

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

Contribuição ao estudo da Laminação a Frio de Folhas  
de Alumínio Comercialmente Puro.

Tese submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

DE

ENGENHARIA MECÂNICA

por

IVAN VIEIRA DE MELO

SETEMBRO - 76

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM CIÊNCIAS - ESPECIALIDADE ENGENHARIA  
MECÂNICA - OPÇÃO FABRICAÇÃO E APROVADA EM  
SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUA-  
ÇÃO.

---

PROF. ARNO BLASS, Ph.D.

Coordenador do Curso de Pós-Graduação  
de Engenharia Mecânica

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFE-  
SORES

---

PROF. BEREND SNOEIJER, M.Sc., Ph.D. - Orientador

---

PROF. JAROSLAV KOZEL, Ph.D.

---

PROF. ARNO BLASS, Ph.D.

---

PROF. FAUSTO MORENO DE MIRA, M.Sc.

A minha esposa Mércia e  
a meu filho Gustavo

### AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Berend Snoeijer, pela valiosa orientação, ajuda e solicitude, prestadas durante todo o trabalho.

À U.F.PE., U.F.S.C., ao CNPq e a A.S.A., pelo auxílio financeiro necessário.

A Alumínio S.A., Extrusão e Laminação - ASA-, pela possibilidade de realizar todo o trabalho experimental em seu departamento de Laminação de Folhas.

À Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE- através do seu departamento de Recursos Minerais, à U.F.PE., através dos seus departamentos de engenharia Elétrica e Mecânica e a Escola Técnica Federal de Pernambuco, através dos seus departamentos de Elétrica e Eletrônica; pela orientação técnica e cessão de equipamentos de medição, sem os quais não seria possível realizar o presente trabalho.

Ao Prof. Jaroslav Kozel, da UFSC, pelas sugestões, aos Eng. Lizanel de Melo Mota, Eng. Herculano Bandeira de Melo e Eng. Klaus Peter Mayvald, da ASA, pelas orientações, sugestões técnicas e apoio moral, durante todo o tempo em que estive realizando este trabalho.

Aos colegas, Imperiano de Cristo da SUDENE, Carlos Egberto da UFPE, Alberto Lavenère Machado, meu amigo particular, e Estélio Medeiros de Araújo, da Escola Técnica Federal de Pernambuco, pelas ajudas que facilitaram sobremaneira a realização deste trabalho.

Ao pessoal da produção, operação e manutenção, elétrica e mecânica, do Departamento de Laminação de Folhas da ASA, sem os quais a realização prática das experiências não seria viável.

À minha irmã Leda e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização completa deste trabalho.

Í N D I C E

1.	Introdução .....	1
1.1.	Histórico do processo de laminação .....	1
1.2.	Teorias de laminação a frio .....	1
1.3.	Necessidade, importância e objetivos do presente estudo	1
2.	Revisão da literatura .....	3
2.1.	Suposições básicas da teoria da plasticidade .....	3
2.2.	Definições básicas do processo de laminação a frio ....	3
2.3.	Apresentação do diagrama de blocos .....	8
2.3.1.	Estudo da qualidade do produto laminado .....	10
2.3.2.	Estudo da influência da velocidade de laminação .....	12
2.3.3.	Estudo das tensões de entrada e saída	15
3.	Planejamento experimental .....	17
3.1.	Formulação do problema .....	17
3.1.1.	Objetivo do experimento .....	17
3.1.2.	Tipo do processo a medir .....	17
3.1.3.	Destino dos dados ou finalidade do experimento .....	17
3.2.	Análise teórica do problema .....	18
3.2.1.	Formulação do modelo teórico .....	18
3.3.	Análise prática do problema .....	22
3.3.1.	Fluxograma de fabricação .....	23
3.3.2.	Especificação do equipamento .....	23
3.3.3.	Material de teste .....	26
3.3.4.	Controle do acabamento superficial dos cilindros .....	29
3.3.5.	Controle do óleo de laminação .....	30
3.3.6.	Metódos práticos de medição a serem empregados .....	31
3.3.7.	Valores usuais das grandezas a serem medidas .....	33
3.4.	Planejamento dos ensaios .....	33
3.4.1.	Levantamento das variáveis, parâmetros e constantes ..	33
3.4.2.	Pontos básicos do planejamento dos ensaios .....	35
3.4.3.	Preparação da planilha de acompanhamento dos ensaios ..	40
3.4.4.	Análise do erro experimental .....	44
3.5.	Escolha dos componentes do sistema de medição, projeto' da combinação dos mesmos e calibração estática .....	49
3.5.1.	Controle de espessura de entrada .....	49
3.5.2.	Controle do acabamento dos cilindros .....	49
3.5.3.	Medição das velocidades .....	51
3.5.4.	Leitura das forças, pressão e corrente .....	63

3.5.5.	Calibração estática .....	63
4.	Apresentação dos resultados .....	66
4.1.	Controle do material de teste .....	66
4.2.	Controle do óleo e cilindros de laminação .....	69
4.3.	Resultados experimentais .....	74
5.	Discussão dos resultados apresentados .....	96
5.1.	Para o 1º passe .....	96
5.1.1.	Índice de redução versus velocidade de laminação .	96
5.1.2.	Índice de redução versus forças de bobinadeira e debobinadeira .....	97
5.2.	Para o 2º passe .....	98
5.2.1.	Índice de redução versus velocidade de laminação .	98
5.2.2.	Índice de redução versus forças de bobinadeira e debobinadeira .....	99
5.3.	Para o 3º passe .....	99
5.3.1.	Índice de redução versus velocidade de laminação .	100
5.3.2.	Índice de redução versus forças de bobinamento e debobinamento .....	100
6.1.	Conclusões .....	101
6.2.	Sugestões para pesquisa .....	102
	Bibliografia consultada .....	103

LISTAS DAS FIGURAS

Figura 1	-	Esquema de uma vista frontal de um laminador quádruplo.....	4
Figura 2	-	Esquema de um cilindro, mostrando o detalhe do bombeio geométrico .....	5
Figura 3a	-	Geometria do passe .....	6
Figura 3b	-	Distribuição das velocidades relativas .....	6
Figura 3c	-	Distribuição da pressão específica .....	6
Figura 4	-	Diagrama de blocos .....	9
Figura 5	-	Espessura nominal para a qual o termo folha é usado segundo cada país. ....	13
Figura 6	-	Diagrama do sistema sob estudo .....	18
Figura 7	-	Fluxograma da fabricação de folhas, ASA. ....	22
Figura 8	-	Vista lateral do laminador FOSA-I .....	23
Figura 9	-	Vista do painel de controle do laminador FOSA-I ..	25
Figura 10	-	Vista frontal do laminador FOSA-I .....	25
Figura 11	-	Vista do sistema de recuperação e aplicação do óleo de laminação .....	26
Figura 12	-	Vista geral de um lote de bobinas da liga Al-1200. ....	27
Figura 13	-	Vista de uma bobina da liga Al-1200 .....	27
Figura 14	-	Corte longitudinal esquemático do laminador FOSA-I ..	32
Figura 15	-	Esquema do sistema de medição e controle automático, de espessura .....	50
Figura 16	-	Vista do indicador de espessura .....	50
Figura 17	-	Esquema do transdutor .....	52
Figura 18	-	Foto do transdutor .....	53
Figura 19	-	Foto do disco .....	53
Figura 20	-	Foto do transdutor no eixo motor do laminador ....	54
Figura 21	-	Foto do transdutor no rolo defletor da entrada ...	55
Figura 22	-	Foto do transdutor no rolo defletor da saída .....	55
Figura 23	-	Esquema elétrico do circuito de medição .....	57
Figura 24	-	Foto do circuito elétrico instalado .....	56
Figura 25	-	Foto do frequencímetro digital .....	62
Figura 26	-	Vista geral do conjunto de medição .....	61
Figura 27	-	Foto da caixa de proteção do circuito de medição, vista de frente .....	60
Figura 28	-	Foto da caixa de proteção do circuito de medição, ( vista posterior ).	60
Figura 29	-	Foto da fonte de alimentação para as lâmpadas ....	61

Figura 30 - Foto dos indicadores das forças e corrente, da debobinadeira e bobinadeira .....	59
Figura 31 - Foto das chaves seletoras das forças de bobinadeira e debobinadeira .....	59
Figura 32 - Foto dos indicadores de pressão .....	58
Figura 33 - Curva de calibração do medidor de espessura, - ( amostra representativa ), para o 1º, 2º e 3º passe .....	64
Figura 34 - Auto-teste do frequencímetro digital, ( transcrição do catálogo ) .....	64

.....

LISTA DOS QUADROS

QUADRO	1 -	Esquema de passes para a fabricação de folhas, com as respectivas velocidades de laminação, de vários fabricantes .....	13
Quadro	2 -	Especificações do laminador FOSA-I .....	24
Quadro	3 -	Modelo das planilhas de controle das propriedades mecânicas .....	28
Quadro	4 -	Modelo da planilha de controle do acabamento dos cilindros .....	29
Quadro	5 -	Modelo para análise do óleo de laminação .....	30
Quadro	6 -	Variação da velocidade de deslizamento na saída, durante a laminação a frio de alumínio, segundo a bibliografia consultada .....	34
Quadro	7 -	Valores usuais da velocidade de laminação e das tensões de bobinadeira e debobinadeira, para cada passe .....	36
Quadro	8 -	Tensão limite de escoamento nas diversas espessuras .....	37
Quadro	9 -	Áreas das seções transversais da folha, para cada passe .....	38
Quadro	10 -	Tensões de bobinamento e debobinamento, pela limitação do equipamento .....	38
Quadro	11 -	Valores das tensões de bobinamento e debobinamento escolhidos para cada passe .....	39
Quadro	12 -	Valores das forças de tração de bobinamento e de bobinamento escolhidos, para cada passe .....	39
Quadro	13 -	Planilha de controle e planejamento dos experimentos, para o 1º passe .....	41
Quadro	14 -	Planilha de controle e planejamento dos experimentos, para o 2º passe .....	42
Quadro	15 -	Planilha de controle e planejamento dos experimentos, para o 3º passe .....	43
Quadro	16 -	Planilha de acompanhamento de ensaio .....	45
Quadro	17 -	Especificações do foto-resistor .....	52
Quadro	18 -	Especificações do frequencímetro digital, para a contagem dos pulsos .....	62
Quadro	19 -	Espessuras das folhas-padrão utilizadas e calibração do medidor de espessura, em cada passe ..	58
Quadro	20 -	Amostra representativa da correção da espessura em cada passe .....	67

Quadro 21	-	Relação das bobinas aproveitadas para os experi- mentos .....	68
Quadro 22	-	Tabela da média das propriedades mecânicas de todas as bobinas utilizadas para cada passe ...	70
Quadro 23	-	Levantamento do material utilizado .....	70
Quadro 24	-	Amostra representativa, das planilhas de contro- le, das propriedades mecânicas .....	71
Quadro 25	-	Ficha de análise do óleo de laminação da ASA ..	72
Quadro 26	-	Variação da viscosidade e Índice de acidez to- tal durante as experiências .....	73
Quadro 27	-	Ficha de controle de retificação do cilindros usados pela ASA .....	73
Quadro 27a	-	Planilha de controle do acabamento superficial dos cilindros .....	75
Quadro 28	-	Condições experimentais reais e resultados pa- ra o 1º passe .....	77
Quadro 29	-	Condições experimentais reais e resultados obti- dos para o 2º passe .....	78
Quadro 30	-	Condições experimentais reais e resultados obti- dos para o 3º passe .....	79
Quadro 31	-	Amostra representativa das planilhas de acompa- nhamento de ensaio, para o 1º passe .....	80
Quadro 32	-	Amostra representativa das planilhas de acompa- nhamento de ensaio, para o 2º passe .....	81
Quadro 33	-	Amostra representativa das planilhas de acompa- nhamento de ensaio, para o 3º passe .....	82
Quadro 34	-	Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de bobinadeira como parâme- tro, no 1º passe .....	84
Quadro 35	-	Gráficos de Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâ- metro, no 1º passe .....	85
Quadro 36	-	Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de bobinadeira como parâme- tro no 2º passe .....	86
Quadro 37	-	Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâ- metro, no 2º passe .....	87
Quadro 38	-	Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâ- metro, no 3º passe .....	88

Quadro 39	- Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâmetro, no 3º passe .....	89
Quadro 40	- Gráficos do Índice de redução versus força de bobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 1º passe .....	90
Quadro 41	- Gráficos do Índice de redução versus força de debobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro no 1º passe .....	91
Quadro 42	- Gráficos do Índice de redução versus força de bobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 2º passe.....	92
Quadro 42	- Gráficos do Índice de redução versus força de debobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 2º passe .....	93
Quadro 44	- Gráficos do Índice de redução versus força de bobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, para o 3º passe .....	94
Quadro 45	- Gráficos do Índice de redução versus força de debobinamento, velocidade de laminação como parâmetro, para 3º passe .....	95

.....

RESUMO

O presente trabalho, foi realizado com a finalidade de observar, na prática, os efeitos combinados da velocidade de laminação com as tensões de bobinamento e debobinamento, no índice de redução por passe, durante a laminação a frio de folhas de alumínio, comercialmente puro. Para isso, faz-se uma abordagem sistêmica da teoria de laminação a frio, evidenciando-se os tópicos inerentes ao presente objetivo e complementa-se este estudo com os aspectos práticos que o limitam.

No planejamento experimental, faz-se uma análise teórica e prática do projeto e realização dos experimentos, evidenciando-se os problemas inerentes ao ambiente de produção. Como os experimentos são realizados em um laminador de produção, escolhe-se medir as reduções através das medições indiretas, pelas medições das velocidades de deslizamento na entrada e saída, utilizando-se as equações de constância de fluxo, ao longo do arco de contato.

No final, conclui-se sobre a influencia de cada variável independente pesquisada, através de experiências realizadas nos três primeiros passes de laminação, que abrangem as espessuras de 0,6mm, 0,3 mm e 0,15 mm e sugere-se que a realização de experimentos semelhantes sejam feitos sob condições ambientes mais fechadas.

ABSTRACT

This work was performed with the scope of observing, in a practical way, the combined effects of the rolling speed with the front and back Tensions, in the draft by passe, during cold rolling of commercially pure aluminium foil. For this reason a systemic approach to the cold rolling theory is made, putting in evidence the topics inherent to the actual objective. This study is complemented with the practical aspects that limit it.

In the experimental planning a practical and theoretical analysis is made of the project and of the experiments, putting in evidence the problems inherent to the ambiental production. As the experiments are performed in the production type rolling mill, the measuring of reduction is made indirectly, by the measure of the backward and forward slip velocity, using the equations of constant flow along the arc of contact.

Finally conclusions about the influence of each variable are independently researched, through experiments performed in the three first drafts of rolling which attain the thickness of 0,6 mm, 0,3 mm and 0,15 mm, and it is suggested that similar experiments be performed under stricter ambiental conditions.

LISTA DE SIMBOLOGIA

A	-	Alongamento percentual	-	%
B	-	Bombeio		
b	-	Largura do laminado		
D	-	Diâmetro do cilindro		
h	-	Espessura do laminado		
$\Delta h$	-	Redução absoluta		
$I_{Red}$	-	Redução relativa	-	%
L	-	Comprimento do arco de contato projetado, segundo o plano do material		
P	-	Pressão específica	-	t
R	-	Raio do Cilindro		
R'	-	Raio do cilindro deformado		
V	-	Velocidade do Material	-	m/min
$V_{lam}$	-	Velocidade de laminação	-	m/min
$V_s^*$	-	Velocidade de deslizamento na saída	-	%
$\epsilon$	-	Redução em função das deformações naturais		
$\theta$	-	Angulo do arco de contato		
$\theta_0$	-	Angulo neutro		
$\sigma$	-	Tensão	-	kgf/mm <sup>2</sup>

.....

## CAPÍTULO 1

### 1. Introdução

#### 1.1. Histórico do Processo de Laminação

Desde os primeiros usos no século XIV, por Leonardo da Vinci, de um pequeno Laminador manual para chapas de estanho, até o século atual, quando os Laminadores são máquinas complexas desenvolvendo velocidades além de 2.000 m/min, como na laminação de folhas de Alumínio, o desenvolvimento foi imenso. Entretanto, só no início deste século e especialmente no pós-guerra, é que a indústria de folhas de Alumínio atingiu um desenvolvimento de importância, participando com percentuais de mais de 20% da produção total dos semi-acabados baseados em Alumínio. Esta importância pode ser sentida quando se analisa o valor econômico, especialmente para a indústria de embalagens, do fato de que 1t de folhas de Al na espessura de  $8\mu\text{m}$  possibilita uma área útil superficial disponível, para recobrimento de produtos, de aproximadamente  $46.300\text{m}^2$ , enquanto que esta mesma quantidade na espessura de 1mm nos fornece apenas, aproximadamente  $370\text{m}^2$ , de área útil.

#### 1.2. Teorias de Laminação a Frio <sup>6,24,25</sup>

As teorias de Laminação que hoje são aceitas universalmente, são quase que totalmente baseadas nas análises de Von-Karman - 1925 e na chamada "teoria exata" desenvolvida por Crowan, em 1943. Pode-se citar como exemplo as teorias de Ford, D.R. Bland e F.Ellis aplicáveis à Laminação a Frio, em 1954. Existem, recentemente, trabalhos em que se procura contornar algumas suposições feitas por estas teorias, principalmente a de que o processo se desenvolve como uma compressão homogênea - particularmente em altas reduções. Como exemplo, tem-se a Teoria Hidrodinâmica de Kneschke e Heber, a Teoria do Cisalhamento Plano - Shear Plane Theory - de Green, Sparling e Wallace. Estas estão ainda em um estágio experimental, mas segundo os críticos serão bem mais precisas que as teorias clássicas de Laminação. Estas teorias, como se disse acima, estão baseadas em suposições que as tornam muito dissociadas da realidade prática. Aconteceu que se generalizou o uso de fórmulas bastante empíricas para uso prático e ao que tudo indica, isto também é responsável pelas poucas pesquisas teóricas aplicáveis na Laminação a Frio de Folhas Finas.

#### 1.3. Necessidade, Importancia e Objetivos do Presente Estudo

A intenção de se realizar um trabalho que viesse a contribu

ir para a pesquisa aplicada no setor de Laminação, fizeram com que se procurasse Indústrias do ramo interessadas em um tal estudo. A Indústria A.S.A. Extrusão e Laminação, de Igarassu-PE, se mostrou desejosa em aproveitar tal pesquisa, visando o desenvolvimento de sua linha de Laminação de Folhas de Alumínio. Após uma análise do processo de fabricação de folhas, empregado pela Indústria em questão e feita em conjunto com os engenheiros do setor em estudo, chegou-se a conclusão da necessidade de pesquisas nas áreas de Velocidade de Laminação, Tensões de tração de Entrada e Saída, Lubrificação e Acabamento superficial dos Cilindros de Laminação. Dificuldades de ordem prática no que diz respeito a equipamentos de medição bem como Laboratórios especializados, implicaram na concentração de todo o trabalho na área de Velocidades, devido a grande importância da mesma na produtividade do Processo. Posteriormente, sentiu-se a necessidade da inclusão de estudos sobre as tensões de Entrada e Saída, pela sua grande importância, juntamente com a Velocidade de Laminação, no controle da espessura de saída do laminado.

Esta necessidade tornou-se mais evidente, pelo fato de que toda a bibliografia consultada, embora rica em estudos sobre Velocidades, é bastante pobre em estudos sobre Tensões e muito especialmente em estudos interativos entre as mesmas, na Laminação de Folhas.

Os problemas normalmente encontrados numa Indústria em estágio de implantação, obrigam a limitar o grande número de experiências necessárias a um estudo desta natureza, que devem permitir inclusive um tratamento estatístico dos dados; executá-los preferivelmente nos primeiros passes de Laminação (chamados de passes de preparação) e a fazer um estudo paralelo sobre a qualidade do laminado, tanto na entrada como na saída dos passes pesquisados, visando assegurar que todo ele possa ser reaproveitado para lançamento no mercado. Esta última condição restringe bastante o campo de ação, mas é condição sem a qual não se pode realizar as pesquisas.

Acredita-se entretanto que, embora pagando-se o alto preço do pioneirismo pela tentativa de realização de uma Tese de Mestrado, em um ambiente Industrial, totalmente interessado no binômio Produção/Vendas, tenha-se conseguido iniciar pesquisas básicas na área de Laminação a Frio de Folhas de Alumínio, campo importantíssimo ao desenvolvimento nacional pois também neste setor todo o know-how brasileiro é importado e ao mesmo tempo, sensibilizar a Indústria a procurar na Universidade respostas aos seus problemas tecnológicos.

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1. Suposições Básicas da Teoria da Plasticidade

A Laminação é um processo de conformação plástica de metais e como tal os seus estudos teóricos estão baseados na Teoria da Plasticidade.<sup>6</sup> As suposições, desta última, de que:

- a- O material é isotrópico e homogêneo antes da deformação e assim permanece durante a mesma,
- b- As curvas Tensão/Deformação seguem leis matemáticas,
- c- A Tensão de Escoamento é independente da direção do carregamento e depende apenas da deformação total até o ponto considerado - não levando em conta o efeito Bauschinger -,
- d- A velocidade de Deformação não influencia o escoamento,
- e- O escoamento se dá a volume constante,

são a base para a formulação dos critérios de escoamento plástico dos materiais, sob os diversos estados de Tensão.<sup>6</sup>

### 2.2. Definições Básicas do Processo de Laminação a Frio <sup>6,1,3</sup>

O objetivo das Teorias de Laminação é o relacionamento matemático das forças externas atuantes no Processo, tais como força de Laminação e forças de Torque, com as propriedades mecânicas dos materiais laminados, em termos da geometria do passe, através de uma análise do estado de Tensão e distribuição de deformações, no mesmo material. Para que se possa analisar o processo de laminação fazem-se necessárias algumas definições sobre os vários aspectos do mesmo.

A Laminação pode ser a quente ou a frio e esta caracterização depende do fato de o material, sob processo, estar em temperatura acima ou abaixo da temperatura de recristalização, respectivamente. A conformação é feita passando-se o metal a laminar entre cilindros de geratrizes normalmente simétricas e eixos paralelos. Estes cilindros fazem parte de um complexo chamado Laminador, que é classificado, normalmente, pelo número de cilindros que possui. Dependendo da forma do perfil dos cilindros, pode-se classificar o processo como sendo Laminação Plana, quando os mesmos são realmente cilíndricos, resultando um produto plano de secção retangular, e Laminação de Perfis, quando os cilindros possuem o perfil igual à sec

ção do perfil que se deseja obter. O presente trabalho trata apenas da Laminção a Frio de Produtos Planos e, muito especialmente, dos Produtos Planos de Pequena Espessura chamados de folhas. Neste tipo de processo os Laminadores atualmente usados são praticamente do tipo Quarto ou Quádruos, segundo a fig. 1. Quando se reduz um laminado de uma espessura  $h_e$  para  $h_s$  o valor,

$$\Delta h = h_e - h_s \quad (1)$$

é chamado de redução absoluta e

$$I_{\text{Red}} = \frac{\Delta h}{h_e} = \frac{h_e - h_s}{h_e} = 1 - \frac{h_s}{h_e} \quad (2)$$

de redução relativa, que quando é expressa em percentuais, chama-se de redução percentual,

$$\frac{\Delta h}{h_e} \% = 100 (h_e - h_s) / h_e$$

Quando a redução é expressa em função das deformações naturais, tem-se

$$\epsilon = \ln (h_e / h_s) \quad (3)$$

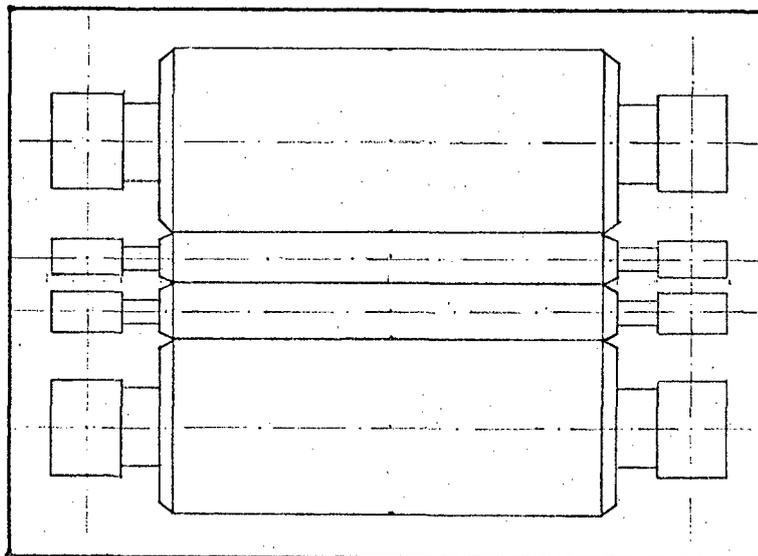


FIG. 1 - Esquema de uma vista frontal de um laminador quádruo

Devido às limitações do Processo, tais como, capacidade de Pressão do Laminador e capacidade do Sistema de Lubrificação e Refrigeração, a redução total a ser dada no material é conseguida através de diversos passes consecutivos que podem ser dados em um mesmo Laminador ou em Laminadores distintos. Quando o material é reduzido de uma espessura  $h_e$  para  $h_s$ , ocorre, mantida a constância de volume, um aumento proporcional do seu comprimento e de sua largura de entrada  $l_e$ . O alargamento entretanto é função da relação  $l_e / h_e$  e pode ser desprezado quando a relação,

$$\frac{l_e}{h_e} > 6 \text{ a } 8$$

e desta maneira a Laminação de Folhas pode ser estudada como sendo um estado plano de Tensões. Quando o Laminado atinge grandes comprimentos, ele é bobinado para dar continuidade ao processo. Tensões de retenção são normalmente utilizadas, tanto do lado de saída quanto do de entrada do material no Laminador e estas são chamadas de Tensão de Bobinamento e Tensão de Debobinamento, respectivamente.

Devido às altas forças necessárias ao escoamento do material, na Laminação a Frio, e muito especialmente na Laminação de Folhas, ocorre a flexão dos cilindros e para evitar que o material seja conformado com uma espessura maior na parte central, os cilindros são retificados com um bombeio em sua geratriz como indica a fig. 2.

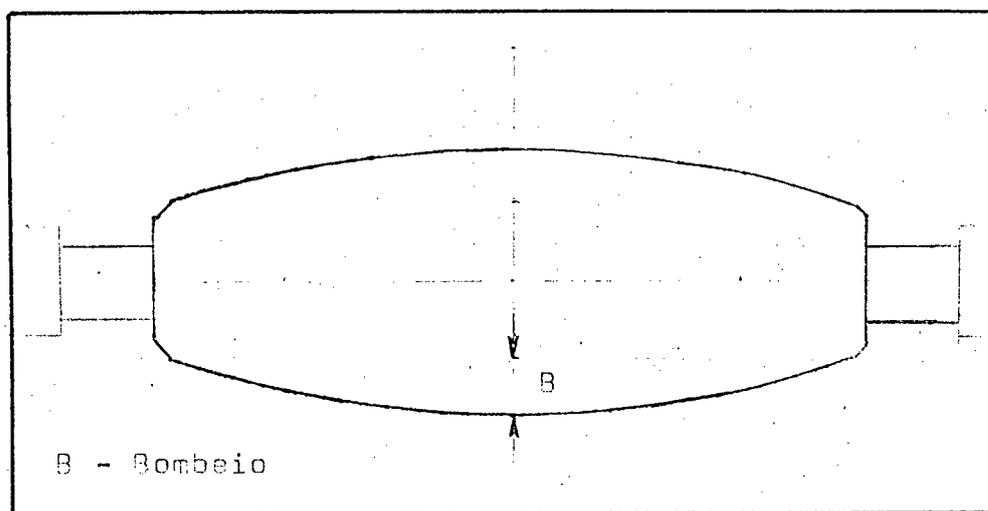


FIG. 2 - Esquema de um cilindro, mostrando o bombeio geométrico - ( radial ).

As variações de espessura segundo a largura do laminado, que são observadas visualmente como ondulações da superfície do mesmo, são devidas principalmente às expansões térmicas diferenciais segundo o comprimento dos cilindros, causadas pelo calor gerado durante o processo. Podem, entretanto, ser causadas também por erros de compensação de Bombeio.

O Alumínio é bastante sensível à temperatura e adere muito facilmente à superfície dos cilindros. Por isso os Laminadores de Folhas são equipados com sistemas de bicos tipo spray, distribuídos segundo o comprimento dos cilindros, por onde é aplicado o lubrificante que, além de lubrificar, também exerce a função de refrigerar. Estes bicos podem ser controlados individualmente de modo que o operador pode manter o perfil de temperatura desejado.

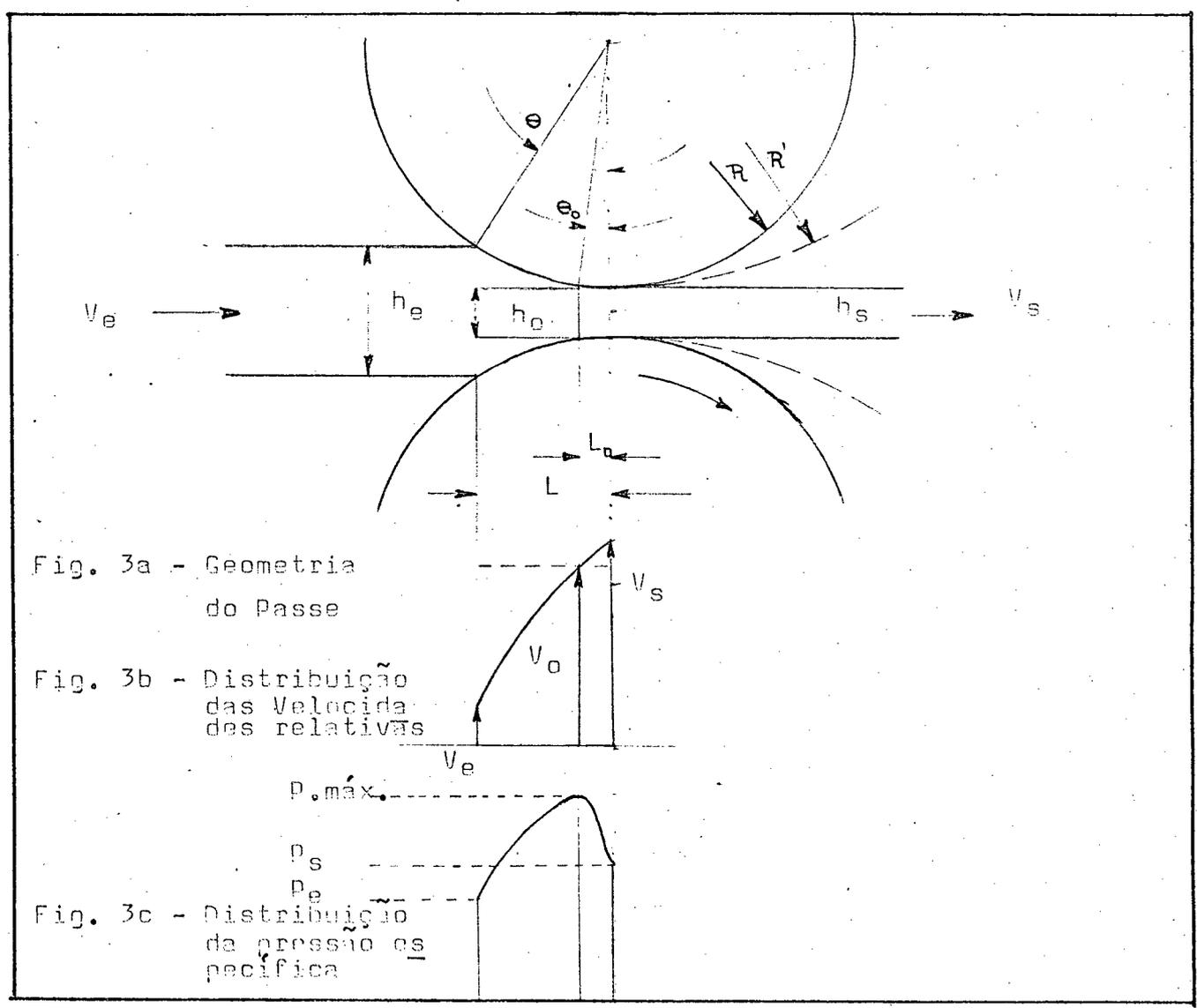


FIG. 3a, 3b e 3c. - Representação esquemática da Geometria do passe, distribuição das velocidades relativas e distribuição da Pressão específica, respectivamente.

A fig. 3a, mostra a geometria do passe, onde:

- $\theta$  - Ângulo de contato
- $\theta_0$  - Ângulo neutro, que caracteriza a linha neutra, onde a velocidade de escoamento do material, coincide com a projeção horizontal da velocidade tangencial dos cilindros de laminação e assim não há movimento relativo entre o material e os mesmos.
- $R$  - Raio dos cilindros de laminação
- $R'$  - Raio dos cilindros deformados, sob a influência das forças de separação entre os mesmos
- $V_e$  - Velocidade média de escoamento do material na entrada do espaço de laminação, ou zona de deslizamento anterior
- $V_s$  - Velocidade média de escoamento do material na saída do espaço de laminação, ou zona de deslizamento posterior
- $h_0$  - Espessura do material na linha neutra
- $L$  - Comprimento do arco de contato, projetado segundo o plano de laminação
- $L_0$  - Comprimento do arco de contato, na zona de deslizamento posterior
- $W$  - Velocidade de rotação dos cilindros de laminação

A fig. 3b, mostra <sup>2</sup> a distribuição das velocidades de escoamento média, relativas à velocidade tangencial  $V_0$ , de laminação, projetada segundo a horizontal, nas regiões de deslizamento anterior e posterior, ao longo do arco de contato.

E na fig. 3c, tem-se <sup>2</sup> a distribuição da pressão específica  $P$ , segundo o arco de contato, e a diferença entre as pressões na entrada e na saída, do espaço de laminação, indica que há o encruamento do material durante o processo, sendo ainda:

- $P_e$  - Pressão na entrada
- $p_s$  - Pressão na saída

### 2.3. Apresentação do Diagrama de Blocos

As variáveis que devem ser estudadas para a compreensão e equacionamento dos problemas em laminação, são bastante numerosas e de complexa interação. Sente-se então, a necessidade de elaborar um Diagrama de Blocos - ver fig. 4 - que faça uma abordagem sistêmica<sup>7,8</sup>, teórico-qualitativa, de todo o processo, sem entretanto entrar em particularidades, exceto no que diz respeito às variáveis do tema ora em estudo. Com isso, situa-se o trabalho dentro da teoria de Laminação e ao mesmo tempo tem-se uma avaliação da potencialidade do mesmo.

A idéia básica para a elaboração do Diagrama foi formada a partir dos estudos publicados por J. A. Schey<sup>2</sup> e complementada paulatinamente com base no restante da bibliografia.

A qualidade resultante do processo<sup>2,11,13,17</sup>, foi analisada visando a determinação das variáveis dependentes a serem observadas e também os possíveis danos, passíveis de ocorrer no Laminação, quando da realização prática das experiências. Para isso, levou-se em conta também a qualidade do material na entrada. A influência do processo foi então observada sob o ponto de vista das variáveis de interesse primário, quais sejam: A Velocidade de Laminação, e as Tensões de Entrada e Saída.

Como pode ser visto na sequência do Diagrama, é impossível fazer-se um estudo destas variáveis sem uma análise do mecanismo de atrito externo, portanto do mecanismo de lubrificação existente entre os cilindros e o laminado, que é em última análise, o mecanismo controlador de todo o processo de Laminação. Ao se estudar o atrito, necessariamente tem-se que levar em conta os seus efeitos térmicos que, muito embora se trate de Laminação a Frio, são de importância fundamental na Laminação de Folhas de Alumínio, juntamente com o controle do Bombeio e Acabamento Superficial dos cilindros, na qualidade do produto e na estabilidade de todo o desenrolar do processo de Laminação.

Justifica-se no item que se segue, porque se tomou como variável dependente, ou grandeza indicadora da influência do processo na qualidade do produto resultante, o índice de Redução por Passagem, para servir como objeto de comprovação experimental, em confronto com os resultados encontrados na bibliografia consultada, observando-se que a inclusão de mais alguma grandeza (variável independente) não seria totalmente justificada, por razões de tempo e dos fins a que se destina o presente trabalho.

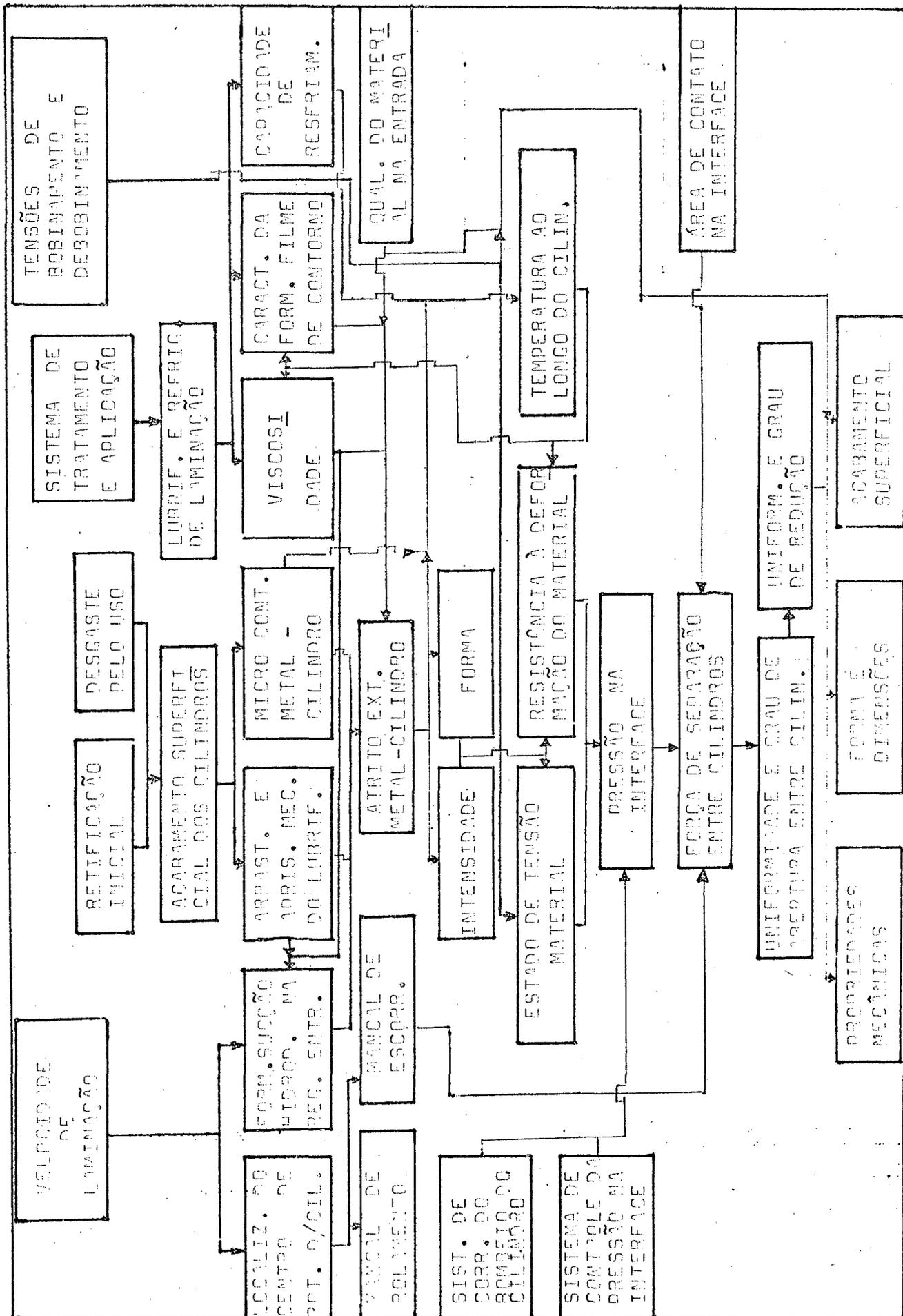


FIG. 4 - DIAGRAMA DE BLOCOS

### 2.3.1. Estudo da Qualidade do Produto Laminado

A Qualidade Resultante dos Laminados, como em todo processo de fabricação, é analisada tendo-se em conta as características de seu uso posterior. É em função deste uso posterior, que se estudam os procedimentos específicos a serem adotados na fabricação dos mesmos, levando-se em conta os fatores teóricos e operacionais inerentes ao processo de fabricação. O processo de fabricação é, no caso, um complexo que envolve:

- a- A Matéria Prima
- b- O processo de Laminação propriamente dito
- c- As atividades Auxiliares como: Duplagem, Refilagem e Separação, Transporte Interno, Armazenamento e Embalagem,
- d- Os Tratamentos Térmicos,

Como se pode notar, são numerosas as variáveis que influem na qualidade dos laminados, mas como se disse anteriormente, apenas o processo de Laminação propriamente dito e no que diz respeito à Velocidade de Laminação e Tensões de Entrada e Saída, será analisado.

A Qualidade do produto resultante pode ser classificada como segue 2,11,13,17:

- a- Acabamento Superficial
- b- Acabamento de Forma e Dimensões, sendo: planicidade, espessura e sua tolerância ao longo do comprimento, largura e sua tolerância ao longo do comprimento e rutura das arestas
- c- Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas
- d- Aspecto de Bobinamento

Ainda assim, cada indicador deste compreende um conjunto de sub-ítem que torna imenso um trabalho que tente controlar todos eles. Na prática, cada um possui o seu grau de importância que varia com a aplicação do laminado. Por isso, ao escolher-se a espessura de saída do laminado como variável dependente, teve-se em mente a sua importância <sup>11,12</sup> básica em todo processo de Laminação, que varia desde a determinação das reduções por passe, até o reprocessamento posterior, aplicação e custo final do produto.

As normas internacionais classificam os produtos laminados planos, por meio de suas dimensões, especificamente pela relação  $b/h$ . Na indústria do Alumínio, o termo Folha é usado para classificar os produtos semi-acabados, bobinados, e laminados na espessura máxima como indicado abaixo, sem levar em conta a largura ( ver fig. 5 ).

A Espessura nominal e a sua Tolerância ao longo do comprimento são as características principais das Folhas, em virtude de

dois aspectos: primeiro, devido aos progressos alcançados na Indústria de Transformação de Folhas que, pelo seu alto grau de automação, exigem matéria prima com tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas, de modo a possibilitar melhores rendimentos operacionais; segundo, devido a um melhor rendimento do produto, através de uma maior área útil por unidade de peso. Por isso, a influência da espessura tem sido estudada com bastante intensidade<sup>2,3</sup>, visando desenvolver sistemas capazes de conferir alto grau de uniformidade à mesma, durante o processo de fabricação. Estes sistemas compreendem os seguintes aspectos:<sup>3,12,19</sup>

a- Medidores de Espessura

b- Controles Automáticos de Espessura - A.G.C. (Automatic Gauge Control) estes atualmente são bastante diversificados, mas seus princípios teóricos são fundamentalmente os mesmos.

Os Controles Automáticos de Espessura estão baseados nos fatores que são responsáveis pela variação da espessura de saída. Estes fatores são:

a- Força Específica de laminação

b- Abertura em vazio dos cilindros de Laminação

c- Velocidade de Laminação

d- Tensões de Entrada e Saída

Entretanto, na Laminação a Frio, quando a relação  $h_s/D$  diminui, para um mesmo valor de  $D$ , a força específica de laminação cresce em uma razão extremamente alta<sup>13,20</sup>. Então, o uso da força específica para corrigir a espessura de saída implicaria em laminadores de grande capacidade, por conseguinte de alto custo, além de criar problemas no controle de Bombeio dos cilindros. Esta situação é exatamente o caso da Laminação de Folhas e os sistemas baseados naquela, não se aplicam neste processo. Além disso, a inércia inerente aos sistemas desenvolvidos até o presente<sup>19</sup> e que se baseiam na mesma, tornam-se impraticáveis para os Laminadores de alta velocidade ora em uso. A abertura em vazio dos cilindros, perde o sentido também, uma vez que neste processo os cilindros de trabalho estão em contato e a abertura entre os mesmos é função das suas deformações elásticas, causadas pela introdução da folha. Assim, a Velocidade de Laminação e as Tensões de Entrada e Saída, surgem como elementos de importância fundamental no controle da espessura de saída do laminado e a determinação dos seus efeitos interativos é de grande interesse para a regulação da mesma.

### 2.3.2. Estudo da influência da Velocidade de Laminação

Devido a sua inerente importância no processo de Laminação a Frio, principalmente no item produtividade, as Indústrias de laminados tem-se lançado na tarefa de trabalhar sempre com velocidades cada vez mais elevadas<sup>22</sup>. Na Indústria de Folhas de Alumínio o interesse é bem evidente, dado que o comprimento do laminado é em média duplicado em cada passe; isto significa que para bobinas de foil stock com espessura nominal de 0,6 mm, peso médio de 3,5 t e largura de 1.390 mm, o comprimento médio é de 1,5 km, enquanto que para esta mesma bobina na espessura de 0,008 mm, o comprimento passa para 116,5 km. Tem-se assim, comprimentos de dezenas de quilômetros nos passes finais. Para se laminar Folhas de Alumínio em altas velocidades se faz necessário dispor de Laminadores projetados para este fim, mão de obra muito especializada e um sistema de lubrificação e refrigeração adequado. Do ponto de vista do equipamento, pode-se dizer que com a tecnologia atual se dispõe, de capacidade em excesso, de sistema de alimentação e retirada de bobinas, e de troca de cilindros, que permitem tempos mortos mínimos; mas com respeito a Refrigeração, ainda não estão todos os problemas resolvidos e esta ainda é uma das limitantes do processo. A Automatização dos Controles<sup>12,23</sup> surge então como elemento fundamental no aumento da produtividade e muito mais ainda na melhoria dos padrões de qualidade do laminado, compatíveis com as exigências do mercado. Entretanto, isto vai depender dos métodos de medição, regulação e ajuste escolhidos e também do uso eficiente dos mesmos. Já existem Laminadores de Folhas de Alumínio controlados por computadores em produção comercial, e isto mostra a necessidade de se conhecer em detalhe a influência da Velocidade de Laminação no processo.

Já se tem publicado<sup>2,3</sup> muitos estudos sobre a influência da Velocidade de Laminação na espessura de saída dos laminados, mas para o caso da Laminação de Folhas os resultados são poucos, sob condições muito especiais e difíceis de serem encontrados na literatura técnica. Sabe-se, entretanto<sup>2,3,13,21</sup>, que a espessura invariavelmente diminui com o aumento da Velocidade de Laminação, e que esta diminuição varia grandemente com as condições de Laminação; mas, à medida que a velocidade aumenta, este efeito diminui. Esta última afirmativa torna necessário ajustes de aceleração em Laminadores que usem a velocidade como meio de correção de espessura e trabalhem efetivamente em altas velocidades. O quadro 1 que se segue mostra os níveis de velocidade usualmente empregados na laminação de foil.<sup>13</sup>

	PAÍS	ESPESSURA mm
1	FRANÇA	0,20
2	ITÁLIA	0,05
3	U.S.A.	0,15
4	INGLATERRA	0,15
5	U.S.S.R.	0,20
6	SUÉCIA	0,04
7	ALEMANHA	0,02
8	CHECOSLOVÁQUIA	0,10
9	BRASIL ( A.S.A. )	0,15

FIG. 5 - Espessura nominal para a qual o termo Folha é usado, segundo cada País.

FABRIC.	PASSE	ESPESSURA ENTRADA mm	ESPESSURA SAÍDA mm	REDUÇÃO%	VELOCIDADE LAMINAÇÃO
A	1	0,75	0,27	64	600 m/min
	2	0,27	0,11	59,3	"
	3	0,11	0,045	59	"
	4	0,045	0,020	55,5	"
	5	2x0,020	2x0,009	55	"
	6	-	-	-	( máx. )
B	1	0,50	0,20	60	900 m/min
	2	0,20	0,076	62	"
	3	0,076	0,034-0,030	55-60	"
	4	0,034-0,030	0,016-0,012	55-60	"
	5	2 x 0,016-0,012	2 x 0,008-0,006	50	" ( máx. )
C	1	0,50	0,22	60	500 m/min
	2	0,22	0,10	54,5	500 m/min
	3	0,10	0,05	50	900 m/min
	4	0,05	0,024	52	"
	5	0,024	0,014-0,018	41,6 - 25	"
	6	2x 0,014-0,018	2x 0,007-0,009	50	"
A.S.A.	1	0,60	0,28	53	400 m/min
	2	0,28	0,16	43	300 m/min
	3	0,16	0,080	50	350 m/min
	4	0,080	0,040	50	700 m/min
	5	0,040	0,020	50	700 m/min
	6	2x0,020	2x 0,008	60	300 m/min ( máx. )

QUADRO 1 - Esquema de passes para fabricação de Folhas, com as respectivas Velocidades, conforme diferentes Fabricantes.

Devido aos problemas apresentados no item anterior, os Laminadores de Folhas são projetados para trabalharem a pressão constante e a mesma é regulada de tal forma que a linha de contato, entre os cilindros de trabalho deformados e a folha sob processo seja retilínea. Este fato faz com que haja sempre uma tendência de aumento ou diminuição do espaço de Laminação, sempre que a força de separação entre cilindros variar. Isto implica em um novo valor do Índice de Redução ou da espessura de saída. Como se pode observar no Diagrama de Blocos, o mecanismo pelo qual a velocidade de laminação pode influenciar a espessura de saída, consta basicamente de dois aspectos:

- Primeiro, indiretamente, pela sua ação no mecanismo de Lubrificação dos mancais dos cilindros de laminação, variando as forças de sustentação hidrodinâmica que, - dependendo do tipo de mancal, se de escorregamento ou de rolamentos, poderão influir com mais intensidade, modifica a posição do centro de rotação dos mesmos cilindros; assim, o equilíbrio das forças de separação entre cilindros será perturbado, implicando em um novo valor do espaço de laminação;

- Segundo, diretamente, através da sua ação no mecanismo de lubrificação, da interface do metal/cilindros de trabalho. Esta ação se dá pelo surgimento de forças de sucção hidrodinâmicas e do bombeamento mecânico, na região de entrada, que promovem o arrastamento do lubrificante para o espaço de laminação. Entretanto, a ação é dependente da pressão, do lubrificante e do seu método de aplicação, do acabamento dos cilindros, do acabamento do material na entrada, de seu estado, do ângulo de entrada do material no Laminador e do material em processo. Muitas dessas variáveis, como por exemplo o acabamento dos cilindros e estado do material, variam durante o processo, e torna-se difícil o seu controle. Sabe-se entretanto, que na Laminação a Frio do Alumínio, onde o Lubrificante é essencial para evitar a adesão do material aos cilindros de trabalho, o mecanismo de lubrificação é do tipo de Filme-Fino com predominância ao regime de lubrificação por camada limite (boundary lubrication) ou Hidrodinâmica (hydrodynamic lubrication) a depender da interação entre os elementos acima citados, embora a existência de um regime puramente Hidrodinâmico ainda seja contestada <sup>2,24,25</sup>.

Pode-se dizer, então, que a ação da velocidade deve ser compreendida pela sua ação no mecanismo de atrito externo, na interface.

A variação das forças de atrito externo, tanto em intensidade como em forma de distribuição segundo o arco de contato, implica em uma variação no estado de Tensão do material que, atuando na distribuição de

pressão na interface, tende a modificar a deflexão dos cilindros de laminação e a abertura entre os mesmos, variando assim o índice de redução. Também a forma de distribuição do atrito na interface age na resistência à deformação do material que, sofrendo ainda os efeitos térmicos gerados pelo atrito externo, novamente influencia a pressão da interface e, pelo mesmo mecanismo anterior, varia o índice de redução.

### 2.3.3. Estudo da Influência das Tensões de Entrada e Saída.

A prática tem mostrado que na laminação a frio de produtos planos bobinados, e muito especialmente na laminação de folhas, é imprescindível a existência de tensões de entrada e saída, como fatores de controle da uniformidade do material no laminador, para correção rápida da espessura de saída - principalmente quando o material está parcialmente encruado - e para permitir uma tensão de bobinamento ou debobinamento satisfatória, possibilitando a continuidade do processo.

Pelo diagrama de blocos desenvolvido pode-se notar que as Tensões de Entrada e Saída podem ser analisadas sob dois aspectos básicos:

- Primeiro, no que diz respeito à forma ou planicidade do laminado, tendo em vista que para o perfeito andamento do processo o material deve entrar e sair do espaço de laminação sob ângulos determinados e com possibilidades mínimas de enrugamentos, formação de vincos ou dobramentos. Daí pois, a necessidade de se laminar sempre com uma Tensão mínima de tração, tanto na entrada como na saída do laminador.

- Segundo, a variação do estado de tensões no material, que é o mais importante, dado que mostra uma influência mais profunda no processo, pela sua atuação direta no escoamento do mesmo. A variação do estado de Tensões no material implica em uma nova configuração da distribuição de pressão na interface que, através das flexões elásticas dos cilindros de laminação, altera o paralelismo e abertura entre os mesmos e conseqüentemente o índice de redução. Entretanto, como em laminação se tem duas regiões distintas de escoamento - zona de deslizamento anterior e zona de deslizamento posterior - sendo a primeira proporcionalmente muito maior que a segunda, é de se esperar que as Tensões de entrada atuem proporcionalmente com muito mais intensidade no escoamento do material, do que as Tensões de saída. Também, para um dado índice de redução, um aumento na parcela de redução correspondente a zona de deslizamento anterior significa uma diminuição na correspondente à zona posterior e

vice-versa. Isto quer dizer que as tensões possuem grande influência na posição da linha neutra<sup>1,6</sup>, alterando portanto a configuração da distribuição de pressão na interface.

Teoricamente, pois, o uso das Tensões para correção rápida de espessura está ligado à modificação do estado de tensões do material e também à resistência à conformação do mesmo. Como o objetivo principal é o de corrigir a espessura do laminado, é de todo interesse se saber a forma da curva, redução por passe ou índice de redução em função das referidas Tensões. O importante é determinar valores médios de tensões para cada passe, com os quais se inicie o processo de laminação, e usar o intervalo de variações em torno deste mesmo valor médio para corrigir a espessura. Os limites máximo e mínimo deste intervalo são de extremo interesse; e estão associados aos problemas secundários que podem perturbar tanto o processo em si como a qualidade do produto. Os limites mínimos estão associados aos problemas de bobinamento ou de debobinamento sob tensão, enrugamentos e vincos do material, que são todos problemas práticos; teoricamente não há nenhum inconveniente em se laminar com tensão zero. Os limites máximos teóricos estão associados a distorções nas características do processo, dado que a localização da linha neutra sobre o arco de contato, é fator básico para a existência de estabilidade do mesmo processo. Também, ao se atingir valores de tensões que se aproximem da Tensão limite de escoamento a tração, do material (notar que esta Tensão limite de escoamento à Tração, está modificada pelos efeitos térmicos, encruamento, etc.) e portanto o material escoe, antes de entrar no espaço de laminação ou ao sair do mesmo, já não se pode assegurar a continuidade do processo.

Do ponto de vista prático, tem-se um aumento substancial na probabilidade de ruptura do material sob processo, com consequente interrupção deste, agravado pela possibilidade de existência de pequenas fissuras nas laterais do laminado, variações da qualidade do material segundo a secção transversal e defeitos no sistema de aplicação da força de Tração.

.....

## CAPÍTULO 3

## 3. Planejamento Experimental

## 3.1. Formulação do Problema

## 3.1.1. Objetivo do Experimento

Observar a Influência da Velocidade de Laminação e das Tensões de Entrada e Saída do material no laminador sobre o Índice de Redução, para cada passe de laminação, mantendo o produto laminado - Folhas de Alumínio - com uma qualidade final aproveitável.

## 3.1.2. Tipo do Processo a Medir

Toda a parte experimental deve ser realizada, sob as condições de REGIME PERMANENTE ( steady state ) do processo, tendo em vista as seguintes razões:

a- O processo de laminação é, propriamente, um fenômeno que se realiza em REGIME PERMANENTE, principalmente na laminação de produtos de grande comprimento e planos, como é o caso da laminação de Folhas de Alumínio.

b- Não é objetivo do presente trabalho observar a capacidade de resposta dinâmica dos equipamentos de controle do processo de laminação.

c- Não se dispõe de instrumental adequado às observações dinâmicas e ou transitórias.

Quando se estabelece que o regime de observação é PERMANENTE ou ESTÁTICO, diz-se que o intervalo de variação das frequências dos sinais a serem medidos está entre:

$$0 \text{ Hz} \leq f. s. m. \leq 2 \text{ Hz}$$

onde, f. s. m. é a frequência do sinal a medir.

## 3.1.3. Destinos dos dados ou Finalidade do Experimento

O objetivo do presente trabalho tem duas finalidades bem distintas:

a- Obter dados Qualitativos e Quantitativos básicos, que permitam melhor elaboração de estudos teóricos mais profundos sobre o mesmo tema.

b- Atender a Produção da Fábrica na qual se realizam as experiências, através do levantamento de dados que permitam uma melhor análise do processo de fabricação de Folhas no que diz respeito a controle e regularização de espessura.

Baseando-se nestas premissas, deve-se estudar o grau de precisão das medições e a maneira de fornecer e interpretar os resultados experimentais.

### 3.2. Análise Teórica do Problema

#### 3.2.1. Formulação do Modelo Teórico

Tomando-se como base o Diagrama de Blocos, como também a revisão teórica, discutidos no capítulo anterior, analisar-se-á o Sistema experimental.

a- Diagrama do Sistema - ver fig. 6 abaixo -.

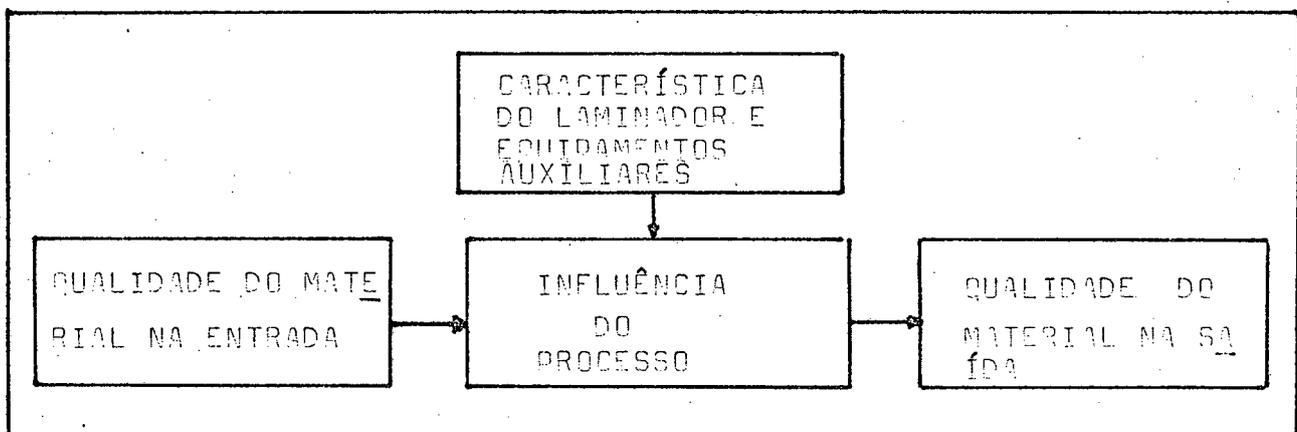


FIG. 6 - Diagrama do sistema sob estudo

Partindo-se deste Diagrama, se estabelecem as medidas de rendimento de cada sub-sistema considerado, quais sejam:

- A medida da Influência do Processo está baseada nas medições dos efeitos de Velocidade de Laminação e das Tensões em vários níveis.

- A Qualidade do material na saída será observada pelas medições do Índice de redução por passe, nos vários níveis do sub-sistema anterior, ao mesmo tempo em que se observará se o produto laminado está dentro de limites de qualidade aproveitáveis.

As medidas de redução podem ser feitas diretamente, através de medições da espessura da folha na entrada e saída simultaneamente, ou por medições indiretas.

- O método direto deveria ser utilizado principalmente pela possibilidade de aproveitamento dos equipamentos de medição de espessura já existentes no próprio laminador, mas tornou-se posteriormente inviável devido a problemas técnicos surgidos nos mesmos.

- O método indireto implica em encontrar variáveis que tenham uma correspondência biunívoca com as espessuras de entrada e saída, assegurando assim uma medição correta do Índice de redução por passe. Também deve ser fácil de ser aplicado.

As equações que regem o fluxo de escoamento do material no espaço de laminação, dão uma resposta a altura, preenchendo muito bem os requisitos básicos acima citados e serão analisados a seguir.

#### b- Análise das equações de Fluxo

As equações que regem o Fluxo de material no espaço de laminação, são:

$$b_e \cdot h_e \cdot v_e = b \cdot h \cdot v = b_s \cdot h_s \cdot v_s \quad (4)$$

tendo-se em vista a constância de volume. Considerando-se que a laminação de Folhas pode ser tomada como um estado Plano de tensões, as equações (4) ficam:

$$h_e \cdot v_e = h \cdot v = h_s \cdot v_s \quad (4a)$$

Se se observar a equação (4a), pode-se notar que as medidas de velocidades são as mais indicadas para determinação do Índice de redução procurado. Logo, a partir de (4a) e comparando-se com a equação (2), tem-se,

$$1 - \frac{h_s}{h_e} = 1 - \frac{v_e}{v_s} = I_{Red} \quad (5)$$

As razões para o uso da equação acima são:

- 1) Não há complexidade no manuseio da equação para calcular o Índice de redução.
- 2) Não há necessidade de suposições básicas - exceto no que diz respeito às suposições básicas da plasticidade - ou condições especiais para aplicação desta equação.
- 3) As medições das velocidades de entrada e saída, são por si só

índices valiosos na avaliação e determinação de todo o processo de laminação.

#### 4) Facilidade na prática das medições.

##### c- Análise do processo de Fabricação

A análise do processo visa:

- Estabelecer o "ambiente" do sistema <sup>7,8</sup>
- Estabelecer os critérios para o planejamento das experiências com o sistema.

Partindo-se da premissa de que o "ambiente compreende tudo aquilo que não pode ser modificado pelo próprio sistema", tem-se então que

a qualidade do material na entrada,  
os equipamentos utilizados no processo e  
as variáveis do processo que não estejam incluídas no objetivo do presente estudo

fazem parte do mesmo. Além disso, tem-se que controlar o "ambiente", visando assegurar que o mesmo seja constante durante toda a fase experimental. O sistema sob teste, está incluído no Sistema geral, que é o processo de fabricação, do Departamento de Laminação de Folhas da Fábrica em questão. Logo, parte deste sistema geral também faz parte do ambiente, nos moldes do discutido acima. Baseando-se nisto, pode-se dizer que a qualidade do material na entrada - para cada passe considerado - pode ser estudada como:

- Qualidade resultante da laminação anterior
- Qualidade resultante do tratamento do material posterior à laminação anterior, antes de iniciar o passe tomado como experimental.

A influência do processo é analisada por experiências feitas em cada passe e com cada variável de interesse, cujo intervalo de variação deverá ter como base o intervalo utilizado no processo de fabricação normal. A partir deste intervalo base deve-se tomar valores limites - no entorno do intervalo - máximos e mínimos, que são estabelecidos observando-se:

- A qualidade do material na saída
  - A estabilidade do processo
  - A capacidade do Laminador,
- determinando-se deste modo, o sistema em estudo.

A qualidade na saída é analisada visando-se a manutenção de padrões não prejudiciais ao produto final. Deve-se observar os seguintes aspectos:

- Necessidade e possibilidade de correção da qualidade resultante do passe em experiência nos passes seguintes.

- Não necessidade de correção da qualidade resultante.

- Observar as normas padrões de qualidade na saída, para cada passe, utilizadas no processo normal.

A estabilidade do processo deve atender aos seguintes aspectos:

- Estar dentro da capacidade e nível dos operadores do laminador.

- O limite superior de velocidade deve estar abaixo da região de instabilidade e o inferior não deve ser muito baixo a ponto de prejudicar a produção.

- Os valores de Tensões de entrada e saída, não devem exceder o valor da tensão limite de escoamento do material - nas condições de laminação - e nem tão pouco ser suficientemente baixas a ponto de prejudicar o bobinamento ou debobinamento. Observe-se, ainda, que valores muito altos da tensão de saída mascaram as observações de qualidade na zona de bobinamento.

Com respeito às variáveis do processo que devem ser mantidas como constantes ou parâmetros, há que:

- Assegurar que realmente o processo esteja em regime permanente, especialmente no que diz respeito a só realizar as experiências quando for atingido o equilíbrio térmico do sistema.

- Usar sempre uma mesma classe de rebolo, na retífica dos cilindros de trabalho, procurando deixar o valor da rugosidade superficial em um intervalo tão estreito quanto possível, e levar em conta a variação deste intervalo com o uso dos cilindros.

- Controlar o óleo de laminação, especialmente no que diz respeito a sua viscosidade cinemática, através de ensaios nas épocas das experiências e da medição da temperatura de entrada do mesmo no laminador.

- Usar sempre um mesmo valor de pressão específica de laminação para as experiências em um mesmo passe.

- A capacidade do laminador deve limitar em muito a todos os itens anteriores e por isso deve ser atentamente observada, para que os intervalos de variação das variáveis em estudo não fujam às especificações do equipamento. De interesse direto são:

- Potência de laminação máxima.

- Potência dos sistemas de Tração de entrada e saída,

- Tempo de estabilização do processo, em função da flutuação nas variáveis em estudo e início do processo quando o equipamento estiver muito tempo parado ou "frio".

### 3.3. Análise Prática do Problema

#### 3.3.1. Fluxograma de fabricação

A fig. 7, abaixo, mostra o fluxograma de fabricação de folhas de alumínio utilizado pela indústria em questão.

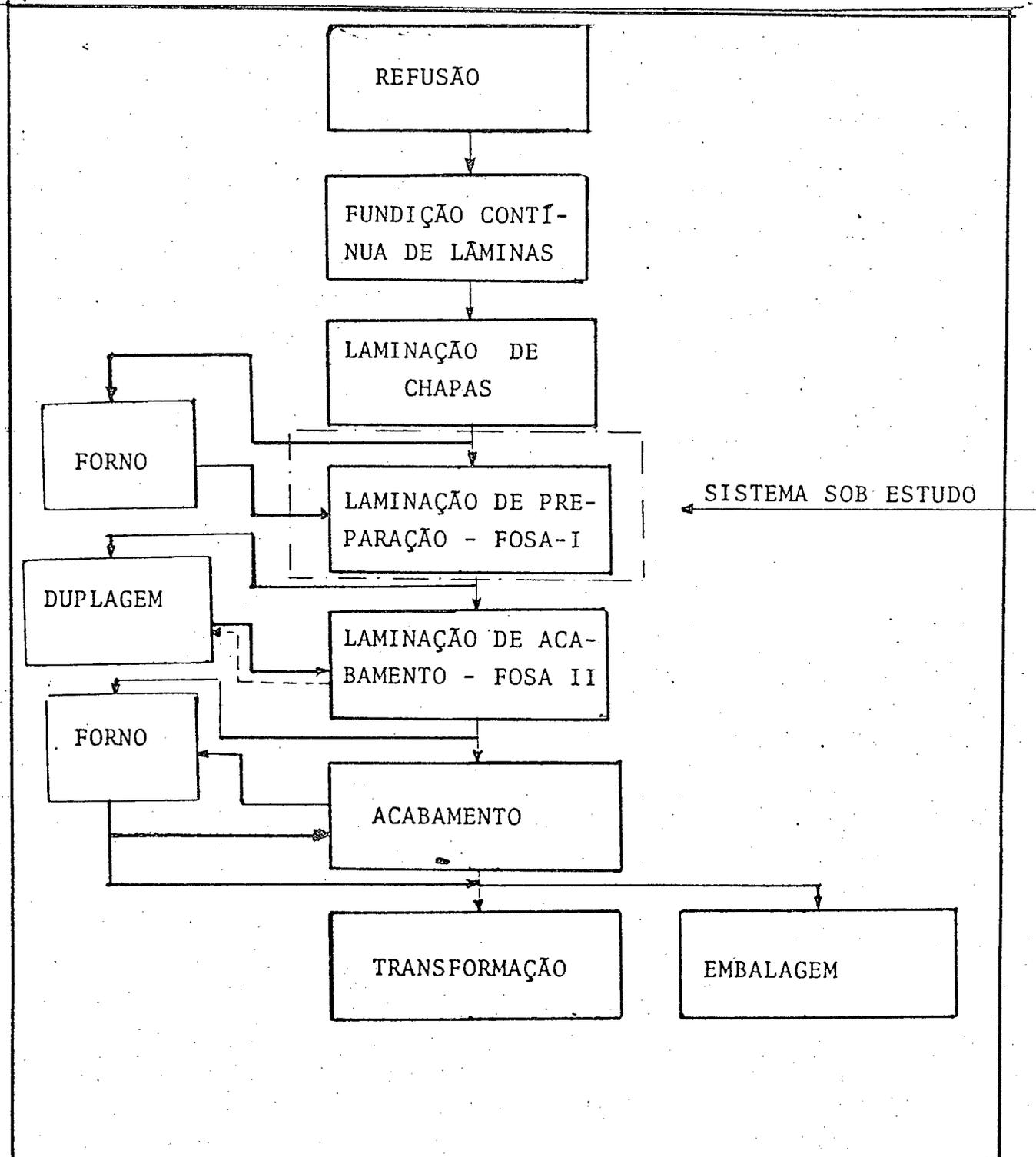


FIG. 7 - Fluxograma da Fabricação de Folhas, A.S.A.



ITEM	ESPECIFICAÇÃO	VALOR	
1	Campo de uso	Indústria de laminação a Frio	
2	Tipo	Quádruo para a laminação de Folhas	
3	Material	Al- 99,5 e ligas leves	
4	Largura máxima da folha	1380	mm
5	Espessura máxima da folha	0,7	mm
6	Pressão máxima	560	t
7	Velocidade de laminação I	0 - 490	m/min
	II	0 - 980	"
8	Potência Motor Laminador	0 - 480	kw
9	Corrente máxima	1,3	ka
10	O Cilindros de trabalho	260	mm
11	Comprimento	1550	mm
12	O Cilindros de apoio	750	mm
13	Comprimento	1550	mm
		BOBINADEIRA	DEBOBINADEIRA
1	Velocidade I	0 - 520m/min	0 - 280m/min
	II	0 -1200 "	0 - 640 "
2	Força de tração I	135 -1350 kgf	220 -2200 kgf
	II	60 - 600 "	92 - 920 "
3	Potência do Motor	120 kw	120 kw
4	Corrente máxima	240 A	240 A

QUADRO 2 - Especificações do laminador FOSA-1

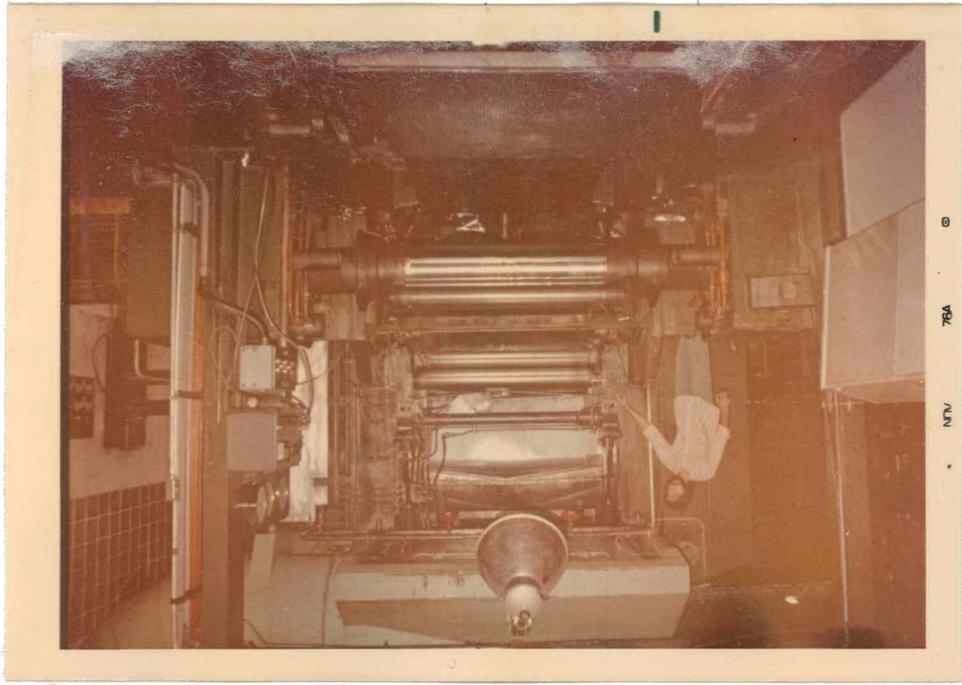
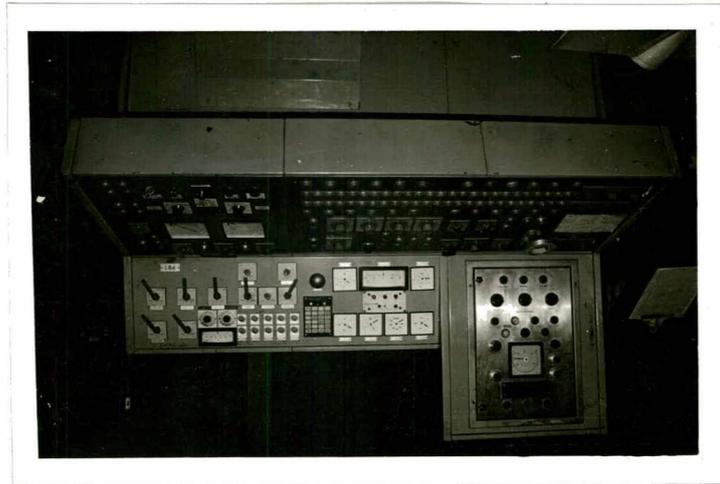


FIG. 9 - Vista do painel de controle do laminador FOSA I.



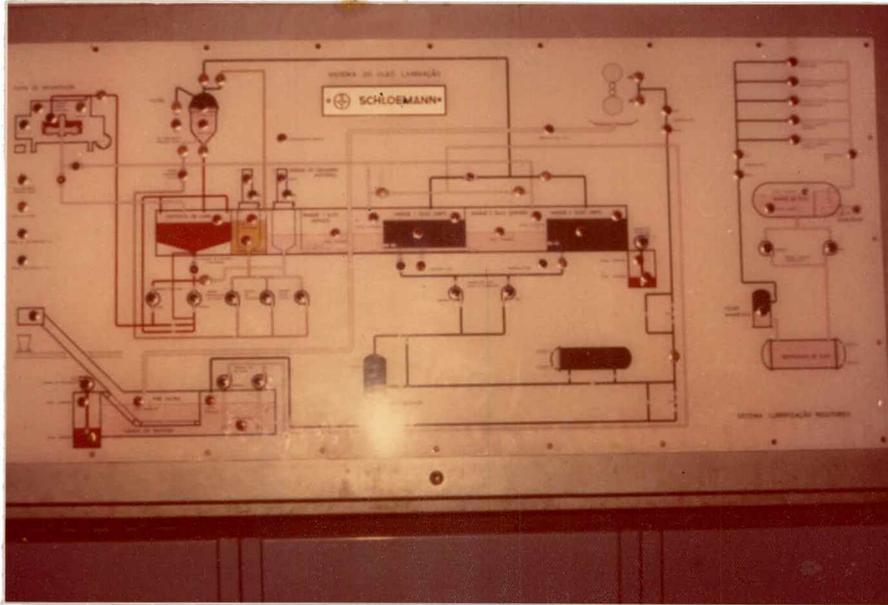


FIG. 11 - Vista do sistema de recuperação e aplicação do óleo de laminação (esquema).

b)- Equipamentos auxiliares

- Sistema de aplicação, recolhimento e recuperação do óleo de laminação. - ver fig. 11 - .
- Controle automático de espessura por velocidade e tensão, acoplado com um medidor de espessura tipo raio-x.
- Controle manual, hidráulico, do bombeio dos cilindros de laminação e da pressão de laminação.
- Sistema de medição das tensões de entrada e saída.

3.3.3. Material de teste

O material de teste constou de bobinas, em espulas de aço segundo as figs. 12 e 13 - e com as especificações abaixo.

a)- Liga escolhida - como a composição é de grande influência - nos parâmetros do processo, escolheu-se apenas a liga Al-1200, uma vez que ela compreende a maior parte da produção. A sua composição básica é:

Al- 1200	%
Al	99,00
Fe + Si	1,00



FIG. 12 - Vista geral de um lote de bobinas de AL-1200.



FIG. 13 - Vista de uma bobina de liga AL-1200.

b) - Qualidade dimensional na entrada para cada passe considerado

- Largura nominal:		1390 mm
- Espessura nominal:	1º passe	0,60 mm
	2º passe	0,30 mm
	3º passe	0,15 mm
- Tolerância de espessura:	1º passe	± 3 %
	2º passe	± 3 %
	3º passe	± 5 %

Estes valores foram estabelecidos em função da capacidade de correção de espessura do sistema usado no laminador e são controladas pelo registro gráfico da sua variação, no passe anterior ao em teste.

c) - Propriedades Mecânicas - Deve-se fazer o levantamento das propriedades mecânicas antes de cada passe considerado, retirando-se as amostras no início e fim de cada bobina, do lado de entrada do material no laminador. Os resultados devem ser levantados preenchendo-se o formulário cujo modelo se mostra no quadro 3 abaixo.

Nele usou-se a seguinte notação:

- NUDBO : Número da bobina sob teste
- NUAMO : Número da amostra do material
- NUPLA : Número do passe sob teste
- $LE_{0,2\%}$  : Limite de escoamento para 0,2% de deformação dado em  $kgf/mm^2$ .
- LRT : Limite de resistencia a tração, dado em  $kgf/mm^2$ .
- A : Alongamento percentual em relação a um comprimento de medição de 50 mm .
- DATA : Data do ensaio.

NUDBO	NUAMO	NUPLA	$LE_{0,2\%}$ $kgf/mm^2$	LRT $kgf$	A %	DATA	OBS.

QUADRO 3- Modelo da Planilha de controle das propriedades mecânicas.

### 3.3.4. Controle do Acabamento superficial dos cilindros

Os cilindros de trabalho são retificados sempre que a produção considerá-lo necessário e o seu controle deve ser feito segundo o formulário cujo modelo se mostra no quadro 4 abaixo. Nele foi usada a seguinte notação:

- NUDBO : Número da bobina usada no teste
- BOCTR : Bombeio geométrico, dado na retificação, dos cilindros de trabalho, em mm.
- NUPLA : Número do passe de laminação sob teste.
- DICTR : Diâmetro dos cilindros de trabalho - par -, em mm.
- DUCTR : Dureza dos cilindros de trabalho, em shore.
- RUCTR : Rugosidade dos cilindros de trabalho, dada em C.L.A.
- DATEN : Data da entrada dos cilindros para os testes.
- DATSA : Data da saída dos cilindros, para efeito dos testes.

Deve-se procurar sempre realizar as experiências com cilindros recém retificados, após os mesmos terem sido utilizados para a laminação de algumas bobinas, de modo a assegurar que o sistema esteja em regime permanente.

NUDBO	BOCTR mm	NUPLA	DICTR mm	DUCTR Shore	RUCTR CL <sub>A</sub> <sub>μ</sub>	DATEN	DATSA	ORS.

QUADRO - 4 - Modelo da planilha de controle de acabamento dos cilindros de trabalho.



### 3.3.6. Métodos práticos de medição a serem empregados

#### 1) Medição das velocidades de entrada e saída da folha.

Para se medir a velocidade de entrada e saída da folha no laminador existem vários métodos usuais, como sejam:

- a) Tacômetros manuais ou aclopados
- b) Geradores tacométricos
- c) Sistemas óticos
- d) Sistemas foto-elétricos

Os métodos a e b estão fora de cogitação pelas seguintes razões:

- Dificuldades de registro das leituras
- Dificuldades de ordem prática para instalação dos mesmos no laminador.
- Baixa precisão

Os do item c, pela complexidade inerente aos mesmos.

Os do item d são sistemas normalmente caros, mas de muita adaptabilidade às condições mais diversas e de grande precisão.

Em princípio foram escolhidos por estas razões. Por isso será feito, a seguir, um melhor estudo sobre os mesmos.

O método que se escolheu, foi fruto de longos estudos sobre a viabilidade prática das medições. Os pré-requisitos estabelecidos foram:

- precisão de medição dentro dos níveis estabelecidos
- facilidade de registro dos dados obtidos
- facilidade de instalação do medidor no sistema a ser medido
- aproveitamento máximo do tempo de medição disponível, durante a laminação da bobina sob teste.
- disponibilidade do equipamento de medição ou medidores.

A prática ensina que é difícilimo se fazer medições de velocidade da folha diretamente. As razões básicas são:

- Existência de óleo de laminação na superfície da mesma
- Possibilidade de danificar o material
- Temperatura da folha sob processo
- Dificuldade de instalação dos medidores

Partiu-se para os métodos indiretos e, pela fig. 14, pode-se notar que o mais recomendado é se medir a velocidade dos roletes ou rolos defletores, no lado de entrada e saída, indicados na figura. Estes roletes estão apoiados em mancais de rolamento e, durante o regime permanente do processo, durante o qual serão feitas as medições, deverão possuir uma velocidade tangencial igual à velocidade

linear da folha que os conduz. O método finalmente escolhido consiste, pois, em medir a velocidade de rotação destes roletes.

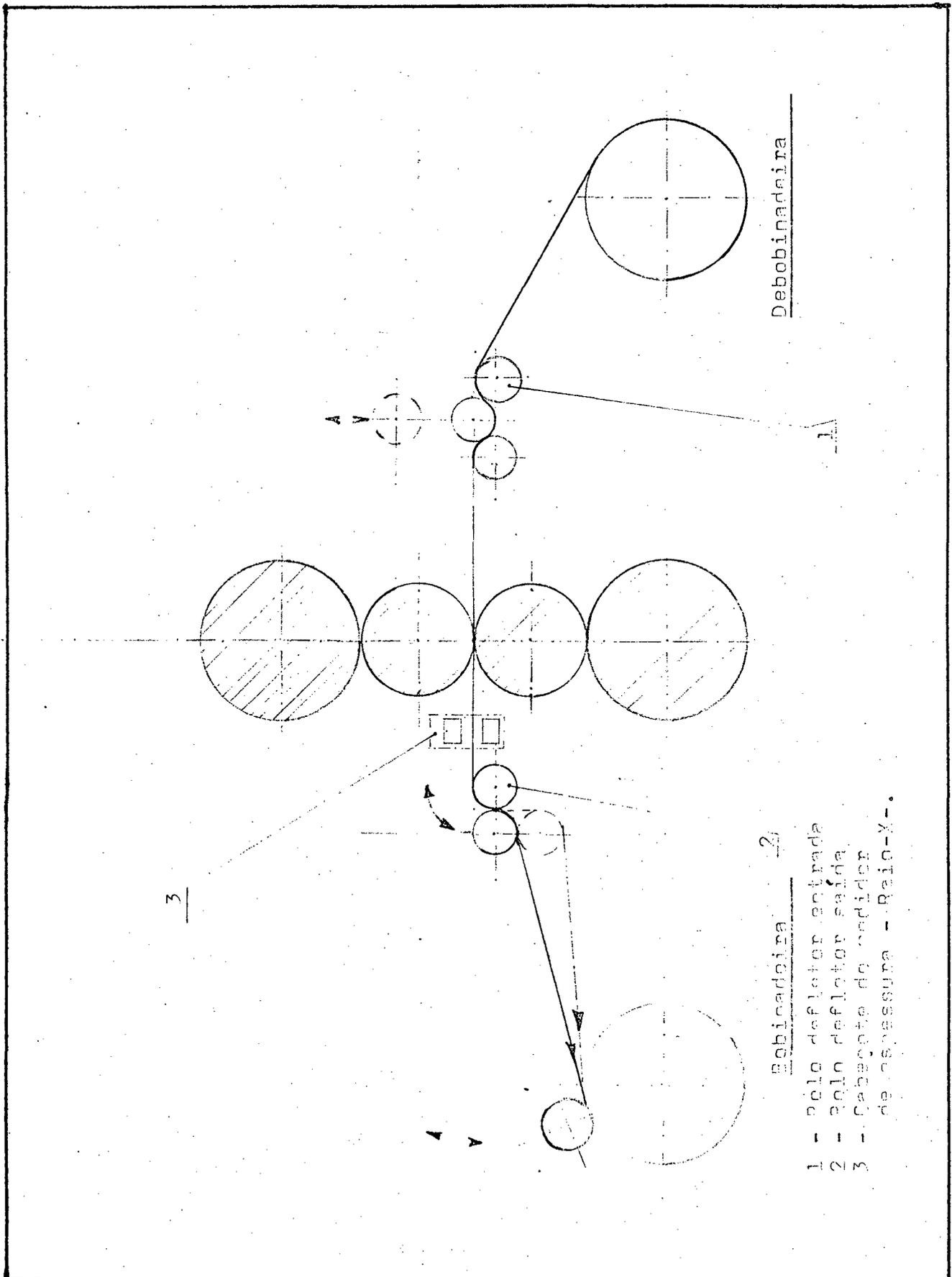


FIG. 14 - Corte longitudinal, esquemático, do laminador FCS-1.

O presente sistema de medição deve constar de:

- Transdutores
- Indicadores

Para servir como indicador utilizou-se um frequencímetro digital de propriedade da SUDENE. Para tanto consultou-se o Deptº de Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco e lá se desenvolveu (inclusive com simulação), o método de medição final, antes de se iniciar as medições reais no laminador.

### 3.3.7. Valores usuais das gradezas a serem medidas

Tendo-se em vista o aproveitamento do material, pela correção da espessura nos passes posteriores ao do teste, escolheu-se, partindo-se das espessuras indicadas no item 3.3.3., valores de velocidade e tensão que resultassem em reduções médias por passe da ordem de 50%, podendo, entretanto, variar no entorno de  $\pm 20\%$  no decorrer das experiências. Pode-se afirmar isto com base em experiências prévias e observações no laminador. No entanto, como as reduções devem ser medidas indiretamente pela medição das velocidades de entrada e saída, torna-se necessário ter uma idéia da variação destas no intervalo de variação da redução indicado acima. Em princípio, de acordo com as especificações do equipamento expostas no item 3.3.2., estas velocidades devem se situar nos intervalos seguintes:

Velocidade de debobinadeira:	0 - 280 m/min
Velocidade de bobinadeira :	0 - 520 m/min

Isto tendo em vista que as velocidades de laminação devem estar na faixa de 0 - 490 m/min, por limitação do processo.

Como complemento, o quadro 6 mostra o intervalo para as velocidades de saída, segundo a bibliografia referenciada.

### 3.4. Planejamento dos Ensaios

Baseando-se no exposto no item 3.2, se estabelece quais e quantas são as variáveis dependentes e independentes, bem como os parâmetros e constantes que atuam no sistema.

#### 3.4.1. Levantamento das variáveis, parâmetros e constantes

1) Variáveis independentes

ITEM	FONTE	VELOCIDADE DESLIZAMENTO SAÍDA %	VELOCIDADE DESLIZAMENTO ENTRADA %	ÍNDICE DE REDUÇÃO %
1	J. A. Schey <sup>2</sup>	1 - 18	-	10 - 50
2	Bulletin of JSME <sup>10</sup>	0,5 - 6,8	-	10 - 60
3	Light Metal AGE <sup>26</sup>	2,8 - 13,5	-	50 - 58
4	Journal of Lubrication Technology <sup>27</sup>	2 - 10	-	-

OBS. - Deixou-se aqui, de mostrar as condições de laminação, para todos os itens acima, tendo em vista a grande diversidade das mesmas.

- As velocidades de deslizamento são dadas em função da velocidade de laminação segundo a seguinte relação:

$$V_s^* = \frac{V_s - V_{lam}}{V_{lam}} \quad \%$$

onde:

$V_s$  - Velocidade de deslizamento na saída

$V_{lam}$  - Velocidade de laminação

- Não se encontrou, em toda a bibliografia consultada, referência a valores de velocidade de deslizamento na entrada.

QUADRO - 6 - Variação da velocidade de deslizamento na saída, durante a laminação a frio de Alumínio, segundo dados da bibliografia consultada.

- Tensão de tração de entrada ou de debobinadeira
  - Tensão de tração de saída ou de bobinadeira
- 2) Variáveis dependentes
- Velocidade do material na entrada do laminador
  - Velocidade do material na saída do laminador
  - Índice de redução por passe
- 3) Parâmetros e Constantes
- Tipo de liga
  - Espessura de Entrada
  - Largura de Entrada
  - Estado de Encruamento inicial
  - Pressão específica de laminação
  - Óleo de laminação e seus Parâmetros
  - Geometria e Acabamento superficial dos cilindros

#### 3.4.2. Pontos básicos do Planejamento dos Ensaios

As medições são feitas em vários ensaios sucessivos e complementares <sup>9</sup>, e as leituras dos resultados sucessivamente, por razões de aproveitamento dos medidores disponíveis.

Deve-se projetar os experimentos <sup>14,15,16</sup> como do tipo fatorial, já que se deseja analisar os efeitos das três variáveis independentes, em um dado intervalo de variação, e a interação das mesmas é de interesse. Com isto, o projeto permite:

- Estimar e comparar os efeitos das variáveis em estudo
- Estimar os possíveis efeitos interativos entre as mesmas
- Estimar a precisão dos experimentos

Os pontos importantes deste projeto são:

- 1) - Sequência dos experimentos

Devido ao fato de se ter de usar várias bobinas nos experimentos sucessivos e complementares, tem-se que assegurar que as condições experimentais se mantenham constantes; os mesmos devem, pois, ser realizados em série <sup>9</sup>, com a repetição de pelo menos um experimento entre dois experimentos consecutivos.

- 2) - Número de níveis de cada uma das variáveis

Cada variável independente é analisada em três níveis diferentes, onde o nível intermediário corresponde ao valor médio usado na produção normal. Este número de níveis foi escolhido em

virtude de que o tipo esperado de curva não deve possuir pontos críticos especiais que justifiquem uma maior frequência de experimentos. Como a presente série de experimentos é do tipo fatorial, tem-se que procurar realizar as medições em todas as possíveis combinações das variáveis em questão.

### 3) - Sucessão das Leituras

A sucessão das leituras é governada pelos aspectos práticos operacionais normalmente empregados na laminação. Cuidou-se apenas, para que os procedimentos normais usados pelos operadores fossem mantidos, sem prejuízo dos ensaios. Assim sendo, tem-se a seguinte sequência:

- 1º) - Leitura da Velocidade de Laminação
- 2º) - Leitura da Velocidade de Entrada
- 3º) - Leitura da Velocidade de Saída

### 4) - Estabelecimento dos valores para os níveis de Velocidade de laminação e das tensões.

- Os valores usuais para cada passe estão indicados no quadro 7.

PASSE	VELOCIDADE DE LAMINAÇÃO m/min	TENSÃO DE DEBOBINADEIRA kg/mm <sup>2</sup>	TENSÃO DE BOBINADEIRA kg/mm <sup>2</sup>
1º	300 - 400	1 - 2	2
2º	200 - 300	2 - 3	3 - 3,5
3º	250 - 350	4 - 5	4 - 5

QUADRO - 7 - Valores usuais da velocidade de laminação e das tensões de bobinadeira e debobinadeira, para cada passe.

- Escolha dos níveis de Velocidade de laminação, em m/min.

- 1º passe:  $V_1 = 200$   
 $V_2 = 300$   
 $V_3 = 400$

$$2^{\circ} \text{ passe: } V_1 = 100$$

$$V_2 = 200$$

$$V_3 = 300$$

$$3^{\circ} \text{ passe: } V_1 = 150$$

$$V_2 = 250$$

$$V_3 = 350$$

- Escolha dos níveis de tensão e cálculo das forças de tração

Como mencionado anteriormente, as tensões de tração, de bobina-  
mento e debobinamento, não devem ser superiores às tensões limites  
de escoamento do material, nas condições de laminação. As tensões li-  
mites de escoamento a tração, a 0,2 % de deformação, devem ser a ba-  
se para a escolha daquelas, já que se desconhece a tensão limite de  
escoamento nas condições reais de laminação. Os valores das tensões  
limites de escoamento a tração, a 0,2 % de deformação, nas diversas  
espessuras são, (segundo dados da produção), como o exposto no quadro  
8.

ESPESSURA mm	$\sigma_{0,2\%}$ kgf/mm <sup>2</sup>
0,60	4 - 6
0,30	11 - 12
0,15	11 - 15
0,07	12 - 17

QUADRO 8 - Tensão limite de escoamento, nas diversas espessuras.

Por outro lado, se deve levar em conta as limitações do equipa-  
mento de bobinamento e debobinamento já mencionados no item 3.3.2.

Como as áreas das seções transversais, em cada passe, são como  
o que está exposto no quadro 9, e considerando-se que no segundo pa-  
sse o material é refilado de 2 x 20 mm, sua largura passa de  
1390 mm para 1350 mm, as tensões de bobinamento e debobinamento má-  
ximas e mínimas, para o equipamento, serão conforme o quadro 10.

	1º PASSE	2º PASSE	3º PASSE
LARGURA DA FOLHA EM mm	1390	1350	1350
ESPESSURA DE ENTRADA EM mm	0,60	0,30	0,15
ESPESSURA SAÍDA MÉDIA EM mm	0,30	0,15	0,07
SEÇÃO TRANSVERSAL ENTRADA mm <sup>2</sup>	834	405	203
SEÇÃO TRANSVERSAL SAÍDA mm <sup>2</sup>	417	203	102

QUADRO 9 - Áreas das seções transversais da folha, em cada passe

TENSÃO DE TRAÇÃO kg/mm <sup>2</sup>	1º PASSE	2º PASSE	3º PASSE
Máx. ENTRADA	2,6	5,4	10,8
Mín. "	0,3	0,6	1,1
Máx. SAÍDA	3,2	6,6	13,2
Mín. "	0,3	0,7	1,3

QUADRO 10 - Tensões de bobinamento e debobinamento, pela limitação do equipamento.

Estas tensões são obtidas tendo-se em conta as seções transversais mostradas no quadro 9 e as forças máximas e mínimas do equipamento expostas no quadro 2. Comparando-se, agora, o quadro 8 com o quadro 10, pode-se escolher os valores das tensões, no que resulta o quadro 11, em que se usa, também, o critério de que as referidas tensões não ultrapassem a 50 % do valor das tensões mostradas no quadro 8, isto por que não se conhece o valor daquelas nas condições de laminação. Portanto, os níveis para as forças de bobinamento e debobinamento ficam como no quadro 12.

PASSE	TENSÃO DE DEBOBINAMENTO kg/mm <sup>2</sup>			TENSÃO DE BOBINAMENTO kg/mm <sup>2</sup>		
	MÍN.	MÉD.	MÁX.	MÍN.	MÉD.	MÁX.
1º	1,0	2	2,5	1	2	3
2º	1,0	3	5,4	1	3	6
3º	1,5	4	6	1,5	4	8

QUADRO 11 - Valores das tensões de bobinamento e debobinamento es-  
colhidos, para cada passe.

PASSE	FORÇA DE DEBOBINAMENTO kgf			FORÇA DE BOBINAMENTO kgf		
	MÍN.	MÉD.	MÁX.	MÍN.	MÉD.	MÁX.
1º	850	1650	2050	400	850	1250
2º	400	1200	2150	200	600	1200
3º	300	800	1200	150	400	800

OBS. Estes valores foram aproximados para valores simpáticos.

QUADRO 12 - Valores das forças de tração de bobinamento e debobi-  
namento, escolhidos para cada passe.

## 5) - Planilha de Planejamento e Controle dos Experimentos

Pode-se reunir, agora, todos os níveis escolhidos das variáveis independentes, todos os parâmetros e todas as constantes, cujos valores foram estabelecidos no parágrafo anterior, em uma planilha geral que permita mostrar todas as combinações com as três variáveis em questão, nos três níveis respectivos. Estas combinações formam então os diferentes experimentos do presente trabalho e estão mostradas nos quadros 13, 14 e 15 para os 1º, 2º e 3º passes, respectivamente.

Nesta planilha se usou a seguinte notação:

SÉRIE - Indica o passe e a combinação dos níveis de cada variável usado naquele experimento, do seguinte modo: o primeiro número, indica o passe, o segundo o nível da velocidade de laminação, o terceiro o nível da força de bobinadeira e o quarto o nível da força de debobinadeira.

TOLEN - Temperatura do Óleo de laminação na entrada do laminador em graus centígrados.

ARLAM - Número do rebolo utilizado na retífica dos cilindros

FOBOB - Força de bobinamento, em kgf

FODEB - Força de debobinamento, em kgf

PRLAM - Pressão de laminação, em t

VELAM - Velocidade de laminação, em m/min

NUREP - Número de repetições para cada experimento

### 3.4.3. Preparação das Planilhas de Acompanhamento de Ensaio

As planilhas ou protocolo de ensaio são a base para se obter uma sequência prática do ensaio, sem que se perca tempo na e-

PASSE Nº 1      ESPESS.: 0,6 mm      LARGURA: 1390 mm							
SÉRIE	TOLEN °C	ARLAM Nº	FOBOB kgf	FODEB kgf	PBLAM t	VELAM m/min	NUREP
1-111	45	180	400	850	2x100	200	3
1-112	"	"	"	1650	"	"	"
1-113	"	"	"	2050	"	"	"
1-121	"	"	850	850	"	"	"
1-122	"	"	"	1650	"	"	"
1-123	"	"	"	2050	"	"	"
1-131	"	"	1250	850	"	"	"
1-132	"	"	"	1650	"	"	"
1-133	"	"	"	2050	"	"	"
1-211	"	"	400	850	"	300	"
1-212	"	"	"	1650	"	"	"
1-213	"	"	"	2050	"	"	"
1-221	"	"	850	850	"	"	"
1-222	"	"	"	1650	"	"	"
1-223	"	"	"	2050	"	"	"
1-231	"	"	1250	850	"	"	"
1-232	"	"	"	1650	"	"	"
1-233	"	"	"	2050	"	"	"
1-311	"	"	400	850	"	400	"
1-312	"	"	"	1650	"	"	"
1-313	"	"	"	2050	"	"	"
1-321	"	"	850	850	"	"	"
1-322	"	"	"	1650	"	"	"
1-323	"	"	"	2050	"	"	"
1-331	"	"	1250	850	"	"	"
1-332	"	"	"	1650	"	"	"
1-333	"	"	"	2050	"	"	"

QUADRO 13 - Planilha de planejamento e controle dos experimentos,  
para o 1º passe.

PASSE Nº 02		ESPESS: 0,30 mm			LARGURA: 1390 mm		
SÉRIE	TOLEN °C	ARLAM Nº	FOBOB kgf	FODEB kgf	PRLAM t	VELAM m/min	NUREP
2-111	45	180	200	400	2x100	100	3
2-112	"	"	"	1200	"	"	"
2-113	"	"	"	2150	"	"	"
2-121	"	"	600	400	"	"	"
2-122	"	"	"	1200	"	"	"
2-123	"	"	"	2150	"	"	"
2-131	"	"	1200	400	"	"	"
2-132	"	"	"	1200	"	"	"
2-133	"	"	"	2150	"	"	"
2-211	"	"	200	400	"	200	"
2-212	"	"	"	1200	"	"	"
2-213	"	"	"	2150	"	"	"
2-221	"	"	600	400	"	"	"
2-222	"	"	"	1200	"	"	"
2-223	"	"	"	2150	"	"	"
2-231	"	"	1200	400	"	"	"
2-232	"	"	"	1200	"	"	"
2-233	"	"	"	2150	"	"	"
2-311	"	"	200	400	"	300	"
2-312	"	"	"	1200	"	"	"
2-313	"	"	"	2150	"	"	"
2-321	"	"	600	400	"	"	"
2-322	"	"	"	1200	"	"	"
2-323	"	"	"	2150	"	"	"
2-331	"	"	1200	400	"	"	"
2-332	"	"	"	1200	"	"	"
2-333	"	"	"	2150	"	"	"

QUADRO 14 - Planilha de planejamento e controle dos experimentos, para o 2º passe.

PASSE Nº 3							
ESPESS.: 0,15 mm							
LARGURA: 1390 mm							
SÉRIE	TOLEN °C	ARLAM Nº	F0B0B kgf	F0DEB kgf	PRLAM t	VELAM m/min	NUREP
3-111	45	180	150	300	2x100	150	3
3-112	"	"	"	800	"	"	"
3-113	"	"	"	1200	"	"	"
3-121	"	"	400	300	"	"	"
3-122	"	"	"	800	"	"	"
3-123	"	"	"	1200	"	"	"
3-131	"	"	800	300	"	"	"
3-132	"	"	"	800	"	"	"
3-133	"	"	"	1200	"	"	"
3-211	"	"	150	300	"	250	"
3-212	"	"	"	800	"	"	"
3-213	"	"	"	1200	"	"	"
3-221	"	"	400	300	"	"	"
3-222	"	"	"	800	"	"	"
3-223	"	"	"	1200	"	"	"
3-231	"	"	800	300	"	"	"
3-232	"	"	"	800	"	"	"
3-233	"	"	"	1200	"	"	"
3-311	"	"	150	300	"	350	"
3-312	"	"	"	800	"	"	"
3-313	"	"	"	1200	"	"	"
3-321	"	"	400	300	"	"	"
3-322	"	"	"	800	"	"	"
3-323	"	"	"	1200	"	"	"
3-331	"	"	800	300	"	"	"
3-332	"	"	"	800	"	"	"
3-333	"	"	"	1200	"	"	"

QUADRO 15 - Planilha de planejamento e controle dos experimentos, para o 3º Passo

xecução do experimento. Servem, ainda, como arquivo ou prova dos dados experimentais obtidos. A planilha desenvolvida para o presente trabalho é a mostrada no quadro 16. Nela se usou a seguinte notação:

- TOLEN - Temperatura do óleo de laminação na entrada do laminador em graus centígrados.
- ARLAM - Acabamento dos Cilindros de Laminação, pela indicação do número do rebolo usado na retífica dos mesmos.
- FOBOB - Força de bobinamento em kgf
- FODEB - Força de debobinamento em kgf
- PRLAM - Pressão específica de laminação em t
- VELAM - Velocidade de laminação em m/min
- AMBOB - Corrente do motor da bobinadeira A
- AMDEB - Corrente do motor da debobinadeira A
- AMLAM - Corrente do motor do laminador em kA
- VELEN - Velocidade do material na entrada em cps
- VELSA - Velocidade do material na saída em cps

A numeração dos experimentos é dada por quatro números que indicam o passe em que o mesmo deve ser executado, o nível da velocidade de laminação, o nível da tensão de entrada e o nível da tensão de saída, respectivamente.

Na parte superior, abaixo do título PARÂMETROS, há duas colunas para cada experimento. Na primeira deve-se colocar os valores respectivos planejados para cada experimento, transcritos das planilhas indicadas nos quadros 11, 12 e 13; e na segunda, os valores realmente utilizados durante a realização dos experimentos no laminador sob teste, isto devido aos problemas que normalmente surgem durante a laminação.

#### 3.4.4. Análise do Erro Experimental <sup>15,14,16</sup>

Partindo-se da idéia de que os resultados experimentais devem estar livres de erros sistemáticos e ser suficientemente precisos, faz-se uma abordagem de como se pretende minimizar o erro experimental, a fim de que se possa obter melhores conclusões com os presentes experimentos.

Os erros sistemáticos e a dispersão de resultados experimentais estão associados, basicamente, às seguintes bem conhecidas fontes:

- a- Variação do próprio operador

PLANILHA DE ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO									
DATA	HORA	ROBINA Nº	ORDEM Nº	SÉRIE					
PARAMETROS									
SERIE									
TOLEN °C									
AMLAM Nº R									
FDBOB kgf									
FODEB kgf									
ORLAM t									
VELAM m/min									
LEITURAS									
AMBOS -A									
AMDES -A									
AMLAM -kA									
VELEN -cps <sup>1º</sup>									
2º									
3º									
VELSA -cps <sup>1º</sup>									
2º									
3º									

- b- Variação entre os operadores
- c- Variação do material sob teste
- d- Variações do equipamento sob teste
- e- Variações dos próprios instrumentos de medição
- f- Variações no procedimento de teste
- g- Variações do meio-ambiente

Como se pode notar, o controle do "ambiente" do sistema sob teste, apresentado no item 3.2., visa exatamente minimizar os erros sistemáticos advindos destas várias fontes. No entanto, em laminação, de modo especial por se tratar de um ambiente industrial, surgem dificuldades de ordem prática e o fator tempo torna-se necessariamente uma variável importante, ainda mais em se tratando de um trabalho com os objetivos do presentemente apresentado. Para que se possa ter uma idéia destas dificuldades, mostrar-se-á algumas delas como ilustração.

Para evitar o erro associado às variações do item h do parágrafo anterior, torna-se necessária a manutenção de um mesmo grupo de operadores, durante toda a fase experimental. Ora, visto que sob condições industriais a produção trabalha em turnos, é praticamente impossível se realizar todas as experiências com um mesmo grupo de operadores, sob pena de se perder muito tempo. O material sob teste é muito mais problemático, devido as seguintes razões:

- O processo de obtenção de lâminas, pelo departamento de refusão, segundo o comentado no item 3.3.1., é um processo de fundição contínua, e como tal, já na própria bobina é possível de se encontrar variações de propriedades ao longo da mesma; acrescente-se a isto o fato de que para a realização da presente série de experimentos são necessários vários lotes de material e cada lote com várias bobinas. Dificuldades de ordem prática, como se pode ver no item 3.5. que se segue, com respeito às calibrações dos medidores já instalados, surgem também como limitações práticas.

O método usualmente empregado para se minimizar os erros sistemáticos é o de se realizar os experimentos de uma maneira aleatória. Entretanto, mais uma vez surgem as limitações práticas de um ambiente de produção normal, pois tanto em relação a própria prática do processo quanto à disponibilidade do material se torna impraticável esta aleatorização.

A precisão dos resultados experimentais é dada pela determinação do erro padrão, e esta por sua vez depende da determinação do desvio padrão residual. Existem, basicamente, cinco métodos para se obter o desvio padrão residual, quais sejam:

- 1- Pelo próprio cálculo da dispersão dos resultados experimentais;
- 2- Pelo valor da interação de mais alta ordem nos experimentos tipo fatorial
- 3- Por considerações teóricas
- 4- Pela variação das amostras dentro de uma própria unidade experimental
- 5- Por experiência anterior de ensaios similares

O interesse presente é saber com que precisão se deve medir as velocidades de deslizamento na entrada e na saída, pelo método exposto no item 3.2.1., para se calcular o índice de redução - com uma dada precisão. Para uma estimativa inicial, os métodos 3 e 5 anteriormente citados, são os mais recomendados. Entretanto, como as equações disponíveis da Teoria de Laminação não permitem dispor de um relacionamento simples que possa ser usado para satisfazer os objetivos presentes, usa-se então o seguinte:

- a)- Estipula-se, a partir de experimentos anteriores similares e experiências prévias, o erro desejável para o índice de redução
- b)- Calcula-se, através da equação ( 5 ) do item 3.2.1., aplicando-se a teoria dos erros a esta equação, com que aproximação se deve medir as velocidades acima referidas, a fim de se obter o índice de redução, com o erro anteriormente estipulado.

Baseando-se no acima exposto, tem-se:

$$a)- \quad |I_{Red}| \leq 1 \%$$

$$b)- \quad I_{Red} = \frac{V_e}{V_s}$$

eq.(5)

Pela teoria dos erros aplicada à equação (5), e supondo-se que:

$$- V_e \text{ mín} = 50 \text{ m/min}$$

$$- V_s \text{ mín} = 100 \text{ m/min, e}$$

$$- |\Delta V_e| = |\Delta V_s| = |\Delta V|$$

tem-se:

$$|\Delta V| = 0,7 \text{ m/min}$$

e

$$\Delta_V = 1,4 \%$$

para o nível de velocidade mais baixo, de 50 m/min.

Pelo item 3.3.6., tem-se que o presente sistema de medição fornece uma frequência de:

$$f \propto W \quad \text{eg. (6)}$$

onde,

$f$  - frequência gerada pelo transdutor, que é proporcional a rotação a ser medida

$W$  - rotação a ser medida, que é proporcional a velocidade da folha.

Tem-se, também, que:

$$W = \frac{V}{\pi D} \quad \text{eg. (7)}$$

onde,

$V$  - velocidade linear tangencial a ser medida, igual à velocidade da folha

$\pi$  - constante

$D$  - diâmetro do rolo defletor

Pela equação 6, tem-se que:

$$f = K \cdot W \quad \text{eg. (6a)}$$

onde,

$K$  - constante de proporcionalidade, equivalente ao número de pulsos gerados por rotação, do rolo defletor.

Para  $k = 4$ , e substituindo-se a eq. (7) na eq. (6a), tem-se:

$$V = \frac{f \cdot \pi \cdot D}{4} \quad \text{eg. (8)}$$

Pela teoria dos erros aplicada à equação 8, tem-se:

$$4 \cdot \Delta_V = \Delta_f + \Delta_D + \Delta_\pi \quad \text{eg. (9)}$$

onde,

$$\Delta_V = \frac{|\Delta V|}{V} = \frac{0,7}{50} = 1,4 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta_f = ?$$

$$\Delta_\pi = \frac{|\Delta \pi|}{\pi} = \frac{0,002}{3,14}$$

$$\Delta_D = \frac{|\Delta D|}{D} = \frac{0,001}{0,165}$$

Substituindo-se na eq. 9, tem-se:

$$\Delta_f = 4 \cdot \Delta_V - (\Delta_\pi + \Delta_D)$$

$$\Delta_f = 4 \cdot (1,4 \cdot 10^{-2}) - 0,7 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta_f = 4,9 \%$$

3.5. Escolha dos componentes do sistema de medição, projeto da combinação dos mesmos e calibração estática.

#### 3.5.1. Controle de Espessura de entrada

O sistema de medição utilizado para a regulação da tolerância de espessura ao longo do comprimento das bobinas compreende o próprio controle automático de espessura, já instalado no Laminador sob teste, e utilizado na produção normal. Isto pode ser justificado pelo fato de se ter que regular a espessura, conforme o estabelecido no item 3.3.3. e não haver disponível outro método mais viável.

O sistema mencionado no parágrafo anterior consta de:

- Medidor de espessura tipo Raio-X
- Sistema de A.G.C., por velocidade de laminação e tensão da bobinadeira, segundo o esquema na fig. 15 e a vista parcial na fig. 16. A ele, se acoplou um voltímetro registrador que possibilita o registro contínuo da variação de espessura ao longo do comprimento do laminado.

#### 3.5.2. Controle do acabamento dos cilindros

O equipamento utilizado é de uso normal, pelo setor de poli

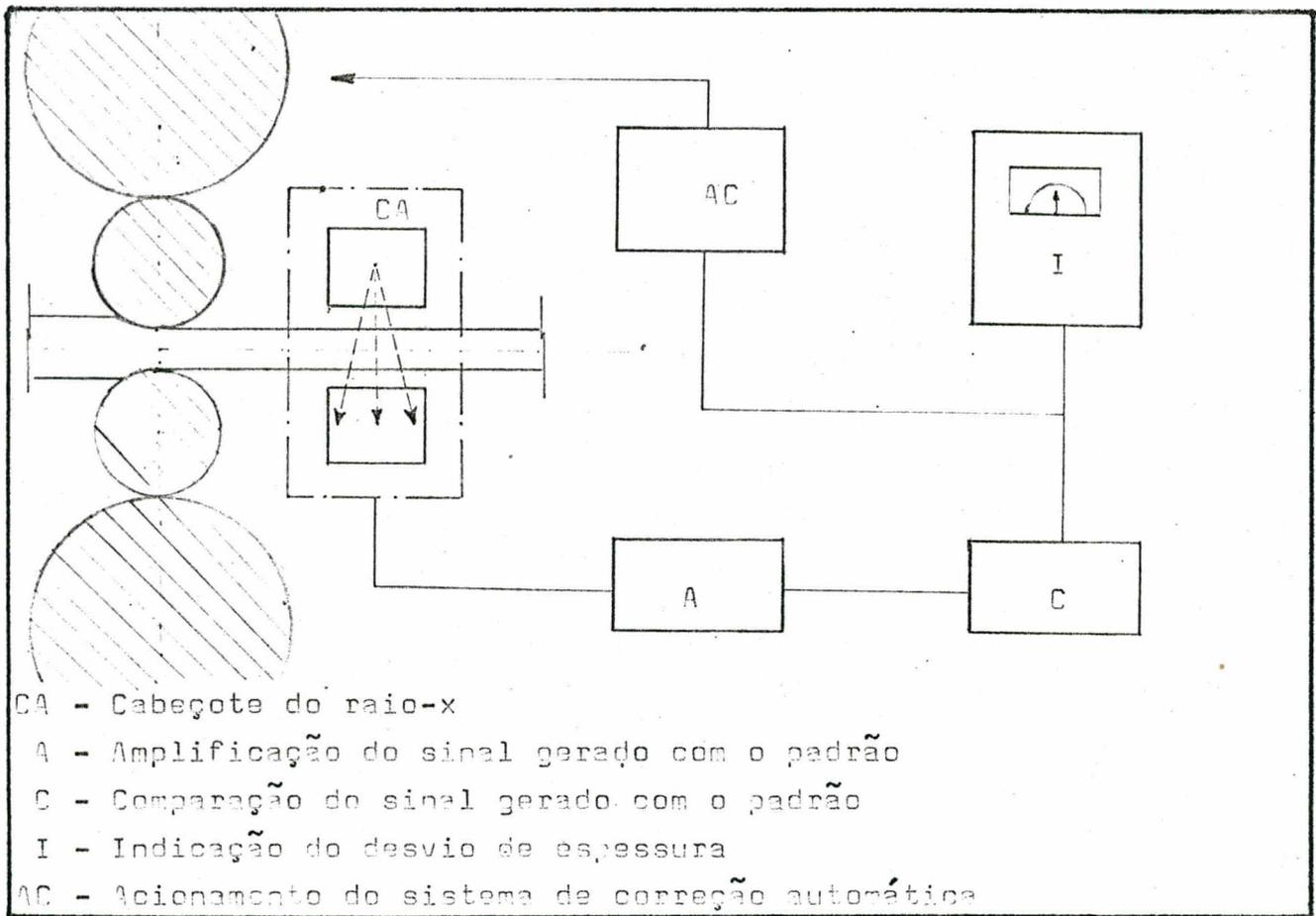


FIG. 15 - Esquema do sistema de medição e controle automático de espessura.



FIG. 16 - Vista do indicador de espessura.

ficação de cilindros de laminação da fábrica em pauta, constando de um medidor tipo SURTRONIC com apalpador de quartzo. Este equipamento indica o valor do desvio médio aritmético, C. L. A. , em microns, e em um dado comprimento de amostragem. Dado que estas medições são feitas pelos próprios operadores de retífica, transcreve-se apenas os dados dos parâmetros utilizados em tais medições, que são:

- Comprimento de medição: 10 mm
- Valor máximo : 0,75 mm

### 3.5.3. Medição das Velocidades

Tendo-se em vista o discutido no item 3.3.6., o sistema de desenvolvido para medir as velocidades de rotação em questão, pelo método foto-elétrico, deve constar de:

- Transdutor - Conversão de rotação em pulsos
- Transporte do sinal gerado
- Tratamento do sinal gerado
- Indicação e leitura do sinal resultante

O transdutor consta de uma resistência elétrica foto-sensível do tipo L. D. R., com as características expostas no quadro 17, e uma pequena lâmpada, dispostos em um mesmo nível, de modo que a luminosidade da lâmpada possa, ciclicamente, atingir o foto-resistor, a depender da coincidência com os furos dispostos no disco instalado entre aqueles. Este disco é bi-partido, para facilitar a montagem no rolo em que se pretende medir a velocidade de rotação. A lâmpada e o foto-resistor estão montados dentro de pequenos tubos em alumínio, fixos por um suporte tipo " U ", que permite a disposição acima descrita, conferindo ainda blindagem elétrica, mecânica e um bom aterramento do transdutor. Tudo isto pode ser visto, no esquema mostrado na fig. 17 e nas fotografias das figs. 18 e 19.

No projeto do acima exposto, levou-se em consideração, principalmente, os fatores localização e proteção contra o meio ambiente. A localização, como se mostrou no item 3.3.6., foi fruto da procura de simplificação do sistema, tendo-se optado pelos rolos de fletores, mostrados na fig. 14, pelas seguintes razões:

- Único lugar onde era viável medir a velocidade da folha, sem a necessidade de instalação de um outro elemento intermediário.
- Facilidade de acesso

TIPO	RESISTÊNCIA NO ESCURO M $\Omega$	RESISTÊNCIA A 50 Lux $\Omega$	TENSÃO MÁX. V	DISSIPACÃO MÁX. W
FOTO-DIODO L.D.R.	1	0,075 - 0,3'	150	200

QUADRO 17 - Especificações do foto-resistor.

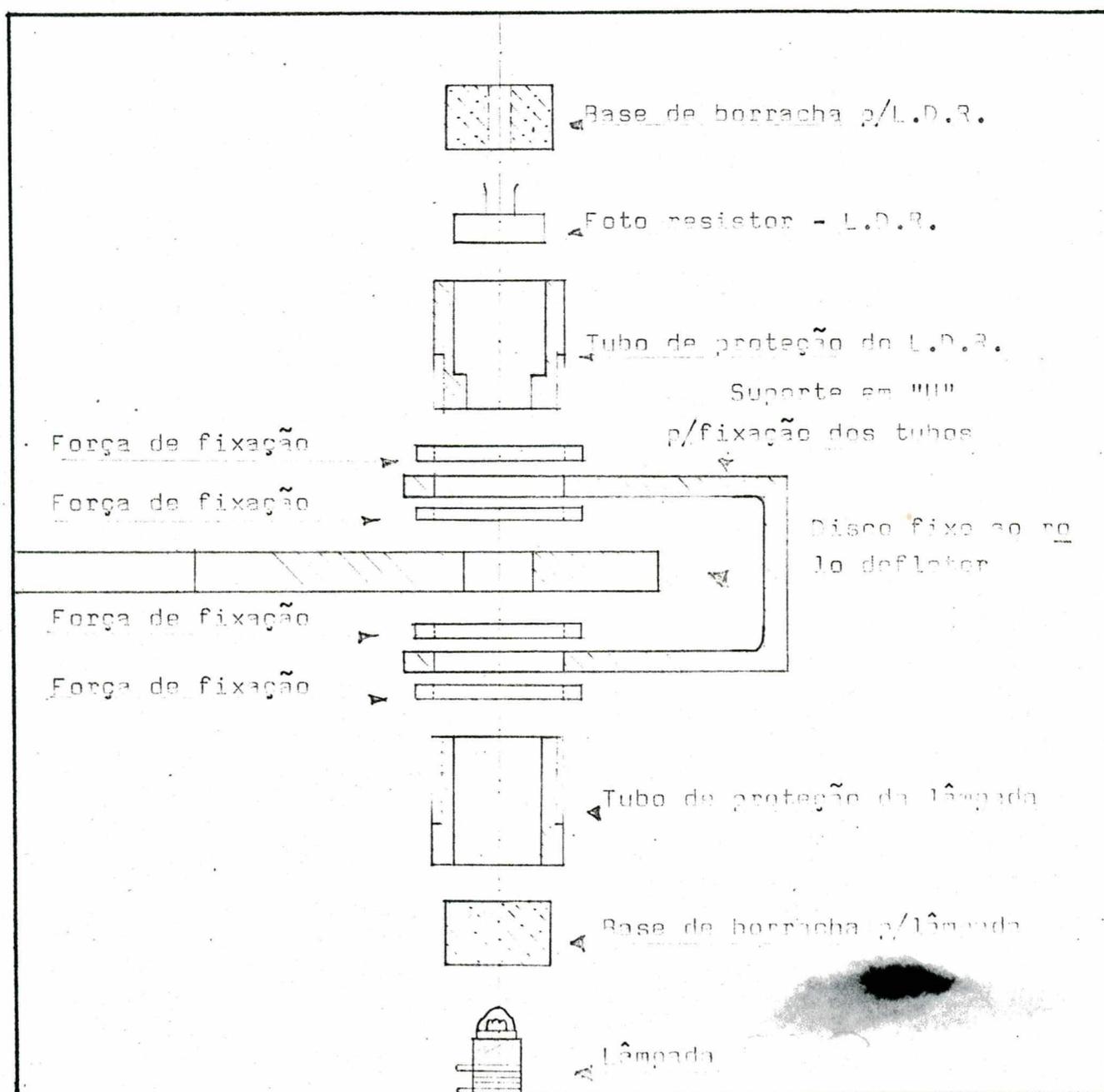


FIG. Nº 17 - Esquema do transdutor.



FIG. 18 - Foto do transdutor

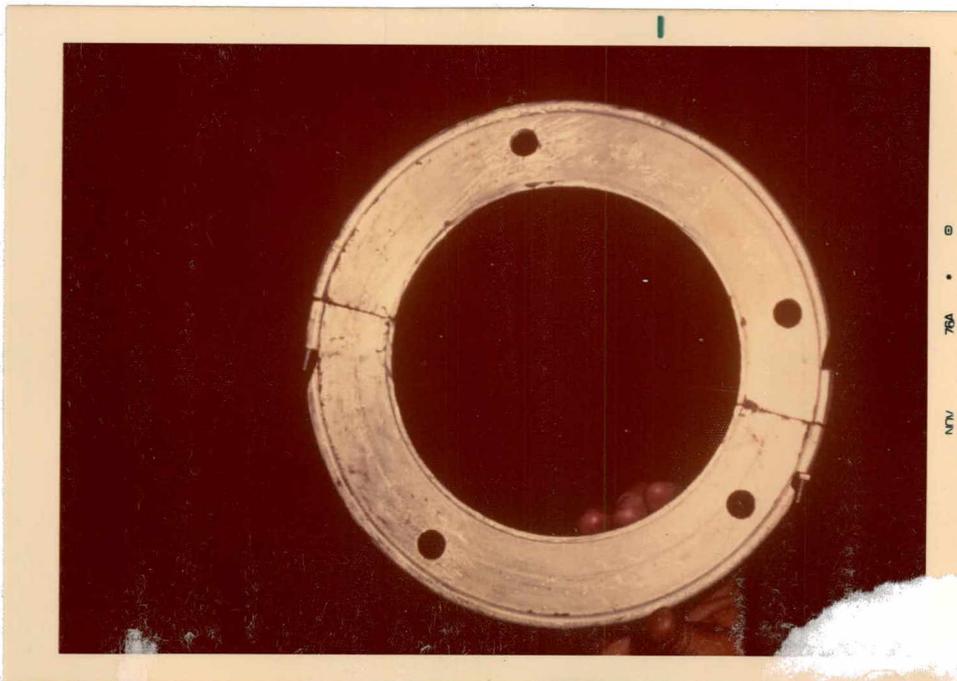


FIG. 19 - Foto do disco

- Existência de espaço, nas laterais destes rolos, como mostra a foto da fig. 21.

A proteção contra o meio ambiente está ligada aos seguintes fatores:

- Quebra, imprevista, da folha durante o processo,
- Interferência com outras partes do laminador e a folha em processo,
- Interferência do óleo de laminação - só do lado da entrada no laminador, que é a região de aplicação do mesmo - ,
- Vibração do laminador,
- Interferência de outras fontes luminosas que possam, eventualmente, impressionar o foto-resistor,
- Alinhamento do foto-resistor com a fonte luminosa,
- Interferência humana, indesejável.

Observando-se estas limitações, foram desenvolvidos os três sistemas transdutores necessários para medir as velocidades dos rolos defletores, na entrada e saída do laminador, e também da velocidade de laminação, pela medição da rotação dos seus eixos motores. Todos os transdutores são idênticos, diferenciando apenas nos suportes de fixação e nos dispositivos de proteção contra o meio ambiente. Esta proteção torna-se necessária apenas no transdutor instalado no lado de entrada, onde o óleo de laminação é aplicado, pois o mesmo interfere no fluxo luminoso. Estas montagens podem ser vistas nas fotos das fig. 20, fig. 21 e fig. 22.



FIG. 20 - Foto do transdutor no eixo motor do laminador

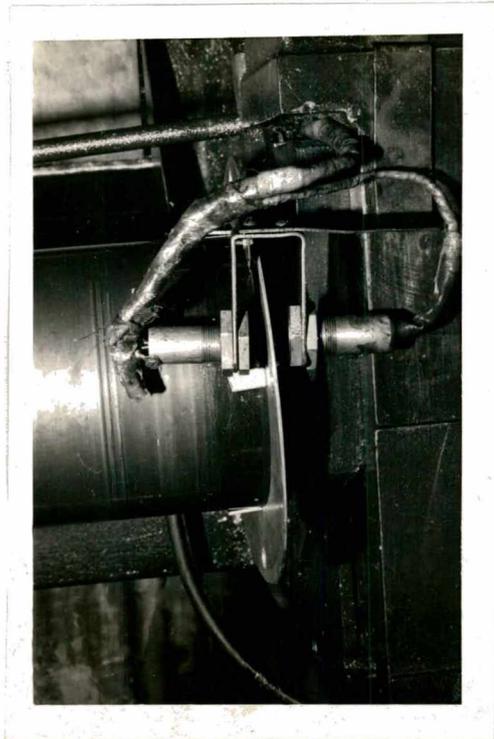


FIG. 21 - Foto do transdutor no rolo defletor da entrada

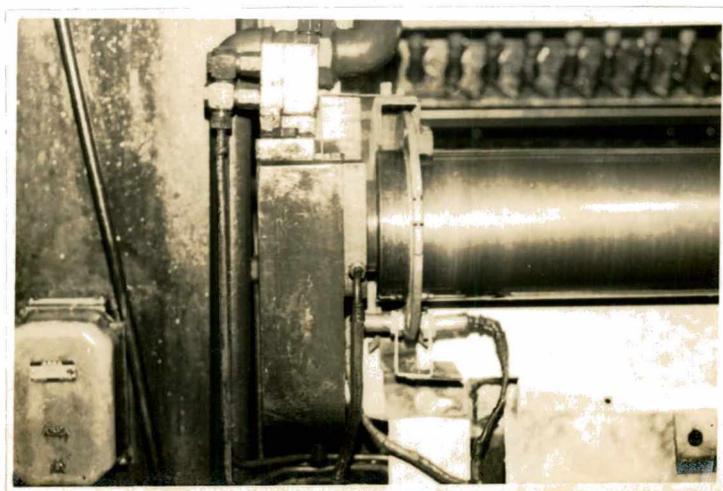


FIG. 22 - Foto do transdutor no rolo defletor da saída

O transporte do sinal gerado (no caso do transdutor instalado na entrada significa 30 m de cabos) do local de medição até o local de tratamento é feito por cabos blindados flexíveis que asseguram:

- Blindagem elétrica em virtude de:
  - Sinais indesejáveis,
  - curto-circuito - (segurança contra incêndio das instalações)
- Blindagem mecânica - (observar na instalação, as partes móveis do laminador) - .
- Blindagem contra a corrosão - (óleo de laminação).

O tratamento do sinal gerado deve ser projetado visando:

- Geração do sinal nas condições necessárias ao sistema de indicação e leitura.
- Seleção fácil do ponto de medição, tendo em vista que as leituras serão feitas em série.
- Blindagem elétrica
- Manutenção confiável da intensidade luminosa sobre o foto-resistor.
- Amplitude mínima do sinal, de 1,5 V
- Sinal com baixa constante de tempo.

Chegou-se assim, ao circuito esquematizado na fig. 23 e mostrado na fotografia da fig. 24, alimentado por uma bateria de 12 V.

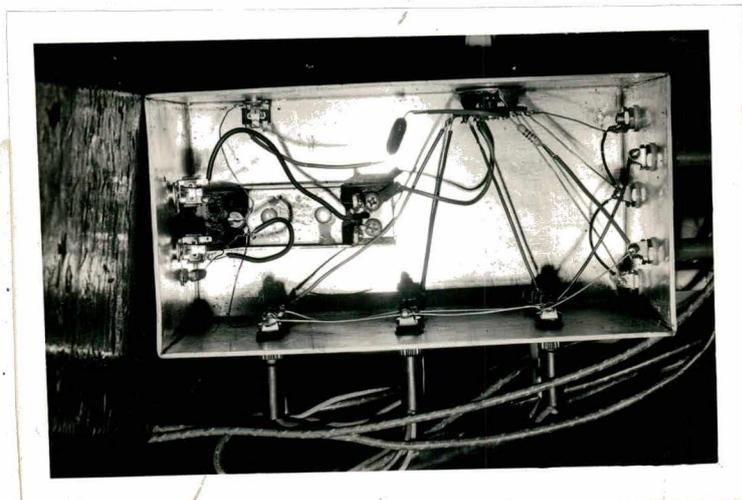


FIG. 24 - Foto do circuito elétrico de medição, instalado.

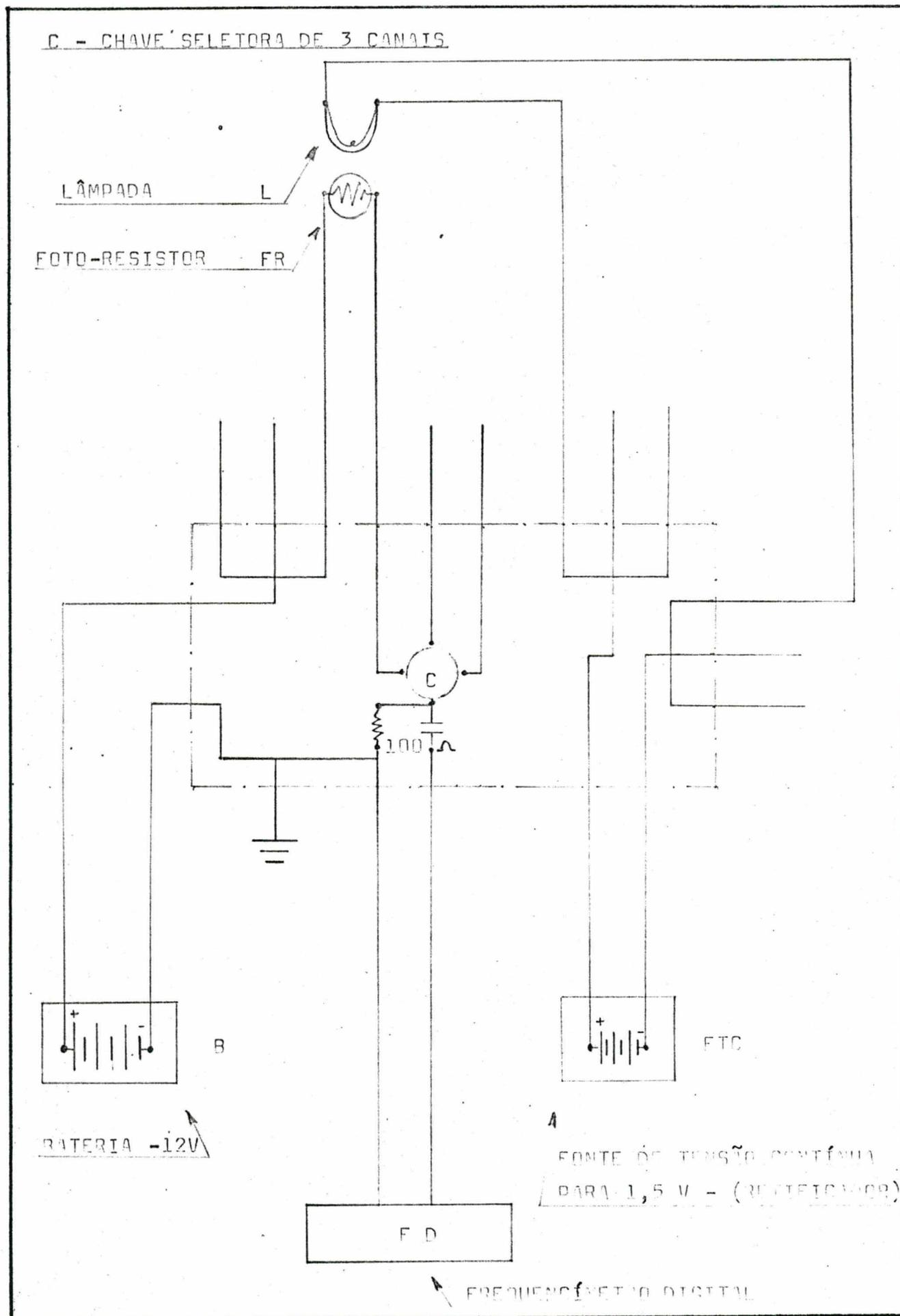


FIG. 23 - Esquema elétrico do circuito de medição

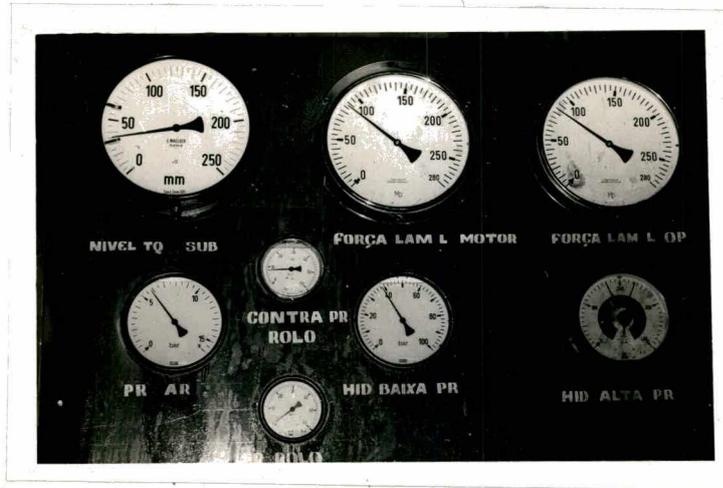


FIG. 32 - Foto dos indicadores de pressão.

FOLHAS- PADRÃO mm	FOLHAS-PADRÃO DE DESVIO mm		
	+ 10 %	+ 5 %	+ 3 %
0,60	0,060	0,030	0,015
0,30	0,030	0,015	0,008
0,15	0,015	0,008	-

QUADRO 19 - Espessuras das folhas-padrão utilizadas na calibração do medidor de espessuras, para cada passo.

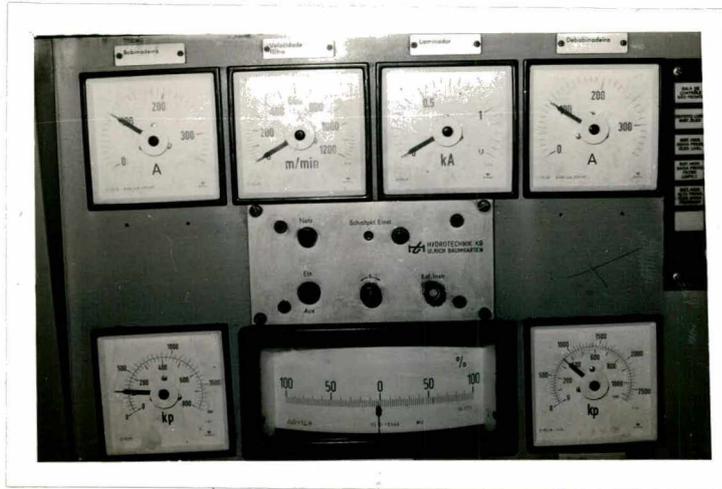


FIG. 30 - Foto dos indicadores das forças e corrente de bobinadeira e debobinadeira.



Fig. 31 - Foto das chaves seletoras das forças de bobinamento e debobinamento.

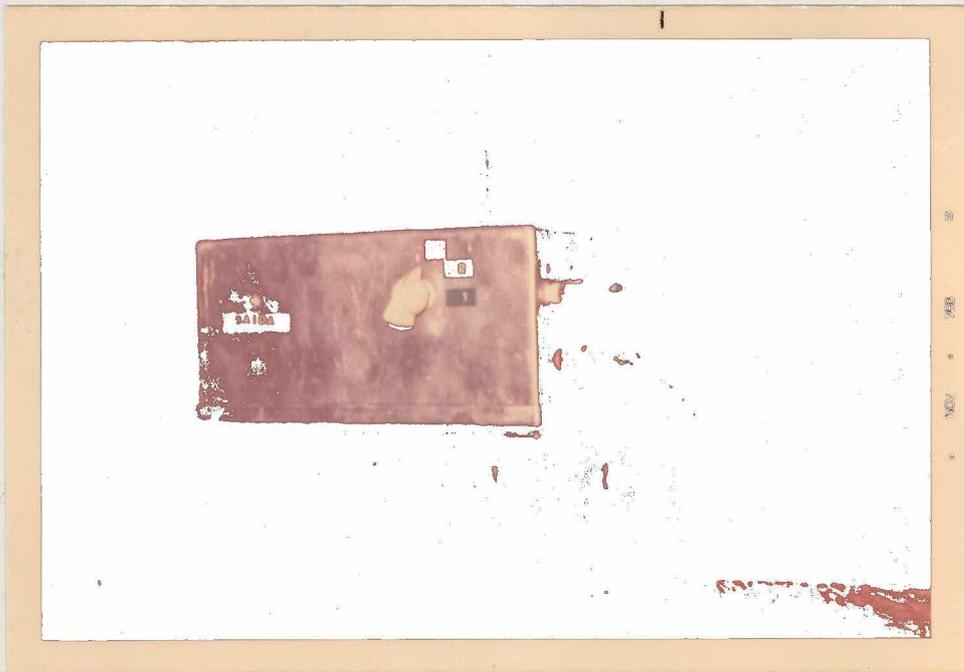


FIG. 27 - Foto da caixa de proteção do circuito de medição, vista de frente.

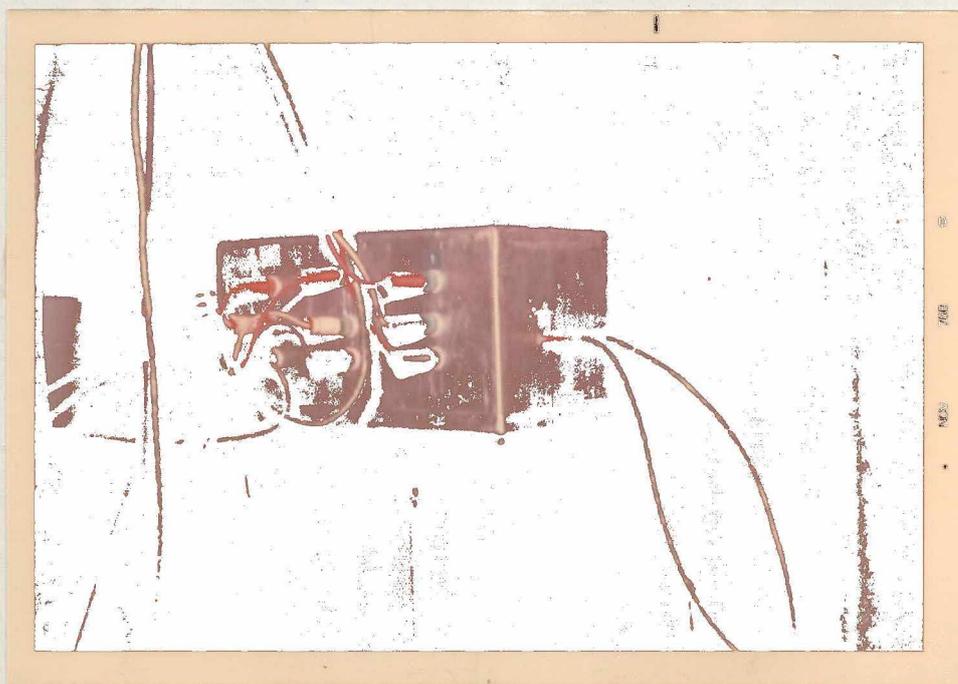


FIG. 28 - Foto da caixa de proteção do circuito de medição, (vista posterior).

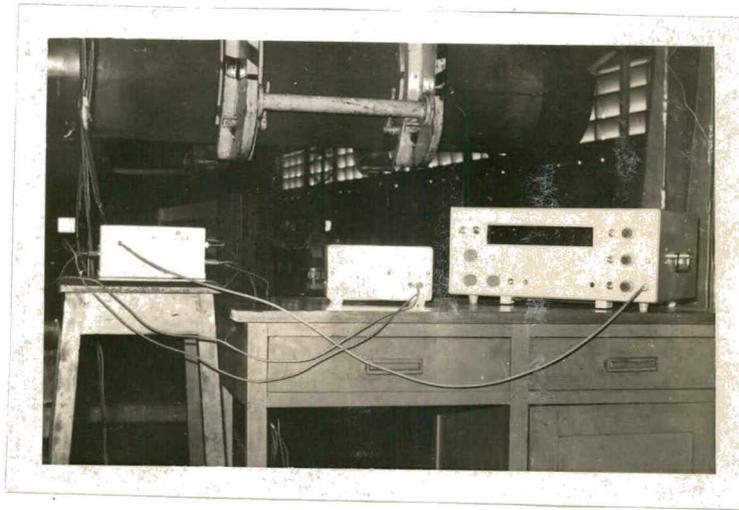


FIG. 26 - Vista geral do conjunto de medição



FIG. 29 - Foto da fonte de alimentação para as lâmpadas.

<u>ITEM</u>	<u>ESPECIFICAÇÃO</u>	<u>VALOR</u>
1	Tipo - Contador de Pulsos Marca- Marconi, T <sup>F</sup> 1417A	— —
2	Faixa de Frequência	0 para 15 MHz
3	Exatidão	1 pulso $\pm$ estabilidade
4	Tempo de contagem automática	10 seg
5	Estabilidade (padrão interno): -curto alcance -longo alcance	2 partes em $10^7$ 3 partes em $10^7$
6	Indicador com 7 décadas com indicação automática do ponto	—
7	Sensibilidade de entrada	100 mV r.m.s.

QUADRO 18 - Especificações do frequencímetro digital, para contagem dos pulsos



FIG. 25 - Foto do frequencímetro digital

O sistema de indicação do sinal resultante, escolhido segundo o exposto no item 3.3.6., consta de um frequencímetro digital com tempo de contagem automático e cujas especificações são dadas no quadro 18. Na fig. 25, mostra-se uma fotografia do mesmo.

Tem-se finalmente, na fotografia da fig. 26, uma vista geral do conjunto de tratamento e indicação, e nas figs. 27 e 28, as fotografias anterior e posterior da caixa onde se instalou o circuito de tratamento, vendo-se os detalhes das ligações dos cabos dos transdutores e das fontes de alimentação; e na fig. 29, uma vista da fonte de alimentação para as lâmpadas.

#### 3.5.4. Leituras das Forças, pressão e Corrente

As forças serão lidas no próprio painel do laminador, nos indicadores mostrados na fig. 30 e selecionadas pelas chaves mostradas na fig. 31.

As pressões serão lidas nos indicadores mostrados na fig. 32 e as Correntes da bobinadeira, debobinadeira e motor do laminador, nos indicadores mostrados na fig. 30, anterior.

#### 3.5.5. Calibração estática

##### 1) Medidores de espessura

Para aferir o sistema descrito no item 3.5.1., usa-se folhas-padrão de alumínio nas espessuras de: 0,60 , 0,30 e 0,15 mm, que possibilitam a zeragem do medidor para as regulagens das espessuras de entrada dos 1º, 2º e 3º passes, respectivamente. No entanto, a curva de calibração é conseguida usando-se folhas-padrão associadas às anteriores, nas espessuras que possibilitem desvios conforme o quadro 19. Esta calibração deve ser feita antes e após a correção de espessura de cada bobina a ser testada. Mas, para não interromper a produção, em um mesmo lote de bobinas só se deve fazer a correção de zero entre cada uma delas, e após todo o lote ser laminado, fazer nova calibração idêntica à inicial. Esta zeragem entre bobinas é necessária por que o medidor de espessura apresenta desvio do zero (zero drift) com pouco tempo de uso. Um exemplo da curva de calibração pode ser visto na fig. 33.

##### 2) Medidor de rugosidade

O rugosímetro apresentado no item 3.5.2. não possui padrões de



superfície com a rugosidade na faixa das presentes medições, mas sim em uma faixa superior. Assim, faz-se apenas uma aferição da faixa superior e se supõe que o resultado seja aplicável à faixa em uso. No entanto, como os valores de rugosidade são parâmetros indicativos que visam apenas a manutenção relativa das mesmas condições de laminação nos diversos experimentos, pode-se aceitar este tipo de aferição.

### 3) Medidores de velocidade

A aferição do sistema discutido no item 3.5.3. consta de duas etapas. Primeiro, uma simulação, como se fala no item 3.3.6., usando-se um estroboscópio, para servir como padrão. No entanto, este estroboscópio só pode servir como uma primeira aproximação, pois não possui uma precisão satisfatória. Segundo, já com o sistema montado no laminador, antes de cada etapa de uso nas experiências, faz-se aferições do frequencímetro, usando-se o seu auto-teste interno, como ilustrado na fig. 34, que é uma transcrição do catálogo deste.

### 4) Medidores de forças de bobinamento, debobinamento, de pressão e de corrente.

Dado que a aferição dos medidores discutidos no item 3.5.4. , já normalmente instalados no laminador, implicam em parada da produção de pelo menos 3 dias consecutivos, segundo o deptº de manutenção elétrica da fábrica em questão, resolveu-se aproveitar as aferições realizadas por este mesmo deptº., feitas nos períodos de paradas programadas pelo mesmo.

.....

#### 4. Apresentação dos Resultados

##### 4.1. Controle do material de teste

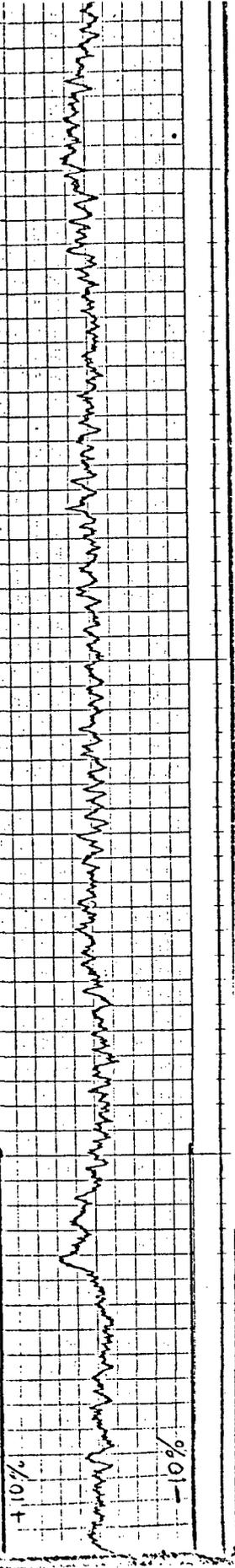
O controle do material a ser usado nos experimentos obedece ao programado no item 3.3.3. A composição química da liga de cada bobina é analisada pelo Boletim de Vazamento respectivo, fornecido pelo deptº competente - Refusão - da Fábrica em questão. A largura é verificada com uma trena industrial comum e para a espessura é necessária uma uniformização ao longo do comprimento, que é conseguida usando o sistema de correção automática de espessura do laminador sob teste, no passe anterior ao utilizado para as experiências. Nestes passes de correção se registra, com um oscilógrafo, a variação contínua da mesma, e posteriormente se escolhe aquelas bobinas que estejam com a tolerância de espessura desejada. Este registro requer a calibração do medidor de espessura ( raio-x ) do sistema em questão. Como não se dispunha de amostras-padrão para tal, retirou-se amostras de bobinas já laminadas nas espessuras desejadas para a calibração, controladas com micrômetros manuais. A calibração é feita antes e após cada lote de bobinas ser laminado, sendo que, após cada bobina, se faz uma calibração do zero, uma vez que o medidor apresenta flutuação do zero ( zero drift ). No quadro 20 se tem uma amostra representativa destes registros gráficos, com as referidas calibrações, e no quadro 21 se mostra as bobinas que são utilizadas nas experiências e que resultam após a aplicação dos controles descritos acima.

Como se pode notar no quadro 21, a bobina de nº 38074, - (numeração da própria produção e que é também presentemente utilizada), é utilizada para experiências no 1º e 3º passes e para isso a espessura da mesma é novamente uniformizada, agora no 2º passe. Algumas bobinas também são acompanhadas, com o registro gráfico da variação da espessura nos passes posteriores aos ensaios, visando assegurar que as variações de espessura causadas durante os passes sejam totalmente corrigidas e o material possa ser aproveitado pela produção. Isto implica em que só se possa realizar as experiências em bobinas programadas pela produção, para espessuras finais da ordem de  $8\mu\text{m}$  de modo que se disponha de pelo menos dois passes

PH INSTRUMENTS DIVISION, GOULD INC.

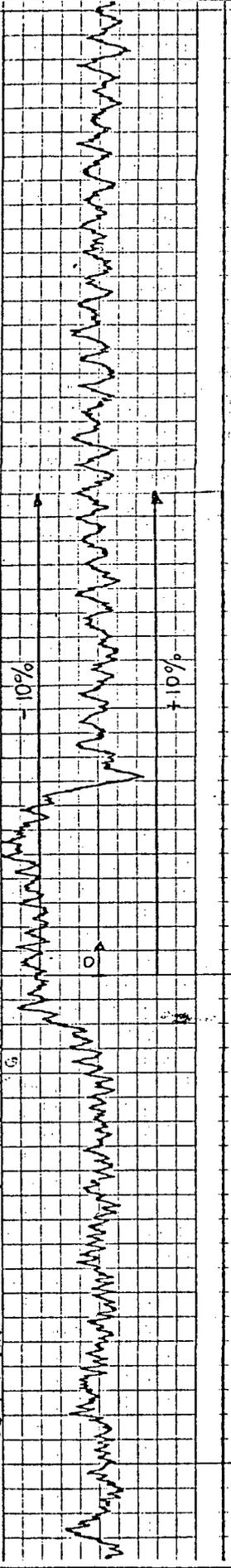
MADE IN U.S.A. PRINTED IN U.S.A.

1º PASSE ; BOBINA N.º 3806-A ; ESPESSURA NOMINAL : 0,6 mm ; DATA 9/10/75



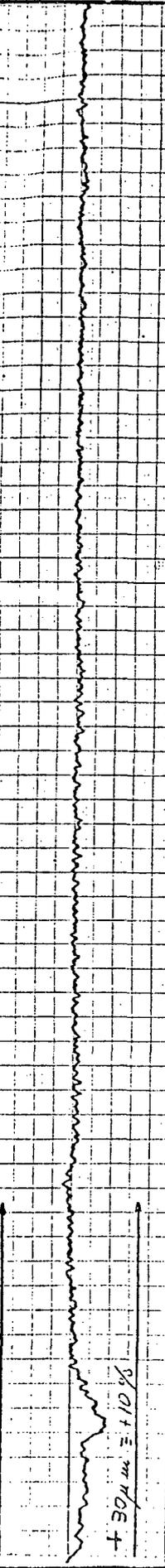
INC.

2º PASSE ; BOBINA N.º 3888-A ; ESP. NOMINAL : 0,15 mm



3º PASSE ; BOBINA N.º 2949-B ; ESP. NOMINAL : 0,3 mm ; DATA 17/01/76

-30µm ± 10%



CLEVIS

QUADRO 20 - Amostra representativa dos registros da correção da espessura para cada passe.

NUDBO	NUMO	DATA		OBS.
3807A	2-A B	07/10	1º	Ano de 1975
3806A	1-A B	" "	1º	
3811A	8-A B	09/10	1º	
2931B	22-A B	13/01	1º	Ano de 1976
2947A	28-A B	18/01	1º	
4122B	19-A B	11/01	2º	Bobina quente na entrada
4127B	20-A B	" "	2º	Bobina quente na entrada
2949B	26-A B	17/01	2º	Bobina quente na entrada
3807A	5-A B	08/10	3º	Ano de 1975
2952A	29-A B	18/01	3º	Ano de 1976; Bobina quente na entrada.
3887A	16-A B	04/11	3º	Ano de 1975
3889B	15-A B	" "	3º	
3888A	17-A B	" "	3º	Utilizada apenas a parte inicial.
				Total de Bobinas: 12

QUADRO 21 - Relação das Bobinas aproveitadas para as Experiências

para a dita correção, antes do passe final de acabamento do produto.

As propriedades mecânicas, no que se refere à tensão limite de resistência à tração, tensão limite de escoamento a 0,2 % de deformação e alongamento, são realizados em duas amostras por bobina testada ou utilizada nas experiências. Estas amostras são retiradas no início e fim de cada bobina, e em cada amostra são realizados três testes de tração na direção de laminação. Estes testes são realizados com o auxílio do laboratório físico da Fábrica. Os corpos de prova são analisados antes e após os ensaios. No quadro 22 se mostra o resultado destes testes, através da média dos seis testes realizados em cada bobina, e no quadro 23 se apresenta uma amostra representativa dos resultados colhidos nestes mesmos testes, segundo o planejado no item 3.3.3.

As bobinas de nº 4122B, 4127B e 2949B, todas usadas nos ensaios do 2º passe, entram no laminador para a realização deste mesmo passe, logo após o primeiro passe, por necessidade da produção. O mesmo acontece com a bobina de nº 2952A, usada nas experiências do 3º passe.

Para que se tenha uma idéia da quantidade de material levantado para o presente trabalho, e que resulta, após a aplicação dos controles apresentados neste item, no quadro 21, se mostra, no quadro 24, um levantamento quantitativo do mesmo.

#### 4.2. Controle do óleo e cilindros, de laminação.

Segundo o planejado no item 3.3.5., antes de cada série de experimentos é realizado o controle do óleo de laminação e dos cilindros de trabalho. O óleo de laminação é controlado, pelas análises fornecidas pelo laboratório competente da fábrica e realizadas em amostras retiradas do sistema de tratamento de mesmo, antes de ser usado, segundo o modelo mostrado no quadro 25. A variação da viscosidade e índice de acidez total do mesmo pode ser observada no quadro 26. Este óleo, embora se tratasse de um óleo mineral inicialmente puro, se apresentava bastante usado, estando na realidade misturado com outros óleos, usados nos diversos sistemas hidráulicos e mecânicos do laminador. Este óleo, portanto, está apenas filtrado pelo sistema de tratamento ou recuperação.

O controle dos cilindros de trabalho, é realizado pelo exame das fichas de controle de retificação, fornecidas pelo departamento competente da fábrica, como se mostra no quadro 27. Os resultados estão transcritos para a tabela mostrada no quadro 27a, conforme o pla-

PASSE	VALOR MÉDIO			INTERVALO		
	LE kgf/mm <sup>2</sup>	LRT kgf/mm <sup>2</sup>	A %	LE kgf/mm <sup>2</sup>	LRT kgf/mm <sup>2</sup>	A %
1º	5,05	9,04	21,35	6,4- 4,0	10,0- 8,5	28,4-12,4
2º	12,15	13,78	2,99	12,9-11,6	14,7-13,2	4,2- 2,0
3º	13,78	17,12	1,97	15,6- 9,3	19,3-14,2	3,0- 1,0

QUADRO 22 - Médias das propriedades mecânicas de todas as bobinas utilizadas, para cada passe.

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	QUANTIDADE
1	Bobinas utilizadas para testes preliminares	12
2	Bobinas laminadas com um passe extra, para corrigir a espessura do 1º passe	110
3	Bobinas laminadas no primeiro passe, para corrigir a espessura, do 2º passe	13
4	Bobinas laminadas no segundo passe, para corrigir a espessura, do 3º passe	15
5	Bobinas não aproveitadas	82
Obs:	Motivos do não aproveitamento: - Defeito no sistema de medição empregado - Erros de programação das experiências - Espessura fora da tolerância especificada - Defeitos no laminador - Espessura final, programada pela produção não compatível com os testes - Defeitos no material - Erros de operação	
6	Peso avaliado (aprox.) das não aproveitadas	246 t
7	Peso aproximado total	363 t

QUADRO 23 - Levantamento do material utilizado

NUMERO	NUMERO	NUMERAS	kg/mm <sup>2</sup> LE <sub>0,2%</sub>	kg/mm <sup>2</sup> LRT	50 mm A %	DATA	OBS.
3806A	1-A <sub>1</sub>	1º	4,67	9,33	22,4	23/01	Ano de 1976
"	1-A <sub>2</sub>	"	4,67	9,33	21,0	"	
"	1-A <sub>3</sub>	"	5,07	9,07	19,0	"	
"	1-B <sub>1</sub>	"	4,72	8,91	14,6	28/11	Ano de 1975
"	1-B <sub>2</sub>	"	4,72	8,91	14,4	"	
"	1-B <sub>3</sub>	1º	4,80	9,00	14,1	"	
4122B	19-A <sub>1</sub>	2º	11,76	13,24	2,4	26/01	Ano de 1976
"	19-A <sub>2</sub>	"	12,37	13,64	2,4	"	
"	19-A <sub>3</sub>	"	12,12	13,38	2,2	"	
"	19-B <sub>1</sub>	"	12,20	14,29	2,6	"	
"	19-B <sub>2</sub>	"	11,90	13,69	2,8	"	
"	19-B <sub>3</sub>	"	11,90	13,69	2,8	"	
3807A	5-A <sub>1</sub>	3º	14,58	18,75	1,0	18/12	Ano de 1975
"	5-A <sub>2</sub>	"	15,63	19,27	1,2	"	
"	5-A <sub>3</sub>	"	14,40	18,55	1,0	"	
"	5-B <sub>1</sub>	"	13,51	17,20	2,0	22/01	Ano de 1976
"	5-B <sub>2</sub>	"	13,20	17,28	2,0	"	
"	5-B <sub>3</sub>	"	11,70	16,80	3,0	"	

QUADRO 24 - Amostra representativa das planilhas de controle, das propriedades mecânicas.



**RESULTADO DE ANÁLISE DE ÓLEO**  
LABORATÓRIO QUÍMICO

COLTA	DATA	UNIDADE REQUISITANTE	NR SOLICITAÇÃO
	HORA	LOCAL	IDENTIFICAÇÃO AMOSTRA

23/09/75 F.I. MISTO ALV. 8. 6. ALDO MEDIUM

CARACTERÍSTICAS	RESULTADO	PADRÃO
ASPECTO	MARRON	
DENSIDADE $\lambda$ $38^{\circ}\text{C}$	0,809	
VISCOSIDADE $\lambda$ $38^{\circ}\text{C}$	3,64 cst	
DENSIDADE $\lambda$ $^{\circ}\text{C}$		
VISCOSIDADE $\lambda$ $^{\circ}\text{C}$		
PONTO DE FULGOR (aberto) $^{\circ}\text{C}$	108 $^{\circ}\text{C}$	
ÍNDICE DE ACIDEZ TOTAL mgKOH/g	2,37	
ÍNDICE DE SAPONIFICAÇÃO	-	
ÍNDICE DE ESTERS	-	
ÁLCOOL %	-	
RESÍDUO DE CARVÃO %	-	
CINZAS %	-	
UMIDADE %	0,05%	
COR	L1,5 dil.	
CURVA DE DESTILAÇÃO: PONTO INICIAL	229 $^{\circ}\text{C}$	
10 %	240	
50 %	253	
90 %	-	
PONTO FINAL	284	
TOTAL DESTILADO	89,8%	
RESÍDUO	9,2%	
PERDA	1,0%	

OBSERVAÇÕES

25/10/75	ANALISADO	APROVADO
----------	-----------	----------

LAB-F103

ITEM	DATA	VISC. CINEMÁT. A 38 °C - est	ÍNDICE DE ACIDEZ TOTAL mg K O H/g	Obs.
1	15/08/75	2,4	0,01	ÓLEO NOVO
2	23/09/75	3,6	2,4	
3	04/11/75	3,9	2,2	
4	09/12/75	3,6	1,7	
5	15/12/75	3,7	2,0	
6	05/01/76	3,5	1,7	
7	13/01/76	3,3	1,2	

QUADRO 26 - Variação da viscosidade e índice de acidez total, durante as experiências.

R E T I F I C A Ç Ã O			
REQUISIÇÃO DE SERVIÇO Nº _____	C. MÁQUINA <u>NAXOS</u>		
Nº DA RETIFICAÇÃO _____			
Nº CILINDRO <u>7422</u>	Ø INICIAL _____		
BOMBEIO <u>0,04mm</u>	Ø FINAL <u>258,03mm</u>		
POLIMENTO <u>C20-C25u</u>	HORA RETIF. <u>200 HS</u>		
OBSERVAÇÃO _____	<u>Revisão 150</u>		
DATA <u>16/1/1976</u>			
<u>S. Poutier</u>			
OPERADOR			

QUADRO 27 - Ficha de controle da retificação dos cilindros, usada pela ASA.



NUMERO	ROCTR mm	NUPLA	DICTR mm	DUCTR Shore	RUCTR CLA $\mu$ m	DATEM	DATSA	OBS
3807-A	0,04	1º 3º	257,43	-	0,24 a 0,30	7/10/75	-	
3806-A	"	1º	"	-	"	-	-	
3811-A	"	1º	"	-	"	-	8/10/75	
APÓS TUDO O LOTE	"	-	-	-	0,24 a 0,30	-	8/10/75	
3887-A	"	3º	258,51	-	0,20 a 0,26	1/11/75	-	
3889-B	"	3º	"	-	0, "	-	-	
3888-A	"	"	"	-	"	-	3/11/75	
Após todo o lote	"	-	-	-	0,18 a 0,22	-	3/11/75	
4122-B	"	2º	258,09	-	0,21 a 0,26	11/1/76	-	
4127-B	"	"	"	-	"	-	Não de- termina- da	
2931-B	"	1º	257,06	-	0,20 a 0,25	13/1/76	-	
2949-B	"	2º	"	-	"	"	Não de- termina- da	
2947-A	"	1º	258,03	-	0,11 a 0,27	18/1/76	-	
2952-A	"	3º	"	-	"	"	Não de- termina- da	

QUADRO 27a- Planilha de controle de acabamento superficial dos cilindros.

dos. Algumas horas antes de iniciar-se o processo de fabricação do lote de bobinas sob teste se faz a instalação e teste dos equipamentos de medição empregados, segundo o planejado no item 3.5. Este procedimento se deve ao fato de que, em se tratando de um local de produção, não se pode deixar o equipamento já instalado, como se faria num laboratório de ensaios, sob pena de o mesmo sofrer danos e até mesmo roubo. O teste do equipamento deve compreender inclusive, uma simulação da medição, durante a laminação de uma bobina não programada para teste, antes do início das medições propriamente ditas. Com isto se pode eliminar erros e realizar ajustes do sistema de medição que, pelo fato de ser eventualmente instalado e retirado, tornam-se necessários.

Após os eventos descritos nos parágrafos anteriores, se está em condições de iniciar as experiências que seguem a sequência planejada no item 3.4. Nos quadros 28, 29 e 30, se apresenta as condições experimentais reais utilizadas nos experimentos de que tem-se tratado, bem como os resultados obtidos com cada uma das mesmas, para os 1º, 2º e 3º passes, respectivamente. Estes resultados são transcritos das Planilhas de Acompanhamento de Ensaios, apresentadas representativamente nos quadros 31, 32 e 33 para cada passe respectivo, exceto o Índice de redução por passe, que é calculado, usando-se os valores medidos das velocidades de entrada e saída do material no laminador, pelo método planejado no item 3.2. Nos quadros inicialmente mencionados se mostra, ainda quais e quantos são os ensaios repetidos, como planejado no item 3.4., os problemas críticos surgidos no material na saída, nas respectivas condições e as datas em que cada ensaio foi realizado. Como se pode ver no quadro 28, apenas os experimentos no nível de velocidade 2 - correspondente a 300 m/min - não foi possível realizar, com as tensões de entrada (força de bobinamento) no nível 3, dado a que estes experimentos foram realizados em datas onde as condições de laminação já não permitiam se laminar com a velocidade neste nível. Os valores das forças de tração de desbobinadeira e bobinadeira, expostos nestes quadros, são valores médios que são verificados com os valores das Correntes dos motores de desbobinadeira e bobinadeira, respectivamente. Finalmente, as datas de realização dos experimentos, a que foram mencionadas acima se referem ao intervalo de 07/10/75 a 18/10/76.

Nos quadros 34 e 35, 36 e 37, e 38 e 39 se apresenta para os 1º, 2º e 3º passes respectivamente, conjuntos de três gráficos, em cada um deles se mostrando a influência da velocidade no Índice de redução por passe. Cada família de três curvas tem como parâme-

COLUNA	EXPERIMENTOS REALIZADOS										CALCULADO										
	1-11	1-12	1-13	1-21	1-22	1-23	1-31	1-32	1-33	1-21	1-22	1-23	1-31	1-32	1-33	1-21	1-22	1-23	1-31	1-32	1-33
TOLEW OC	45	44	45	45	44	44	44	45	45	45	45	45	45	45	41	41	45	41	41	41	45
VELW m	150	150	150	150	100	100	100	150	150	150	150	150	150	150	180	180	190	150	150	150	180
FORÇA kgf	550	550	550	550	850	850	850	550	550	750	1100	1100	1100	1100	600	600	600	600	600	600	650
FORÇA kgf	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1500	1500	1500	1000	1500
VELW t	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
VELW m/m	2074	2086	2086	2086	2086	2074	2074	2086	2086	2074	2074	2074	2074	2098	2098	3164	3128	3164	3164	3164	3128
VELOCIDADES MEDIDAS E INDICES DE REDUÇÃO																					
VELW m/m	1075	1100	1076	975	1014	1037	998	1092	1053	975	1037	1037	967	1463	1474	1490	1463	1381	1521	1412	1412
VELSA m/m	2207	2207	2215	2207	2176	2207	2200	2215	2207	2207	2231	2246	2239	3307	3234	3234	3234	3234	3332	3333	3239
IMPED m	512	506	514	514	534	530	546	507	523	558	535	534	568	564	571	546	568	568	530	530	572
DATA	07/10	07/10	09/10	13/01	07/10	07/10	07/10	07/10	07/10	07/10	07/10	07/10	09/10	03/11	03/11	03/11	03/11	03/11	03/11	03/11	03/11
EXPERIMENTOS REALIZADOS																					
COLUNA	1-311	1-312	1-313	1-321	1-322	1-323	1-331	1-332	1-333	1-411	1-412	1-413	1-421	1-422	1-423	1-431	1-432	1-433	1-433	---	---
TOLEW OC	45	44	45	45	45	45	45	45	45	45	45	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
VELW m	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
FORÇA kgf	250	550	550	850	850	950	1000	1100	1100	600	550	550	850	850	850	1100	1100	1100	1100	1100	1100
FORÇA kgf	2000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1000	1000	2000
VELW t	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
VELW m/m	3128	956	956	956	956	956	956	956	956	956	956	956	436	436	436	436	436	436	436	436	436
VELOCIDADES MEDIDAS E INDICES DE REDUÇÃO																					
VELW "	1365	457	437	398	413	390	460	413	343	242	226	218	234	226	218	234	226	218	218	218	218
VELSA "	3307	1014	1006	998	1014	1014	1037	1030	1030	460	460	460	468	460	460	468	460	468	468	468	460
IMPED m	587	538	504	566	602	554	592	615	556	598	667	475	508	508	508	525	508	525	508	517	542
DATA	03/11	18/01	18/01	13/01	13/01	13/01	13/01	13/01	13/01	13/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01	18/01

QUADRO - 28 - Condições experimentais reais e resultados para o 10 passo.





PLANILHA DE ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO											Nº 1
DATA	HORA	SOLINA		ORDEM			SÉRIE				
07/10/75	11:30	Nº 3807-A		Nº 1-1º Passe			1-111 a 1-113; 1-123 a 1-131				
PARÂMETROS											
SÉRIE	1-111		1-112		1-113		1-123		1-131		
TOLEN C	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	
ARLAM Nº R	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	
FOBOB kgf	400	550	400	550	400	550	850	850	1250	1100	
FODEB kgf	850	1000	1650	1600	2050	2000	2050	2000	850	1000	
PRLAM t	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
VELAM m/min	200		200		200		200		200		
1-cps	17.2									17.1	
2-cps	17.1									17.1	
3-cps	17.1									17.1	
LEITURAS											
AMBCE -A	140	140	140	170	250						
ANDES -A	110	160	210	210	100						
AMLAM -k1	0,76	0,80	0,85	0,89	0,75						
VELEN-cps <sup>1º</sup>	13,8	13,3	12,8	12,5	13,3						
2º	13,8	13,3	12,7	12,6	13,3						
3º	13,8	13,3	12,7	12,6	13,3						
VELSA-cps <sup>1º</sup>	28,3	28,3	28,2	28,3	28,6						
2º	28,3	28,3	28,3	28,4	28,6						
3º	28,3	28,3	28,2	28,3	28,7						

QUADRO 31 - Amostra representativa das planilhas de acompanhamento de ensaio, para o 1º passe.

PLAQUILHA DE ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO											Nº 2
DATA	HORA	MORINA		ORDEM		SÉRIE					
11/01/76	14:50	4122-B		Nº1-209asse		2-111 a 2-113 e 2-121 a 2-122					
PARÂMETROS											
SÉRIE	2-111		2-112		2-113		2-121		2-122		
TOLEN °C	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	
ARLAM Nº R	180	150	180	150	180	150	180	150	180	150	
FOBOB kgf	200	300	200	300	200	300	600	550*	600	550	
FODEB kgf	400	750	1200	1100	2150	1900	400	750	1200	1100	
PRLAM t	100	80	100	80	100	80	100	80	100	80	
VELAM m/min	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1-cps		8.6								8.6	
2-cps		3.6								8.6	
3-cps		8.6								8.6	
LEITURAS											
AMBOS -A	80		90		80		130		130		
AMDEB -A	70		110		170		70		110		
ALLAM -kA	0,40		0,43		0,50		0,36		0,42		
VELEN -cps <sup>1º</sup>	9,6		9,3		8,7		9,5		9,2		
2º	9,6		9,3		8,7		9,5		9,2		
3º	9,5		9,2		8,6		9,6		9,2		
VELSA -cps <sup>1º</sup>	14,2		14,2		14,2		14,3		14,3		
2º	14,2		14,2		14,1		14,3		14,3		
3º	14,3		14,2		14,2		14,3		14,3		
OBS.											
* Valor diminuído p/aparecimento de listras na superfície do material											

QUADRO 32 - Amostra representativa das plaquilhas de acompanhamento de ensaio, para o 2º passo.

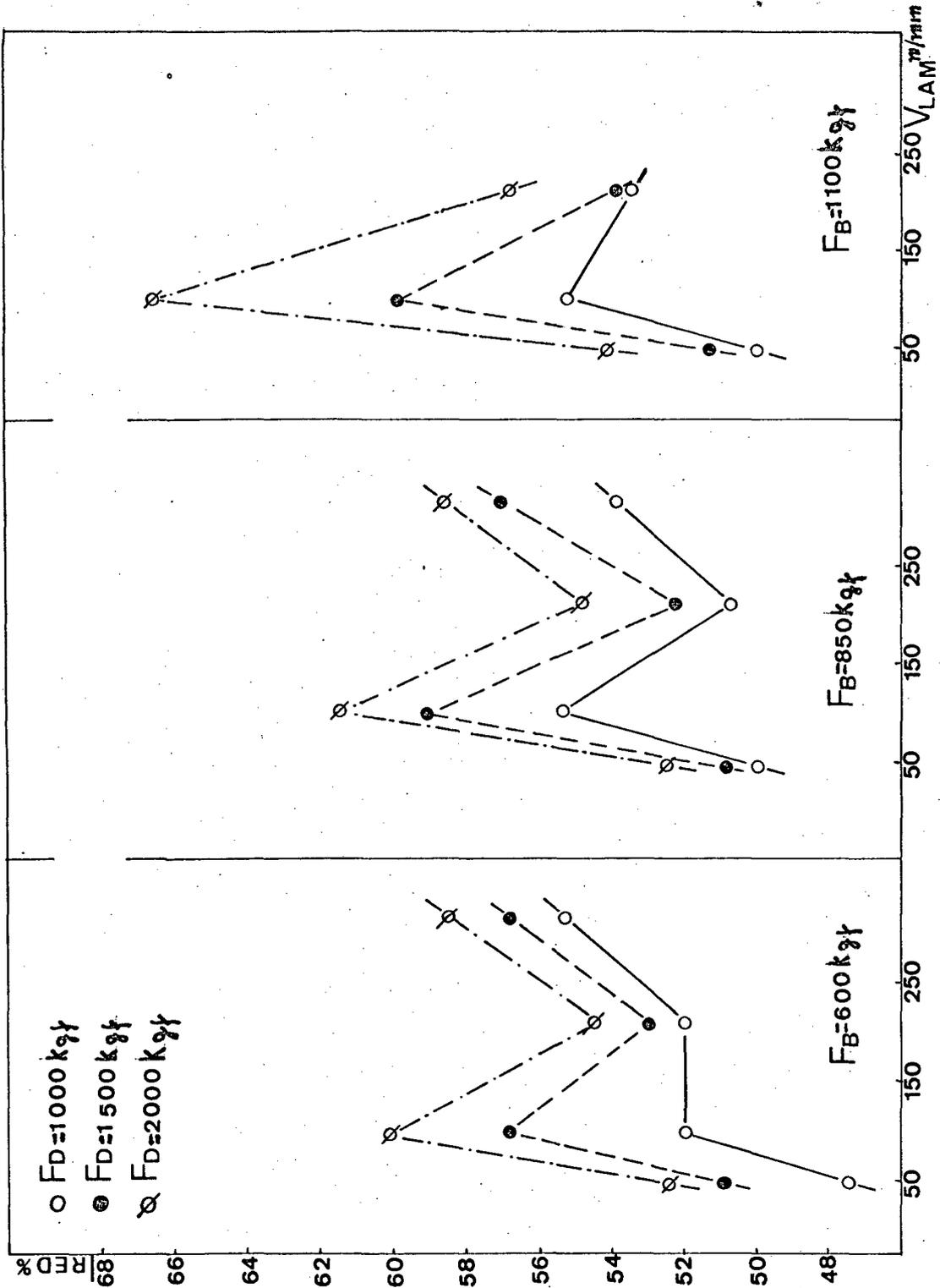
PLANILHA DE ACOMPANHAMENTO DE ENSAIO											Nº 3
DATA	HORA	BOTAFA		ORDEM		SERIE					
08/10/75	10:15	Nº 38071		Nº 1		3-111 a 3-122					
PARÂMETROS											
SÉRIE	3-111		3-112		3-113		3-121		3-122		
TOLEM C	45	44	45	44	45	44	45	44	45	44	
ARLAM Nº R	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	
FOBOB kgf	150	200	150	200	150	200	400	500	400	500	
FODEB kgf	300	450	300	450	300	450	300	450	300	450	
PRLAM t	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
VELAM m/min	150	200	150	200	150	200	150	200	150	200	
1-cps		17.2								17.2	
2-cps		17.2								17.3	
3-cps		17.3								17.2	
LEITURAS											
AMBOB -A		60		60				160		160	
AMDEB -A		50		130		245		50		130	
AMLAM -kA		0,30		0,38		0,48		0,30		0,36	
VELEN- cps <sup>1º</sup>		19,6		17,8		13,7		19,1		17,3	
2º		19,6		17,8		13,8		19,1		17,2	
3º		19,6		17,8		13,7		19,1		17,2	
VELSA- cps <sup>1º</sup>		29,1		29,1		28,9		29,8		29,8	
2º		29,1		29,1		28,9		29,8		29,8	
3º		29,2		29,0		29,0		29,8		29,8	

QUADRO 33 - Amostra representativa das planilhas de acompanhamento de ensaio, para o 3º passo.

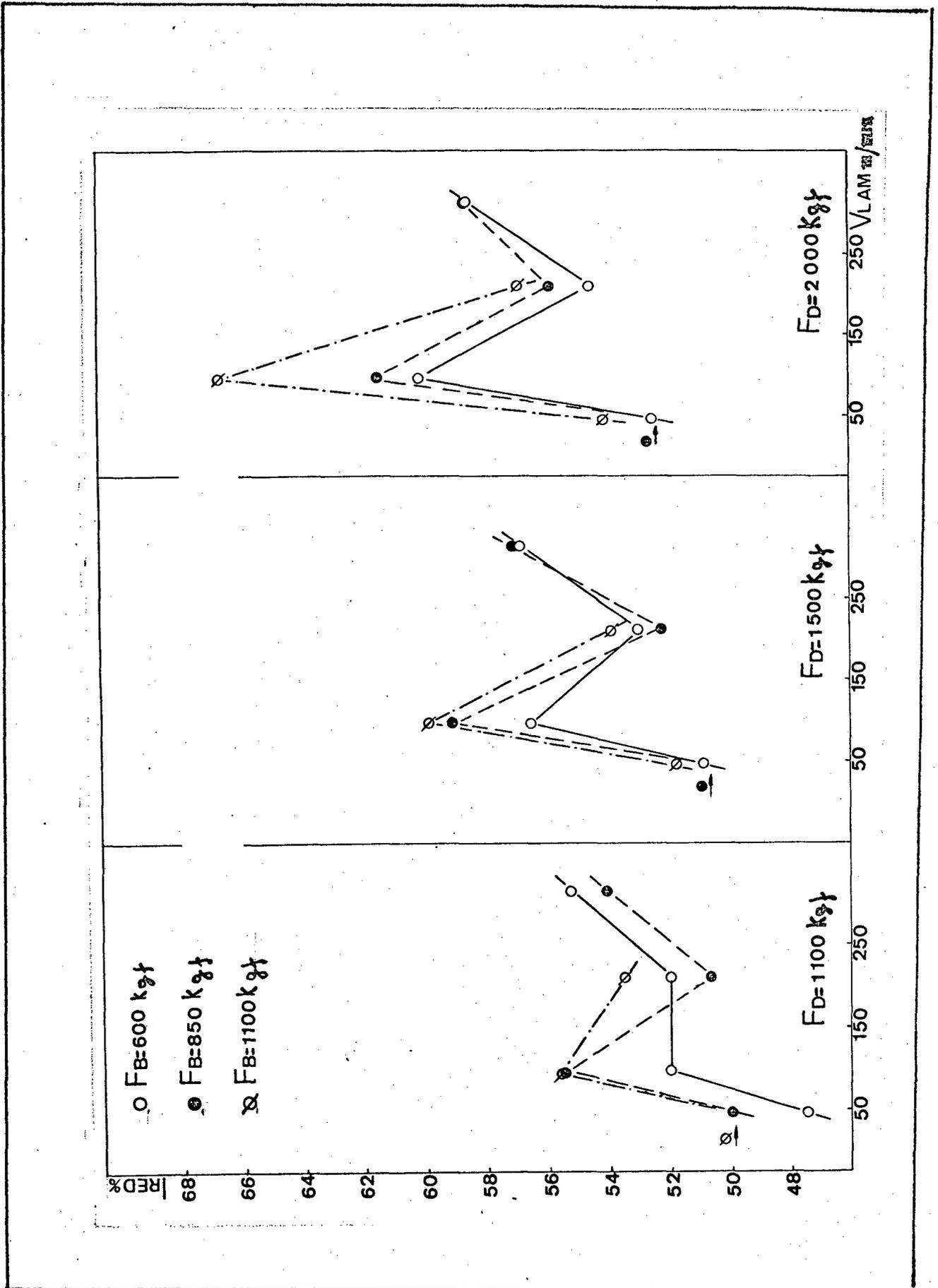
tras as tensões de bobinamento e debobinamento indicadas.

Nos grupos de quadros 40 e 41, 42 e 43, e 44 e 45 se apresentam os gráficos do Índice de redução em função das Forças de bobinamento e debobinamento, respectivamente. Em cada um destes seis quadros se apresentam três gráficos, tendo como parâmetros a velocidade de laminação, cada um deles mostrando uma família de três curvas, onde o parâmetro entre elas é o valor da tensão de debobinamento e bobinamento, respectivamente aos grupos inicialmente mencionados, sendo que cada grupo se refere aos 1º, 2º e 3º passes respectivamente.

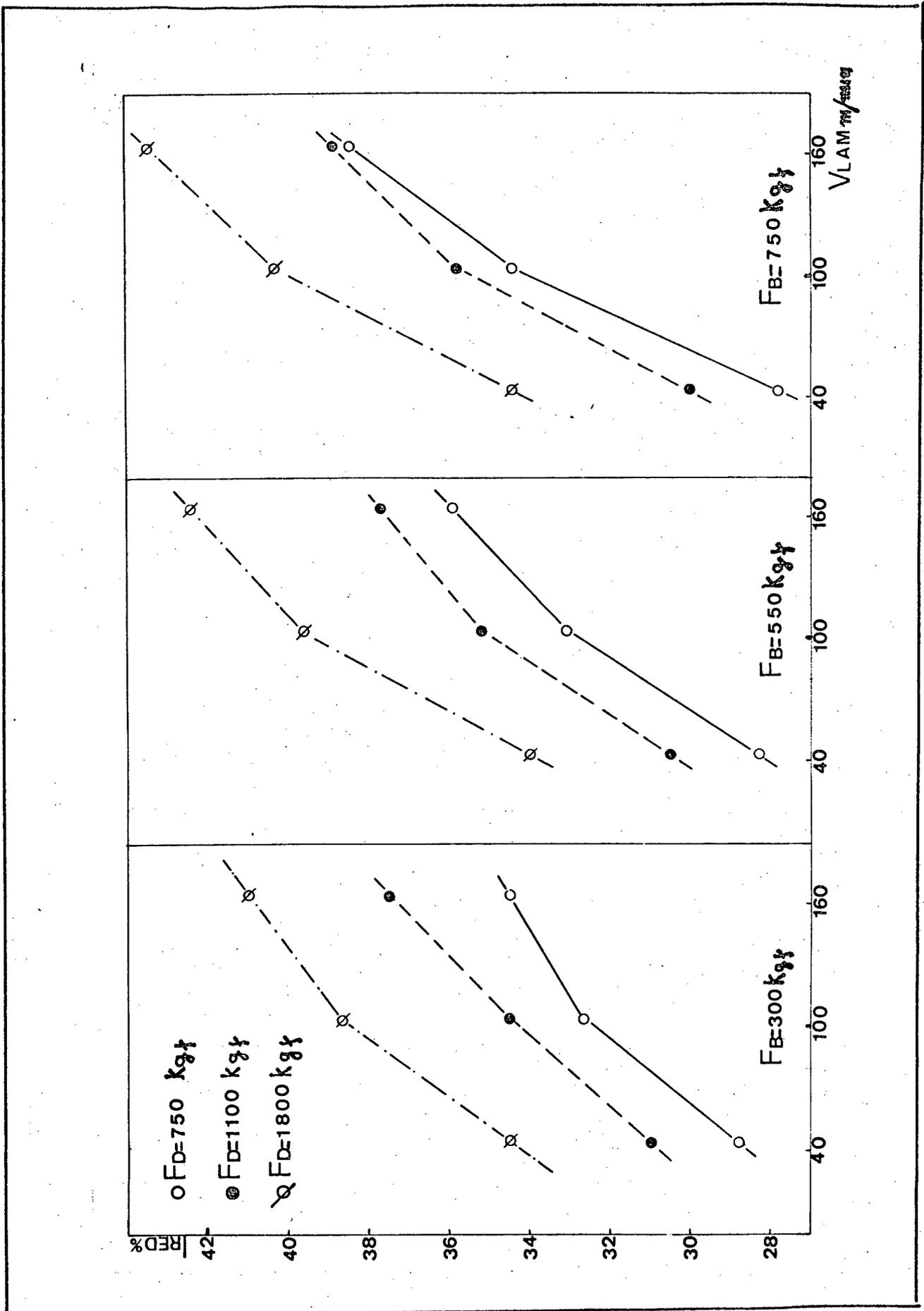
.....



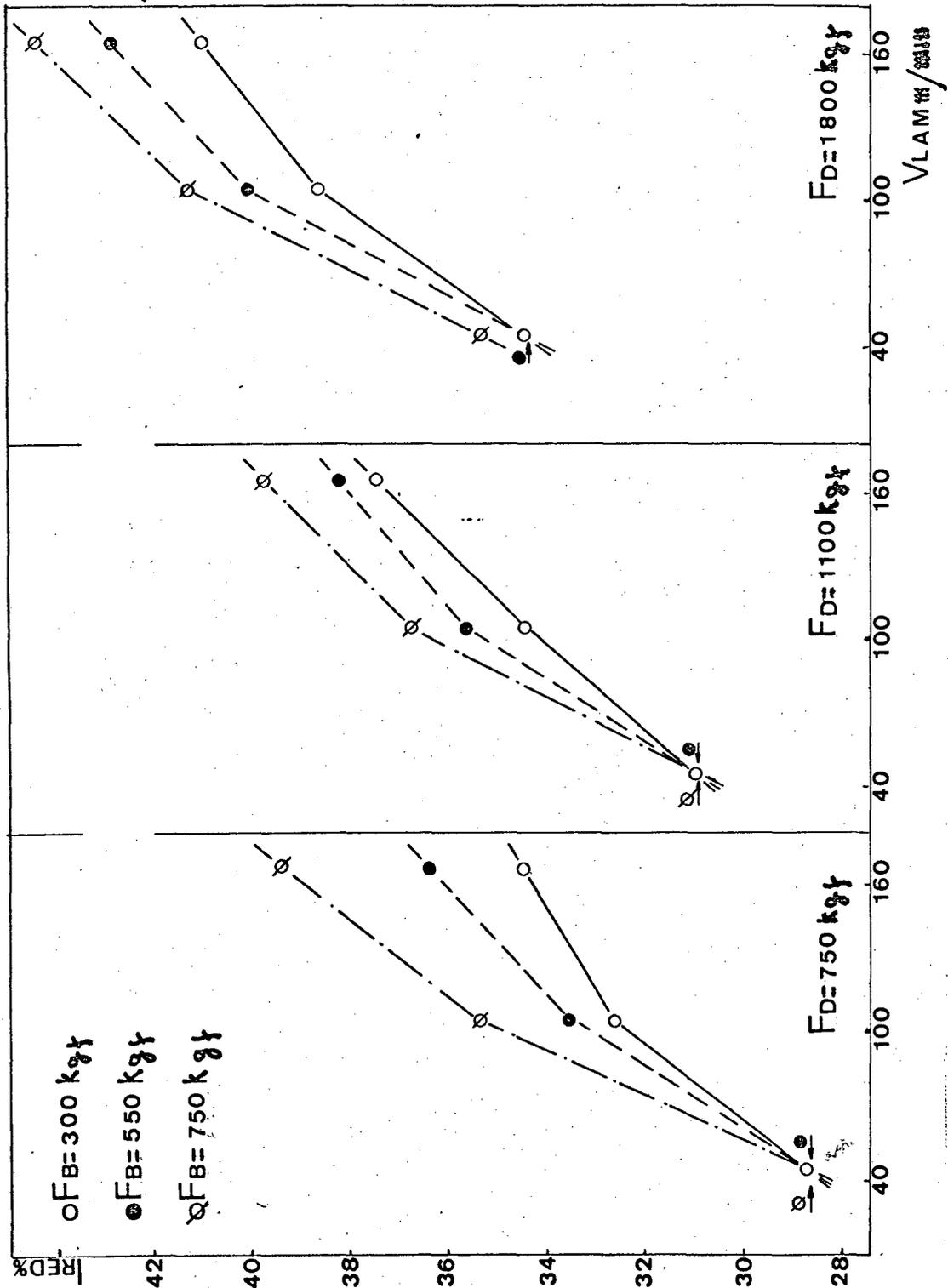
QUADRO 34 - Gráficos do índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de bobinadeira como parâmetro, com 10 passe.



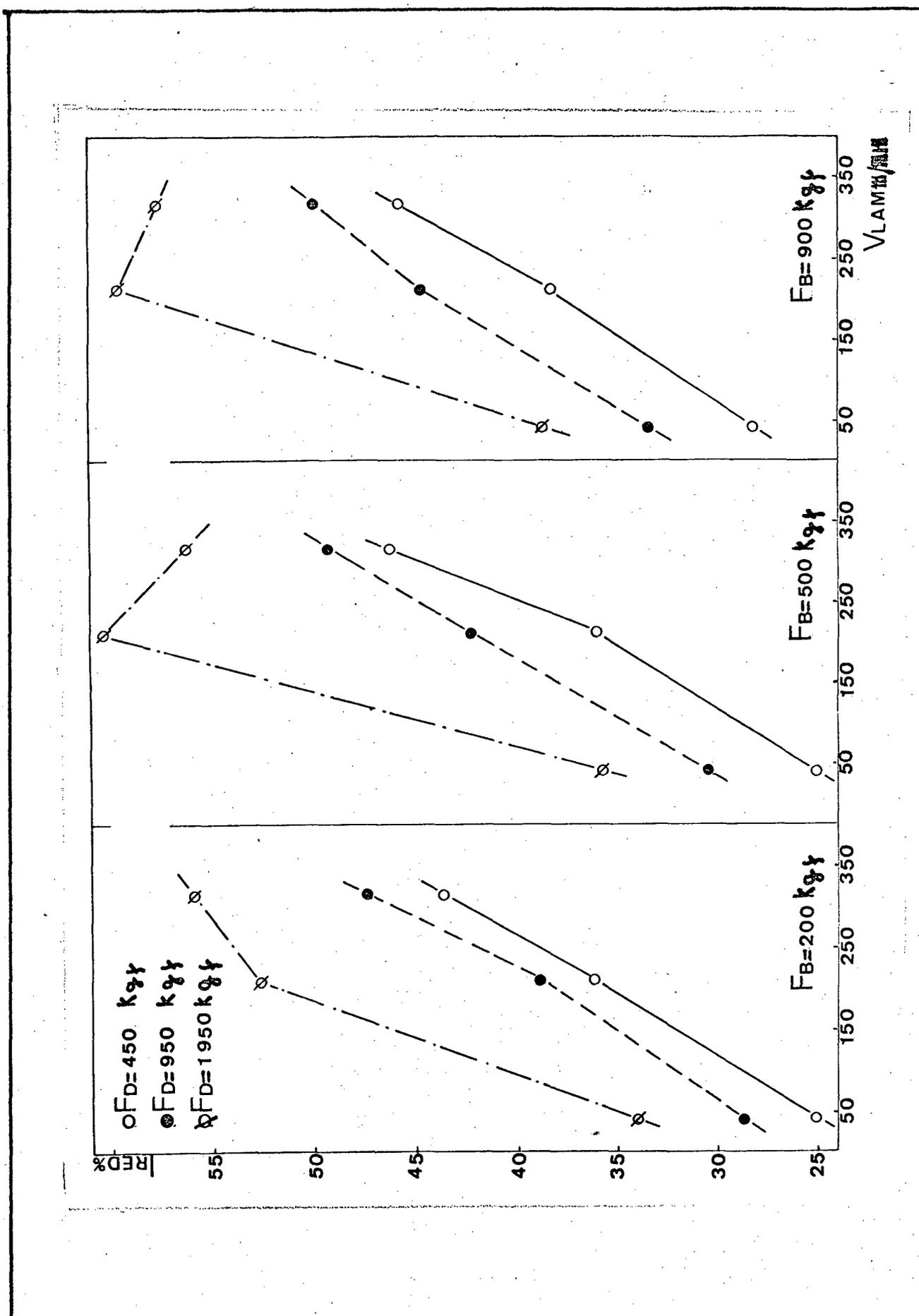
QUADRO 35 - Gráficos do índice de redução versus velocidade de linha, tensão de debobinadeira como parâmetro, em 1º passe.



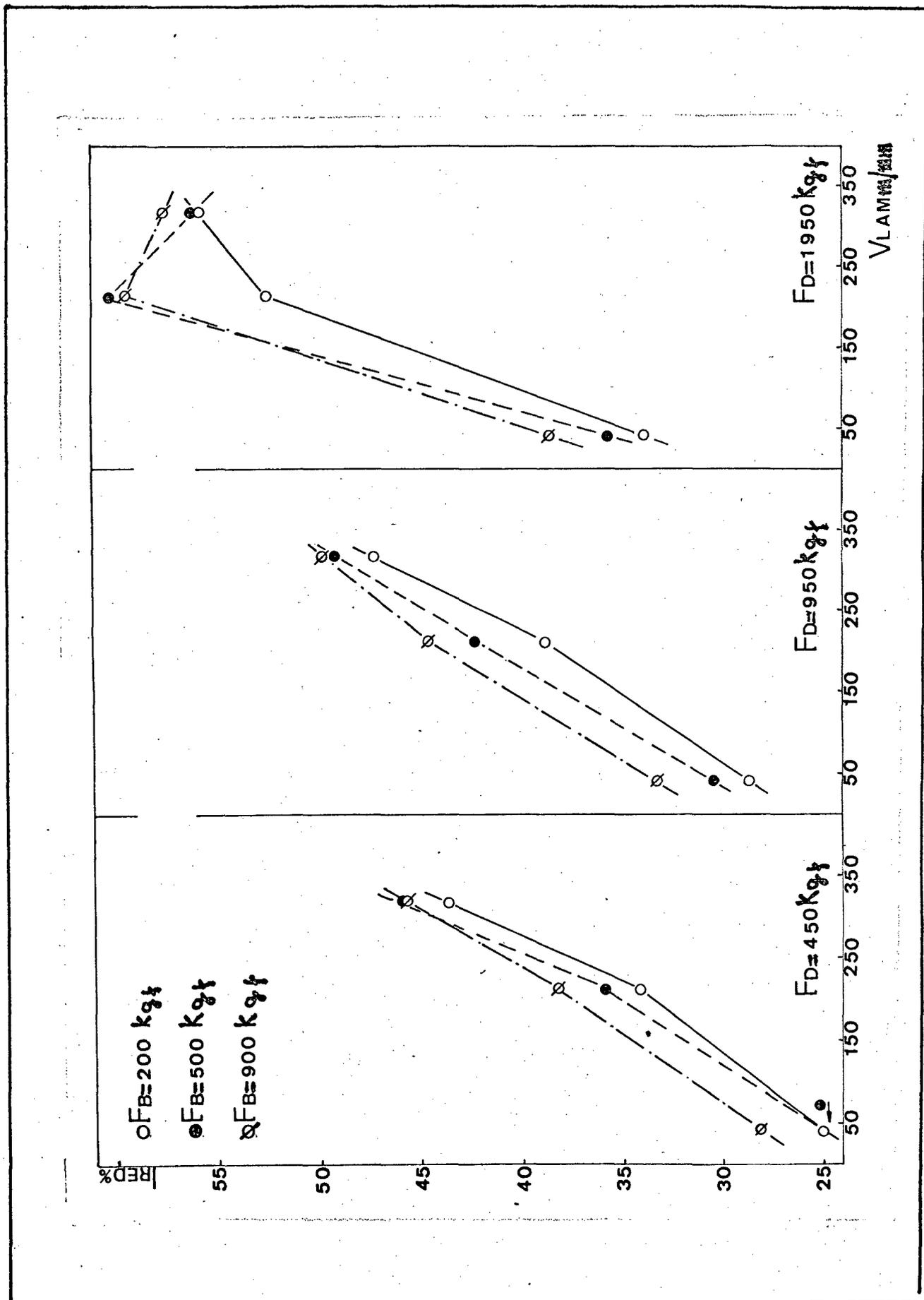
QUADRO 36 - Gráficos do Índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de bobinadeira como parâmetro, no 2º passo.



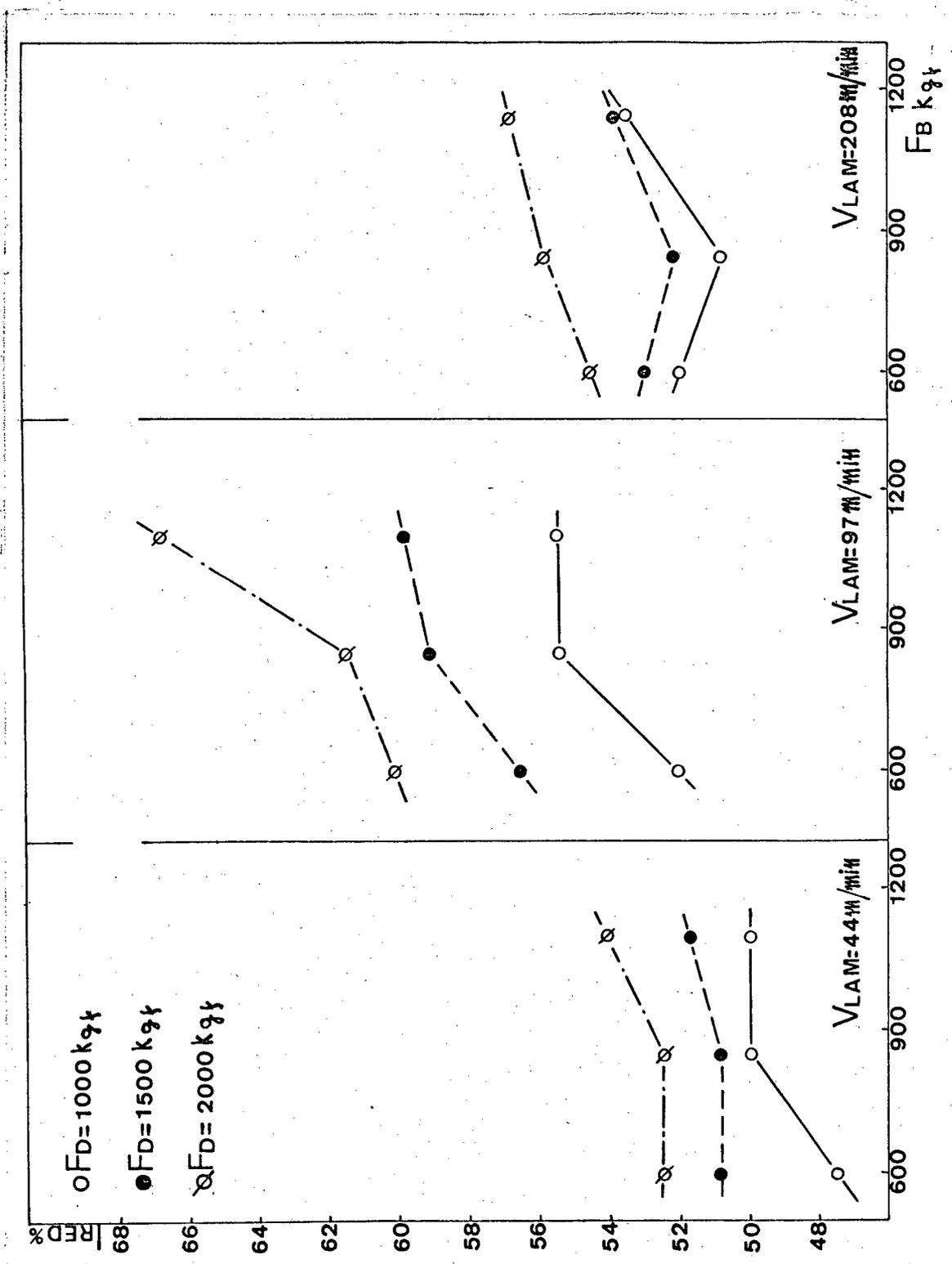
QUADRO 37 - Gráficos do índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâmetro, no 2º passe.



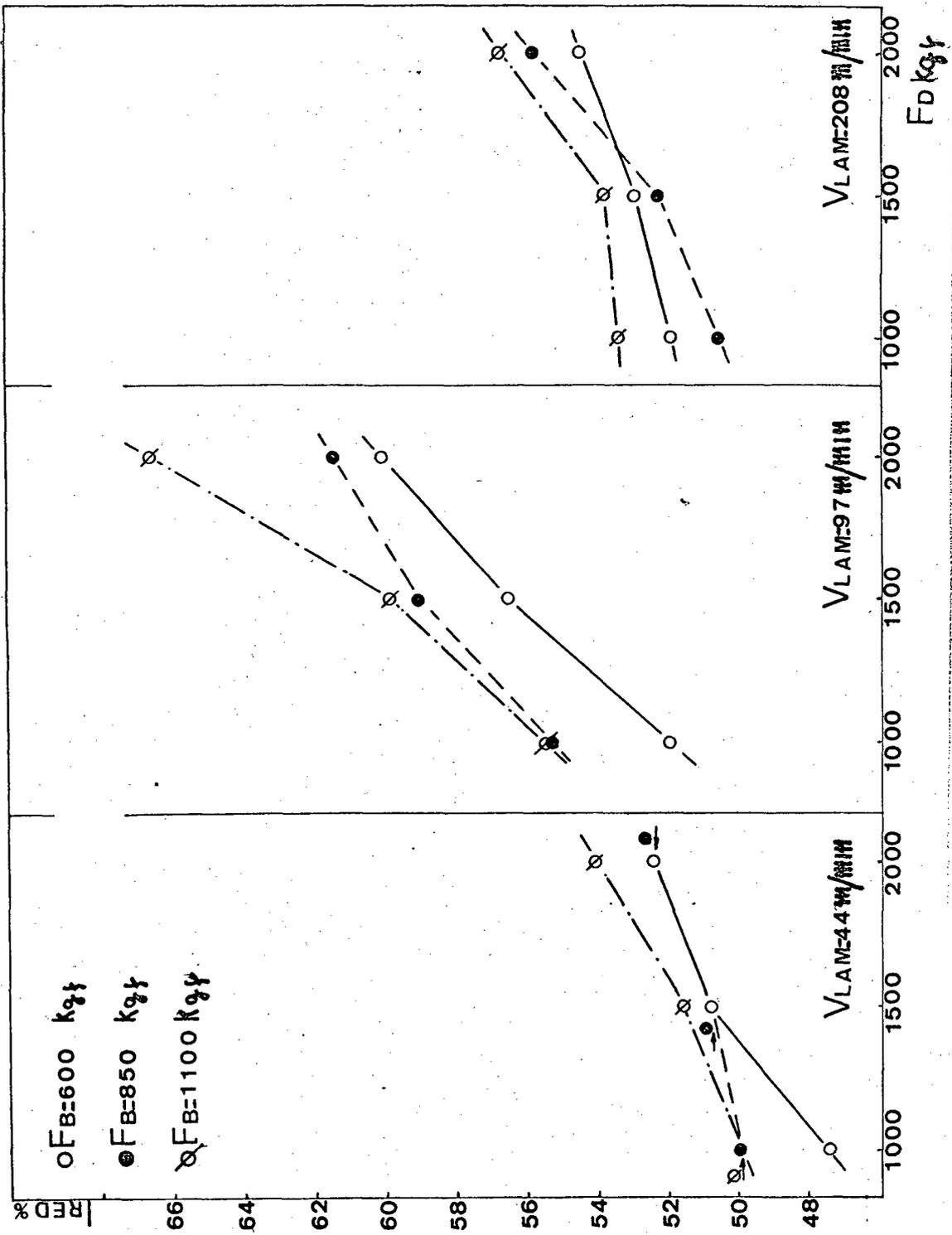
QUADRO 38 - Gráficos do índice de redução versus velocidade de lami-  
nação, tensão de bobinadeira como parâmetro, no 3º pas-  
se.



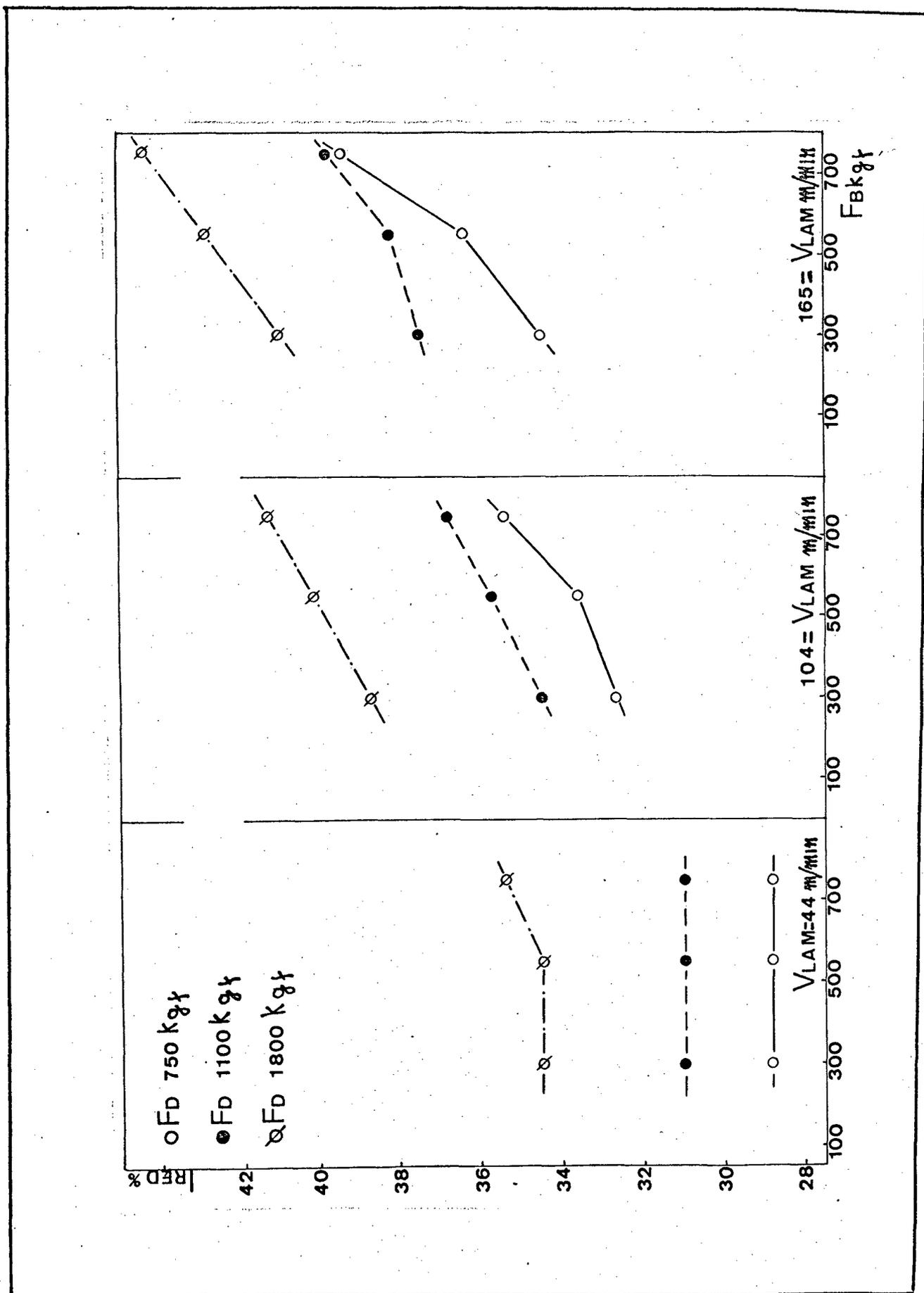
QUADRO 39 - Gráficos do índice de redução versus velocidade de laminação, tensão de debobinadeira como parâmetro, no 3º passe.



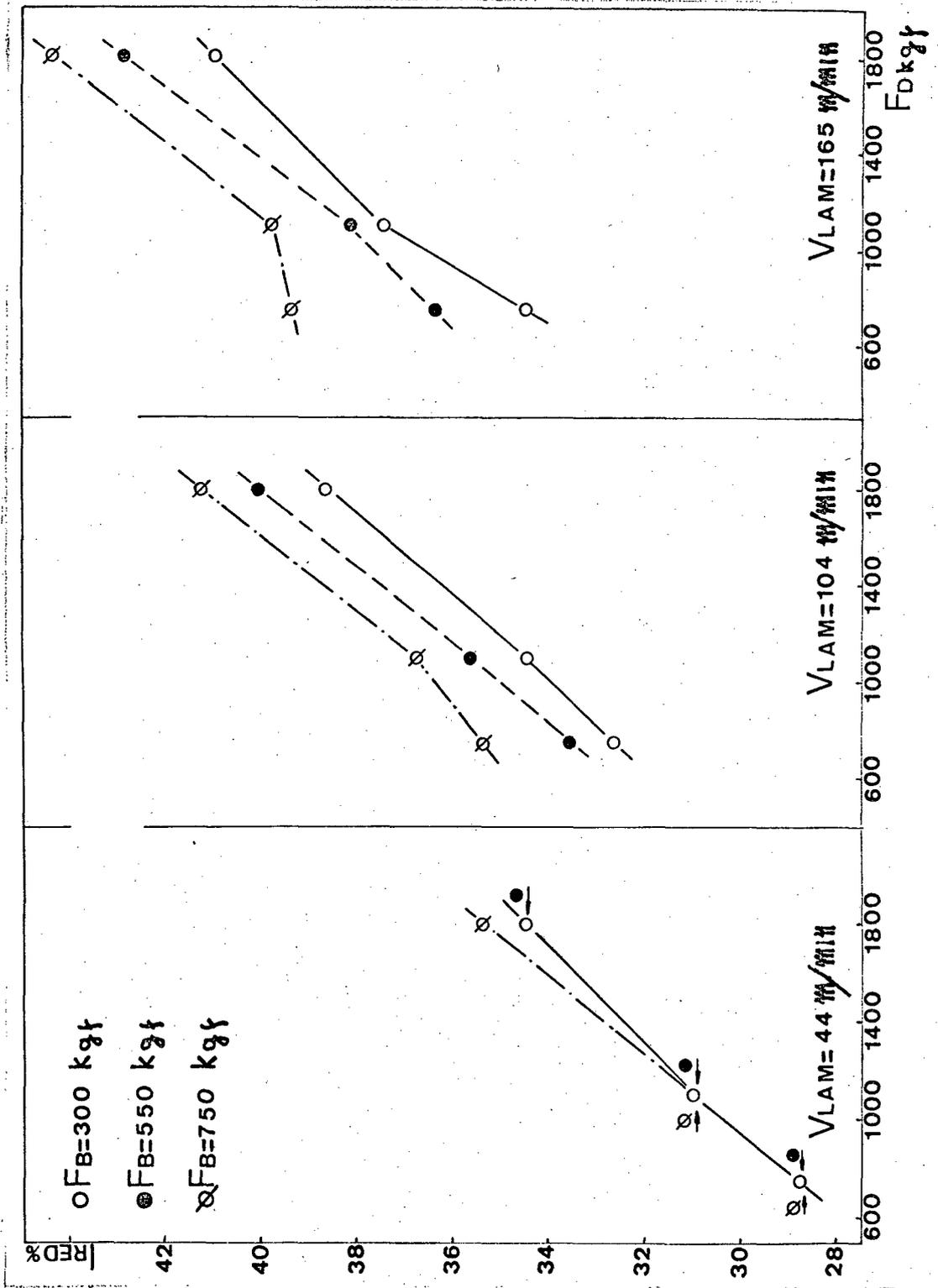
QUADRO 40 - Gráficos do índice de redução versus força de bobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 1º passe.



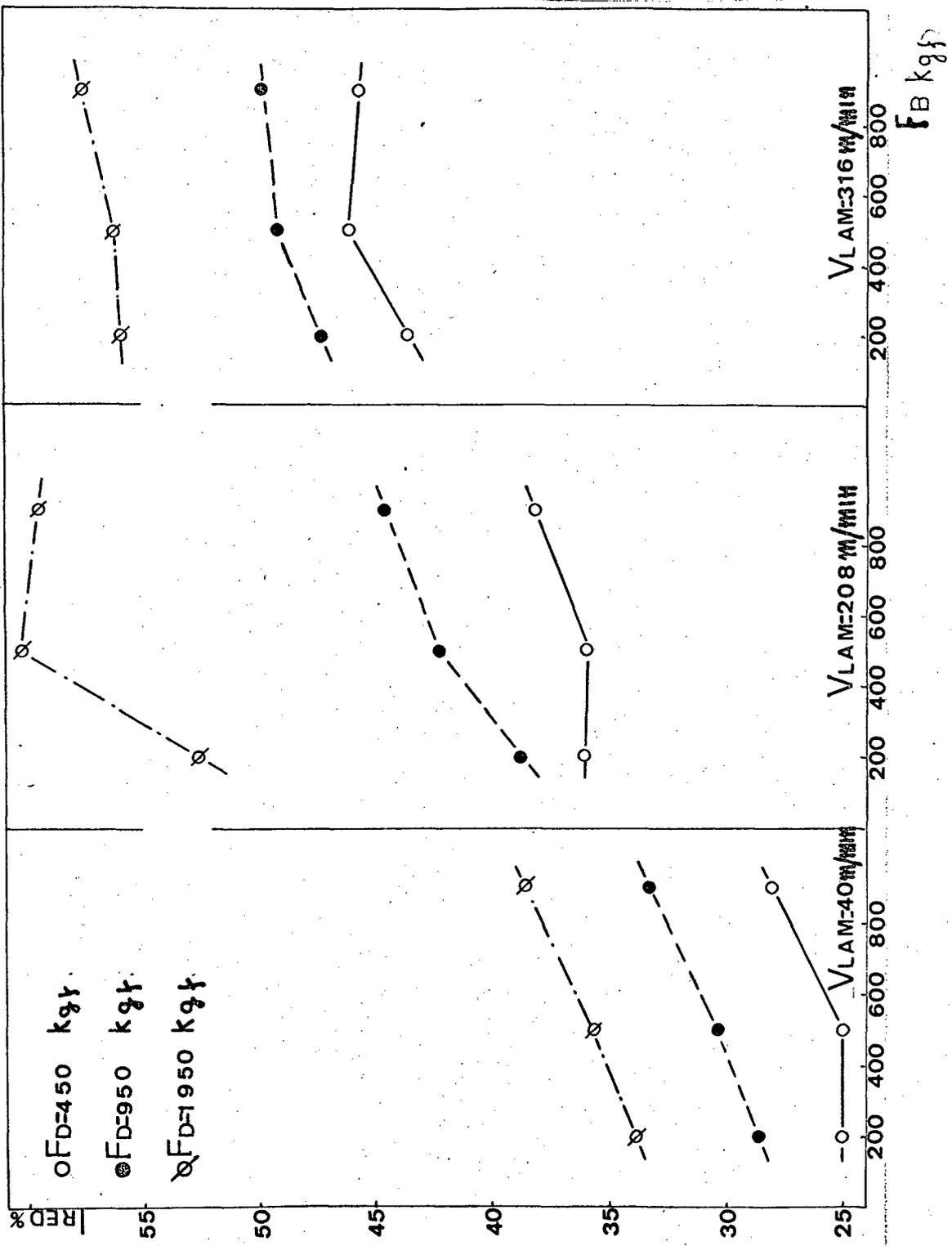
QUADRO 41 - Gráficos do índice de redução versus força de debobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro no 1º passe.



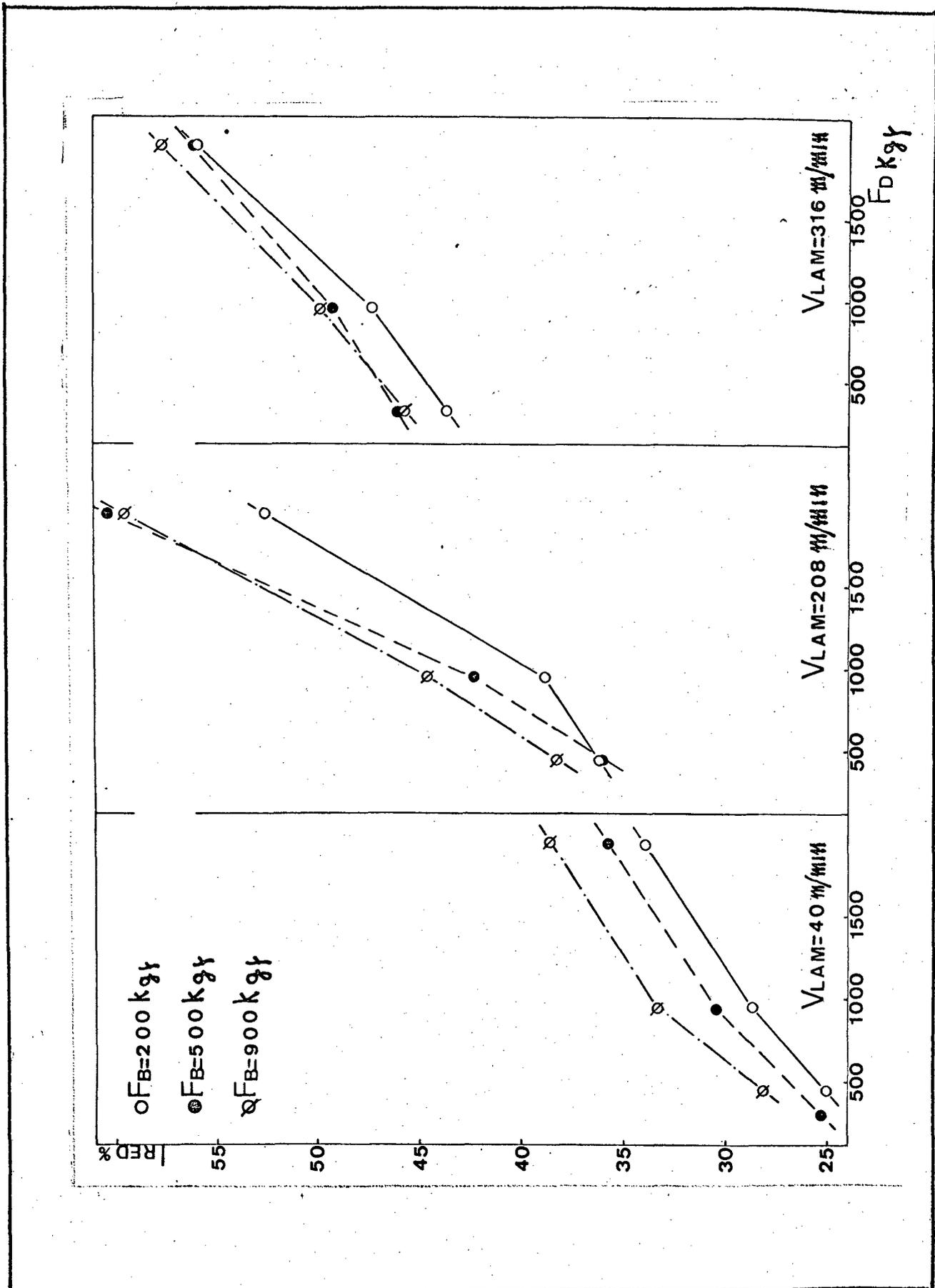
QUADRO 42 - Gráficos do índice de redução versus força de bobina deira, velocidade de laminação como parâmetro, no 2º passe.



QUADRO 43 - Gráficos do índice de redução versus força do duplo nadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 2º passe.



QUADRO 44 - Gráficos do índice de redução versus força de bobina deira, velocidade de laminação como parâmetro, no 3º passe.



QUADRO 45 - Gráficos do índice de redução versus força de debobinadeira, velocidade de laminação como parâmetro, no 3º passe.

## CAPÍTULO 5

## 5. Discussão dos Resultados Apresentados

Antes de começar a discussão propriamente dita é necessário dizer que os resultados presentemente obtidos, só podem ser comparados qualitativamente com os resultados encontrados na bibliografia consultada, isto por que as condições de laminação são bastante diversificadas e existe escassez de resultados, publicados na área de laminação a frio de Folhas de Alumínio, como se comenta no item 3.3.7.

## 5.1. Para o 1º Passe

## 5.1.1. Índice de redução versus Velocidade de Laminação

Analisando-se cada uma das três famílias de curvas apresentadas nos quadros 34 e 35, pode-se observar que aumentando-se a velocidade de laminação, o índice de redução aumenta, estando de acordo com os dados bibliográficos pesquisados. Entretanto, entre as velocidades de 97 m/min e 208 m/min, aquilo não se verifica, isto é, os valores do índice de redução para a última, são menores que para as primeiras, contrastando com o esperado. Este comportamento anômalo pode ser explicado pelos resultados das análises do óleo de laminação, que mostram modificações de suas características iniciais, pelos problemas apresentados no item 4.2. . Estas modificações, demonstradas pela coloração do óleo e seu índice de acidez, implicam em um aumento na resistência da película lubrificante, a qual, segundo o comentado no item 2.3.2., melhora as condições de atrito na interface, possibilitando assim uma maior redução com menos dispêndio de energia ou, estando todas as outras condições constantes, menor velocidade de laminação, condição indesejável para o processo, pois limita a capacidade de produção. Note-se, por exemplo, que laminado com o óleo nas condições das velocidades de 0 - 97 m/min, se obtém reduções maiores do que com as das velocidades de 208 m/min e 315 m/min, triplicando conseqüentemente o tempo de laminação. Tendo em vista o baixo intervalo de velocidades, passível de ser utilizado para os presentes experimentos, a diferença entre o efeito da velocidade no nível mais baixo para o mais alto não pode ser verificado, fato este que é mais acentuado pelo problema do óleo, mencionado anteriormente. Entretanto, nos gráficos onde há resultados para

a velocidade de até 315 m/min, inclusive, já é possível notar que o efeito da mesma é proporcionalmente menor que no intervalo de 0 - 97 m/min.

Comparando-se os quadros 34 e 35, vê-se que o efeito da velocidade no índice de redução não é influenciado pelos diferentes níveis das forças de debobinadeira e bobinadeira, respectivamente. Contudo, pode-se notar que as três curvas de cada gráfico são praticamente paralelas, mas quando se trata do efeito da velocidade para os vários níveis de força de bobinadeira, exposto no quadro 35, há intersecção das curvas, anomalia que pode ser explicada pelo pequeno intervalo dos diferentes níveis de força utilizados, pela pequena influência desta força (como será visto no item que se segue), pelas perturbações de sinais indesejáveis verificados nos medidores de força utilizados, e pelas dificuldades para se realizar repetições sistemáticas dos experimentos, tendo em vista a enorme quantidade de bobinas requeridas para tal, tempo, etc.

Neste primeiro passe, o tempo médio de laminação de cada bobina, é cerca de 7 min para a velocidade na faixa de 200 m/min a 300 m/min. Isto permite um tempo útil de 5 min, aproximadamente, para realizar as medições em uma bobina, implicando em um número elevado delas para a realização de todas as experiências programadas, tendo-se em conta o método de leitura em série empregado.

Nas velocidades de 0 - 100 m/min pode-se, entretanto, realizar todas as experiências previstas com poucas bobinas, dado que o tempo disponível é bem maior. Tendo-se em conta o acima exposto e o fato que não foi possível realizar os experimentos previstos para a velocidade de 300 m/min ou acima desta, pelos problemas surgidos com o óleo explicados no parágrafo inicial, optou-se pelas velocidades de 50 m/min e 100 m/min, que, muito embora retardassem a produção, não traziam problemas maiores devido ao pouco volume de material a laminar. Por outro lado, o uso de velocidades baixas, implica em uma menor precisão nas medições.

#### 5.1.2. Índice de redução versus forças de debobinamento e bobinamento.

Nas curvas mostradas no quadro 40 pode-se observar que é grande a influência da força de tração de bobinamento no índice de redução, o que não ocorre com a força de tração de debobi

namento, para as presentes condições e intervalo de força adotado, como mostra o quadro 41. Com efeito, algumas das curvas deste quadro mostram que, mesmo se aumentando a força de bobinadeira de 50 %, não se obtém variação no índice de redução, e em outros casos, há até uma diminuição deste índice. Este comportamento contraditório pode ser explicado tendo-se em vista que a influência da força de bobinamento é pequena e o intervalo passível de ser utilizado para variar a mesma é muito restrito, dadas as limitações práticas encontradas. A isto se acrescenta as flutuações verificadas durante as medições, dos valores mostrados pelos indicadores de força utilizados.

Vale acrescentar ainda que durante a realização, desta série de experimentos, não foi verificado nenhum efeito indesejável na qualidade do material na saída.

## 5.2. Para o 2º Passe

### 5.2.1. Índice de Redução versus Velocidade de Laminação

Os quadros 36 e 37 mostram a influência da velocidade de laminação no índice de redução por passe, para o 2º passe. Também neste passe se vê que aumentando a velocidade, o índice de redução aumenta, o que está totalmente de acordo com os dados da bibliografia consultada. Aqui, o problema relativo ao óleo de laminação toma outro aspecto, uma vez que todos os experimentos programados para este passe, foram realizados em uma mesma época. Conseqüentemente, não havendo variações nas características do óleo durante a mesma, os resultados para este passe não apresentam a anomalia verificada no 1º passe. Entretanto, como a capacidade de redução, com o óleo nas condições destes experimentos, é alta o suficiente para já com velocidades baixas se conseguir reduções da ordem de 40 % a 50 %, não se consegue laminar com velocidades acima de 200 m/min, pois os efeitos térmicos que surgem acima desta velocidade impedem a continuidade do processo, tendo em vista o surgimento de zonas de calor, que provocam o fenômeno indesejável das ondulações no material, já descrito no item 2.2. Por isso se programaram níveis mais baixos de velocidades, para contornar o problema acima exposto. Acrescente-se ainda o fato de que não havendo grandes lotes de material a laminar, para produção normal da fábrica, se é obrigado a realizar o 2º passo logo após a realização do 1º passe e conseqüentemente o material já entra no laminador em uma temperatura acima da ambiente, dificultando ainda mais

o seu resfriamento durante o processo, portanto auxiliando o fenômeno acima citado.

Nos gráficos do quadro 37, onde se tem as curvas para a força de bobinadeira e a força de debobinadeira como parâmetro, pode-se notar que a mesma não influencia o efeito da velocidade, pois as curvas de cada gráfico são praticamente paralelas.

Nos gráficos do quadro 36 nota-se que a influência da velocidade no índice de redução, em baixas velocidades, praticamente independe da força de bobinadeira, mas à medida que a velocidade cresce, o efeito da primeira depende cada vez mais do nível da força de bobinadeira empregado e este efeito é maior nos menores níveis da força de debobinadeira. Entretanto, dada a pouca influência desta força no índice de redução (como se verá a seguir), a pequena variação entre os diferentes níveis adotados e os problemas surgidos com a medição da mesma, já mencionados no item 5.1.1., este efeito carece de uma melhor comprovação, através de novos experimentos que procurem contornar os problemas presentemente discutidos.

#### 5.2.2. Índice de Redução versus força de bobinadeira e debobinadeira

No quadro 42 pode-se notar que realmente é pouca a influência da força de bobinamento no índice de redução, e que quanto mais baixa for a velocidade de laminação, menor é a influência daquela, o que não ocorre com as forças de debobinamento, que possuem grande influência no índice de redução, mas não são afetadas pela força de bobinamento nem pela velocidade de laminação, como se pode ver no quadro 43. Com efeito, as curvas ali mostradas são praticamente paralelas, independentemente das outras variáveis acima citadas.

Deve-se levar em consideração, também neste passo, as mesmas restrições feitas no item 5.1.2., sobre as medições das forças de bobinadeira.

Notou-se, neste passo, que para os experimentos onde os valores das forças de debobinamento são mais baixos, combinados com os níveis mais altos de força de bobinadeira, a superfície do material na saída apresentava zonas de brilho diferentes, levando a supor que a folha, nestes casos, esteja sofrendo um início de perfilagem.

#### 5.3. Para o 3º passe

### 5.3.1. Índice de redução versus Velocidade de laminação

Tanto no quadro 38 como no quadro 39, se pode notar que, aumentando-se a velocidade de laminação, o índice de redução aumenta como consequência. No entanto, nos gráficos onde as forças de debobinadeira e bobinadeira estão nos níveis mais altos, há uma diminuição do índice de redução quando se passa de 208 m/min para 316 m/min. A explicação para este fato, novamente está relacionada com os problemas citados no item 5.1.1., para o óleo de laminação. Também as curvas para os vários níveis de força não variam de inclinação, indicando a não interação do efeito da velocidade com as mesmas.

### 5.3.2. Índice de Redução versus força de Bobinamento e Debobinamento

Também neste passe, o efeito da força de debobinadeira é bem mais acentuado que o da força de bobinadeira, e não há efeito interativo entre as mesmas, como se pode verificar pela constância da inclinação das curvas para as diferentes combinações entre elas.

Neste passe, os experimentos onde a força de bobinadeira é muito mais elevada que a força de debobinadeira, surgem novamente os problemas com a qualidade superficial do laminado na saída, que se apresenta com o brilho não uniforme, conforme já comentado no item 5.2.2.

Finalmente, tem-se nos quadros 44 e 45 os gráficos relativos às forças de bobinadeira e debobinadeira, acima mencionadas, respectivamente.

.....

## CAPÍTULO 6

## 6.1. Conclusões

A influência das variáveis Velocidade de laminação e forças de bobinamento e debobinamento sobre o Índice de redução por passe, durante a laminação a frio de folhas de alumínio comercialmente puro, entre as espessuras de 0,6 mm, 0,3 mm, e 0,15 mm, se verifica segundo o seguinte quadro:

1) Quanto maior fôr a velocidade de laminação, maior será o índice de redução por passe;

2) Aumentando-se a Força de debobinadeira ou bobinadeira, aumenta-se o índice de redução por passe;

3) O índice de redução por passe é mais influenciado por:

- 1ª velocidade de laminação
- 2ª força de debobinadeira
- 3ª força de bobinadeira

4) Não há interação entre os efeitos das velocidades com as forças de bobinamento ou debobinamento;

5) - Não é aconselhável se usar a força de bobinamento para correção de espessura, pois além de sua pouca influência sobre a redução, valores muito altos da mesma tendem a piorar a qualidade do material sa saída;

6) - É possível medir-se o índice de redução por passe através de medições indiretas das velocidades de deslizamento na entrada e saída, com uma precisão razoável, muita facilidade e confiabilidade;

7) - Desejando-se tirar conclusões mais confiáveis, deve-se procurar realizar experiências similares com as condições ambientes mais fechadas, especialmente no que diz respeito à espessura de entrada, acabamento superficial dos cilindros de laminação e óleo de laminação; procurar tornar os diversos experimentos aleatórios, e repeti-los um número de vezes suficiente para se ter um tratamento estatístico dos resultados.

## 6.2. Sugestões para Pesquisa

- 1- Estudo da influência do acabamento superficial dos cilindros de laminação nas características do processo de laminação de folhas tais como: velocidade, capacidade de

redução, etc.

- 2 - Estudo da influência da lubrificação e capacidade de resfriamento, objetivando maiores velocidades de laminação e boa qualidade do laminado. (uso de emulsões para laminação a frio).
- 3 - Estudo das medições de temperatura no processo de laminação a frio, objetivando um melhor controle das características do processo e da qualidade do laminado.
- 4 - Estudo das possibilidades de laminação de folhas superpostas - sanduíche - em vários passes consecutivos, visando uma melhor otimização dos passes de laminação, especialmente em folhas finas.
- 5 - Estudo para otimização das velocidades de laminação nos diversos escalonamentos de passes de laminação a frio de folhas.
- 6 - Estudo para automatização do processo de laminação a frio de folhas, visando a utilização do computador para controle do processo.
- 7 - Estudo das influências da qualidade da placa e ou chapa, na qualidade da folha fina laminada.
- 8 - Estudo da influência da laminação a frio nas características de "EARING" das folhas de alumínio para estampagem.

.....

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 1 - Tselikóv, A., Stress and Strains in Metal Rolling, 1967.
- 2 - Schey, J.A., Metal Deformation Processes-Friction and Lubrication, 1970.
- 3 - Larke, Eustace C., The Rolling of Strip Sheet and Plate, 1967.
- 4 - Nedo Eston de Eston, Acabamento de superfícies e conversão de escalas de rugosidade; Metalurgia, vol. 23, nº 116 julho de 1967.
- 5 - Benedyk, Dr. J. C. ; Evaluating the Reduction capacity of Lubrificants for the cold rolling of aluminium and its alloys; Light Metal Age, Fev. 1971.
- 6 - Hugh Ford and J. M. Alexander, Advanced Mechanics of Materials, 1962.
- 7 - Churchman, C. West, Introdução a teoria dos Sistemas, 2ª edição, 1964.
- 8 - Wilson, Warren E., Conceptos sobre Ingenieria de Sistemas 1967.
- 9 - Kozel, J., Medidas Mecânicas (Apostila) 1973.
- 10 - Mizuno, T., Matsubara, K. and Hiroshi Kimura; Friction and Lubrication in the Cold Rolling of Thin Sheet Metals; Bulletin of JSME, Vol. 12, nº 50, 1969.
- 11 - ( Características das folhas de alumínio ), Tradução.
- 12 - Alich, G. Adtisswll (Schweiz), Processo de medição para a regularização das espessuras de folhas - mecanismos de laminação a frio e a quente; tradução do original em alemão pelo Deptº de Mecânica da UFSC; Aluminium, janeiro - 1969-10.
- 13 - Brzobahaty, Miroslav; Production of Aluminium Foil; Sheet Metal Industries; Maio 1962.
- 14 - Juran, J. M.; Quality Control Handbook, 3ª edição.
- 15 - Cox, D. R.; Planning of Experiments; 1958
- 16 - Hicks, Charles R.; Fundamental Concepts in the Design of Experiments; 1965.
- 17 - King, F., Turner, A.N.; The Control of Quality in the hot and cold rolling of aluminium and aluminium alloys; J. Inst. Metals; Vol. 92, março, 1953-54.
- 18 - O'Connor, H. W., Weinstein, A.S.; Shape and Flatness in thin Strip Rolling; Journal of Engineering for Industry, nov. 1972.
- 19 - Greenberger J. I.; Design Concepts in an Hydraulic Plate

- Mill with ACC and Shape Control; Iron and Steel Engineer, set. 1971.
- 20 - Kuhn, H.A., Weinstein, A.S.; The Minimum Gauge Problem in Thin Strip Rolling; Journal of Lubrication Technology; Julho, 1971.
- 21 - Hans D. C.; Principios Fundamentais da laminação de Folhas; Z. Metalikde; Bd.53 - (1962) - H.10.
- 22 - Schippert, L.; Limites superiores de velocidade na laminação de chapas; ( tradução do alemão com o título Die Obere Grenze der Walzgeschwindigkeit beim Walzen von Bandern ).
- 23 - Raymond Shah; New Methods Measure Metals in Motion; Iron Age Metalworking International; Agosto, 1975.
- 24 - Atkins, A. G.; Hidrodinamic Lubrication in Cold Rolling ; Int. J. Mech. Sci., Vol. 16, 1974.
- 25 - AVITZUR B. GROSSMAN G.; Hidrodinamic Lubrication in rolling of thin strips; Journal of Engineering for Industry Feb. 1972.
- 26 - Benedyk, J.C.; Evaluating the reduction capacity of Lubrificants for the Cold Rolling of Aluminium and its Alloys; Light Metal Age, Feb. 1971.
- 27 - Kondo, S.; An Improvement of Rolling Stability During Cold Rolling of Aluminium; Journal of Lubrication Technology; Jan. 1975.
- 28 - Serna, P.F. and Louis E.; Linear paraffin-based cold rolling lubricants; Empresa Nacional del Aluminio, S. A., Alicante, ( Spain ), 1975.

.....