do método de determinação do coeficiente de atrito em fieira bi-partida em trefilação de arames de Cobre em trefiladora industrial". Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1983.
- /2.1/ KOPP, R.; TZSCHEUTSCHLER, H. - "Información de novedades en el trefilado en caliente de aceros de alta aleación". Alambre, Enero/Febrero 1984, pg. 1 - 4.

- /2.2/ PETKOVIC, D. - "Direct wire cooling System" *Wire industry*, May 1984, pg. 409 - 410.
- /2.3/ PAWELSKI, O. ; KEUPER, R. - "Investigation on direct cooling in drawing steel wire". *Wire industry*, June 1984, pg. 465 - 468.
- /2.4/ McLENNAN, J.A. - "Synthetic diamond dies and their impact on the industry". *Wire industry*, August 1984, pg. 572 - 578.
- /2.5/ HINKFOTH, R. - "La influencia de la forma real de la hilera en la fuerza de estirado". *Alambre*, Vol. 35 Mayo , Junio 1985, pg. 83 - 85.
- /3.1/ SCHMIDT, W. - "Aufbau von Trockenziehmitteln und Anforderungen an Trockenziehmittel beim Drahtziehen". *Stahl u. Eisen* 91 (1971) Nr. 24 - 25, November, pg. 1374 - 1381.
- /3.2/ ROWE, G.W. - "Lubrication in the drawing of Steel wire". *Wire industry*, April 1978, pg. 229 - 236.
- /3.3/ JOHN COLLIER & Co Ltd. - "Wire drawing Lubrication . Application, Behaviour, Effects." *Wire industry*, August 1972, pag 678-682
- /3.4/ GREENWALD, B.W. - "Wire drawing Lubricants". A review (1954 - 1975), A preview (1976 - 1985). *Wire Journal*, May 1977, pg. 74 - 78.
- /3.5/ COELHO, A.R.Z.; MAGNAVACCA, E.H. - "Lubrificação a seco em trefilação de arames de aço Carbono". *Contribuição técnica apresentada no XXX Congresso Anual da ABM*, 1975.
- /3.6/ SCHAEFFER, L. - "Pressão hidrostática reduz coeficiente de atrito" *Engenharia na indústria* , 1976, pg. 50 - 51.
- /3.7/ RASP, W.; PAWELSKI, O. - "Messung rheologischer Kennwerte von Trockenziehseifen" *Arch. Eisenhüttenwes*, 52 (1981) Nr. 10 Oktober, pg. 391 - 397.
- /3.8/ LUNN, B. - "Lubrication in wire drawing and some observations on drawing soaps". *Wire*, October, 1965, pg. 1554 - 1558 e pg. 1636 - 1637.

- /3.9/ SMITH, B.F. - "Effects Lubrication and Consequences in Wire Drawing"
Wire industry, april 1976, pg. 241 - 243.
- /3.10/ WISTREICH, J.G. - "ABC of better lubrication and cooling in Steel wire drawing". Wire, november 1959, pg. 1486 - 1489 e 1550 - 1551.
- /3.11/ GRUDEV, A.P.; DOLZHANSKII, A.M.; BORODAVKIN, I.T.; SIGALOV, B. -
"Study of thickness of lubricant layer during drawing", Steel in the USSR, August 1984, pg. 386 - 387.
- /3.12/ NILSSON, B.; STENLUND, B. - "Detection of lubrication failures in Wire drawing". wire industry, November 1984, pg. 855 - 858.
- /3.13/ ACKERMAN, A.W.; ALLAN, F.V. - "The Synthetic Fluid and its uses in Wire drawing!" Wire, October 1966, pg. 1620 - 1623 e 1705 - 1707.
- /4.1/ CETLIN, P.R.; HELMAN, H. - "Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais". Editora Guanabara Dois S.A. (R.J.), 1983.
- /4.2/ DELLILE, J. e outros - "Herstellung von Stahldraht" Vol.1 Verein Deutscher Eisenhütten Leute! Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1969.
- /4.3/ SIEBEL, E. - "Der Derzeitige Stand der Erkenntnisse über die Mechanischen Vorgänge beim Drahtziehen". Stahl und Eisen Vol. 66/67, 1947 pg 171 - 180.
- /4.4/ GELEJI, A. - "Bildsame Formgebung der Metalle"; Akademie Verlag, Berlin, 1967.
- /4.5/ LANGE, K. - "Lehrbuch der Umformtechnik". Vol.I, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1972.
- /4.6/ SCHAEFFER, L. - "Introdução a Conformação Mecânica de Metais". Editora da UFRGS, Porto Alegre, 1983.
- /4.7/ BALDNER, K.R. - "Kraft und Arbeitsberechnungen für das Gleitziehen von einfachen Profilen". Tese de doutoramento da Universidade técnica de Aachen, Alemanha Ocidental, 1977.

- /5.1/ SCHAEFFER, L.; BORCHARDT, I. - "Teoria e Medição de Força na Trefilação de Arames e Barras!" *Anais do I Encontro de Tecnologia e Utilização dos Aços Nacionais*. Outubro 1982, COPPE - Rio de Janeiro.
- /5.2/ LUEG, W.; TREPTOW - "Schmierstoffe und Schmierstoffeträger beim Ziehen von Stahldraht". 1^a parte, *Stahl und Eisen* 72 (1952) Nr.8, pg. 339-416.
- /5.3/ DRUCKFIELD, B.S. - "The Teory and Practice of wire industry, August (1973), pg. 618-624.
- /5.4/ MACLELLAN, G.D.S. -- "A Critical Survey of wire drawing Theory". *Journal of the Iron and Steel Institute* .Vol. 158, March 1948, pg. 347-356.
- /5.5/ ROWE, G.W. - "An Introduction to the Principles of Metalworking". Edward Arnold Ltd., London 1968.
- /5.6/ KOPP, R. - "Reinisch Westfälische Technische Hochschule:" *Institut für Bildsame Formgebung*. Publicação interna.
- /5.7/ AVITZUR, B. - "Metal Forming: Processes and analyses" *Mc Graw-Hill Book Company*, New York, 1968.
- /5.8/ POMP, A.; GESCHE, G. - "Die Anwerdbarkeit der Isotherm Härtung bei der Herstellung Unlegierter Stahldrahte". *Stahl und Eisen* - Vol. 70, 1950, pg. 52-57.
- /7.1/ SCHEY, J.A. - "Surface Roughness Effects in Metalworking Lubrication!" *Lubrication Engineering*, June 1983, pg. 376-382.
- /7.2/ PAWELSKI, O.; KAISER, G. - "Untersuchungen über das Richten von Stahldraht mit einen Rollenrichtapparat!" *Stahl und Eisen* 92(1972), Nr. 21, 23, November, pg. 1215-1223.
- /8.1/ JOHNSON, R.W.; ROWE, G.W. - "Redundant work in drawing cylindrical stock" *Journal of the institute of Metals* Vol. 96. 1968, pg. 97.105.

- /9.1/ JURETZER, G.; FUHRMANN, H.; PETZOLD, K.M. - "Hydrodynamische Schmierung beim drahtziehen": *Neue Hütte*, April 1965, pg. 193-199.
- /A.1/ FEODOSYEV, V. - "Strength of Materials". Mir Publishers - Moscow, 1973.
- /A.2/ TIMOSCHENKO, S.P. - "Theory of Elasticity". McGraw-Hill - Vol. 2 - 1970.
- /A.3/ BORCHARDT, I.; SCHAEFFER, L.; GERBASE, J. - "Projeto e Construção de uma Célula de Carga para Medição de Força de Trefilação". *Revista Brasileira de Tecnologia*, Vol. 7, 1976, pg. 433-438.

APÊNDICE A - PROJETO DO SENSOR PARA MEDIR

FORÇA DE TREFILAÇÃO

O projeto deste sensor foi feito especificamente para trefilação de arames prevendo medições de força até 5.000 N.

Este sensor consiste na flexão de uma placa circular com um furo no centro e engastada nos bordos conforme mostra a figura A.1.

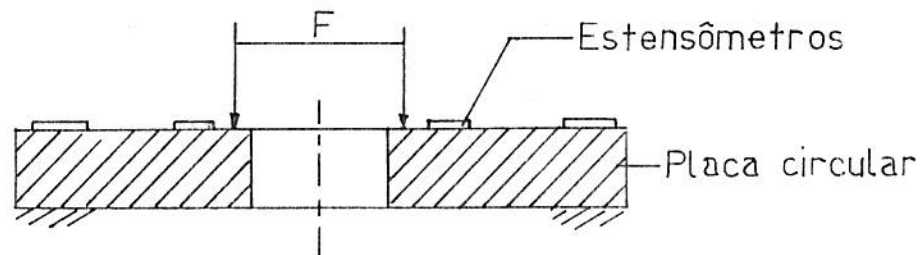


Fig. A.1 - Placa Sensora

A força de trefilação aplicada próxima ao diâmetro interno da placa causa deformações em suas faces superior e inferior. Estas deformações são medidas através de extensômetros de resistência elétrica ("Strain gauges") que são colados na face superior da placa em direções tangenciais e radiais nas posições onde ocorrem os máximos momentos. Os extensômetros utilizados são do tipo comercial com sensibilidade $k = 2,02$ e seu sinal de deformação é avaliado por uma ponte amplificadora de frequência com sensibilidade de 10^{-3} m/m.

A geometria do sensor utilizado permite medir forças até 5000N, ou seja abrangendo medições de força em trefiladoras industriais para arames com diâmetros menores que 3,00 mm.

O cálculo da espessura da placa circular é feito levando-se em consideração o esforço aplicado e a mínima deformação mensurável pela ponte, ou seja, a máxima sensibilidade desta.

$$\text{A expressão } \mathcal{E}' = \frac{1}{n\alpha} \cdot \frac{2}{k} c \cdot \mathcal{E} \quad (I)$$

relaciona a deformação real de um extensômetro (\mathcal{E}') com a deformação medida pela ponte, onde:

n é o número de braços ativos da ponte

k é o fator do extensômetro (gauge factor)

α e c são constantes que dependem da temperatura e do comprimento dos cabos de alimentação.

O cálculo da deformação da placa é feito segundo Feodosyev / A .1/ e Timoshenko / A .2/ através da expressão

$$\mathcal{E}' = \frac{1}{E} (\sigma_r + \nu \sigma_t) \quad (II)$$

onde \mathcal{E}' é a deformação da placa no sentido radial, σ_r e σ_t são as tensões radiais e tangenciais no ponto considerado, E é o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson.

As máximas tensões são calculadas por

$$\sigma_r^{\text{máx.}} = \pm \frac{6 M_r}{h^2} \quad (III) \quad e$$

$$\sigma_t^{\text{máx.}} = \pm \frac{6 M_t}{h^2} \quad (IV)$$

onde h é a espessura da placa e M_r e M_t os momentos radiais e tangenciais que podem ser calculados pelas expressões abaixo segundo a literatura / A .3/.

Então, para a célula de carga em questão utilizando-se quatro extensômetros ativos e arbitrando α e c iguais a unidade, têm-se substituindo estes valores na expressão (I):

$$\xi' = \frac{1}{4.1} \cdot \frac{2}{2,02} \cdot 1 \cdot \xi = 0,25 \xi \quad (\text{VII})$$

Sabe-se que a mínima deformação mensurável pela ponte usando uma escala de sensibilidade média é

$$\xi = 1,0 \times 10^{-6} \text{ m/m. Então resulta para a expressão (VII)}$$

$$\xi' = 0,25 \cdot 10^{-6}$$

Este valor de ξ' é mensurável com segurança, com a ponte numa escala de sensibilidade média.

Através das expressões (V) e (VI) calculam-se os momentos M_r e M_t , resultando

$$M_r = -0,05 F \quad e$$

$$M_t = 0,09 F$$

Substituindo estes valores em (III) e (IV), tem-se

$$\sigma_r = -\frac{0,30 F}{h^2} \quad e$$

$$\sigma_t = \frac{0,54 F}{h^2}$$

Substituindo os valores de σ_r e σ_t na expressão (II) obtém-se:

$$\xi' = \frac{1}{E} \left(-\frac{0,30 F}{h^2} - 0,3 \frac{0,54 F}{h^2} \right) \quad (\text{VIII})$$

$$M_r = \frac{F}{4\pi} \left\{ (1+\nu) \ln \frac{b}{r} - 1 - \frac{a^2}{r^2} \frac{[(1+\nu) \ln(\frac{b}{a}) - 1] [r^2(1+\nu) + b^2(1-\nu)]}{b^2(1-\nu) + a^2(1+\nu)} \right\} \quad (V)$$

e

$$M_t = \frac{F}{4\pi} \left\{ (1+\nu) - \nu - \frac{a^2}{r^2} \frac{[(1+\nu) \ln(b/a) - 1] [r^2(1+\nu) - b^2(1-\nu)]}{b^2(1-\nu)} \right\} \quad (VI)$$

onde "F" é a força aplicada no contorno interno da placa, "b" o raio externo, "a" o raio interno e "r" o raio onde estão colados os extensômetros. A escolha da posição de colagem dos extensômetros é feita em função da avaliação do diagrama de momentos que está mostrado na Fig. A.2

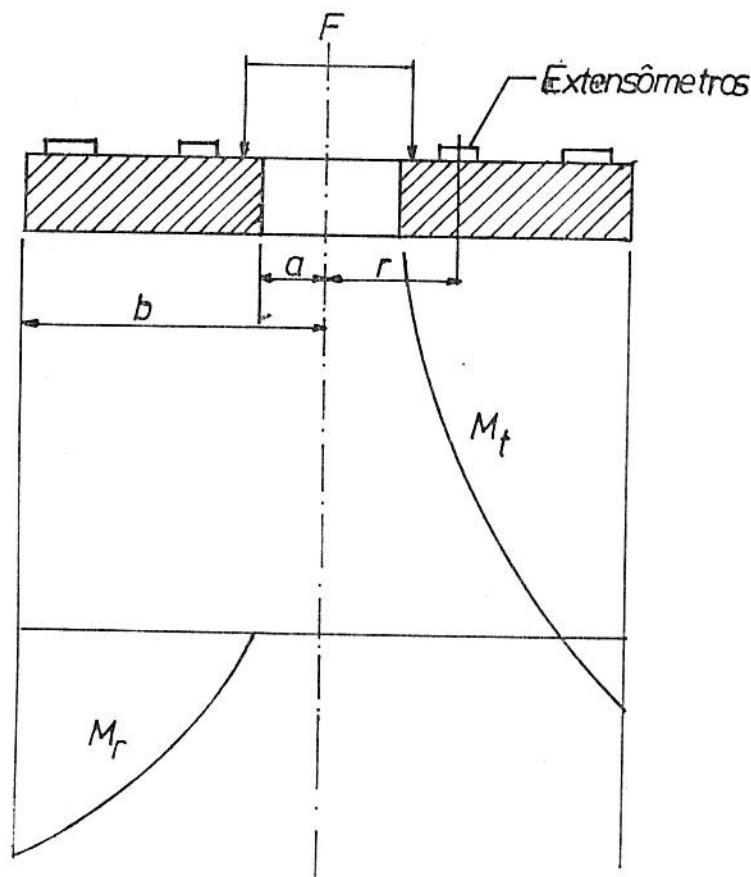


Fig. A.2 - Distribuição dos Momentos radiais e tangenciais na placa circular.

A espessura da placa circular foi calculada igualando-se as expressões (I) e (II) e após foi verificado se, com a aplicação da força máxima, a tensão de escoamento do material não foi ultrapassada.

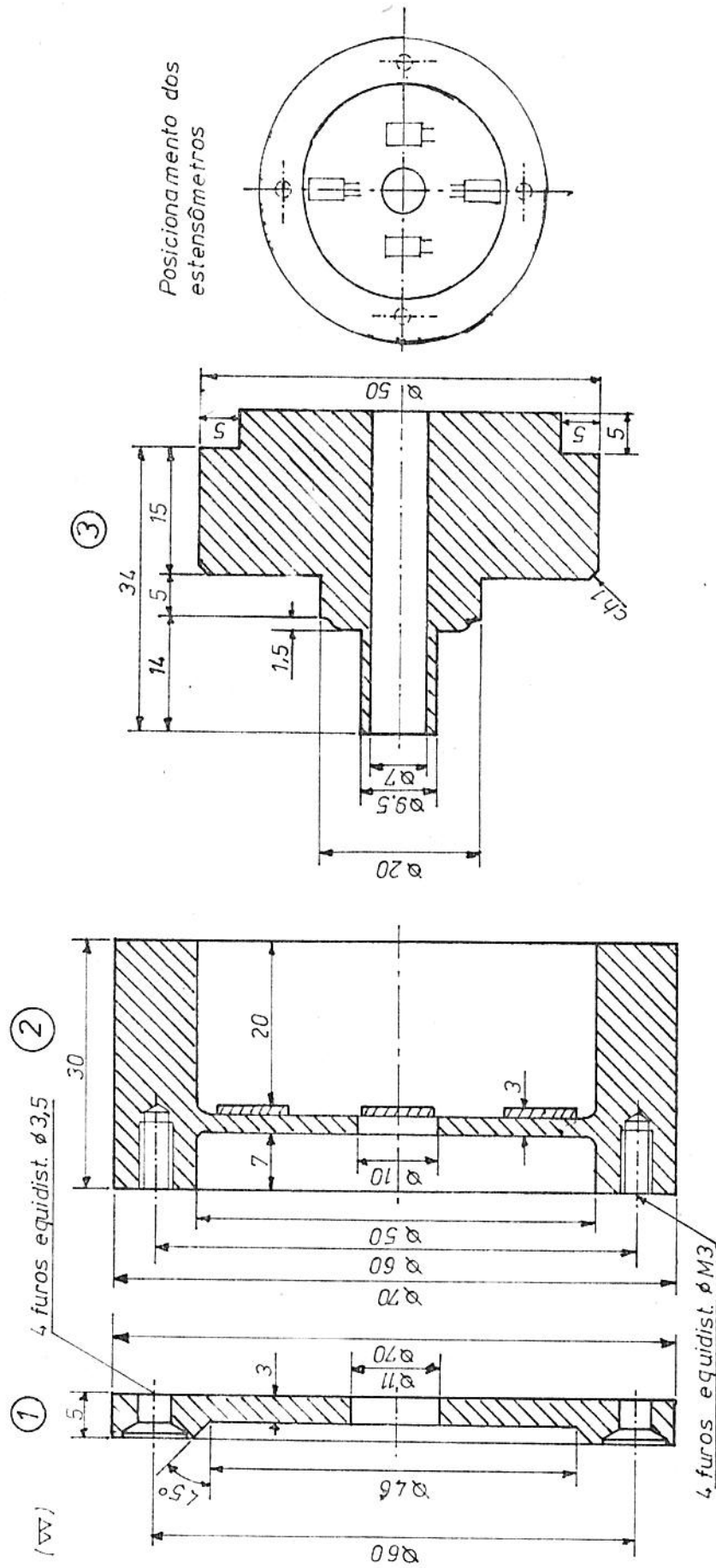


Fig. A.3 - Desenho do conjunto Sensor

- 1 - Placa suporte
- 2 - Placa sensora
- 3 - Pino de Encontro

A força estipulada com coeficiente de segurança 2,0 para para a célula em questão é 5000 N e a espessura correspondente usando a expressão VIII para uma força mínima de 1000 N é $h = 3,0$ mm. Construiu-se a célula de carga com esta espessura. Também foi verificado se com esta espessura as tensões radiais e tangenciais não ultrapassam a tensão de escoamento do material.

O dimensionamento final do sensor e materiais utilizados assim como a posição onde estão colados os extensômetros estão mostrados na Fig. A.3.

Calibração do Sensor

A calibração foi realizada em uma máquina universal de ensaios mecânicos marca Kratos, capacidade 10 toneladas, equipada para compressão. Esta máquina possui um dinamômetro aferido por padrões de calibração. A imprecisão desde dinamômetro é 1%. Comprimiu-se a célula de carga e, desta maneira, constituiu-se a curva de calibração que está mostrada na Fig. A.4. Cada ponto desta curva representa a correspondência entre os valores de tensão de desbalço da ponte e os valores de força medidos pelo dinamômetro da máquina.

Foram levantadas várias curvas comprimindo-se a célula de carga em diferentes posições. A imprecisão máxima do sensor, nestas condições de calibração, foi de $\pm 5\%$. Observou-se também que, com o sensor colocado numa só posição, a imprecisão diminui para $\pm 2\%$.

FORÇA (N)

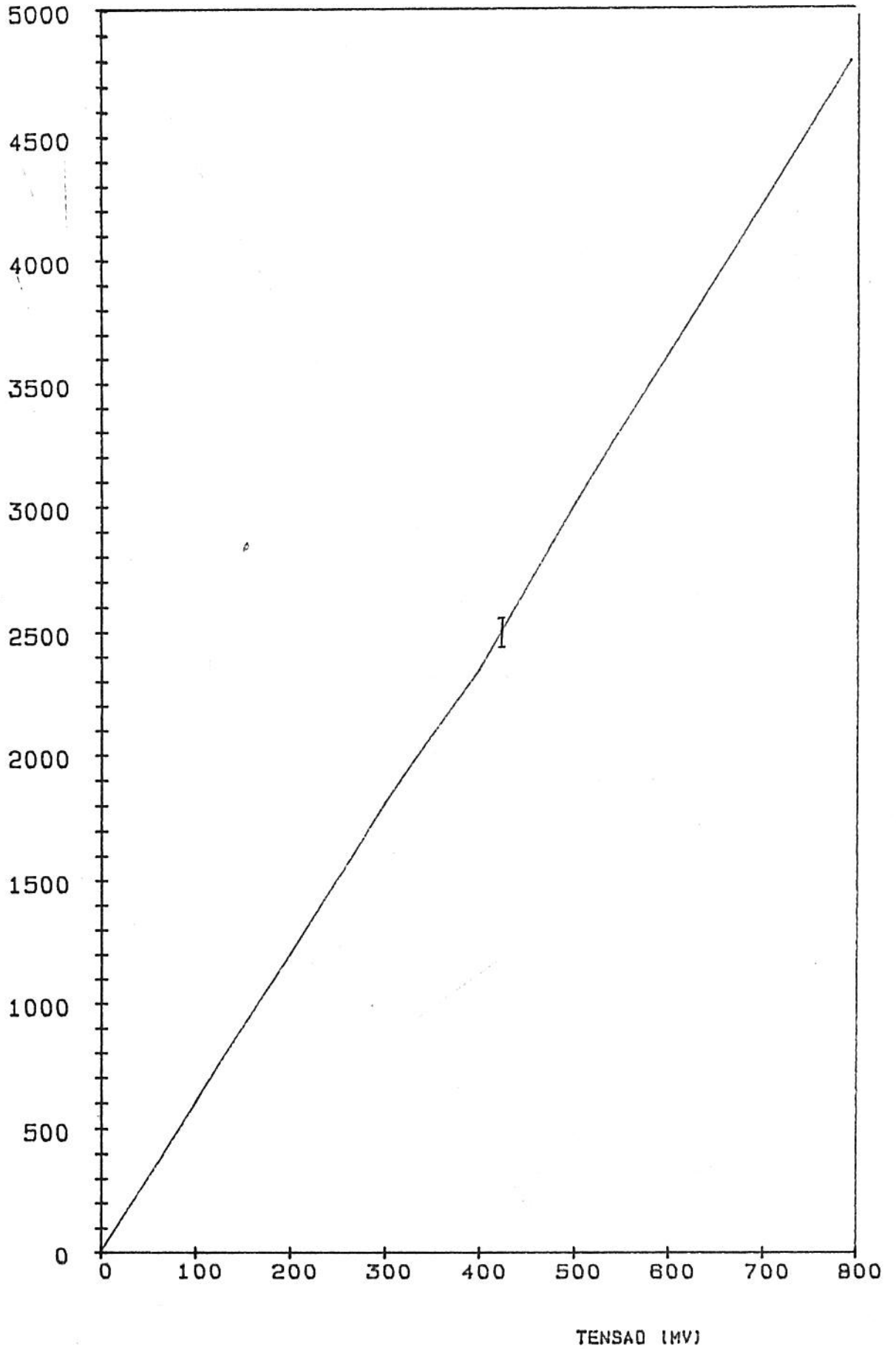


Fig. A. 4 - Curva de Calibração do Sensor T-5000

APÊNDICE B- PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO DOS DISCOS

```

0 rem#####
1 rem"  MENU  DE  OPCOES  "
2 rem#####
3 rem
4 rem
5 print "π:pi=3.1416"
10 sys40960:lc
15 !a,3
20 !l,"TREFILACAO",3,3,100,100,1
23 !l,"Calculo de Forca por Regressao Linear      ",2,2,0,140,1
24 print"##### (C) Marco 1985 Joao Ricardo Masuero LACOM"
25 print"##### Escolha sua opção:"
30 print"1 - Introducao de dados"chr#(13)"2 - Correcao de Dados"chr#(13):
35 print"3 - Execucão do Calculo"chr#(13)"4 - Impressao dos resultados"
40 print"5 - Reinicializacao":print
50 getx#:ifx#=""then50
55 xx=val(x#):ifxx<lorxx>5then50
60 !c:print "π":onxgosub500,1000,1500,2000,90
70 goto5
90 run
483 rem
484 rem
485 rem#####
490 rem###  i n t r o d u c a o  d e  d a d o s  ###
495 rem#####
496 rem
497 rem
500 print:print:input"Numero de Fieiras":n
505 dima!n),d!n),f!n)
510 print
512 print"#####
===="
515 print"##### Introduza os angulos em graus"
520 print:fori=1ton:print"Introduza semi-angulo da fieira ";i:" ":inputa(i)
530 nexti
540 print:input"Introduza diametro inicial":d!0)
550 fori=1ton:print"Introduza diametro final da fieira ";i:" ":inputd(i):next
555 print"-----"
560 print:input"introduza o numero de discos":t
570 dimf!n,t),k!n,t),s!n,t),sr!n,t)
575 print"-----"
580 print:input"Introduza coeficiente de atrito":mi
585 print"#####
===="
590 print:input"Numero de pontos para a interpolacao":p
600 dima!p),b!p):fori=1top:print"Entre com a abcissa ";i:" ":inputa(i)
610 print"Entre com a ordenada ";i:" ":inputb(i)
620 print"-----"
630 nexti
640 return
1000 rem
1001 rem

```

```

1002 rem#####
1003 rem***   c o r r e c a o   d e   d a d o s   ***
1004 rem#####
1005 rem
1006 rem
1020 print "3)";tab(5)"3.5 mi-Angulos";tab(50)"3.5 diametros"
1030 for i=0 to n:print i;"-";a(i);:i=i+1:print tab(20);i;"-";a(i);
1040 i=i-1:print tab(40)"3.5";i;"-";d(i);:i=i+1:print tab(58);i;"-";d(i)
1050 if n-i <> 1 then next i: goto 1070
1060 print n;" ";a(n);tab(40)"3.5";n;" ";d(n)
1070 print "3.5 coeficiente de Atrito :";mi;tab(40)"3.5 numero de discos :";l
1080 print tab(12)"3.5 p e i s s a s ";tab(50)"3.5 d e n a d a s : "
1085 if p=0 then l130
1086 if p=1 then l120
1090 for i=1 to p:print i;" ";a(i);:i=i+1:print tab(20);i;" ";a(i);
1100 i=i-1:print tab(38)"3.5";i;"-";b(i);:i=i+1:print tab(57);i;"-";b(i)
1110 if p-i <> 1 then next i: goto l130
1120 print p;" ";a(p);tab(38)"3.5";p;" ";b(p)
1130 print "3.5 Introd.<letra, indice, numero correto> ou <ENTER>";"3.5";
1135 get x#: if x#="" then l135
1136 if x#<>"a" and x#<>"c" and x#<>"d" and x#<>"s" and x#<>"o" and x#<>"n" and x#<>chr#(13)
then l135
1138 if x#=chr#(13) then return
1139 if x#="c" then l180
1140 print x#;:input y,w
1160 if x#="s" then a(y)=w: goto 1000
1170 if x#="d" then d(y)=w: goto 1000
1180 print x#;:input w,mi:w: goto 1000
1190 if x#="a" then a(y)=w: goto 1000
1200 if x#="o" then b(y)=w: print b(y);: goto 1000
1205 if x#="n" then t=w: goto 1000
1220 goto 1000
1489 ta=tan(a1(h)-del)
1490 rem
1491 rem
1492 rem#####
1493 rem***   c a l c u l o   i n t e r a t i v o   ***
1494 rem#####
1495 rem
1496 rem
1500 print "3)";:f i=1,2:for h=1 to t: i=0: f m=f i
1510 d o=d(h-1):r o=d o/2:d n=d(h):r n=d n/2
1515 a l=a l(h)+p i/180
1520 l=(r o-r n)/tan(a l):b=1/t:del=a t n(mi)
1530 gosub 5000
1540 for h1=0 to t
1545 !a,3: !1,"CALCULANDO",3,3,100,100,1
1546 yw=n+(t+1)-(h-1)*(t+1)-h1-1:yw#s:tr#(yw)
1547 !1,yw#,2,2,150,150,1
1550 f i=2*(log(d o/(2*r o))):f i(h,h1)=f i:f i=f i+f m
1560 gosub 7000
1565 !c:
1570 k f(h,h1)=k f:s i(h,h1)=s i:s r=s i-k f:s r(h,h1)=s r
1580 gosub 5000
1590 a l=s i:te=tan(a l+del)
1600 s i=2*b/r o*k f*te-s i*(2+b/r o*(te-tan(a l))-1)
1610 next h1
1615 gosub 7100
1620 f(h)=a l+p i+t t/4*d n%2
1630 next h
1645 rem"-----"
1650 rem"-----PADRONIZACAO DOS RESULTADOS COM 4 CASAS DECIMAIS-----"
1655 rem"-----"
1660 for i=1 to n:for j=0 to t
1670 f i(i,j)=int(f i(i,j)+10000)/10000
1675 s i(i,j)=int(s i(i,j)+10000)/10000
1680 s r(i,j)=int(s r(i,j)+10000)/10000
1690 k f(i,j)=int(k f(i,j)+10000)/10000
1700 next j,i: return

```

```

1990 rem
1991 rem
1992 rem*****
1993 rem*** display e impressao ***
1994 rem*****
1995 rem
1996 rem
2000 rem
2010 print" "
2020 for i=1 to n
2025 print" "
2027 print" ";
2030 print"  "; "FIEIRA HUMERO :"; i; "  "; tab(30)"  "; "SEMI-ANGULO :"; al(i);
2033 qv=65-pos(0)
2035 print"  "; for hf=1 to qv: print " "; next: print
2040 print" "
2043 print" ";
2050 print"Diametro Inicial :"; d(i-1); print tab(40)"Diametro Final :"; d(i)
2052 print"Disco"; tab(6); "Fi"; tab(17); "Kfi"; tab(34); "Tensao long."; tab(53);
2054 print"Tensao Radial"
2060 if t>=200 then pa=20: goto 2080
2061 if t>=150 then pa=15: goto 2080
2062 if t>=100 then pa=10: goto 2080
2063 if t>=80 then pa=8: goto 2080
2064 if t>=60 then pa=6: goto 2080
2065 if t>=40 then pa=4: goto 2080
2066 if t>=20 then pa=2: goto 2080
2067 pa=1
2080 for j=1 to steps
2090 print j; tab(6); fi(i,j); tab(17); kf(i,j); tab(34); si(i,j); tab(53); sr(i,j)
2100 next j
2110 print"FORCA NECESSARIA :"; f(i); tab(40)"Fi Total :"; fi(i,j-pa)
2120 if in=1 then goto 2200
2130 print"  ENTER > p/ proxima fieira <P> p/ saida na Impressora <H> para menu"
;
2135 getx#: if x#="" then 2135
2150 if x#=chr$(13) then 2200
2155 if x#="p" then gosub 2500
2160 if x#="m" then return
2170 goto 2200
2200 print"  "; next i: goto 2000
2210 goto 2000
2500 rem-----
2503 rem-----
2504 poke 59468,12: open 7,4,7: print #7: close 7: poke 59468,8: open 1,4
2510 for ii=1 to n
2525 print #1, " "
2527 print #1, " ";
2530 print #1, "  "; "FIEIRA HUMERO :"; ii;
2531 print #1, "      "; "  "; "SEMI-ANGULO :"; al(ii); "  "; spc(27); " "
2540 print #1, " "
2543 print #1, " ";
2550 print #1, "Diametro Inicial :"; d(ii-1); spc(15);
2551 print #1, "Diametro final :"; d(ii)
2552 print #1
2555 print #1, "Disco"; spc(2); "Fi"; spc(8); "Kfi"; spc(19); "Tensao Long."; spc(7);
2556 print #1, "Tensao radial"
2580 for jj=1 to steps
2583 j#=str$(jj): fi#=str$(fi(ii,jj)): kf#=str$(kf(ii,jj)): si#=str$(si(ii,jj))
2584 sr#=str$(sr(ii,jj))
2590 print #1, j#; spc(6-len(j#)); fi#; spc(11-len(fi#)); kf#; spc(17-len(kf#));
2595 print #1, si#; spc(19-len(si#)); sr#
2600 next jj
2610 print #1, "Forca Necessaria :"; f(ii); spc(15); "Fi Total :"; fi(ii,jj-pa)
2620 print: print: print: next ii
2630 print #1: print #1: print #1

```

```

2640 print#1,"DADOS GERAIS PARA TODOS OS PASSES"
2650 print#1:print#1
2670 print#1,"Abcissas          Ordenadas"
2680 for ii=1 to p:a#=str$(a(ii)):b#=str$(b(ii))
2690 print#1,a#;sep(21-len(a#));b#
2700 next ii
2705 print#1:print#1:print#1,"Coeficiente de Atrito :";mi
2710 close:return
4994 rem
4995 rem
4996 rem#####
4997 rem*** calculo do raio ***
4998 rem#####
4999 rem
5000 ro=do/2-(do/2-rn)/1+hi+tb
5010 return
6997 rem
6998 rem
6999 rem#####
7000 rem*** funcao parabolica ***
7001 rem#####
7002 rem
7003 rem
7020 kf=464.63+301.35*fi-37.18*fi**2
7030 return
7097 rem
7098 rem
7099 rem#####
7100 rem*** calculo do trabalho redundante ***
7101 rem#####
7102 rem
7103 rem
7105 al=al(h)*pi/180
7110 asm=(d(h-1)+d(h))/d(h-1)-d(h):g=(1-cos(al))/(2*sin(al))
7120 asm=asm*g
7130 tt=.8+.78*asm
7140 return
ready.

```