

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RIGIDEZ NORMAL E TANGENCIAL DE SUPERFÍCIES USINADAS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE

"MESTRE EM CIÊNCIAS"

OSWALDO PAIVA ALMEIDA FILHO

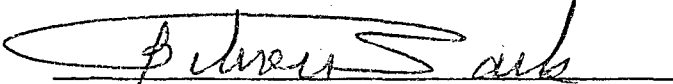
DEZEMBRO - 1976


RIGIDEZ NORMAL E TANGENCIAL DE SUPERFÍCIES USINADAS

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

"MESTRE EM CIÊNCIAS"

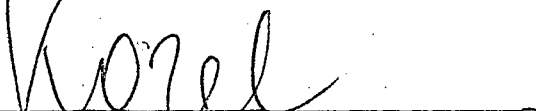
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO ORIENTADOR E PE  
LO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.


  
Prof. Nelson Back, Ph.D.  
Orientador

  
Prof. Arno Blass, Ph.D.  
Coordenador do Curso de  
Pós-Graduação

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS  
PROFESSORES:

  
Prof. Nelson Back, Ph.D.

  
Prof. Jaroslav Kozel, Ph.D.

  
Prof. Longuinho da Costa M. Leal, M.Sc.

À minha esposa,

## AGRADECIMENTOS

- À Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, pela possibilidade de realização do Curso de Pós-Graduação e da Tese de Mestrado;
- Ao CNPq, BNDE, cujas bolsas muito auxiliaram para elaboração deste trabalho;
- À Fundação TUPY, pelos corpos de prova de ferro fundido;
- Ao Prof. Nelson Back, pela orientação deste trabalho;
- Ao Prof. Jaroslav Kozel, pelo apoio na parte experimental;
- Ao laboratorista Nilson João de Aquino, pela colaboração na realização dos testes;
- Aos amigos Alcides, Hilton José, Luiz Henrique e Nestor, que muito auxiliaram na montagem final deste trabalho;
- Aos professores e funcionários do Centro Tecnológico, que de uma forma ou de outra, contribuíram para realização deste trabalho.

O meu muito Obrigado!

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, b' = constantes
- A<sub>0</sub>, A<sub>c1</sub>, A<sub>c2</sub>, A<sub>s</sub> = constantes
- A<sub>a</sub> = área aparente
- A<sub>r</sub> = área real de contato
- A<sub>i</sub> = área individual de contato
- A, B = parâmetro característico material e acabamento superficial (11,12)
- b = parâmetro característico material e acabamento superficial (5, 9)
- C, M = parâmetro característico material e acabamento superficial
- E = módulo elasticidade normal
- F<sub>n</sub> = força normal
- F<sub>ni</sub> = força normal suportada a uma aspereza
- F<sub>ailim</sub> = força atrito limite de aspereza
- G = módulo de elasticidade transversal
- h<sub>i</sub> = altura da aspereza
- k, K = constantes
- K<sub>n</sub> = flexibilidade normal
- K<sub>t</sub> = flexibilidade tangencial
- n = número de pontos em contato por unidade de área
- N = número de pontos em contato
- N' = número de pontos em contato - para pressão tangencial
- P<sub>n</sub> = pressão normal
- P<sub>no</sub> = pressão normal inicial

- $P_{tlim}$  = pressão tangencial limite  
 $P_t$  = pressão tangencial  
 $Q$  = número de pontos em contato/cm<sup>2</sup>  
 $R, S$  = parâmetro característico de rigidez tangencial  
 $R_{ni}$  = rigidez normal de uma aspereza  
 $R_N$  = rigidez normal de superfície usinada, por unidade de área.  
 $R_a, R_t, R_z$  = parâmetro de rugosidade  
 $RT$  = rigidez tangencial de superfície usinada, por unidade de área.  
 $RT'$  = rigidez tangencial de superfície usinada, por unidade de área - carregamento simultâneo.  
 $R_{ti}$  = rigidez tangencial de uma aspereza  
 $Y$  = constante  
 $Z$  = profundidade  
 $Z_i$  = profundidade a partir do qual uma aspereza deverá ser solicitada.  
 $\lambda_n$  = deformação normal da superfície  
 $\lambda_{ni}$  = deformação normal de uma aspereza  
 $\lambda_t$  = deformação tangencial da superfície  
 $\lambda_t'$  = deformação tangencial da superfície - carregamento simultâneo.  
 $\lambda_{tlim}$  = deformação tangencial limite de uma aspereza  
 $\lambda_{tmax}$  = deformação tangencial máxima da superfície  
 $\phi(Z)$  = função densidade  
 $\mu$  = coeficiente de Poisson  
 $\mu_a$  = coeficiente de atrito estático  
 $\mu_{lim}$  = coeficiente de atrito limite  
 $\alpha$  = relação entre a pressão tangencial e a normal

## NOTA SOBRE NOMENCLATURA DOS MODELOS

Cada modelo foi codificado com 3 letras, a saber:

- A primeira letra, corresponde ao tipo de material do modelo:
  - A - ferro fundido
  - B - aço 1020
  - C - bronze
  
- A segunda letra, corresponde a posição do modelo em relação ao material.
  
- A terceira letra, corresponde ao acabamento superficial:
  - A - retificado
  - B - torneado
  - C - fresado
  - D - plainado
  - E - rasqueteado
  - F - rasqueteado
  - G - rasqueteado

e a letra H, é para o corpo sólido equivalente ao modelo.

## S U M Á R I O

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

- 1.1 - Generalidades
- 1.2 - Sequência deste trabalho

## CAPÍTULO 2 - RIGIDEZ NORMAL DE SUPERFÍCIE USINADA

- 2.1 - Generalidades
- 2.2 - Deformação normal de uma superfície usinada a equação
- 2.3 - Outras equações propostas por pesquisadores
- 2.4 - Fatores que afetam a rigidez normal de superfície usinada
  - 2.4.1 - Influência do par de materiais
  - 2.4.2 - Rugosidade superficial e influência de orientação das estrias de usinagem
  - 2.4.3 - Influência da dureza superficial
  - 2.4.4 - Erro de planicidade e tamanho da área de contato
- 2.5 - A área real de contato
- 2.6 - Valores de C e M obtidos por diversos pesquisadores

## CAPÍTULO 3 - RIGIDEZ TANGENCIAL DE SUPERFÍCIES USINADAS

- 3.1 - Generalidades
- 3.2 - Deformação tangencial de superfícies usinadas
  - 3.2.1 - Deformação tangencial, quando cargas normais e tangenciais são aplicadas simultaneamente



- 3.3 - Relação entre a rigidez normal e tangencial de superfícies usinadas
- 3.4 - Análise matemática do primeiro de demais ciclos de carga
  - 3.4.1 - a) primeiro carregamento tangencial (sob pressão normal constante)  
b) descarregamento tangencial (sob pressão normal constante)
  - 3.4.2 - Aplicação de cargas normais e tangenciais simultaneamente
    - a) descarregamento tangencial sob pressão normal constante, após carregamento simultâneo

#### CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS MATERIAIS

- 4.1 - Módulo E, a partir do corpo sólido equivalente
- 4.2 - Módulos E e G, a partir de modelo normalizado, submetido a ensaio de tração

#### CAPÍTULO 5 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE RIGIDEZ NORMAL

- 5.1 - Generalidades
- 5.2 - Modelo utilizado
  - 5.2.1 - A usinagem dos corpos de prova
- 5.3 - Procedimento escolhido para determinação dos parâmetros característicos de superfície
- 5.4 - Curvas de calibração
  - 5.4.1 - Para medir a deformação
  - 5.4.2 - Para medir a força
- 5.5 - Equipamento utilizado

5.6 - Testes preliminares

5.6.1 - Obtenção da primeira curva de carregamento

5.6.2 - Testes preliminares propriamente ditos

5.7 - Testes definitivos

5.7.1 - Generalidades

5.7.2 - Preparação e execução do experimento

5.7.3 - Determinação dos parâmetros C e M

5.7.4 - Parâmetros obtidos

5.8 - A tabela dos parâmetros

CAPÍTULO 6 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE RIGIDEZ TANGENCIAL

6.1 - Generalidades

6.2 - Procedimento experimental

6.2.1 - Equipamentos utilizados

6.2.2 - Procedimento de cálculos

6.3 - Carregamento não simultâneo - Curvas e parâmetros obtidos

6.4 - Carregamento simultâneo

CAPÍTULO 7 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 - Módulos de elasticidade

7.2 - Os parâmetros C e M de rigidez normal

7.2.1 - Material de junta

7.2.2 - Altura das asperezas

7.2.3 - Orientação das asperezas

7.2.4 - Influência do primeiro nível de carga

7.2.5 - Comparação dos acabamentos superficiais

- 7.2.6 - Comparação com os valores obtidos pelos outros pesquisadores
- 7.3 - Comparação dos parâmetros R e R<sup>+</sup>
  - 7.3.1 - A tabela 7.5
  - 7.3.2 - Extrapolação para os demais materiais e acabamentos superficiais

## CONCLUSÕES

## BIBLIOGRAFIA

### APÊNDICE 1 - RUGOSIDADE SUPERFICIAL

- 1 - Generalidades
- 2 - Normas DIN
- 3 - Norma ABNT NB 93 - 1964
- 4 - Comentário sobre pesquisa dos parâmetros característicos normalizados
- 5 - Os parâmetros característicos normalizados, utilizados nos diversos países
- 6 - Definição dos parâmetros de rugosidade que foram utilizados nos ensaios

### APÊNDICE 2 - TESTES PRELIMINARES PROPRIAMENTE DITO

### ANEXOS:

- 1 - Questionário aplicado a 72 firmas da Alemanha Ocidental que utilizam controle de rugosidade superficial
- 2 - Parâmetros característicos de rugosidade superficial, utilizado pelos diversos países
- 3 - Planilha de dados dos parâmetros de rugosidade

- 4 - Relatório pré-carga
- 5 - Planilha de dados teste rigidez normal
- 6 - Relatório de teste
- 7 - Relatório do conjunto de teste
- 8 - Planilha de dados do teste de rigidez tangencial
- 9 - Adendo da planilha de dados de teste de rigidez tangencial

## R E S U M O

Neste trabalho, analisou-se a relação da pressão e de formação normal das superfícies em contato, bem como, através de experimentos, foram obtidos os parâmetros característicos de rigidez normal de superfícies usinadas. Para os modelos de ensaio, foram adotados o ferro fundido, aço 1020 e bronze, com os seguintes acabamentos superficiais: retificado, torneado, fresado, plainado, rasqueteado fino, rasqueteado normal e rasqueteado grosseiro.

Também são apresentados resultados teóricos e experimentais da rigidez tangencial de superfícies usinadas e as equações matemáticas que representam todo o comportamento das rugosidades, desde o início do seu carregamento, em função do modo de aplicação da carga.

Verificou-se experimentalmente a proposta de Back, de que os parâmetros de rigidez tangencial podem ser obtidos em função dos parâmetros de rigidez normal, através da relação dos módulos de elasticidade.

## A B S T R A C T

This work presents and analysis of the relationship between the pressure and normal deformation of surface in contact. The parameters of the normal stiffness of machined surface have been measured on cast iron, mill steel and brass models, using different qualities surface finish and machinery processes, as follow: ground, turned, milled, shaped, fine, conventional and coarse hand-scraped.

It was presents theoritical and experimental results of the shear stiffness of machine surface, through a theoritical analysis, an presented analitical shear pressure-deformation relationship, for different loading conditions: simultaneous, non simultaneous loading, and different loading cycles.

It is also presented an analysis of the Back proposal in which the shear stiffness parameters can be obtaine from the normal stiffness parameters.

## C A P Í T U L O 1

## INTRODUÇÃO

## 1.1 - Generalidades

A rigidez de uma máquina ferramenta é definida em função da rigidez dos elementos estruturais da mesma, bem como das juntas fixas (aparafusadas) e juntas móveis (guias). Por sua vez, a rigidez da junta é função de diversos elementos, tais como: a rugosidade, ondulação das superfícies e elementos estruturais da junta.

Devido à rugosidade superficial, apenas uma pequena percentagem da área aparente  $A_a$ , entra em real contato quando as superfícies forem submetidas a pressão de contato. Em vista disto, resultados dos experimentos e cálculos para determinação do valor da deflexão da junta sob carga, diferem em muito, quando o calculado é obtido pela teoria de elasticidade para corpos com superfícies perfeitamente lisas.

A correta determinação da deflexão das juntas é de grande importância em máquinas ferramentas, porque:

- uma máquina ferramenta sendo constituída de várias peças, devido à complexidade de fabricação, por problemas de transporte ou por razões funcionais, tem no seu fluxo de força, incluída uma série de juntas;
- nas juntas com grandes dimensões de área de contato  $A_a$ , ocorre inevitáveis erros de planicidade, como ondulosidade, ovalização, etc., que influem sobre sua rigidez;
- alguns dos elementos da estrutura da máquina ferramenta e em especial, juntas, são de baixa rigidez, resultando numa distribuição de pressão variável na área de contato  $A_a$ , que afetam o comportamento das juntas.

Uma junta de máquina ferramenta, em geral, está sujeita a um carregamento mais complexo: carregamento normal combinado com um momento torçor, provocando uma determinada rotação dos

elementos montados em contato. A figura 1.1 apresenta exemplos destes tipos de rotação. A figura 1.1a mostra que numa fresadora manual vertical, o deslocamento no ponto de atuação da força de corte  $P$ , pode ser muito maior do que a deformação em sua guia. A figura 1.1b apresenta o caso semelhante do rebolo de uma retífica.

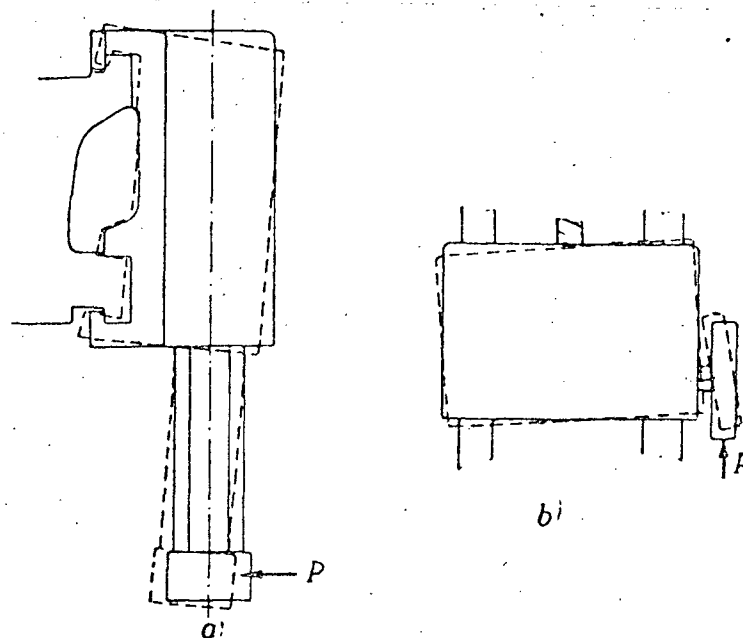


Fig. 1.1 - Deflexão das guias e deslocamentos correspondentes das ferramentas de corte, devido a força de corte  $P$ .

Foi sugerido <sup>1</sup> calcular a contribuição de cada componente estrutural da máquina ferramenta, em relação à deflexão total no ponto da ferramenta e comparar os resultados analíticos (considerando solicitação estática) com os valores medidos. Concluiu-se que a contribuição das juntas da máquina ferramenta é parte significativa da deflexão elástica total. Por exemplo, a deflexão elástica do carro de um torno mecânico analisado contribuiu com 40% da deflexão total na ferramenta. Deste valor, 30% foi devido a três guias existentes. Na contra ponta do cabeçote móvel 60 - 70% do total da deflexão resultou da flexibilidade da junta. Na fresadora mandriladora vertical, o deslocamento elástico no suporte e guia do porta-ferramenta contribuiu com até



25% da deflexão total no plano do pórtico e até 40% no plano normal. Na fresadora vertical as deflexões das guias da mesa e do console contribuem com 60 - 70% do deslocamento total da mesa em relação a ferramenta.

Como pode ser observado, é de importância vital para a determinação da rigidez da máquina ferramenta, o perfeito conhecimento da rigidez das juntas. Se se considerar que, uma junta é formada por superfícies usinadas elásticas circundada por componentes rígidos, poder-se-ia determinar sua rigidez, conforme o tipo e distribuição de carga, de maneira bastante simples. Contudo, na prática, nem a superfície, nem os componentes são rígidos, e se tem um problema. BACK<sup>2</sup> o resolveu através de um método interativo.

Alguns resultados mostram que a deformação total da junta é dependente mais da flexibilidade dos componentes que circundam a superfície do que da deformação da própria superfície. E, em alguns casos, poder-se-ia desprezar a aproximação das superfícies em relação às deformações dos componentes.

Entretanto, BACK<sup>2</sup> afirma ser necessário conhecer o comportamento das superfícies para poder formular a solução dos problemas e então determinar a distribuição de pressão em contato e a deformação dos componentes. A partir desses resultados, poder-se-ia definir a rigidez total da junta.

## 1.2 - Sequência deste trabalho

Este trabalho apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica referente a rigidez normal de superfícies usinadas, parâmetros específicos e fatores que a influenciam, a rigidez tangencial de superfícies usinadas, parâmetros específicos, sua comparação com o comportamento da rigidez normal e apresenta a proposta de BACK<sup>2,3</sup>, que relaciona os parâmetros de rigidez normal e tangencial com os módulos de elasticidade normal  $E$  e transversal  $G$ . Apresenta, ainda, um estudo sobre os parâmetros característicos normalizados de rugosidade superficial, com base nas normas NB 94, ABNT-1964, DIN 4762-1960 e DIN 4768-1970, bem

como pesquisa dos parâmetros característicos, utilizados na indústria mecânica alemã, por DREYHAUPT<sup>4</sup> (Apêndice 1).

Em seguida, é apresentado a parte experimental que inicia com a determinação dos módulos de elasticidade normal  $E$  e transversal  $G$ , e segue com o procedimento experimental da determinação dos parâmetros  $C$  e  $M$  de rigidez normal, bem como seu método de cálculo. Foi estudado o comportamento do ferro fundido, aço 1020 e bronze nos seguintes acabamentos superficiais: retificado, fresado, torneado, plainado, rasqueteado fino, rasqueteado normal e rasqueteado grosseiro. Com algumas adaptações na prensa mecânica desenvolvida e executada no Centro Tecnológico da UFSC, foi possível determinar experimentalmente o comportamento das superfícies usinadas quando solicitada tangencialmente. Para este caso, limitou-se o estudo para o ferro fundido, com determinado tipo de retificado e conseguindo provar a teoria de BACK<sup>2,3</sup> com acuidade suficiente, extrapolou-se esta teoria, para os demais materiais e acabamentos superficiais.

## C A P Í T U L O 2

## RIGIDEZ NORMAL DE SUPERFÍCIE USINADA

## 2.1 - Generalidades

Vários pesquisadores <sup>1,2,5,6,7</sup> mostraram que a característica de aproximação de duas superfícies formando uma junta, quando sujeitas a uma pressão normal  $P_n$  uniforme, depende do módulo da pressão, tipo de acabamento superficial da junta e das propriedades mecânicas dos materiais que a constituem. A deformação da superfície em contato sempre segue a mesma forma. A figura 2.1 mostra um comportamento típico de deformação de uma junta sujeita a pressão normal.

Nota-se no primeiro ciclo de carga que a deformação do carregamento é bem maior do que a correspondente ao descarregamento, pois a deformação do carregamento consiste na soma de deformações elásticas e plásticas das rugosidades superficiais, enquanto que a deformação do descarregamento é puramente elástica.

Na maioria das juntas fixas, as superfícies são raramente separadas; então, é o comportamento elástico de principal importância e o primeiro carregamento não é considerado. Isto pode ser observado na figura 2.1, onde as curvas de carregamento e descarregamento somente são coincidentes após o primeiro carregamento: curvas OA e AB. O valor de OB corresponde ao amassamento da rugosidade superficial. Se não ocorrer separação das superfícies, e as juntas forem solicitadas de modo que não ultrapassem o primeiro carregamento, tem-se curvas carregamento e descarregamento representadas pela curva AB. Caso ultrapasse este limite, tem-se a curva AC que é a soma de deformações elásticas e plásticas.

Este trabalho é limitado ao estudo de juntas com solicitação estática às superfícies usinadas.

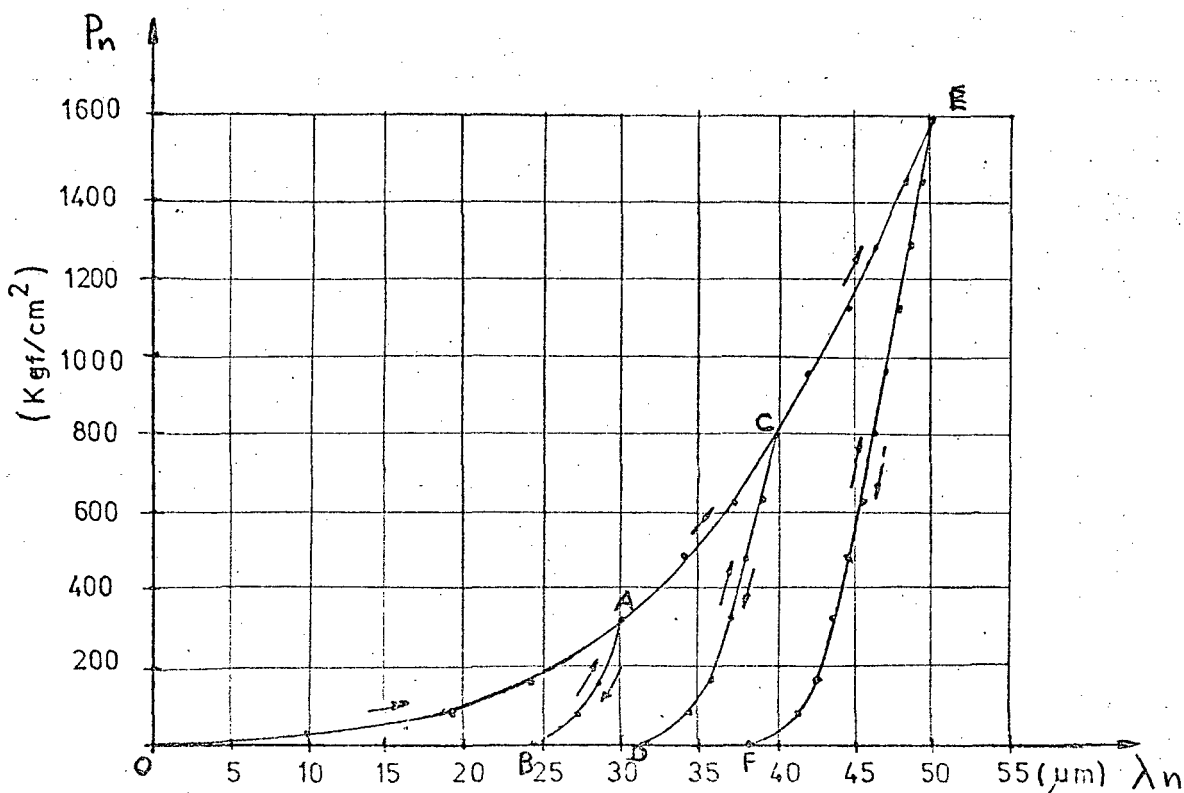


Fig. 2.1 - Comportamento da deformação da rugosidade superficial, quando submetida a pressão normal  $P_n$  : o primeiro carregamento.

## 2.2 - Deformação normal de uma superfície usinada

Quando dois elementos de máquina são colocados em contato através de superfícies planas usinadas solicitadas por uma pressão normal  $P_n$ , verifica-se que a aproximação entre as superfícies é função da pressão aplicada. Isto ocorre mesmo para os melhores e mais finos acabamentos superficiais, pelo fato de que as superfícies apresentam-se rugosas, ou seja, nem toda área aparente  $A_a$  entra em contato, mas apenas um percentual desta área, que é denominada de área real de contato  $A_r$ .

Vários modelos foram propostos para se obter uma forma matemática da relação entre a aproximação da superfície (ou deformação normal da superfície -  $\lambda_n$ ), e a pressão específicos para determinado acabamento ou material; outros apresentavam restrições quanto ao nível da pressão normal aplicada; outro considerava um determinado pré-carregamento na junta.

Entretanto, todos pesquisadores concordam que a área real de contato  $A_r$  é proporcional a carga aplicada. Então, pode ser escrito:

$$F_n = K \cdot A_r \quad (2.1)$$

Sabe-se que a área real de contato é igual a soma das áreas individuais em contato. Se for considerado que uma área aparente tenha  $N$  pontos ou regiões de contato e que cada ponto apresente uma mesma área individual de contato  $A_i$ , tem-se:

$$A_r = N \cdot A_i \quad (2.2)$$

Considerando ainda, que estas áreas individuais permaneçam constante, mesmo para o aumento da pressão aplicada (isto não é o que ocorre na realidade), e definindo  $\phi(Z)$  como função densidade, cuja integral da função resulta na probabilidade do evento entre os valores limites; então, pode-se escrever <sup>7</sup>:

$$N = n \cdot A_a \int_0^{\lambda_n} \phi(Z) dZ \quad (2.3)$$

em que  $\int_0^{\lambda_n} \phi(Z) \cdot dZ$  apresenta a probabilidade do número de pontos em contato a uma aproximação  $\lambda_n$ , e  $n$  é o nº de pontos por unidade de área e  $z$  a profundidade.

Reunindo as equações (2.1), (2.2) e (2.3), temos:

$$P_n = \frac{F_n}{A_a} = a \int_0^{\lambda_n} \phi(Z) \cdot dZ \quad (2.4)$$

onde  $a$  = constante.

Assumindo a função densidade  $\phi(Z)$  <sup>2,7</sup> como:

$$\phi(Z) = b' \cdot z^{(1-M)/M} \quad (2.5)$$

em que  $b'$  e  $M$  são constantes, a equação (2.4) fica reduzida a:

$$P_n = a \cdot b' \cdot M \cdot \lambda_n^{1/M} \quad (2.6)$$

ou,

$$\lambda_n = C \cdot P_n^M \quad (2.7)$$

em que

$$C = (a \cdot b \cdot M)^{-M}$$

A equação (2.7) em geral é apresentada usando  $\lambda_n$  em  $\mu\text{m}$ ,  $P_n$  em  $\text{kgf/cm}^2$  e os valores de  $C$  e  $M$  são parâmetros característicos dos acabamentos superficiais e materiais. Vários pesquisadores adotam esta equação como solução para as curvas obtidas experimentalmente. No item 2.6, está apresentada a Tabela 2.4 destes parâmetros obtidos por vários pesquisadores.

Definiu-se a rigidez normal da superfície usinada por unidade de área  $R_N$  como a relação da variação da pressão normal sobre a área aparente da junta, pela variação da deformação das superfícies. Com base na equação (2.7), pode-se obter:

$$R_N = \frac{dP_n}{d\lambda_n} = \frac{P_n(1-M)}{C \cdot M} \quad (2.8)$$

Se uma junta está sujeita a um pré-carregamento inicial (pressão  $P_{n0}$ ), então a equação (2.7) toma a forma de:

$$\lambda_n = C \left[ (P_{n0} + P_n)^M - P_{n0}^M \right] \quad (2.9)$$

e a rigidez normal:

$$R_N = \frac{(P_{n0} + P_n)^{1-M}}{C \cdot M} \quad (2.10)$$

Analisando as equações (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10), verifica-se que a relação da deformação das rugosidades  $\lambda_n$  com a pressão aplicada  $P_n$  e a rigidez da superfície usinada ( $R_N$ ) são funções dos parâmetros  $C$  e  $M$ , e estes função do par de material da junta, bem como do acabamento superficial.

Para a determinação destes fatores, são realizados testes experimentais com modelos de pequena área aparente  $A_a$ , pa

ra que se possa desprezar os erros de planicidade e considerar um contato uniformemente distribuído. DOLBEY e BELL <sup>7</sup>, por exemplo, usaram modelos de seção quadrada de 76 mm (3 polegadas) de lado, a uma pressão normal  $P_n$  máxima de 5 kgf/cm<sup>2</sup>, e os valores de C e M foram obtidos para as deformações  $\lambda_n$  a pressões de 2,45 e 4,3 kgf/cm<sup>2</sup>, usando as relações:

$$M = \frac{\log \left( \frac{\lambda_{n1}}{\lambda_{n2}} \right)}{\log \left( \frac{4,30}{2,45} \right)} \quad (2.11)$$

$$C = \frac{\log \lambda_{n1}}{(4,30)^M} \quad (2.12)$$

em que  $\lambda_{n1}$  e  $\lambda_{n2}$  correspondem às deformações  $\lambda_n$  a pressões de 2,45 e 4,3 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

OSTROVSKII <sup>9</sup> também utilizou um modelo com seção quadrada, mas de 25 mm (1 polegada) de lado, para pressões até 30 kgf/cm<sup>2</sup>. Os parâmetros foram obtidos em gráfico bi-logarítmico, com aproximação de uma reta pelo método dos mínimos quadrados.

A figura 2.2, apresenta curvas experimentais obtidas por DOLBEY e BELL para pressões normais  $P_n$  de até 5 kgf/cm<sup>2</sup> para o ferro fundido cinzento, "Ferobesto" tipo LA 3, "Tufnol", Glacier D.U., Glacier D.X., onde pode ser observado a existência de histerese para as curvas 4 e 8, mas não de deformações plásticas.

Experiências similares foram obtidas por LEVINA e OSTROVSKII, cujas curvas resultantes estão apresentadas pelas figuras 2.3 e 2.4, respectivamente.

LEVINA <sup>1,8</sup> apresenta uma comparação entre os diversos graus de acabamento para o rasquetado em modelos de ferro fundido, para pressões de até 12 kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto OSTROVSKII analisa também outros acabamentos como o retificado e o plainado.

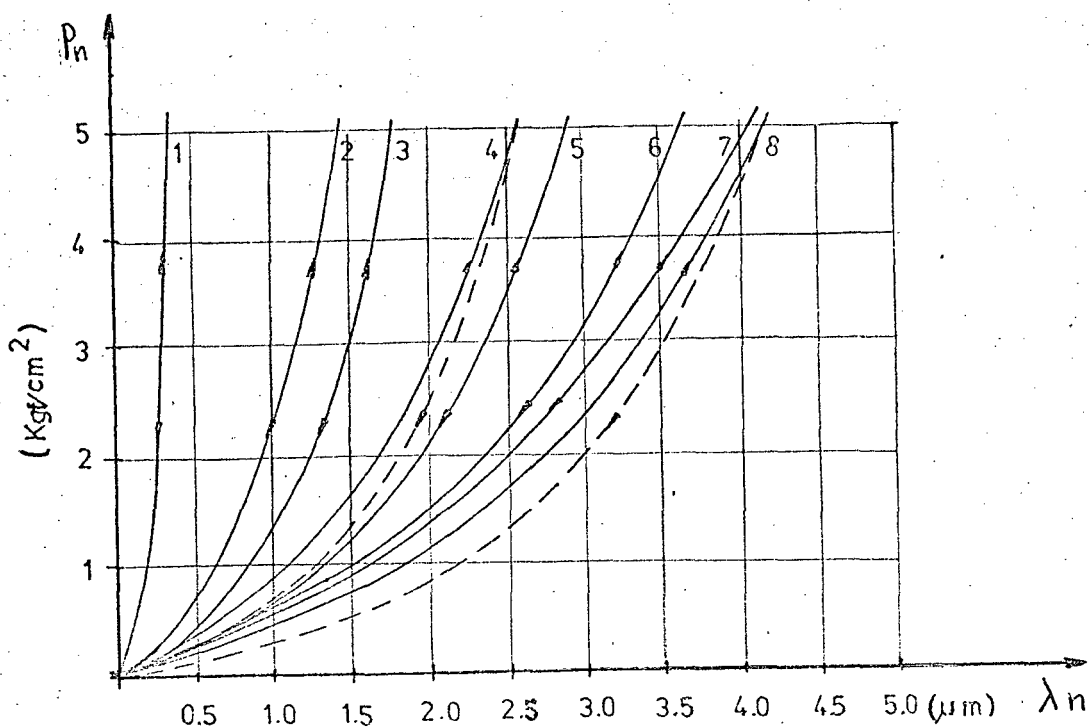


Fig 2.2 - Curvas experimentais obtidas por DOLBEY e BELL <sup>7</sup>. Relação da pressão  $P_n$  e a deformação das rugosidades para os seguintes materiais e acabamentos superficiais: 1-Ferro fundido (FoFo), lapidada (ambas as superfícies); 2-FoFo, retificado (ambas); 3-Fofo, retificado/rasqueteado; 4-FoFo/ferrosbesto, retificadas; 5-FoFo, retificado/glacier DX retificado; 6-FoFo retificado/glacier DX retificado de copo; 7-FoFo retificado/glacier DU bruto; 8-FoFo retificado/Tufuol retificado.

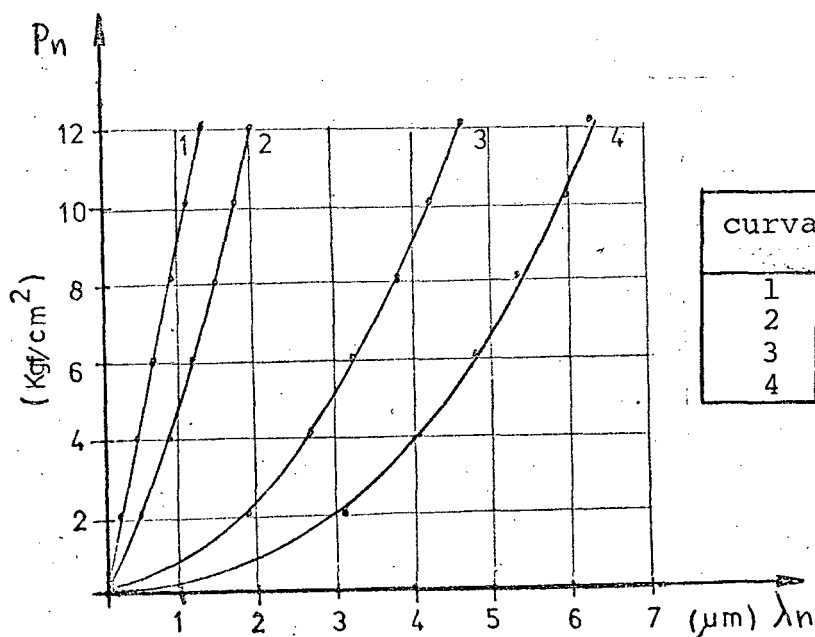


Fig. 2.3 - Curvas experimentais obtidas por LEVINA <sup>8</sup>. Relação entre a pressão normal  $P_n$  e a deformação das rugosidades  $\lambda_n$  para o ferro fundido, rasqueteado.



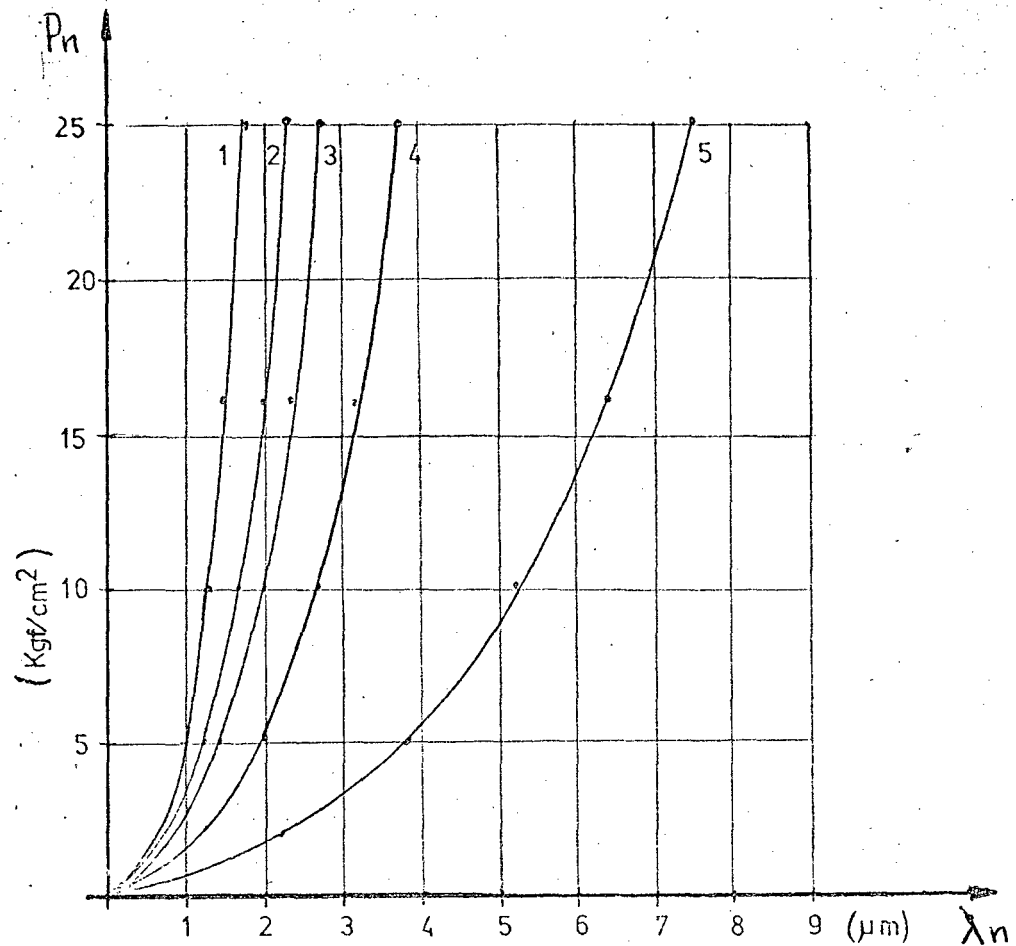


Fig. 2.4 - Curvas experimentais obtidas por OSTROVSKII<sup>9</sup>. Relação da pressão normal  $P_n$  e a deformação da rugosidade  $\lambda_n$  para os seguintes acabamentos do ferro fundido: 1 - retificado; 2 - rasqueteado ( $Q = 4 - 6$  pontos/ $\text{cm}^2$ ); 3 - plainado fino; 4 - rasqueteado médio; 5 - rasqueteado grosseiro ( $Q = 1 - 1,5$  pontos/ $\text{cm}^2$ )

### 2.3 - Outras equações propostas por pesquisadores

LEVINA <sup>8</sup> recomenda para uma primeira aproximação, a linearização da equação (2.7), ou seja:

$$\lambda_n = K \cdot P_n \quad (2.13)$$

onde o valor de  $K$  deve ser obtido experimentalmente.

Mostrou que o resultado do uso da equação (2.13) dá aproximações aceitáveis, para um cálculo grosseiro. Recomenda, em especial, o uso desta equação para superfícies com pré-carregamento. Neste caso, a rigidez será inversamente proporcional a  $K$  e independente de  $P_n$ , ou seja:

$$RN = \frac{\Delta P_n}{\Delta \lambda_n} = \frac{1}{K} \quad (2.14)$$

CONNOLLY <sup>5,9</sup> apresentou uma solução exponencial, válida para o caso em que os modelos acham-se submetidos a um pré-carregamento inicial  $P_{n0}$ :

$$P_n = P_{n0} \cdot e^{b \cdot \lambda_n} \quad (2.15)$$

em que o parâmetro  $b$  é função do par de materiais e do acabamento superficial.  $P_n$  é apresentado em  $\text{kgf/cm}^2$  e  $\lambda_n$  em  $\mu\text{m}$ . De acordo com a tabela apresentada pelo autor,  $P_{n0}$  deve ser maior ou igual a  $8 \text{ kgf/cm}^2$ . Com a equação (2.15), tem-se para a rigidez normal:

$$RN = b \cdot P_n \quad (2.16)$$

ou seja, a rigidez é diretamente proporcional a  $b$  e à pressão normal  $P_n$ .

Outros autores <sup>11,12,14</sup>, propuseram equações do tipo

$$\lambda_n = A \cdot \log P_n + B \quad (2.17)$$

onde os valores de  $A$  e  $B$  dependem do material e acabamento superficial.

BURDEKIN e BACK<sup>13</sup>, adotaram um modelo de superfície, constituído por um número de barras prismáticas de igual rigidez, com distribuição linear de alturas. A figura 2.5 apresenta o modelo adotado.

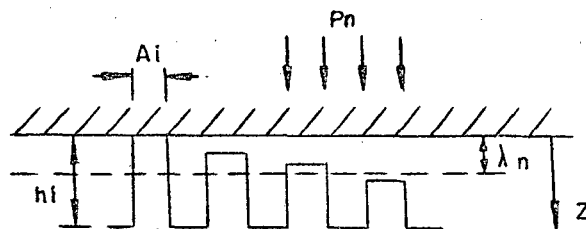


Fig. 2.5 - Modelo de superfície proposto por BURDEKIN e BACK<sup>13</sup>.

Sendo a distribuição das alturas linear, na distância  $Z$ , abaixo da posição inicial de contato, o número de pontos em contato por unidade de área ( $n$ ), aumenta linearmente com  $Z$ , ou conforme a equação,

$$n = A_0 \cdot Z \quad (2.18)$$

Definiu-se rigidez normal de cada barra individual ( $R_{ni}$ ) como:

$$R_{ni} = E \cdot \frac{A_i}{h_i} \quad (2.19)$$

Considerou-se ainda que cada barra tenha a mesma rigidez; então, a relação  $A_i/h_i$  deve ser a mesma para todas as barras.

A aplicação de uma pressão normal  $P_n$  à superfície provocará uma deformação  $\lambda_n$ , ou conforme a figura 2.5, um deslocamento  $Z = \lambda_n$ . A rigidez normal é proporcional ao número de barras em contato, ou:

$$RN = \frac{dP_n}{d\lambda_n} = R_{ni} \cdot n = R_{ni} \cdot A_o \cdot \lambda_n \quad (2.20)$$

$$P_n = \int R_{ni} \cdot A_o \cdot \lambda_n \cdot d\lambda_n = R_{ni} A_o \frac{\lambda_n^2}{2} \quad (2.21)$$

ou

$$RN = (2 \cdot R_{ni} \cdot A_o \cdot P_n)^{0,5} \quad (2.22)$$

ou ainda

$$RN = Y \cdot P_n^{0,5} \quad (2.23)$$

Comparando a equação (2.22) e (2.23) com a eq. (2.8), observa-se certa semelhança. Como foi verificado pelos diversos pesquisadores<sup>2,7,8,9</sup>, o parâmetro M permanece aproximadamente constante, igual ao valor 0,5. A equação (2.8) toma a seguinte forma:

$$RN = \frac{2}{C} \cdot P_n^{0,5} \quad (2.24)$$

que está de perfeito acordo com as equações (2.22) e (2.23), em que:

$$Y = \sqrt{2 R_{ni} A_o} = \frac{2}{C} \quad (2.25)$$

#### 2.4 - Fatores que afetam a rigidez normal de superfícies usinadas

Os parâmetros C e M da equação (2.7), dependem dos seguintes fatores:

- par de materiais;
- processo de usinagem;
- altura das rugosidades;
- orientação mútua das estrias de usinagem;
- dureza superficial;

- erro de planicidade;
- tamanho da área de contato.

A seguir, serão analisados estes diversos fatores.

#### 2.4.1 - Influência do par de materiais

Sendo a aproximação das superfícies do tipo elástico, plástico ou a soma dos dois tipos, pode se dizer que a rigidez normal aumenta com o aumento das propriedades mecânicas dos materiais (módulo de elasticidade  $E$ , tensão de escoamento  $\sigma_e$ ).

Para juntas de máquinas ferramentas, só é de interesse, do ponto de vista de rigidez, o regime elástico das rugosidades. Então, para um dado acabamento superficial, para diferentes materiais, a rigidez da superfície resultante será caracterizada pelas propriedades elásticas do par de materiais.

A partir dos valores obtidos por diversos pesquisadores, notou-se que o parâmetro  $C$  varia para diferentes materiais (módulos de elasticidade diferentes), diferentes acabamentos superficiais, e ainda, para um mesmo processo de usinagem mas com diferentes alturas de asperezas, enquanto que o valor de  $M$  permanece aproximadamente igual a 0,5 (entre 0,4 e 0,6). Considerando então o parâmetro  $M = 0,5$ , pode-se relacionar o parâmetro  $C$  com o módulo de elasticidade  $E$ . Da equação (2.8), nota-se que  $C$  é inversamente proporcional a rigidez. Por outro lado, a rigidez é diretamente proporcional ao módulo  $E$ . Então, pode-se relacionar  $C$  com  $E$ , definindo que o parâmetro  $C$  é inversamente proporcional a  $E$ , ou:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{E_2}{E_1} \quad (2.26)$$

em que 1 e 2 são índices representativos para dois materiais diferentes de mesmo acabamento superficial.

Para juntas constituídas de materiais diferentes, pode-se obter o correspondente valor de  $C$ , em função do módulo de elasticidade equivalente  $E_{eq}$ , ou seja,

$$\frac{C_j}{C_1} = \frac{E_1}{E_{eq}} \quad (2.27)$$

em que  $C_j$  corresponde ao parâmetro  $C$  para a junta constituída de dois materiais diferentes, com determinado  $E_{eq}$ , calculado em função de  $C_1$  de uma junta de material  $E_1$ , com mesmo material e mesma altura das asperezas.

#### 2.4.2 - Rugosidade superficial e influência de orientação das estrias de usinagem

A rugosidade superficial, está sempre presente em superfícies usinadas, mesmos nos melhores e mais finos acabamentos, e depende do processo de usinagem, velocidade e avanço usado. Os parâmetros principais específicos de rugosidades são:  $R_a$  (CLA) - média aritmética das alturas das asperezas;  $R_t$  - medida máxima entre o "pico e vale", no trecho analisado; e  $R_z$  - média entre os valores máximos parciais de cinco partes do trecho analisado.

Outro ponto a ser considerado é que a distribuição das alturas das asperezas pode ser de forma normal, exponencial, linear, uniforme ou em forma de potência, dependendo do processo de usinagem e suas características, conforme afirmaram BUC<sup>15</sup>, KRAGELSKII<sup>12</sup>, GREENWOOD<sup>16</sup>.

Considerando que as asperezas se comportam como molas lineares, pode-se então concluir que com o aumento da pressão normal, ter-se-á um aumento na área real de contato e um conseqüente aumento da rigidez. Para superfícies de mesmo processo de usinagem, mas diferentes alturas de asperezas  $R_t$ , tem-se diferentes rigidez: O parâmetro  $C$  da equação (2.7) será menor para a superfície que tiver o menor valor de  $R_t$ . Através de modelos teóricos, substituindo as asperezas por esferas, semi cilindros, barras ou

elipsóides e considerando a teoria de HERTZ, concluiu-se que para valores menores de rugosidade tem-se maior rigidez.

A tabela 2.1, apresenta resultados experimentais do parâmetro C, obtido por LEVINA<sup>1,8</sup> em pequenos modelos com área aparente de 80 a 100 cm<sup>2</sup>, para os diferentes graus do rasqueteadado. Considerou o parâmetro M como o valor médio = 0,5. Como pode ser visto nesta tabela, para o mesmo processo de acabamento superficial, o parâmetro C decresce para superfícies mais finas (menores R<sub>t</sub>).

TAB. 2.1 - Resultados experimentais de LEVINA<sup>1,8</sup>, onde se nota a influência do grau de acabamento superficial no parâmetro C.

Sup. rasqueteadas em contato		C
R <sub>t</sub> (μm)	Q = nº de pontos em contato/cm <sup>2</sup>	
15 - 20	1,5 - 2,0	1,8 - 2,0
6 - 8		1,3 - 1,5
6 - 8	2,0 - 3,0	0,8 - 1,0
6 - 8	3,0 - 4,0	0,5
3 - 5		0,3

CONNOLLY<sup>5</sup>, através de estudo realizado com modelos de aço de pequena área de contato, acabamento plainado e torneado, concluiu que é válida a relação,

$$b \cdot CL = A \quad (2.28)$$

em que A é uma constante; CL é o valor da rugosidade R<sub>a</sub> (CLA) da superfície; e b é o parâmetro das equações (2.15) e (2.16). Da equação (2.16), verifica-se que a rigidez é diretamente proporcional a b e da equação (2.28) nota-se que b é inversamente proporcional ao parâmetro de rugosidade R<sub>a</sub>, donde pode-se mais

uma vez concluir que a rigidez é inversamente proporcional à rugosidade.

Quanto a influência da orientação mútua das estrias de usinagem, pode-se citar como exemplo, os resultados experimentais para as superfícies torneadas e plainadas com idênticos valores dos parâmetros de rugosidade onde as estrias são de forma espiral e paralela, respectivamente. SCHOFIELD<sup>18</sup> estudou esta influência na rigidez de juntas e verificou que com o aumento do ângulo de orientação da estria, a rigidez é levemente aumentada, que contrariou as considerações teóricas da referência.

SCHLOSSER<sup>19</sup> testou a influência dos acabamentos superficiais lapidado, rasquetado e retificado com  $R_t$  menor que  $2 \mu\text{m}$ , em um flange circular parafusado de aço, e concluiu que a rigidez apresentada para os casos era a mesma. Testou então os acabamentos torneados e plainados. O controle de qualidade das superfícies era tal que quando da montagem ter-se-ia asperezas paralelas. Também o perfil transversal de ambas superfícies eram de mesma ordem. Tomou-se como padrão a rigidez para superfícies retificadas com valor 100%. A tabela 2.2 apresenta os resultados obtidos.

TAB. 2.2 - Resultados experimentais de SCHLOSSER<sup>19</sup> com comparação dos acabamentos superficiais: retificado (padrão) apresenta  $RN = 100\%$ .

SUPERFÍCIE	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	RN (%)
Torneado	30	94
	115	70
	300	68
Plainado	30	98
	100	99
	350	94



Nota-se uma grande diferença em relação aos dois tipos de acabamentos apresentados. As superfícies plainadas, desde que sejam rigorosamente controladas durante a montagem, apresentam uma maior área de contato que a torneada. Pode-se concluir que a influência da orientação das estrias está diretamente ligado a área real de contato: qualquer parâmetro que aumenta a área real de contato, melhora também a rigidez da superfície.

#### 2.4.3 - Influência da dureza superficial

DOLBEY e BELL <sup>7</sup> testaram a influência da dureza superficial usando modelos de ferro fundido submetido a baixas pressões de contato (até 5 kgf/cm<sup>2</sup>), com área aparente de 58 cm<sup>2</sup> (seção quadrada de 76 mm - 3 pol. - de lado), suficientemente para desconsiderar os efeitos de erros de planicidade. Sua conclusão foi de que a dureza superficial não tem nenhuma influência na rigidez da superfície.

CONNOLLY <sup>20</sup> também verificou esta influência, usando modelos de ferro fundido, com superfícies torneadas e plainadas, mas para altas pressões, até 1600 kgf/cm<sup>2</sup> com tratamento térmico. Para altas pressões, a influência da rigidez tem efeito negativo. No primeiro carregamento, a deformação total é a soma de deformações elásticas e plásticas. Foi observado que a deflexão total decresce com aumento da dureza, pois a parte plástica é diminuída consideravelmente. Após o descarregamento, e sem separar as superfícies, outro carregamento é aplicado, até o valor limite (o do primeiro nível). Verificou-se que as deformações tornam-se maiores a medida que a dureza das superfícies é aumentada. Neste segundo ciclo de carga, as rugosidades já apresentavam um comportamento elástico. A explicação para tal fato, é de que o tratamento térmico aumenta a tensão de escoamento, mas não aumenta o módulo de elasticidade do material. Para superfícies de baixa dureza, o primeiro carregamento provoca uma considerável deformação plástica, que aumenta a área real de contato; conseqüentemente, tem-se maior rigidez.

Aumentando a dureza superficial dos elementos em contato, tem-se menores deformações plásticas, menores áreas de contato e menor rigidez.

#### 2.4.4 - Erro de planicidade e tamanho da área aparente de contato.

A análise destes dois fatores pode ser feita como uma única influência, pois quando o tamanho da superfície de contato aumenta, também aumenta a probabilidade de erros de planicidade.

BUC e NOWICKI<sup>15</sup>, verificaram que para uma pressão de contato constante ( $P_n$ ), o valor relativo da área real de contato decresce com o aumento da superfície aparente. Daí, pode-se concluir que a rigidez normal da superfície usinada por unidade de área decresce para maiores áreas aparentes nominais.

CONNOLLY<sup>20</sup> testou modelos de aço de forma anular, de mesma área aparente de contato, mas diferentes diâmetros externos, usando a equação (2.15), que relaciona a deformação das rugosidades  $\lambda_n$  e a pressão normal  $P_n$  aplicada. A equação (2.16) apresenta a relação da rigidez para a solução da equação (2.15). Ou seja, a rigidez normal é função do parâmetro  $b$  e da pressão normal a que está submetido a junta. Baseado nestas equações, CONNOLLY concluiu que, para os modelos de maiores dimensões, e mesmo tipo e grau de acabamento e material, o parâmetro  $b$  decresce e, conseqüentemente a rigidez das superfícies analisadas. Verificou-se ainda que a superfície fresada entre as analisadas, é a menos sensível a erros de planicidade. Comparando ainda uma superfície rasquetada e outra plainada, verificou que na rasquetada, os erros de planicidade são eliminados, devido a forma de acabamento. Para a superfície plainada, a rigidez é bastante afetada, pelos erros de planicidade.

TENNER<sup>6</sup>, estudando este efeito, mediu a rigidez de guias de sete furadeiras de coordenadas de mesmo modelo, quando era aplicado torque no eixo vertical. Analisando teoricamente as guias, baseado na equação (2.7), verificou que os resultados teóricos eram de 5 a 13 vezes maior do que os valores obtidos experimentalmente. Caso fosse obtido uma relação constante entre o valor teórico e o

experimental, poder-se-ia explicar tal fato como resultante de deformações elásticas dos elementos que compõem aquelas máquinas. Mas os resultados apresentaram dispersão, e tal fato foi atribuído aos erros de usinagem das usperfícies de contato ou erros de planicidade. A solução proposta para diminuir tal efeito, foi do uso de áreas de contato de ressalto, conforme mostra a figura 2.6. Para os ressaltos foram propostos três situações:

1. largura ( $b_0$ ) permanecer constante; conclui-se que a relação ótima é  $l/L = 0,56$ .
2. com aumento de  $b_0$ , deve ser aumentado  $l/L$  para se obter um aumento na rigidez; entretanto, não existe um valor ótimo.
3. largura ( $b_0$ ) e pressão normal constante. Para os valores de  $l/L$  de 0,4 a 0,6, pode-se considerar uma pequena perda de rigidez. Para valores maiores a rigidez é mais afetada.

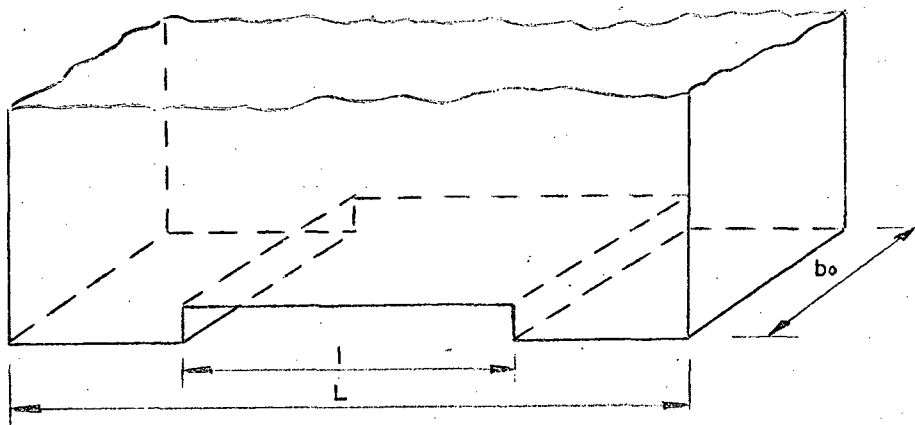


Fig. 2.6 - Detalhe construtivo da área de contato de ressalto, proposta por TENNER<sup>6</sup>.

A conclusão de utilizar áreas de contato de ressalto é que se consegue um aumento na rigidez (resultado experimental) de um fator 3, e até mais.

Desta maneira, pode-se diminuir as influências dos erros de planicidade em juntas de maiores dimensões.

LEVINA<sup>8</sup> apresenta na tabela 2.3 a relação entre a pressão  $P_n$  e a deformação  $\lambda_n$  para os diversos tipos de erros de planicidade: côncavo, convexo, conicidade, biconicidade e ondulação, esta representada por uma curva cosenoidal. Para obtenção de tais equações, partiu da equação (2.7) que rege o comportamento das rugosidades no regime elástico, acrescido das equações das irregularidades, conforme a forma do erro de planicidade.

TENNER<sup>6</sup> também estudou o efeito do erro de planicidade. Para isto, definiu os seguintes parâmetros:

$$K\lambda_n = \frac{\lambda_{n1}}{\lambda_n} \quad (2.29)$$

$$Kk = \frac{K_1}{K} \quad (2.30)$$

$$K\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \quad (2.31)$$

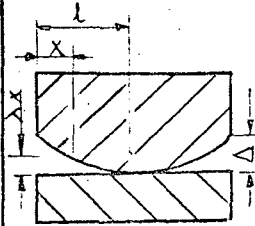
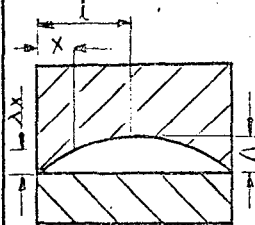
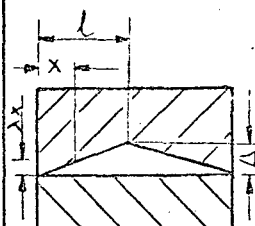
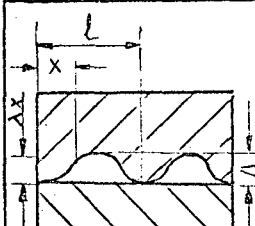
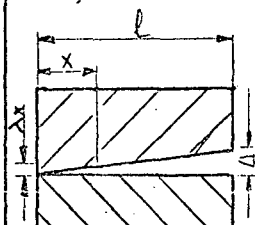
onde  $\lambda_{n1}$  é a aproximação das superfícies no centro da junta com ondulosidade determinada;  $K_1$  é a rigidez normal da superfície e  $\varepsilon_1$  é a rigidez angular desta superfície ondulosa e  $\lambda_n$ ,  $K$  são os mesmos valores definidos acima, mas sem levar em conta as ondulosidades de acordo com as equações (2.7) e (2.8) e através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot P_n^{1-M} J}{100 \cdot C \cdot M} \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.32)$$

onde  $J$  é o momento de inércia de uma superfície em relação a um eixo que passa em seu centro, e  $\alpha$  é o ângulo entre uma normal a uma superfície e a normal a outra deformada.

A figura 2.7, apresenta um tipo de superfície analisada, onde estão indicadas as características geométricas. Outros tipos de ondulações, com maior número de ondas, também são analisados (vide figura 2.8).

TAB. 2.3 - Relações teóricas da relação da pressão  $P_n$  em função da deformação  $\lambda_n$ , para diversos tipos de erros de planicidade. LEVINA<sup>1</sup>

FORMA DE IRREGULARIDADE	EQUAÇÃO DA IRREGULARIDADE	RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO $P_n$ E DEFORMAÇÃO ELÁSTICA $\lambda_n$ ( $M = 0,5$ )	
	$\lambda_x = \Delta \frac{x^2}{l^2}$	$\lambda_n < \Delta$	$P_n = \frac{8}{15} \frac{\lambda_n^2}{c^2} \sqrt{\frac{\lambda_n}{\Delta}}$
		$\lambda_n > \Delta$	$P_n = \frac{1}{c^2} \left( \lambda_n^2 - \frac{2}{3} \Delta \lambda_n + \frac{\Delta^2}{5} \right)$
	$\lambda_x = 4\Delta \frac{x}{l} \left( 1 - \frac{x}{l} \right)$	$\lambda_n < \Delta$	$P_n = \frac{1}{3 \cdot \Delta \cdot c^2} \cdot \lambda_n^2$
		$\lambda_n > \Delta$	$P_n = \frac{1}{c^2} \left( \lambda_n^2 - \frac{4}{3} \Delta \lambda_n + \frac{8}{15} \Delta^2 \right)$
	$\lambda_x = \Delta \cdot \frac{x}{l}$	$\lambda_n < \Delta$	$P_n = \frac{1}{3 \cdot \Delta \cdot c^2} \cdot \lambda_n^3$
		$\lambda_n > \Delta$	$P_n = \frac{1}{3 \cdot \Delta \cdot c^2} \left[ \lambda_n^3 - (\lambda_n - \Delta)^3 \right]$
	$\lambda_x = \frac{\Delta}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right)$	$\lambda_n < \Delta$	$P_n = \frac{2}{3} \left\{ \left[ \left( \lambda_n - \frac{\Delta}{2} \right)^2 + \frac{\Delta^2}{8} \right] \cdot \frac{l}{l} - \frac{3}{4\pi} x \cdot \left( \frac{\Delta}{2} - \lambda_n \right) \sqrt{\lambda_n \left( \Delta - \lambda_n \right)} \right\}$
		$\lambda_n > \Delta$	$P_n = \frac{1}{c^2} \left[ \left( \lambda_n - \frac{\Delta}{2} \right)^2 + \frac{\Delta^2}{8} \right]$
	$\lambda_x = \Delta \frac{x}{l}$	$\lambda_n < \Delta$	$P_n = \frac{1}{3 \cdot \Delta \cdot c^2} \cdot \lambda_n^3$
		$\lambda_n > \Delta$	$P_n = \frac{1}{3 \cdot \Delta \cdot c^2} \left[ \lambda_n^3 - (\lambda_n - \Delta)^3 \right]$

Na figura 2.9, vê-se as curvas correspondentes aos parâmetros  $K\lambda_n$  e  $Kk$ , definidos pelas equações (2.30) e (2.31) e na figura 2.10 é apresentado a variação do parâmetro  $K\epsilon$  em função da relação  $\lambda_n/\Delta$ , para os tipos de ondulação consideradas. Pode ser concluído que o aumento do número de ondas nas faces das juntas, só influenciam o fator  $K\epsilon$ . Por exemplo, a troca de um perfil de convexo para côncavo, para a mesma pressão  $P_n=0,5\text{kgf/cm}^2$  com erro de planicidade  $\Delta = 0,5\ \mu\text{m}$ , altera a rigidez angular de um fator 6. Para o erro de planicidade, tipo de duas ondas ou mais, a rigidez angular, para  $P_n = 0,5\ \text{kgf/cm}^2$  e  $\Delta = 3\ \mu\text{m}$ , difere de um fator de aproximadamente 2, em relação a junta de uma onda só.

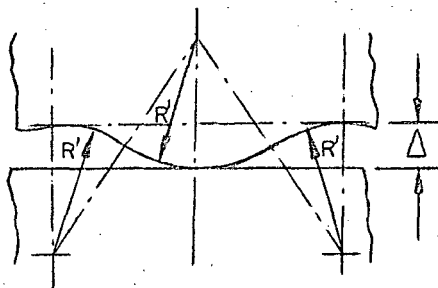


Fig. 2.7 - Detalhe da forma geométrica de um tipo de erro de planicidade, proposto por TENNER 6.

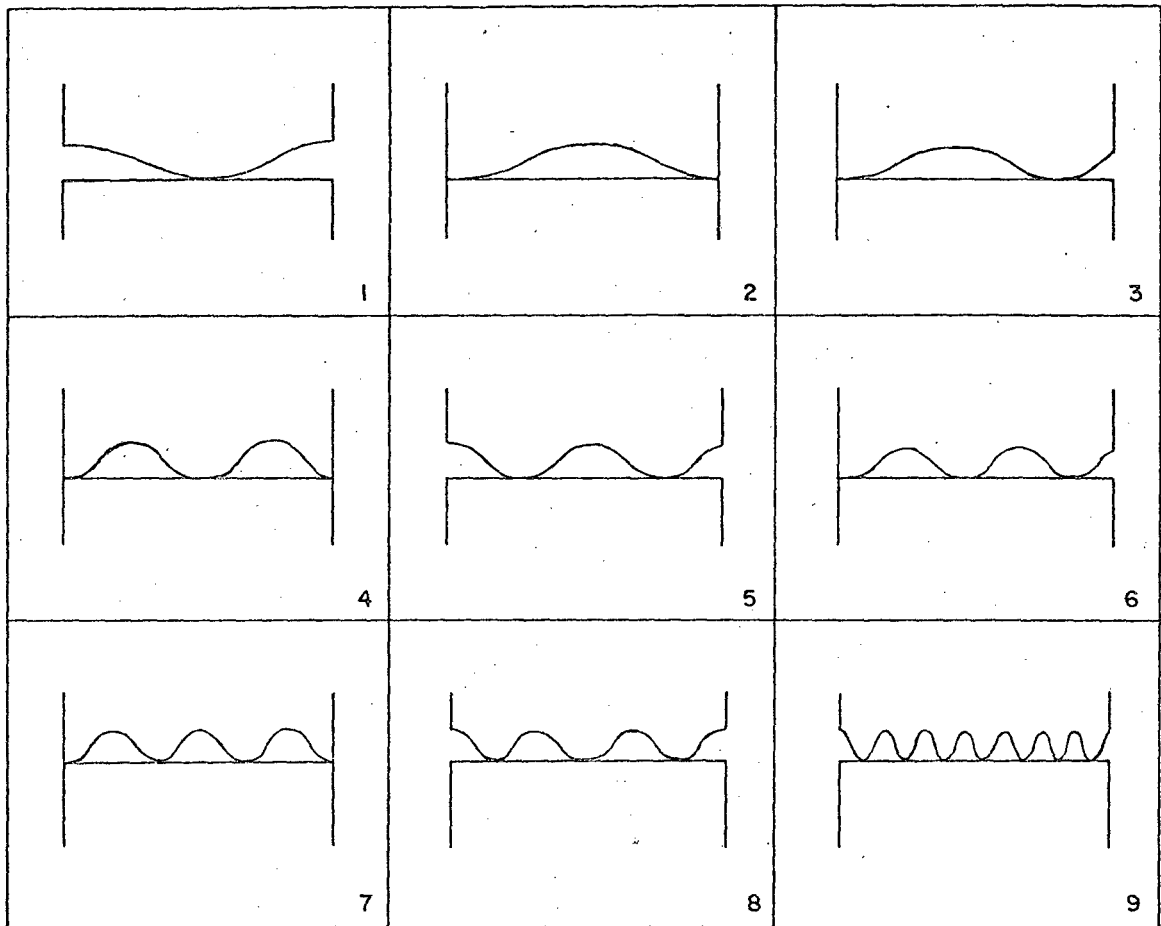


Fig. 2.8 - Demais tipos de erro de planicidade, analisados por TENNER <sup>6</sup>.

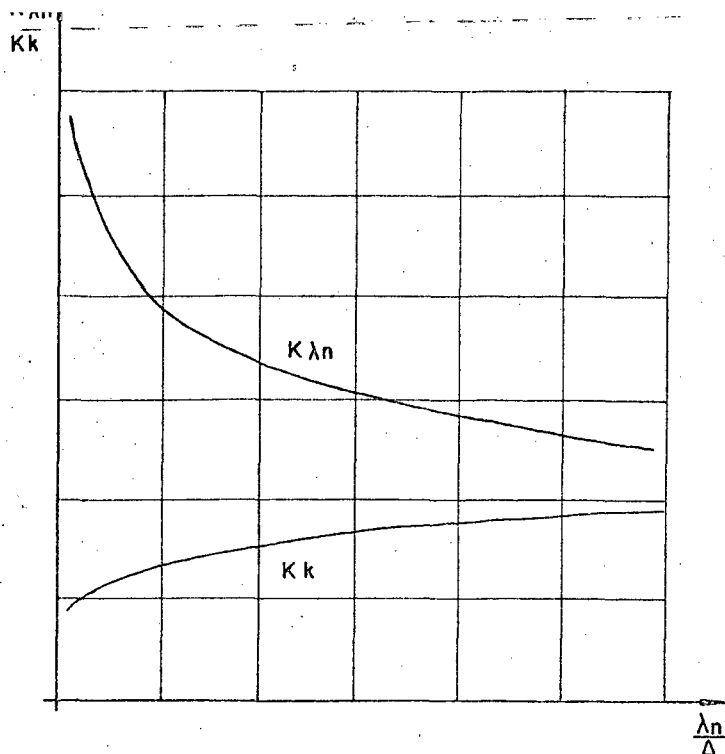


Fig. 2.9 - Curvas experimentais resultantes da comparação dos parâmetros  $K_R$  e  $K_\epsilon$  em função de  $\lambda_n/\Delta$ , para os diversos tipos de erros de planicidade. TENNER<sup>6</sup>

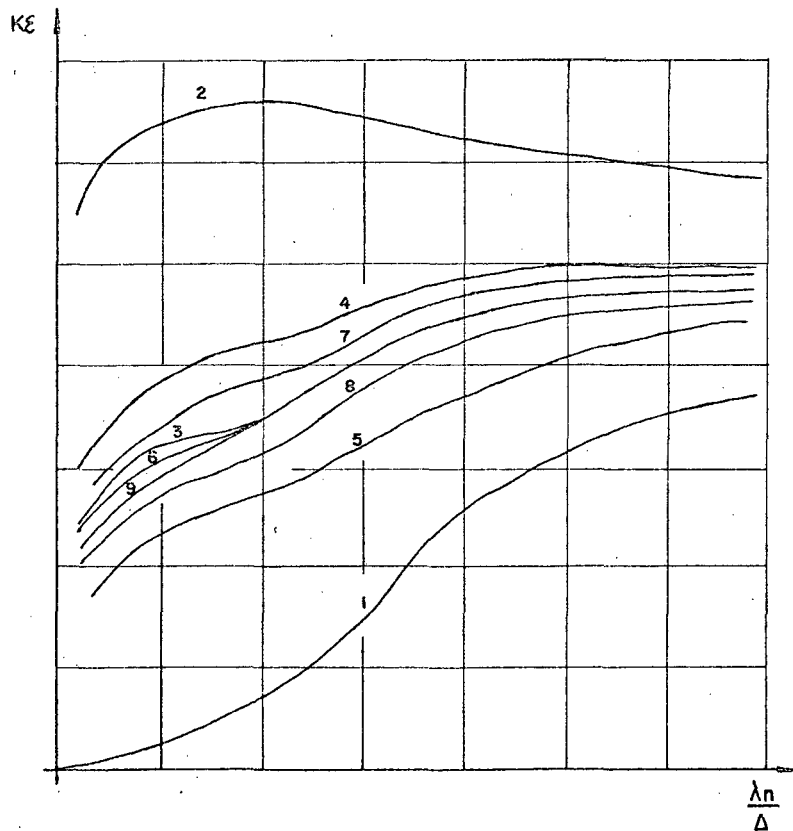


Fig. 2.10 - Curvas experimentais resultantes da comparação de  $K_\epsilon$  em função de  $\lambda_n/\Delta$ , para os diversos tipos de erros de planicidade. TENNER<sup>6</sup>



## 2.5 - A área real de contato

Um dos principais problemas a serem resolvidos para de terminar a deformação de superfícies usinadas é o perfeito conhecimento da área real de contato. Sabe-se que conforme o tipo e o grau do acabamento superficial, tem-se uma distribuição da altura das asperezas que podem ser uniforme, normal, exponencial, parabólica ou linear.

Até então, não se conseguiu uma equação empírica ou relacionamento teórico simples, que facilitasse o trabalho do projeto no dimensionamento de juntas de máquinas ferramentas.

KRAGELSKII <sup>12</sup>, em sua pesquisa bibliográfica, apresenta a primeira equação para o cálculo da área real de contato, obtida por Zhunavlev, que usou o modelo das asperezas hemisféricas, com distribuição linear das alturas:

$$A_r = k \left( \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot E} \right)^{10/11} \cdot F_n^{10/11} \quad (2.33)$$

onde  $k$  é uma constante que depende das dimensões dos hemisférios.

BOWDEN e TABOR consideraram as asperezas como cones truncados. RUBINSTEIN adotou o modelo de superfícies constituídas de semi-esferas e semi cilindros de mesmo raio e distribuição uniforme das alturas.

Outros pesquisadores também tentaram equacionar outras soluções, mas sempre um dado como raio do hemisfério, altura do tronco de cone, etc., que são de difícil obtenção, impediram o uso das equações.

KRAGELSKII, em sua pesquisa teórica, toma como referência a relação da área real pela área aparente de contato. Desta relação pode ser obtida o percentual da área real de contato. Analisa as seguintes situações, baseada na teoria de Hertz:

- superfície rugosa representada por hemisférios de raio  $r$ , com alturas distribuídas uniformemente;
- superfície rugosa representada por um conjunto de barras de diferentes comprimentos;
- superfície rugosa e um plano rígido sem endurecimento, contato elástico-plástico;
- contato com endurecimento;
- superfícies rugosas nas quais as asperezas são distribuídas aleatoriamente: área real de contato e área individual de contato.

No setor experimental, os seguintes métodos são apresentados:

- Método da resistência elétrica - BOWDEN E TABOR propuseram determinar a área de contato medindo a resistência elétrica das superfícies rugosas.
- Método do raio de luz - desenvolvido por Friction and Frictional Material Laboratory, que utiliza como modelos, corpos transparentes. Baseia-se no princípio de que o raio de luz quando passa de um meio de alta a outro com densidade ótica diferente, é desviado da sua direção original. Para as superfícies em contato quando pressionadas, o raio de luz que atravessa as áreas reais de contato permanecem na mesma direção, enquanto as demais são desviadas. Pela relação da quantidade de luz emitida e quantidade de luz recebida, obtém-se a cota da área real de contato. Recomenda-se o uso de cloreto de prata,  $\text{AgCl}_2$ , conhecido como metal transparente, que possui propriedades similares a do cobre. O erro percentual é de 30 a 40%. Não deve ser usada para superfície muito plana
- Método ótico de Mechau - Baseado na reflexão da luz, nos pontos de contato entre um prisma de vidro (superfície padrão) e uma superfície rugosa. Como vantagem apresenta confiança dos resultados e possibilidade da observação direta do processo. A desvantagem é que a área medida é levemente maior do que a área real, devido a reflexão da luz no segundo meio

(parte sem contato). Equipamento fabricado pela Visoport.

BUC e NOWICKI <sup>15</sup> desenvolveram uma teoria para o caso de contato elástico de superfícies rugosas, constituída de semi-esferas em relação a um plano rígido. Adotou a teoria de Hertz, onde considerou que os corpos em contato eram isotrópicos e obedecem a lei de Hooke; a carga aplicada é normal a superfície de contato. Adotou distribuição normal de Gauss das alturas das asperezas, a partir da análise do registro das rugosidades.

Os métodos experimentais sugeridos por BUC e NOWICKI para medição da área real de contato, foram:

- Método ótico de Mechau - descrito acima.
- Método da luminescência - que se baseia na medida dos micro contatos da superfície usando o fenômeno da emissão de luz pelos materiais luminescentes sob influência da radiação ultra violeta. É interposta entre as superfícies a serem analisadas, uma camada de material luminescente de espessura especificada. Se a camada for bem fina, então a altura da rugosidade da área real pode ser determinada. Para camadas mais grossa, só pode ser medido a altura do macro superfície de contato. A precisão do método é de  $\pm 10\%$ .
- Método da "refletometria" - a medida da área real de contato se baseia na intensidade de luz refletida nos picos de rugosidade, quando em contato com uma superfície padrão. A superfície a ser analisada pode ser coberta com um absorvente ótico (substância que absorve luz), que é removida dos picos da rugosidade pelo movimento da superfície padrão. O fluxo de luz é incidido sobre a superfície de maneira que se possa captar a luz refletida.

Pode ser concluído, que a perfeita determinação da área real de contato de superfícies usinadas, por método experimental ou com uso de fórmulas empíricas (com parâmetros específicos em função do acabamento superficial, material e nível de pressão aplicada) ainda é de difícil obtenção.

## 2.6 - Valores de C e M obtidos por diversos pesquisadores

A tabela 2.4, apresenta um resumo dos parâmetros C e M, obtidos experimentalmente por diversos pesquisadores. Nesta tabela, são indicadas as fontes bibliográficas e os parâmetros de rugosidades superficiais; segue norma adotada pelos autores.

TABELA 2.4 - Resumo dos parâmetros C e M obtidos pelos pesquisadores.

MATERIAL	TIPO DE SUPERF.	REF.	Q Ptos./cm <sup>2</sup>	Rt ( $\mu$ m)	Ra ( $\mu$ m)	C	M
FoFo	Rasqueteado	6				0,63	0,5
	Rasqueteado	1,8,21	1,5-2,0	15-20		1,8-2,0	0,5
			1,5-2,0	6 - 8		1,3-1,5	
			2,5-3,0	6 - 8		0,8-1,0	
			3,0-4,0	6 - 8		0,5	
			3,0-4,0	3 - 5		0,3	
	Rasqueteado Retificado	1,8	2,5-3,0	6 - 8	1,0	0,8-1,0	0,4
	Retificado	1			1,0	0,6-0,7	0,4
Plainado fino				1,0	0,6	0,5	
Rasqueteado	3	1,0-2,0	15-20		1,5-2,0	0,5	
FoFo/Ferrosbestos	Retificado	7,20				3,98	0,32
FoFo/tufnol						2,36	0,40
FoFo	Retificado	7				0,66	0,50
FoFo/Glacier DÜ						1,77	0,50
FoFo/Glacier DX						1,74	0,43
FoFo/Glacier DX						2,29	0,41

## C A P Í T U L O 3

## RIGIDEZ TANGENCIAL DE SUPERFÍCIES USINADAS

## 3.1 - Generalidades

Em geral, uma junta está sempre sujeita a um sistema de forças que pode ser decomposto em forças normais e tangenciais, que são transmitidas às interfaces.

Mesmo que se considere apenas uma força normal aplicada à superfície de dois corpos em contato, devido a deformação dos mesmos, o deslocamento das superfícies não se fará somente no sentido normal, mas aparecerão também deslocamentos tangenciais que por sua vez, introduzirão forças tangenciais às superfícies.

Neste capítulo é apresentado a equação que relaciona a deformação e o carregamento tangencial de superfícies em contato bem como é mostrada a relação entre os parâmetros da rigidez normal e tangencial.

A partir, então, do perfeito conhecimento dos parâmetros específicos de rigidez normal, pode-se obter os parâmetros de rigidez tangencial que são mais difíceis de serem obtidos experimentalmente.

Este capítulo também analisa através de equações matemáticas, o comportamento das rugosidades, quando as forças tangenciais e normais são aplicadas simultaneamente, ou não.

## 3.2 - Deformação tangencial de superfícies usinadas

Pesquisas nesta área foram desenvolvidas por BACK<sup>2,3</sup>, KIRSANOVA<sup>22</sup> e ITO e MASUKO<sup>23</sup>. Foi verificado que quando se aplicam forças tangenciais às superfícies em contato até um determinado limite, aparecerão deslocamentos tangenciais, puramente elásticas. (vide fig. 3.1a,b, parte inicial do primeiro carregamento). Para cargas tangenciais acima deste limite, ocorre uma alteração da relação do carregamento - deslocamento tangencial.

Poder-se-ã justificar esta mudança de comportamento, em termos de deformações plásticas das asperezas, ou em termos de escorregamentos individuais de um determinado número de asperezas.

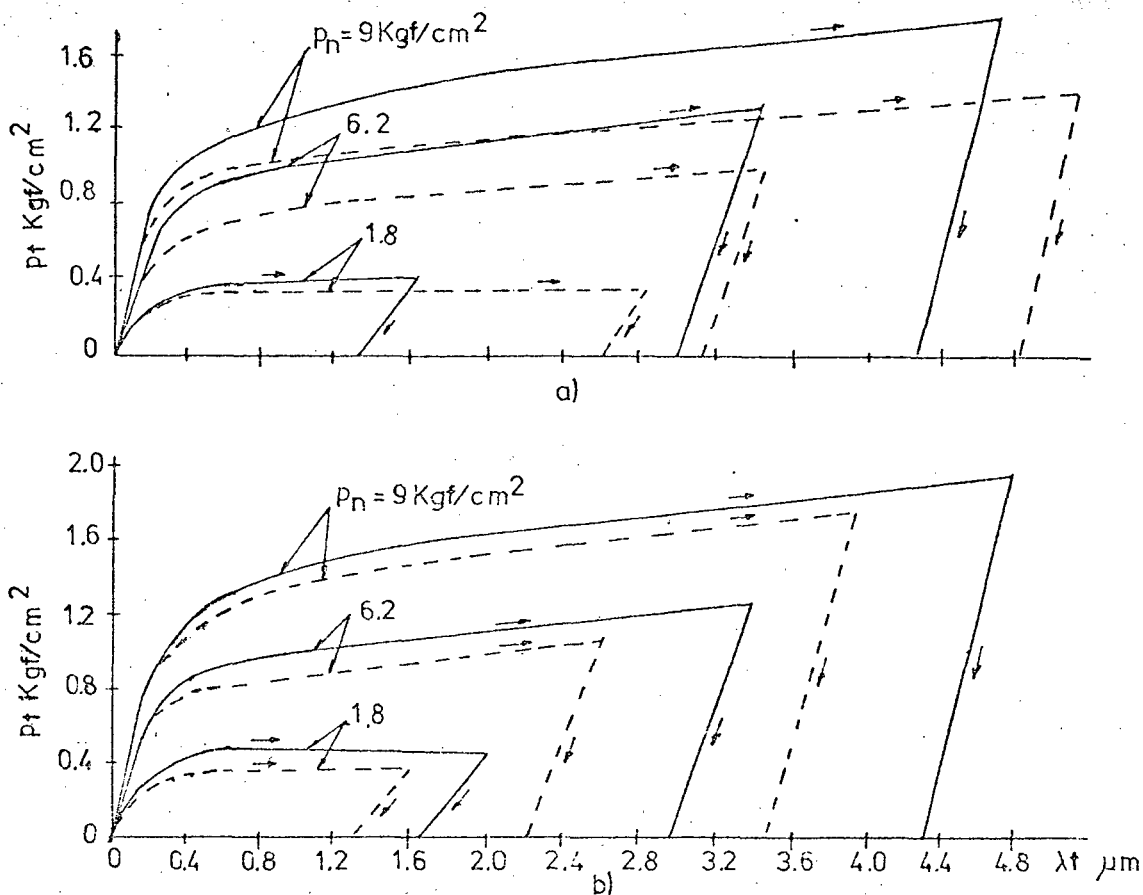


Fig. 3.1 - Resultados experimentais de KIRSANOVA. Deformação tangencial de superfícies de ferro fundido, uma retificada e outra rasqueteada - linhas contínuas para juntas secas e linhas tracejadas, para juntas lubrificadas - Primeiro carregamento e descarregamento. a) contato de 5 minutos; b) contato de 24 hs para junta seca e 5 min para junta lubrificada.

A figura 3.1 apresenta curvas resultantes da pesquisa de KIRSANOVA<sup>22</sup> usando modelo de ferro fundido cinzento com  $A_a = 225 \text{ cm}^2$ , com uma superfície retificada e outra rasqueteada. Linhas contínuas correspondem às juntas secas e tracejadas às juntas lubrificadas com óleo. Na figura 3.1.a o contato

foi de 5 min, enquanto que na figura 3.1.b, o contato para a junta seca foi de 24 horas e para junta lubrificada de 5 min. Foi verificada ainda que, para o recarregamento quando não se excedesse o primeiro nível de carga, os deslocamentos eram somente e lásticos.

De acordo com estes resultados, foi verificado que para uma pré-carga normal e para o primeiro carregamento tangencial, as deformações eram elásticas enquanto a força tangencial não ultrapasse a metade da força de atrito estático. Assim, até o limite elástico, é válida a seguinte relação:

$$\mu_{lim} = F_{tlim}/F_n \quad (3.1)$$

Os valores de  $\mu_{lim}$  da equação (3.1) foram obtidos experimentalmente para várias pressões normais de contato, de  $P_n = 1$  a  $15 \text{ kgf/cm}^2$ , e foi verificado ser independente de  $P_n$ . A tabela (3.1) mostra os valores de  $\mu_{lim}$ , bem como o valor do coeficiente de atrito estático  $\mu_a$  para os diferentes acabamentos superficiais do ferro fundido.

TAB. 3.1 - Valores dos parâmetros  $\mu_{lim}$ , definido pela equação (3.1) e  $\mu_a$  = coeficiente de atrito estático para os diversos acabamentos superficiais do ferro fundido, para juntas secas ou lubrificadas, segundo KIRSANOVA<sup>22</sup>.

ACABAMENTO SUPERFICIAL	SECA		LUBRIFICADA	
	$\mu_{lim}$	$\mu_a$	$\mu_{lim}$	$\mu_a$
Torneado fino - $R_t = 1,6$ a $6 \mu\text{m}$	0,13	0,25	0,13	0,25
Retificado grosseiro $R_t = 4$ a $6 \mu\text{m}$	0,12	0,18	0,12	0,18
Retificado e lapidado $R_t = 1 \mu\text{m}$	0,17	0,35	0,14	0,35
Rasqueteado $R_t = 8$ a $10 \mu\text{m}$	0,12	0,22	0,12	0,22
Rasqueteado fino $R_t = 1$ a $2 \mu\text{m}$	0,14	0,28	0,12	0,24

Com base nos resultados experimentais de KIRSANOVA <sup>22</sup>, propõe-se linearizar a relação entre a pressão  $P_t$  e a deformação tangencial  $\lambda_t$ . Tem-se então a seguinte equação:

$$\lambda_t = K_t P_t \quad (3.2)$$

Com base na equação (3.2) foi montada a figura 3.2, que relaciona os valores de  $K_t$  em função da pressão normal para os acabamentos superficiais do ferro fundido, onde pode ser observado que para melhores acabamentos superficiais, obtêm-se melhor rigidez tangencial.

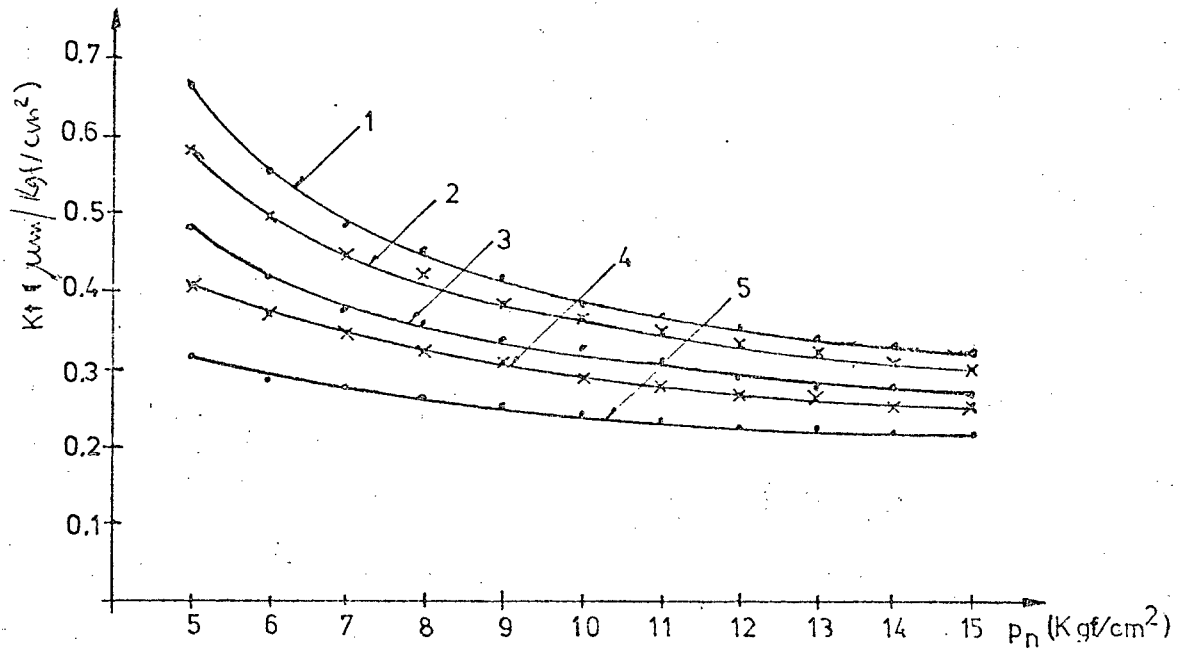


Fig. 3.2 - Resultados experimentais <sup>22</sup>. Flexibilidade tangencial versus pressão normal, para 1 - rasqueteado normal; 2 - rasqueteado fino; 3 - torneado fino; 4 - retificado; 5 - rasqueteado muito fino.

MASUKO <sup>23</sup> investigou a influência da orientação das estrias da usinagem e concluiu que o retificado cruzado é mais rígido que o com estrias paralelas, usando modelos de aço e ferro fundido a pressões normais de 100 a 200  $\text{kgf/cm}^2$ . Verificou também a influência dos materiais, erros de planicidade, tamanho da área aparente de contato, dureza, de mesmo modo que foi verificado para a rigidez normal, resultando em tendências semelhantes



tes. Foi mostrado que a rigidez tangencial aumenta com a pressão normal. Entretanto não foi proposto qualquer relação.

Da figura 3.2, verifica-se que a flexibilidade tangencial  $K_t$  decresce com a pressão normal, em forma parabólica ou exponencial. BACK<sup>2,3</sup> propõe a relação da seguinte forma:

$$K_t = \frac{R}{(P_n)^S} \quad (3.3)$$

onde R e S são os parâmetros (positivos) característicos da flexibilidade tangencial que dependem do acabamento superficial e do par de materiais da junta.

### 3.2.1 - Deformação tangencial, quando cargas normais e tangenciais são aplicadas simultaneamente.

Considere que a aplicação de carregamento simultâneo, seja simulado pela aplicação de carregamentos sucessivos de pequenos passos, ora normal ora tangencial. Por exemplo, para um passo i, a deformação tangencial pode ser calculada pela fórmula:

$$\lambda_t' = \sum_{i=1}^i \lambda_t'(i) + \frac{R}{(P_n)^S} dP_t \quad (3.4)$$

onde  $P_n$  é a pressão normal para o passo i+1 e  $dP_t$  é o incremento da pressão tangencial por passo.

Considerando que os incrementos de pressão normal e tangencial obedecem a uma constante, pode-se escrever a seguinte equação:

$$dP_t = \alpha dP_n \quad (3.5)$$

onde  $\alpha$  deve ser menor do que o coeficiente de atrito  $\mu_a$ , quando não for aplicada uma pressão normal inicial. Substituindo a equação (3.5) na equação (3.4), tem-se:

$$\lambda_t' = \sum_{i=1}^i \lambda_t'(i) + \frac{R}{(P_n)^S} \alpha dP_n \quad (3.6)$$

Ou então,

$$\lambda_t' = R \alpha \int \frac{dP_n}{(P_n)^S} \quad (3.7)$$

ou

$$\lambda_t' = \frac{R \alpha}{1 - S} P_n^{(1-S)} + A \quad (3.8)$$

Para determinar a constante de integração  $A$ , pode-se considerar que a pressão tangencial é aplicada após uma pressão normal inicial  $P_{no}$ , e a equação (3.8) se transforma em,

$$\lambda_t' = \frac{R \alpha}{1 - S} (P_n - P_{no})^{(1-S)} \quad (3.9)$$

e quando  $p_{no} = 0$

$$\lambda_t' = \frac{R \alpha}{1 - S} P_n^{(1-S)} \quad (3.10)$$

Com referência às equações (3.3) e (3.9), a equação (3.2) pode ser escrita:

$$\lambda_t = R \alpha (P_n)^{1-S} \quad (3.11)$$

Comparando as equações (3.2) e (3.3) com a equação (3.9), nota-se que a deformação tangencial ( $\lambda_t'$ ) devido a aplicação simultânea é o dobro da deformação tangencial devido ao carregamento não simultâneo, isto se  $S = 0,5$ . A figura 3.3 apresenta a relação entre  $\lambda_n$ ,  $\lambda_t$ ,  $\lambda_t'$  e  $P_n$  e  $P_t$  para os valores de  $C = 1,2$ ,  $R = 1,3$  e  $\alpha = 0,3$  com base nas equações (2.7), (3.2), (3.3) e (3.10), e considerando ainda  $M = S = 0,5$ .

### 3.3 - Relação entre a rigidez normal e tangencial de superfícies usinadas.

Definindo rigidez tangencial ( $R_T$ ) de superfícies usinadas por unidade de área como a relação entre a variação de pressão aplicada e variação da deformação tangencial, e considerando a equação (3.2), tem-se:

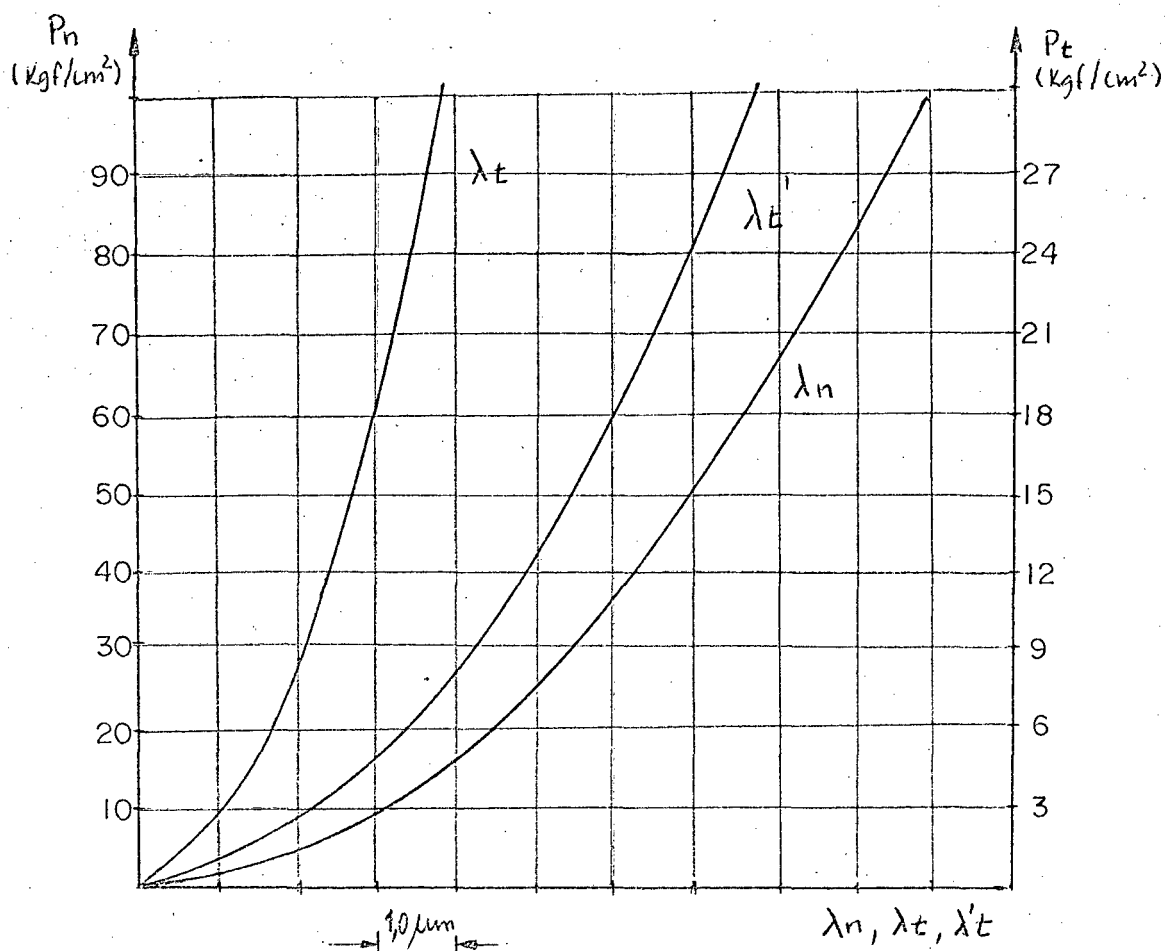


Fig. 3.3 - Relação entre  $\lambda_n$ ,  $\lambda_t$ ,  $\lambda_t'$  e  $P_n$  e  $P_s$  para para  $C = 1,0$   
 $R = 1,3$  e  $\alpha = 0,3$ .

$$R_T = \frac{dP_t}{d\lambda_t} = \frac{1}{K_t} \quad (3.12)$$

ou considerando a equação (3.3), tem-se:

$$R_T = \frac{(P_n)^S}{R} \quad (3.13)$$

A tabela 3.2 apresenta os valores dos parâmetros  $R$  e  $S$  obtidos por interpolação a partir das curvas experimentais de Kirsanova usando as equações (3.2) e (3.3). Estes valores são válidos para pressões normais até  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Verifica-se através da figura 3.4 que para maiores pressões normais, a flexibilidade tangencial (por definição é o inverso da rigidez) independe

do acabamento superficial.

TAB. 3.2 - Parâmetros R e S da rigidez tangencial, com base na equação (3.2) e (3.3) e os valores de R\* através da equação (3.11) e considerando S\* = 0,5, valor médio dos resultados experimentais.

Par de superfície em contato	R	S	R*	S*
Rasqueteado - $R_t = 3 - 5 \mu\text{m}$ ; $Q = 3 \text{ a } 4 \text{ pontos/cm}^2$	-	-	0,39	0,5
Rasqueteado - $R_t = 6 - 8 \mu\text{m}$ ; $Q = 3 \text{ a } 4 \text{ pontos/cm}^2$	0,55	0,35	0,65	0,5
Rasqueteado - $R_t = 6 - 8 \mu\text{m}$ ; $Q = 2 \text{ a } 3 \text{ pontos/cm}^2$	1,42	0,58	1,0-1,3	0,5
Rasqueteado - $R_t = 15 - 20 \mu\text{m}$ ; $Q = 1,5 \text{ a } 2 \text{ pontos/cm}^2$	1,66	0,62	1,7-2,0	0,5
Rasqueteado - $R_t = 15 \text{ a } 20 \mu\text{m}$ ; $Q = 1,0 \text{ a } 2 \text{ pontos/cm}^2$	-	-	2,0-2,6	0,5
Rasqueteado - $R_t = 6 \text{ a } 8$ ; $Q = 2 \text{ a } 3$ $\text{pontos/cm}^2$ / retificado $R_a = 1,0 \mu\text{m}$ ,	-	-	1,0-1,3	0,5
Retificado $R_a = 1,0 \mu\text{m}$ .	0,77	0,42	0,8-0,9	0,5
Plainado fino	1,03	0,52	0,78	0,5

Para se obter a relação entre a rigidez normal e a tangencial, usa-se as eqs. (2.8) e (3.13), ou seja:

$$\frac{R_N}{R_T} \frac{P_n (1-M)}{C M} \cdot \frac{R}{(P_n)^S} = \frac{R}{C M} P_n^{(1-M-S)} \quad (3.14)$$

Dos resultados experimentais, pode verificar-se que o parâmetro M de rigidez normal pode ser assumido como igual a 0,5. Do mesmo modo, com referência à tabela 3.2, verifica-se que o parâmetro S de rigidez tangencial pode ser tomado como valor médio de 0,5. A equação (3.14) fica então:

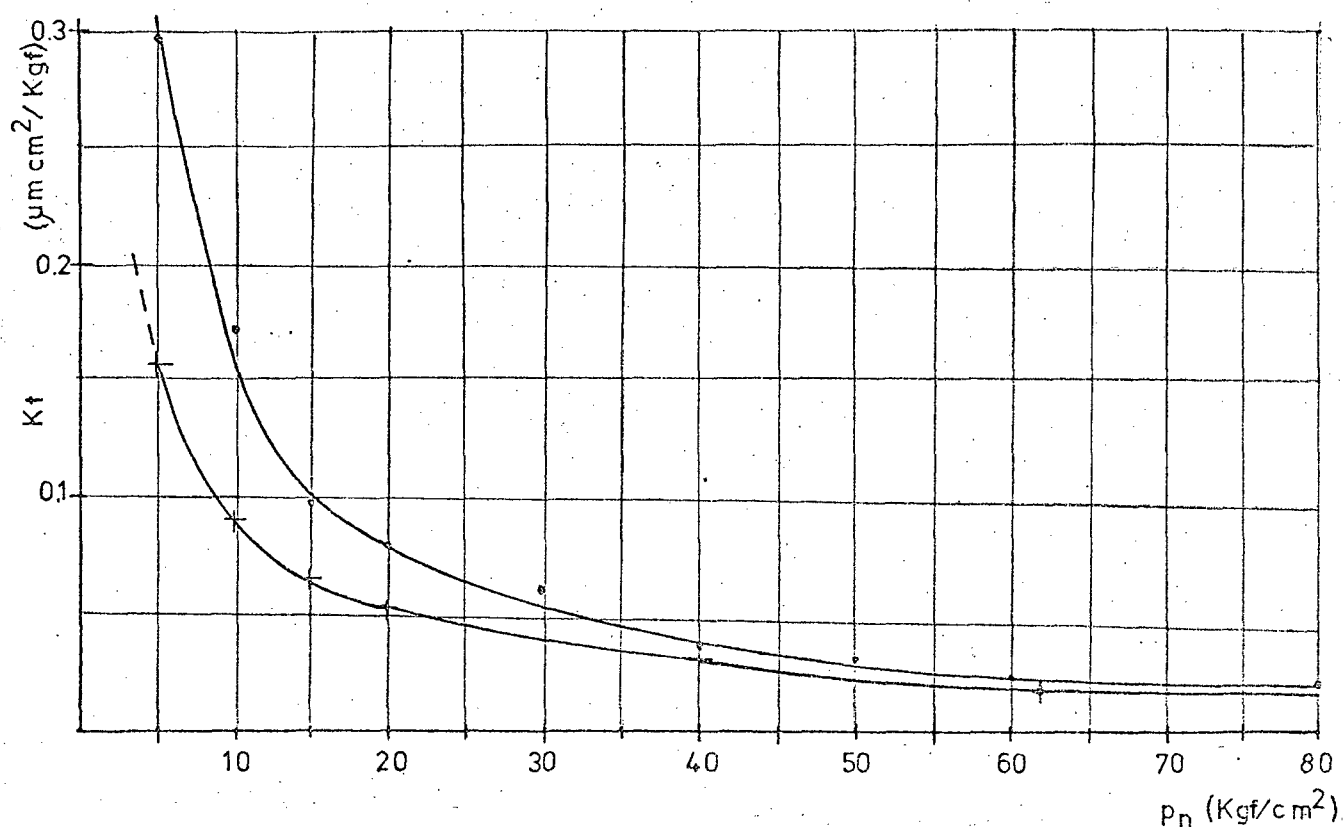


Fig. 3.4 - Comparação da flexibilidade tangencial  $k_t$  para 2 tipos de superfície de ferro fundido. Extrapolação dos dados de KIRSANOVA<sup>22</sup>.

$$\frac{R_N}{R_T} = \frac{R}{C M} = \frac{2 R}{C} \quad (3.15)$$

ou seja, a relação entre a rigidez normal e tangencial, independente da pressão normal.

BACK<sup>3</sup> verificou, com base em resultados experimentais que a relação apresentada pela equação (3.15) permanece constante, para um mesmo material, acabamento superficial, constante esta próxima da relação entre os módulos de elasticidade do material  $E$  e  $G$  e propõe:

$$\frac{R_N}{R_T} = \frac{E}{G} = 2(1 + \mu) \quad (3.16)$$

onde  $\mu$  = coeficiente de Poisson.

Um dos objetivos básicos deste trabalho é obter me-

lhor acuidade da relação apresentada pelas equações (3.15) e (3.16), pois várias vantagens resultam, entre as quais:

1 - relacionando as equações (3.15) e (3.16), tem-se:

$$R = 2(1 + \mu) C M \quad (3.17)$$

ou

$$R = \frac{E}{G} C M \quad (3.18)$$

Pode-se assumir o valor do parâmetro  $S = 0,5$  e calcular  $R$  a partir da equação (3.17) ou (3.18);

- 2 - como já existem muitos dados, avaliados por outros pesquisadores, para a determinação dos parâmetros de rigidez normal, pode-se agora relacionar estes dados conhecidos para se obter os parâmetros de rigidez tangencial;
- 3 - caso haja necessidade de se conhecer os parâmetros de rigidez tangencial de um determinado acabamento e material, executar-se-ia experimentos com aplicação de carregamento normal que são mais fáceis de serem realizados e obtem-se os parâmetros a partir das equações (3.17) ou (3.18).

Na tabela 3.2, os valores de  $R^*$  foram calculados por Back, com base nas equações (3.17) e (3.18), onde se assumiu o valor de  $S^* = 0,5$ .

A figura 3.5 apresenta o resultado experimental obtido por Back, onde se nota uma boa aproximação da relação da flexibilidade normal e a tangencial com a relação dos módulos de elasticidade normal e transversal do material da junta.

Analisando a forma de aplicação da carga, nota-se que a superfície, quando as pressões (normal e tangencial) são aplicadas simultaneamente, é menos rígida do que no caso do carregamento não simultâneo:

$$\frac{R_T'}{R_T} = \frac{dP_t/d\lambda_t'}{dP_t/d\lambda_t} = 1 - S \quad (3.19)$$

Sendo  $S = 0,5$ , de acordo com os resultados experimen -

tais, a rigidez tangencial de uma superfície usinada quando a carga é aplicada não simultaneamente, é o dobro da rigidez quando a aplicação da carga é simultânea.

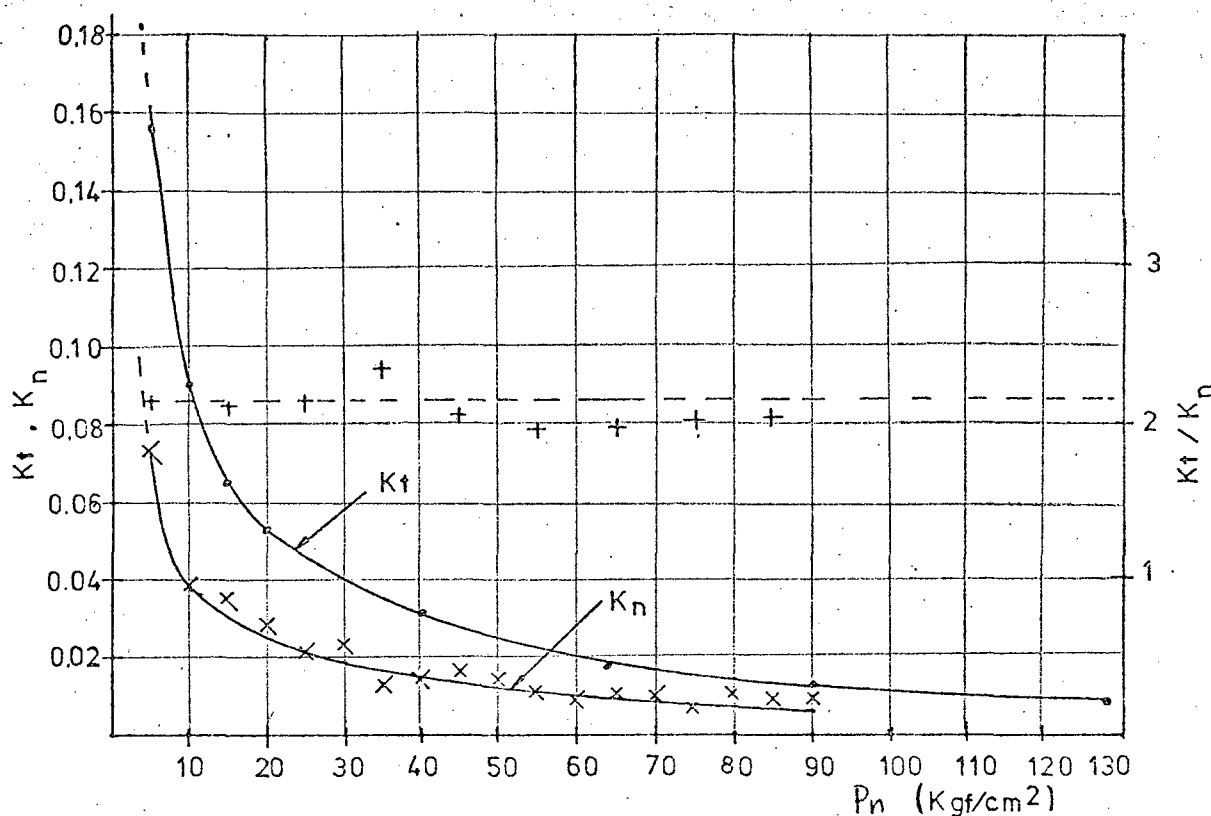


Fig. 3.5 - Flexibilidade normal e tangencial em função da pressão normal para superfícies de ferro fundido (retificado e rasqueteado).

### 3.4 - Análise matemática do primeiro e demais ciclos de carga.

Esta análise baseia-se em pesquisa de BACK e BURDEKIN <sup>13</sup>, com base em resultados experimentais obtidos. O modelo da rugosidade superficial proposto é a substituição das asperezas por barras de mesma rigidez, cuja distribuição da altura é de forma linear apresentada no item 2.5.

#### 3.4.1 - Primeiro carregamento tangencial (sob pressão normal constante).

Considere que uma pressão normal  $P_n$  foi aplicada a uma

superfície de área nominal  $A_a$  e resulte numa aproximação normal  $\lambda_n$ . Uma força normal  $F_{ni}$  aplicada a uma aspereza individual, resultará numa deformação  $\lambda_{ni}$  desta aspereza.

Para uma aspereza, com profundidade inicial  $z_i$  do plano de referência antes do início do carregamento (fig. 2.5), a força suportada será:

$$F_{ni} = R_{ni} (\lambda_n - z_i) \quad (3.20)$$

Aplicando então, uma força tangencial  $F_{ti}$ , a aspereza, comportar-se-á como uma mola elástica até que  $F_{ti}$  atinja o valor máximo que é igual a força de atrito limite ( $F_{ailim}$ ) desta aspereza, que pode ser obtida por:

$$F_{ailim} = \mu_a F_{ni} = \mu_a R_{ni} (\lambda_n - z_i) \quad (3.21)$$

A deflexão tangencial limite para uma aspereza individual ( $\lambda_{tilim}$ ), a partir da qual não se comporta como mola, será dada por:

$$\lambda_{tilim} = \frac{F_{ailim}}{R_{ti}} = \mu_a \frac{R_{ni}}{R_{ti}} (\lambda_n - z_i) \quad (3.22)$$

em que

$$R_{ti} = G \frac{A_i}{h_i} \quad (3.23)$$

A equação (3.22) pode ser escrita:

$$\lambda_{tilim} = \mu_a \frac{R_{ni}}{R_{ti}} \lambda_{ni} \quad (3.24)$$

Com base na equação (3.22), a deflexão máxima da superfície é:

$$\lambda_{tm\acute{a}x} = \mu_a \frac{R_{ni}}{R_{ti}} \lambda_n \quad (3.25)$$

O número de pontos em contato, antes da aplicação do carregamento tangencial é dado por:



$$N' = N = A_o A_a \lambda_n \quad (3.26)$$

Considerando que o número máximo de pontos em contato (quando  $\lambda_t = 0$ ) é dado pela equação (3.26), e a máxima deflexão tangencial ocorre quando  $N' = 0$  e assumindo que o número de pontos  $N'$ , varia linearmente (fig. 3.6) em função de  $\lambda_t$ , tem-se a equação:

$$N' = A_o A_a (\lambda_n - \frac{R_{ti}}{R_{ni} \mu_a} \lambda_t) \quad (3.27)$$

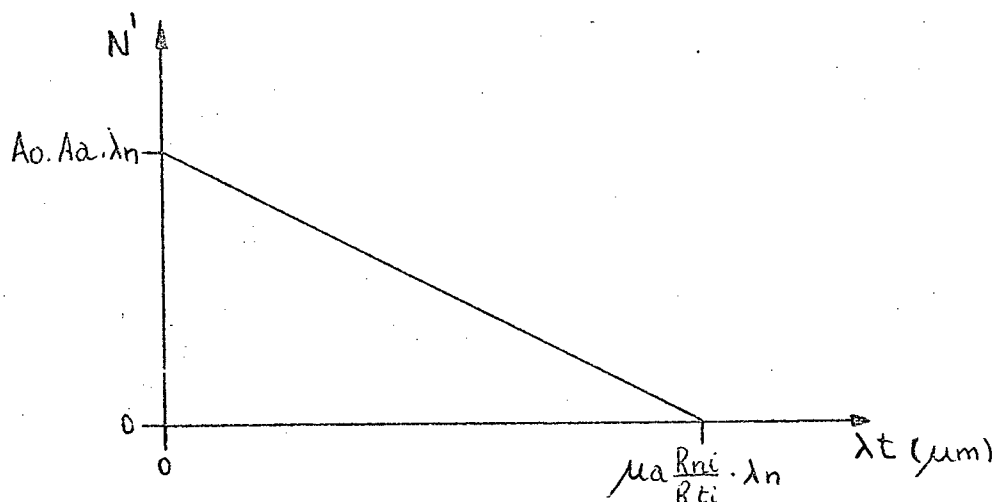


Fig. 3.6 - Número de pontos ( $N'$ ) em contato em função da deflexão tangencial.

A rigidez tangencial da superfície usinada por unidade de área depende do número de pontos em contato, ou:

$$R_T = \frac{dP_t}{d\lambda_t} = R_{ti} \frac{N'}{A_a} \quad (3.28)$$

A partir da relação (3.28) obtém-se a relação entre a pressão e deformação tangencial

$$P_t = R_{ti} \int_0^{\lambda_{t\text{máx}}} N' d\lambda_t \quad (3.29)$$

$$P_t = R_{ti} A_o \lambda_n \lambda_t - \frac{R_{ti} A_o}{\mu_o R_{ni}} \frac{\lambda_t^2}{2} \quad (3.30)$$

A equação (3.30) é válida, (baseada na figura 3.5), para valores de  $\lambda_t$  de 0 a  $\mu_a \lambda_n R_{ni}/R_{ti}$ . Pode-se escrever a equação (3.30) da seguinte forma:

$$P_t = A_{c1} \lambda_t - A_{c2} \frac{\lambda_t^2}{2} \quad (3.31)$$

A curva representativa da equação (3.30) e (3.31) é uma reta diminuída de uma parábola. Verificando resultados de Kirsanova (fig. 3.1) e Back (fig. 3.7 e 3.8), nota-se perfeito acordo.

Para determinar o valor máximo de  $P_t$ , substitui-se o valor de  $\lambda_t = \mu_a \lambda_n R_{ni}/R_{ti}$ , na equação (3.30) e tem-se:

$$P_{t\text{m}\acute{a}\text{x}} = \mu_a \left( \frac{1}{2} A_o R_{ni} \lambda_n^2 \right) \quad (3.32)$$

$$P_{t\text{m}\acute{a}\text{x}} = \mu_a P_n \quad (3.33)$$

#### a) Descarregamento tangencial (sob pressão normal constante)

Considere-se que a condição de superfície da junta para uma solicitação normal constante foi acrescida de uma solicitação cisalhante (tangencial), de maneira que não ocorresse escorregamento das superfícies. Quanto às asperezas, considere-se algumas atingiram a deflexão tangencial limite, e outras que se comportaram como molas lineares (regime elástico).

A figura 3.9.a apresenta o comportamento de duas asperezas: a (1) comportou-se como mola linear e a (2) escorregou, podendo-se calcular o valor de sua deflexão através da equação (3.24).

Com a redução da carga tangencial (início do descarregamento), a deflexão  $\lambda_{ti}$  também é reduzida, ou melhor, todas as asperezas, inclusive as que escorregaram, voltam a funcionar como molas lineares. Ou seja, todas as asperezas resistem à redu-

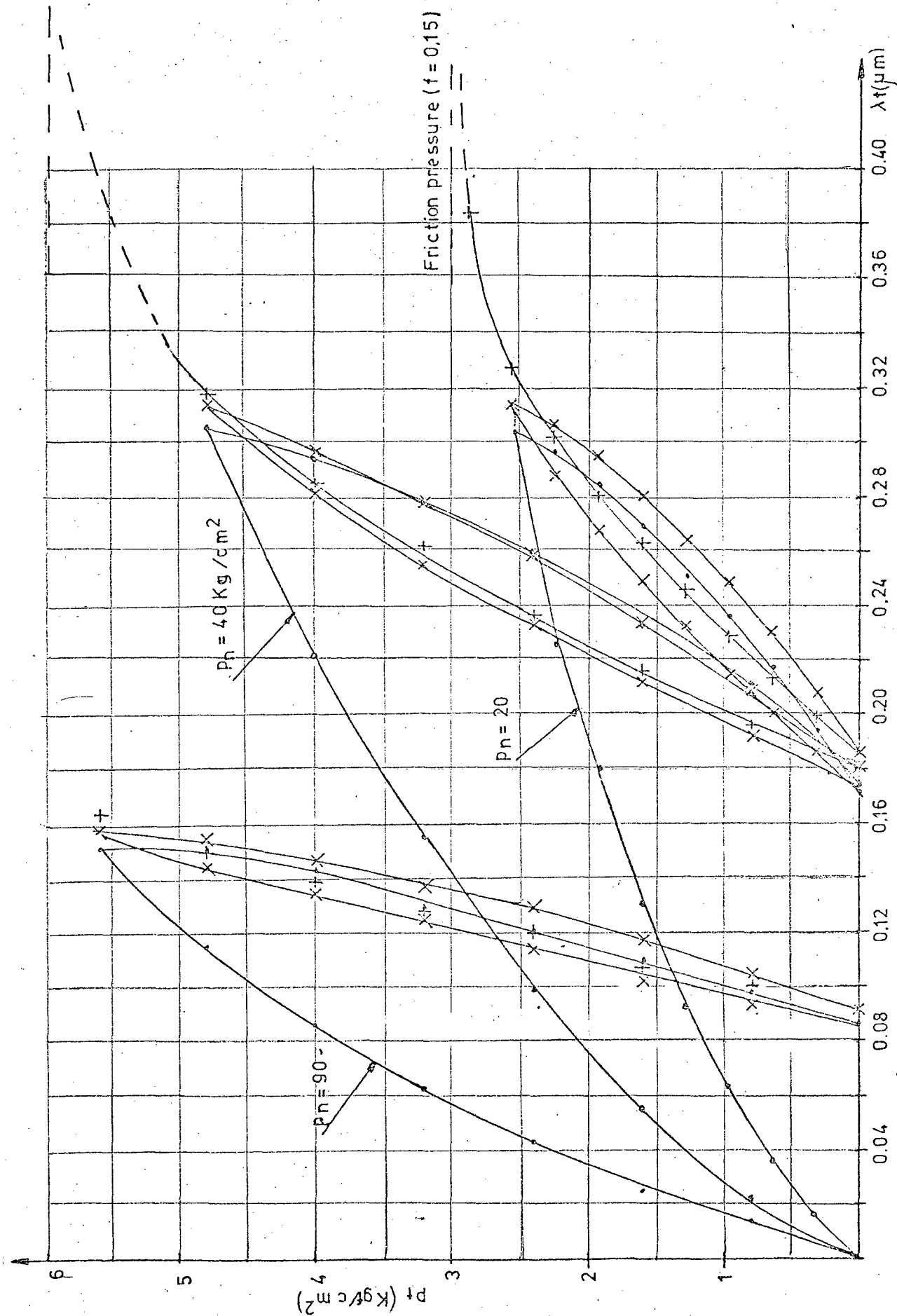


Fig. 3.7 - Resultados experimentais  $EACK^2$  - Diagramas pressão  $P_t$  x deformação  $\lambda_t$ , para diversas pressões normais  $P_n$ , para o ferro fundido, com superfícies, uma retificada e outra rasquetada.

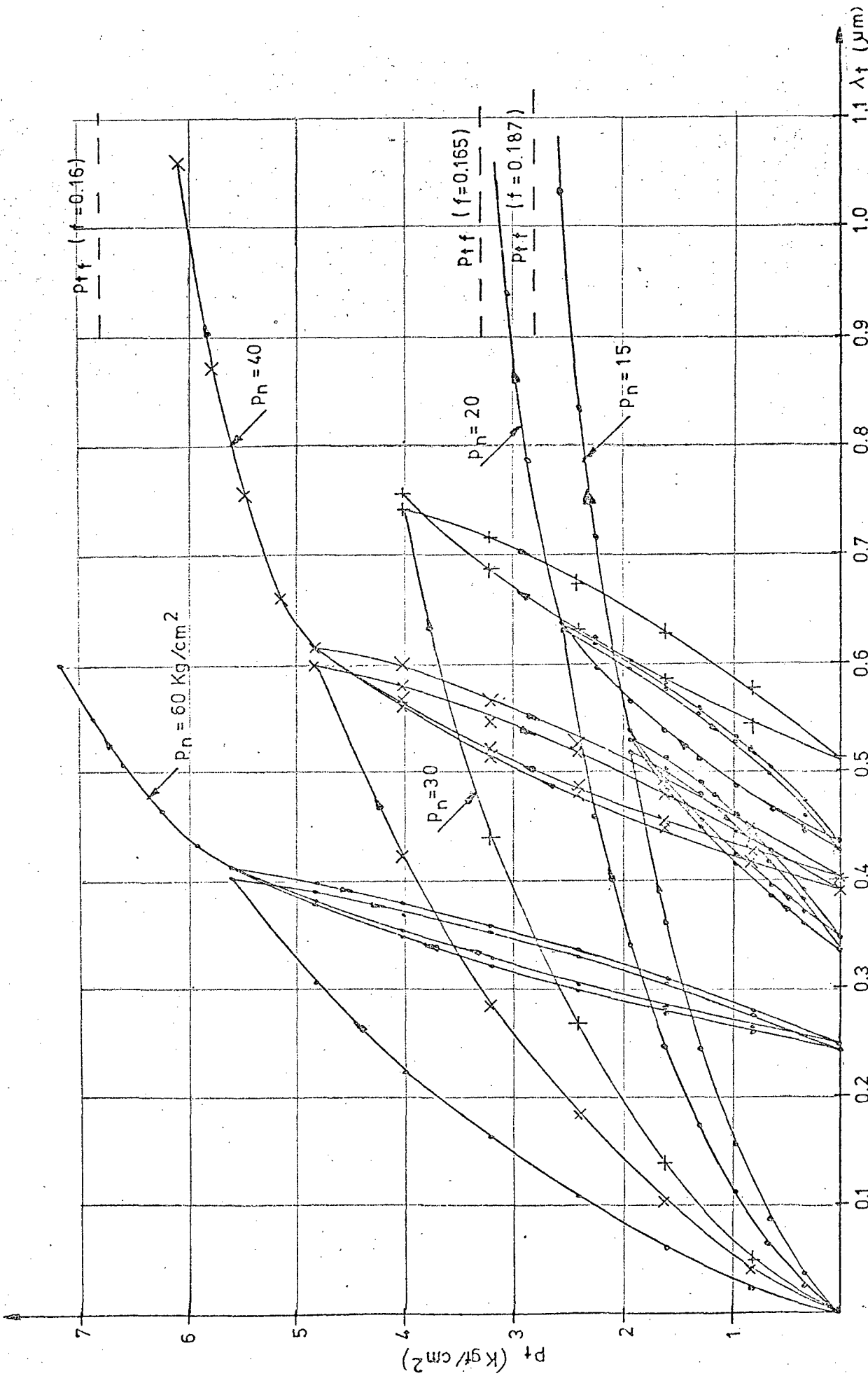


Fig. 3.8 - Resultados experimentais. BACK<sup>2</sup> - Diagramas pressão  $P_t$  x deformação  $\lambda_t$ , para diversas pressões normais  $P_n$ , para o ferro fundido, com superfícies, uma retificada e outra rasquetada.

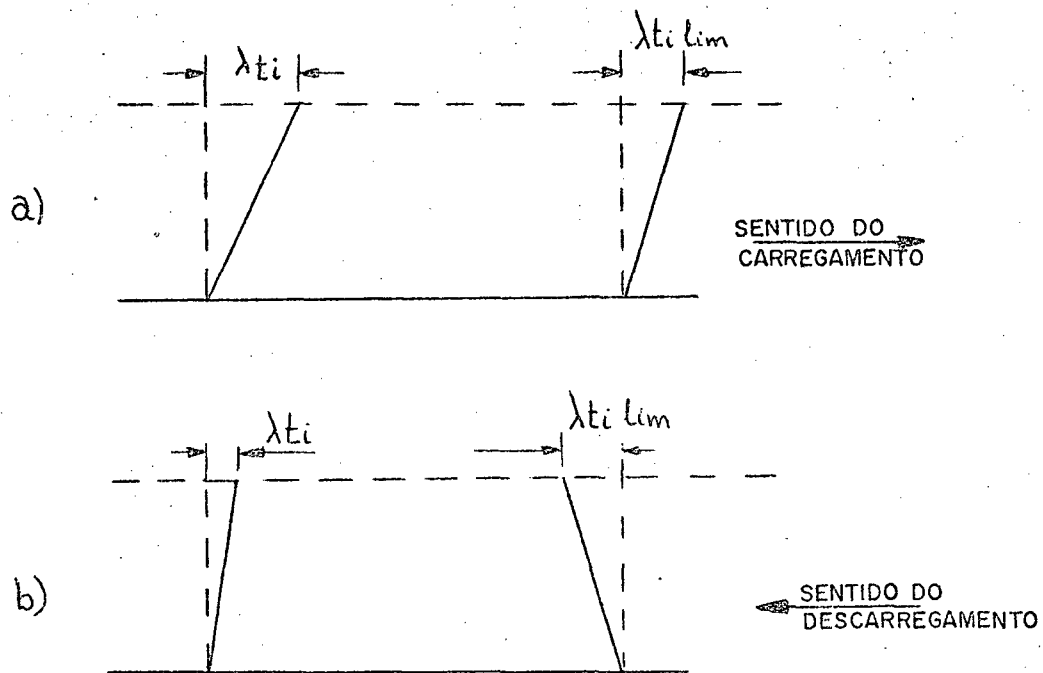


Fig. 3.9 - Comportamento das asperezas. a) - no carregamento; b) no descarregamento. (1) - aspereza como mola linear; (2) - aspereza que atingiu seu limite máximo.

ção da deformação de  $\lambda_t$ , durante o descarregamento. Como o processo de descarregamento é contínuo, com conseqüente redução de  $\lambda_t$ , algumas asperezas excedem seu valor limite  $\lambda_{ti \text{ lim}}$ . Se esta aspereza escorregou no carregamento e novamente atingiu o seu limite, significa dizer que esta aspereza, no descarregamento se deformou de:

$$\lambda_{ti} = 2 \lambda_{ti \text{ lim}} \quad (3.34)$$

Pode-se considerar o descarregamento, como uma aplicação da pressão tangencial no sentido contrário. Isto é uma situação análoga à condição vista no item a (carregamento tangencial, sob pressão normal constante), só que  $\lambda_{ti \text{ lim}}$  para o descarregamento é o dobro do carregamento. Ou seja,

$$\lambda_{t \text{ limd}} = 2 \mu_a \frac{R_{ni}}{R_{ti}} (\lambda_n - z_i) \quad (3.35)$$

e a correspondente equação (3.30) é:

$$P_t = R_{ti} A_o \lambda_n \lambda_t - \frac{R_{ti}^2 A_o}{R_{ni} \mu_a} \frac{\lambda_t}{4} \quad (3.36)$$

ou

$$P_t = A_{c1} \lambda_t - A_{c2} \frac{\lambda_t^2}{4} \quad (3.37)$$

A figura 3.10 mostra o comportamento da rugosidade das superfícies quando carregadas do ponto inicial 0 ao ponto A; descarregamento do ponto A ao ponto B e posterior carregamento, ponto B ao ponto A. A equação (3.36) ou (3.37), que representa o comportamento das rugosidades durante o descarregamento é a mesma equação que rege o comportamento das rugosidades no recarregamento. Como pode ser verificado, as curvas de descarregamento e

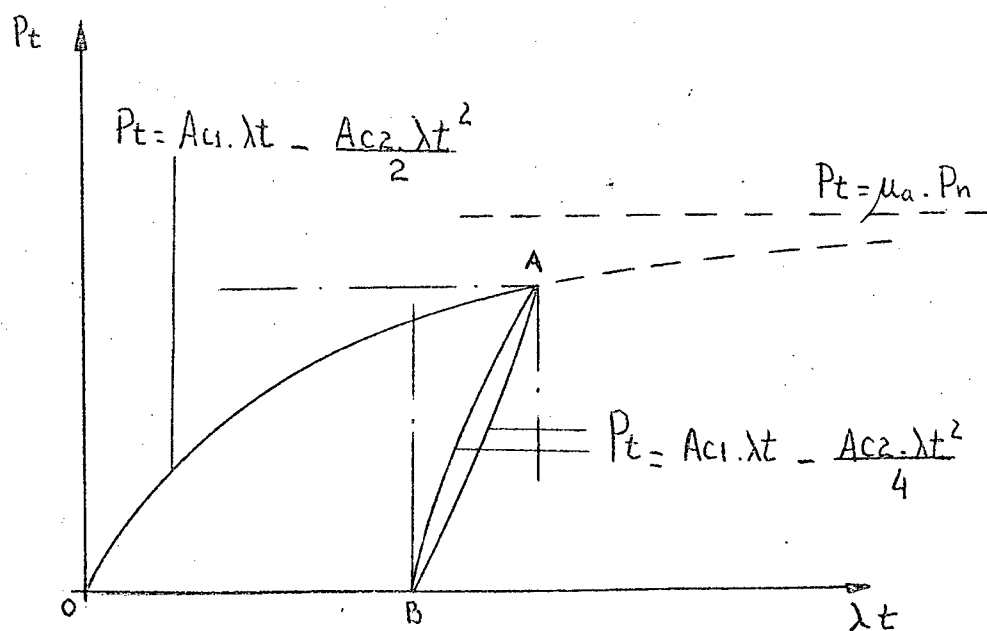


Fig. 3.10 - Comportamento da deformação tangencial da rugosidade quando solicitada a uma pressão tangencial.

e recarregamento, dentro do regime elástico, apresentam histere-se, isto quer dizer que existe uma dissipação de energia na interface das juntas.

O desvio da linearidade, que controla a energia dissipada, é o 2º termo da equação (3.37). KIRSANOVA<sup>22</sup> em suas conclusões, desprezou este efeito (equação 3.2) bem como BACK<sup>3</sup> quando propôs as equações (3.3) a (3.18).

### 3.4.2 - Aplicação de cargas normais e tangenciais simultaneamente.

Considere-se que duas superfícies estejam inicialmente em contato, sem qualquer carregamento e, e que então uma pressão normal  $P_n$  e uma cisalhante  $P_t$  sejam aplicadas simultaneamente, numa razão  $\alpha$ , tal que:

$$P_t = \alpha P_n \quad (3.38)$$

em que

$$\alpha < \mu_a \quad (3.39)$$

Neste caso, o comportamento da rugosidade da superfície, difere anterior analisado. Sendo uma pressão normal aumentada de  $dP_n$ , obtém-se um aumento na deformação  $d\lambda_n$  das superfícies. Logo, tem-se um aumento do número de pontos em contato  $DN'$  e um aumento na rigidez tangencial das superfícies, ou:

$$dR_{T'} = R_{ti} \frac{dN'}{A_a} \quad (3.40)$$

Adaptando a equação (3.26) para esta condição, tem-se:

$$dN' = A_o A_a d\lambda_n \quad (3.41)$$

Baseado na definição de  $R_{T'}$

$$R_{T'} = \frac{dP_t}{d\lambda_t'} \quad (3.42)$$

tem-se:

$$dP_t/d\lambda_t' = R_{ti} A_o \lambda_n \quad (3.43)$$

Da equação (2.29), tem-se:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{2 P_n}{R_{ni} A_o}} \quad (3.44)$$

ou

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{2 P_t}{R_{ni} A_o \alpha}} \quad (3.45)$$

Substituindo a equação (3.45) na equação (3.43)

$$\frac{dP_t}{d\lambda_t'} = R_{ti} \sqrt{\frac{2 A_o}{R_{ni} \alpha}} \sqrt{P_t} \quad (3.46)$$

ou

$$\frac{dP_t}{P_t} = R_{ti} \sqrt{\frac{2 A_o}{R_{ni} \alpha}} d\lambda_t' \quad (3.47)$$

então

$$P_t = \frac{R_{ti}^2 A_o}{2 \alpha R_{ni}} \lambda_t'^2 \quad (3.48)$$

ou

$$P_t = A_s \cdot \lambda_t'^2 \quad (3.49)$$

Pode ser verificado que a equação (3.48), ou (3.49), caracteriza esta situação através de uma parábola cuja magnitude, depende do fator  $\alpha$ , relação entre as pressões aplicadas simultaneamente.

Curvas experimentais de BACK<sup>2</sup>, conforme figuras 3.11 e 3.12, confirmam a equação (3.49).

a) - Descarregamento tangencial sob pressão normal constante após carregamento simultâneo.

Nesta situação, após o carregamento, nenhuma aspereza deve ter escorregado, ou melhor, a deflexão das asperezas individuais não atingiu seu limite de deflexão tangencial  $\lambda_{ti\lim}$ . Quan



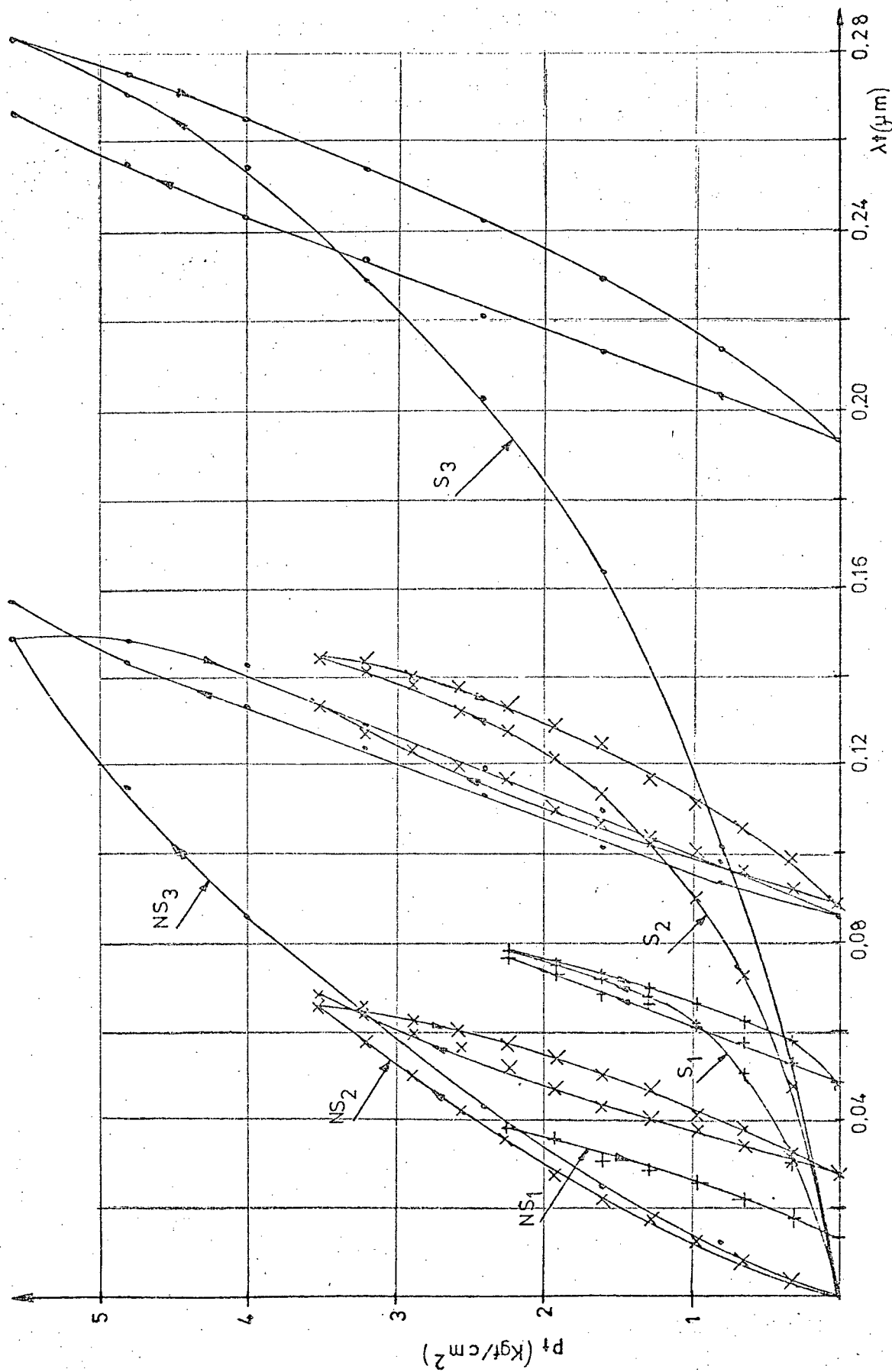


Fig. 3.11 - Curvas experimentais obtidas por BACK 2. NS representa o carregamento não simultâneo e S, carregamento simultâneo.

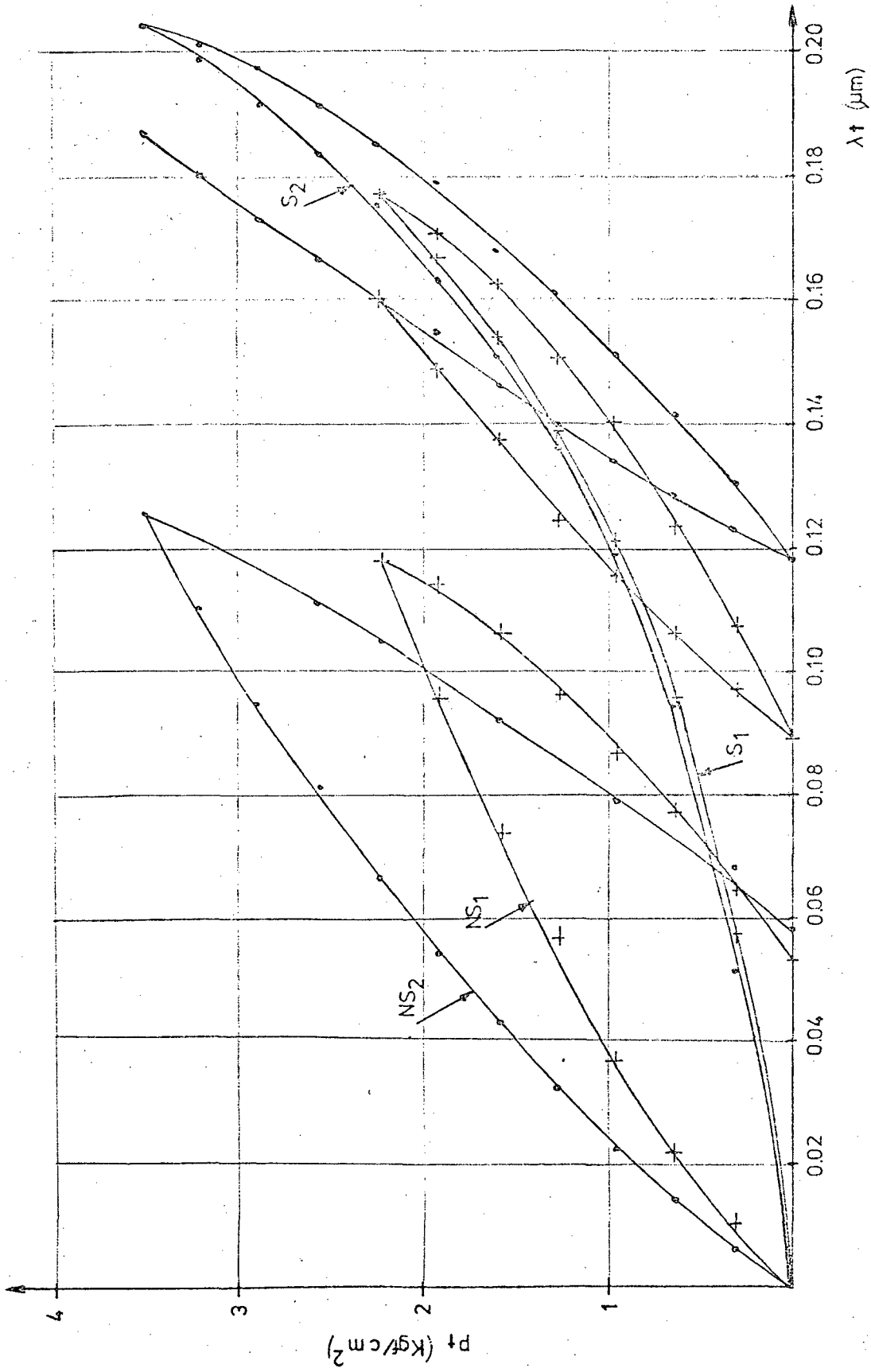


Fig. 3.12 - Curvas experimentais obtidas por BACK 2 . NS representa o carregamento não si-  
multâneo e S o carregamento simultâneo.

do o descarregamento inicia, todas as barras agem como molas como no ítem 3.4.1.a, anteriormente citado, só que, como as asperezas não atingiram seu limite, no descarregamento a deformação será menor do que  $2 \lambda_{ti \text{ lim}}$ .

A relação da pressão tangencial e deformação normal, pode ser obtida pelas equações (2.29) e (3.38):

$$P_t = \alpha R_{ni} A_o \frac{z^2}{2} \quad (3.50)$$

O valor correspondente da deflexão  $\lambda_t$ , quando a superfície foi aproximada de  $z$ , é dada igualando as equações (3.48) e (3.50):

$$\lambda_t' = \frac{R_{ni}}{R_{ti}} \alpha z = \frac{E}{G} \alpha z \quad (3.51)$$

Se as superfícies em contato são inicialmente carregadas, tal que a aproximação normal  $z = \lambda_n$ , então a correspondente deflexão tangencial de uma aspereza individual, que está em contato a uma distância  $z_i$  abaixo do ponto inicial de contato, é dada por:

$$\lambda_{ti}' = \frac{R_{ni}}{R_{ti}} \alpha (\lambda_n - z_i) \quad (3.52)$$

Quando do descarregamento tangencial, as asperezas comportar-se-ão como molas lineares até que a deflexão exceda a deformação calculada pela soma das equações (3.24) e (3.52):

$$\lambda_t' = (\mu_a + \alpha) \frac{R_{ni}}{R_{ti}} (\lambda_n - z) \quad (3.53)$$

O descarregamento agora, pode ser considerado análogo ao caso anteriormente citado. O número de pontos em contato é dado pela equação

$$N' = A_o A_a \left[ \lambda_n - \frac{R_{ti}}{R_{ni}} \frac{1}{(\mu + \alpha)} \lambda_t' \right] \quad (3.54)$$

e a relação entre a pressão e a deformação tangencial é dada por

$$P_t = R_{ti} A_o \lambda_n \lambda_t' - \frac{R_{ti}^2 A_o}{R_{ni} (\mu_a + \alpha)} \cdot \frac{\lambda_t'}{2} \quad (3.55)$$

Comparando as equações (3.36) e (3.55), nota-se que o 2º termo da equação (3.55) será sempre maior do que o termo correspondente ao da equação (3.36), já que  $\alpha$  será sempre menor que  $\mu$ . Com isto, pode-se concluir que a curva do descarregamento após a aplicação da carga simultânea é menos rígida do que a correspondente após o carregamento não simultâneo.

Quando  $P_t$  da equação (3.55) chega ao valor de  $P_t$  da equação (3.48) (quando ocorreu todo o descarregamento), a junta não se acha solicitada e poderia ser iniciado um novo carregamento. Então as barras funcionarão com uma variação elástica de  $2 \lambda_{ti}$ , tal qual a equação (3.36):

$$P_t = R_{ti} A_o \lambda_n \lambda_t' - \frac{R_{si} A_o}{\mu_a R_{ni}} \frac{\lambda_t'^2}{4} \quad (3.56)$$

Devido a esta característica, no recarregamento, para a mesma carga aplicada, no ciclo anterior, tem-se deformações menores, o que quer dizer que se tem uma curva mais rígida.

As figuras (3.11) e (3.12) apresentam esta situação, bem como as demais analisadas neste ítem. Foram obtidas pelos experimentos de BACK<sup>2</sup>.

## C A P I T U L O 4

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DOS MATERIAIS ENSAIADOS

## 4.1 - Generalidades

A determinação dos módulos de elasticidade dos materiais utilizados nos ensaios, se fez necessário, para verificar a proposta de que a relação da rigidez normal e tangencial é igual à relação dos módulos de elasticidade do material, quando se tem o mesmo tipo e grau de acabamento superficial. A partir disto, pode-se obter os parâmetros de rigidez tangencial em função dos de rigidez normal que são mais fáceis de serem obtidos.

Utilizou-se dois métodos para esta determinação:

- a) módulo E - a partir do corpo sólido equivalente - Mediu-se a força e a correspondente deformação de um modelo sólido equivalente a um conjunto de anéis. A partir destes dados e de suas dimensões, calculou-se o módulo E, que foi utilizado na determinação dos parâmetros C e M de rigidez normal.
- b) módulos E, G - a partir de modelo submetido a ensaio de tração, com uso de extensômetros - através deste método podem ser determinados os valores de E e G, com melhor precisão. Estes valores deverão ser utilizados para verificar a relação proposta <sup>3</sup>.

## 4.2 - E a partir do corpo sólido equivalente

O modelo ensaiado descrito no capítulo 6 consiste em seis anéis com diâmetro externo igual a 75 mm, diâmetro interno igual a 40 mm e altura igual a 15 mm, os cinco anéis superiores apresentam três furos de 8 mm de diâmetro médio. Para esta determinação, utilizou-se um modelo sólido equivalente a esta pilha de anéis: diâmetro internos e externos respectivamente 40 e 75 mm, altura de 90 mm e os furos de 8 mm com profun

didade nominal de 75 mm.

#### 4.2.1 - Procedimento de teste

O procedimento de teste consistiu em submeter o modelo a ensaio de compressão, donde se obtinha os valores de força e deformação do corpo sólido (com uso de três apalpadores). Estes valores eram calibrados através de equações experimentais obtidas anteriormente e que serão descritas com mais detalhes, já que o mesmo procedimento é adotado para determinação dos parâmetros C e M de rigidez normal.

#### 4.2.2 - Cálculos e resultados

A partir do conjunto de valores de pressão  $P_n$  (relação entre força aplicada e a área aparente =  $30,10 \text{ cm}^2$ ) e deformação  $\Delta L$ , ajustou-se a uma reta, através do método dos mínimos quadrados, cuja equação é:

$$\Delta L = X \cdot P_n \quad (4.1)$$

Os valores de X, para os vários testes de cada modelo e material, encontram-se nas tabelas 4.1 e 4.6.

Comparando a equação 4.1 com a lei de Hooke

$$\Delta L = \frac{L}{E} \cdot P_n \quad (4.2)$$

pode-se obter:

$$E = \frac{L}{X} \quad (4.3)$$

Os valores de L foram obtidos como valor médio de dez medidas de cada furo, e encontram-se tabelados junto aos valores de X. Nas tabelas 4.1 a 4.6, o valor de  $\bar{X}$  corresponde à média dos valores de X e E é o valor resultante por modelo em  $\text{kgf/cm}^2$ .

TAB. 4.1 - Determinação de E - material = Aço 1020, modelo BOH

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
01	0,0336	0,0334	74,46	2,230
02	0,0324			
03	0,0340			
04	0,0334			

TAB. 4.2 - Determinação de E - material = Aço 1020, modelo BNH

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
05	0,0272	0,0281	73,56	2,618
06	0,0303			
07	0,0267			

TAB. 4.3 - Determinação de E - material = FoFo, modelo AXH

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
08	0,0611	0,0622	73,85	1,187
09	0,0639			
10	0,0615			

TAB. 4.4 - Determinação de E - material = FoFo, modelo AYH

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
11	0,0637	0,0652	74,45	1,142
12	0,0609			
13	0,0709			

TAB. 4.5 - Determinação de E - material = FoFo, modelo AZH

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
14	0,0645	0,0615	74,42	1,210
15	0,0589			
16	0,0611			

TAB. 4.6 - Determinação de E - material = bronze

TESTE Nº	X { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	$\bar{X}$ { $\mu\text{m}/(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ }	L (mm)	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
17	0,0907	0,0906	74,10	0,818
18	0,0882			
19	0,0929			

A partir dos valores de E, determinados pelas tabelas 4.1 a 4.6, pode-se obter um valor médio para cada material e, tem-se assim, uma primeira aproximação, conforme a tabela 4.7.

TAB. 4.7 - Módulo de elasticidade E para os materiais

MATERIAL	E $10^6$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
Aço 1020	2,424±0,598
ferro fundido	1,180±0,041
bronze*	0,818

\* executado somente para um modelo

4.3 - E, G - a partir de modelo padronizado submetido a ensaio de tração, com uso de extensômetros <sup>43</sup>.

Numa estrutura de madeira, foi montado um sistema bra





Fig. 4.1 - Vista geral da montagem de teste da determinação do E, G, com uso de extensômetros.

çadeira-morsa, para fixação do corpo de prova (B 10x50 DIN 50 125<sup>31</sup>, conforme mostra a figura 5.1. Cuidou-se que o eixo axial do corpo de prova coincidissem com o eixo de carga para que tivesse todas as secções solicitadas somente à tração (e se ter um estado uni-axial de tensões em todos os pontos do campo L de medição). Utilizou-se extensômetros de resistência elétrica variável para medir as deformações específicas longitudinais  $\epsilon_l$  e transversais  $\epsilon_t$ .

O módulo de elasticidade normal, pode ser calculado em função da carga aplicada F e da deformação longitudinal:

$$E = \frac{F}{A} \cdot \frac{l}{\epsilon_l} \quad (4.4)$$

em que A é a área da secção transversal do modelo, na região analisada, que é igual a 78,54 mm<sup>2</sup>.

A relação entre as elongações fornece diretamente o coeficiente de Poisson  $\mu$ :

$$\mu = \left| \frac{\epsilon_t}{\epsilon_l} \right| \quad (4.5)$$

O módulo de elasticidade transversal G pode ser calculado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4.6)$$

#### 4.3.1 - Sistema de Medição.

Para obtenção da força aplicada ao corpo de prova, foi utilizada a arruela piezoelétrica Kistler de tração que fornece, através de calibração, a seguinte relação:

$$F = 0,5 \text{ VL} \quad (4.7)$$

em que F é o valor da força em kgf; VL o valor da leitura em mV. Os extensômetros utilizados eram da Hottinger, HBM, Alemanha, código 3/120 LA21, com fator K = 1,94±1%, que fornece a deformação específica  $\epsilon$ . Colou-se em cada modelo 2 extensômetros de resis-

tência elétrica variável, um no sentido longitudinal e o outro no transversal. Foi usado meia ponte, com um extensômetro ativo e outro compensador de temperatura. Utilizou-se a ponte extensométrica Hottinger HBM, tipo MK, G.Nr = 560.02, F.Nr = 4763, com leitura por compensação.

#### 4.3.2 - Obtenção dos dados e resultados

O modelo foi submetido a uma tensão normal máxima de  $1,6 \text{ kgf/mm}^2$ , em vários passos. Foram executados no mínimo três testes em cada modelo, com os resultados apresentados nas tabelas 4.8 a 4.11, relação da variação de VL (donde, pode ser obtido o valor da força) e variação da deformação específica longitudinal  $\epsilon_1$  e as tabelas 4.12 a 4.14, que relacionam a variação de VL com a variação da deformação específica transversal,  $\epsilon_t$  para o ferro fundido que resultou no módulo  $E = 0,715 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ , módulo  $G = 0,279 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  e  $\mu = 0,28$ . Para o aço foi determinado apenas o módulo E. As tabelas 4.15 a 4.17 apresentam os valores experimentais obtidos. Resultou em  $E = 2,50 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ .

TAB. 4.8 a 4.11 - Relação de VL e  $\Delta\epsilon_1$ , para o ferro fundido.

TAB. 4.8 - Teste 1

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta\epsilon_1$ $10^{-6}$
0	2425
78	278
158	300
196	307
244	325
197	308
159	299
80	277
0	250

TAB. 4.9 - Teste 2

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta\epsilon_1$ $10^{-6}$
0	24250
78	276
158	299
198	304
244	315
196	297
158	290
80	274
0	249

TAB. 4.10 - Teste 3

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_1$ $10^{-6}$
0	24250
78	280
158	298
196	307
243	325
197	306
159	297
80	278
0	251

TAB. 4.11 - Teste 4

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_1$ $10^{-6}$
0	24250
78	271
158	293
197	299
254	306
198	300
159	291
81	273
0	250

TAB. 4.12 a 4.14 - Relação entre VL e  $\epsilon_t$ , para o ferro fundido

TAB. 4.12 - Teste 1

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_t$ $10^{-6}$
0	31600
78	593
159	583
198	580
253	576
198	581
162	584
81	591
0	598

TAB. 4.13 - Teste 2

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_t$ $10^{-6}$
0	31600
79	593
160	588
200	584
258	579
202	584
164	588
84	593
-	600

TAB. 4.14 - Teste 3

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_t$ $10^{-6}$
0	31600
78	595
161	587
200	584
255	578
198	585
163	588
83	595
0	601

TAB. 4.15 a 4.17 - Relação entre VL e  $\epsilon_1$ , para o Aço 1020.

TAB. 4.15 - Teste 1

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_1$ $10^{-6}$
0	27750
78	785
254	808
160	778
82	774
0	749

TAB. 4.16 - Teste 2

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_1$ $10^{-6}$
0	27750
79	779
254	811
82	777
0	750

TAB. 4.17 - Teste 3

$\Delta VL$ (mV)	$\Delta \epsilon_1$ $10^{-6}$
0	27750
80	775
160	788
255	813
83	774
0	750

## C A P I T U L O 5

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS

## DE RIGIDEZ NORMAL

## 5.1 - Generalidades

Como foi verificado por diversos pesquisadores, a relação da aproximação  $\lambda_n$  de duas superfícies usinadas de um determinado material, e acabamento superficial, com a pressão normal  $P_n$  a ela aplicada, se faz na forma de potência, ou seja, conforme a equação,

$$\lambda_n = C \cdot P_n^M \quad (5.1)$$

em que os valores de  $C$  e  $M$  são parâmetros característicos, função do material e acabamento superficial da junta.

Para determinação destes valores, foram planejados testes experimentais com o ferro fundido, aço 1020 e bronze, usando os acabamentos superficiais usuais em juntas de máquinas ferramentas: retificado, fresado, torneado, plainado, rasqueteado fino, rasqueteado normal e rasqueteado grosseiro.

O dispositivo para realização dos testes foi desenvolvido, de acordo com a figura 5.1. Consiste de uma prensa mecânica, com aplicação de carga manual através de um parafuso de movimento, que transmite força aos modelos, por meio dos elementos elásticos - no caso foram usadas molas prato.

Esta prensa prevê três possibilidades de medição de força, a saber:

- através do dinamômetro de anel WAZAU, com uso de extensômetros de resistência colados nos pontos de maior deformação. Foram usados quatro destes elementos, para se ter melhor precisão de medida.

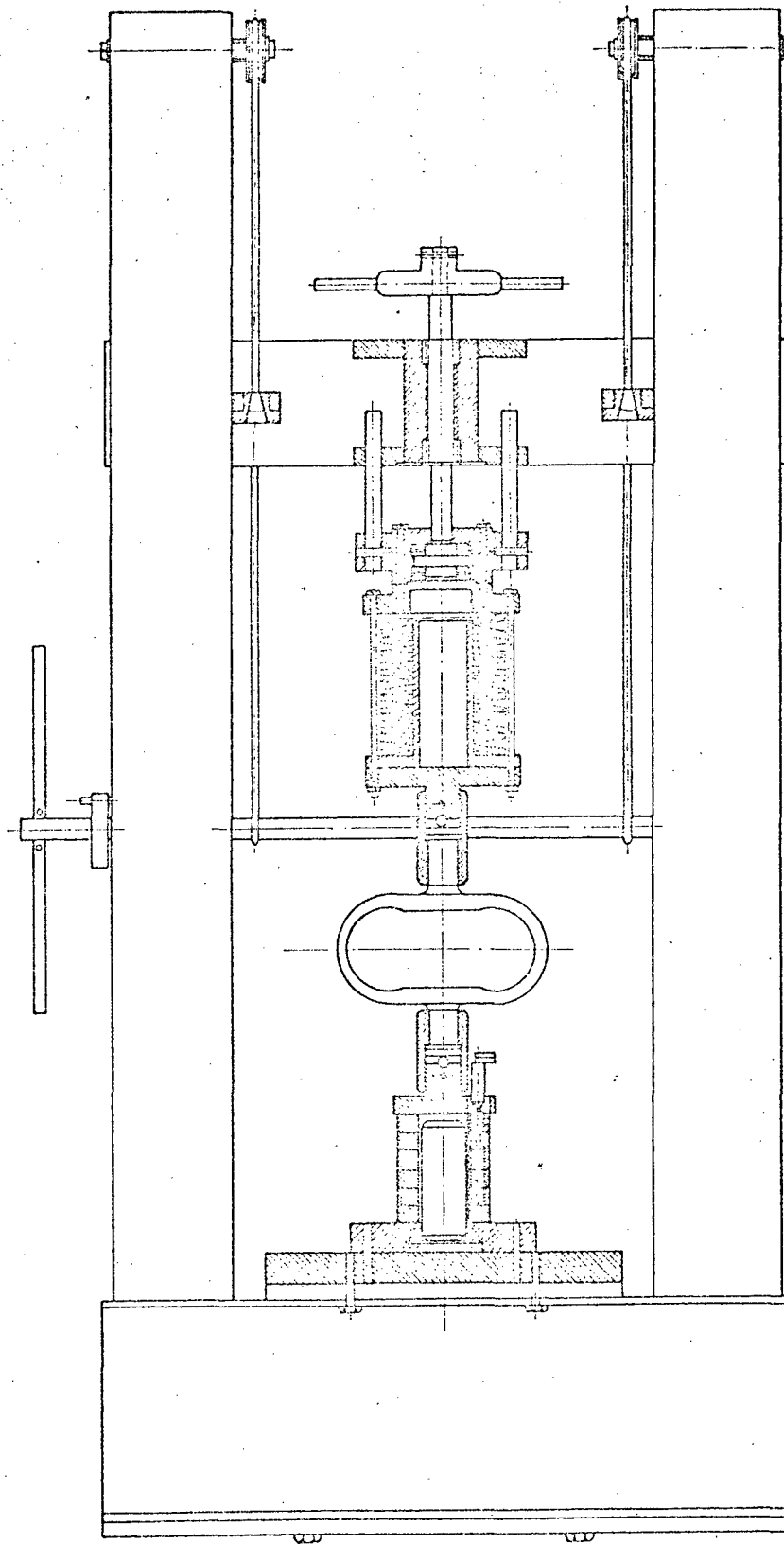


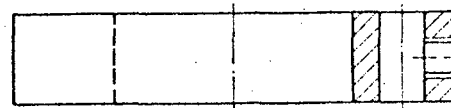
Fig. 5.1 - Projeto "Genoveva" Prensa Mecânica.  
Capacidade: 3.500 kgf.

- através de dinamômetro de anel WAZAU, com uso de relógio comparador - a deformação do anel amplificado mecanicamente pode ser obtido por relógio comparador e relacionado na aferição, com cargas padrão correspondente.
- com uso da arruela piezoelétrica KISTLER - com amplificação mecânica colocados no fluxo de força. A curva de calibração determinada anteriormente pode fornecer os valores de carga correspondente.

## 5.2 - Modelo utilizado

Projetou-se um modelo de junta de forma anular que atendesse às condições básicas do teste experimental: pequena dimensão, para não levar em conta os efeitos de ondulosidade; forma geométrica que permitisse uma execução simples. O resultado destas premissas recaiu na escolha de um modelo constituído de maior número de anéis (diâmetro externo de 75 mm, diâmetro interno de 40 mm e com altura de 15 mm). Para aumentar a deformação da junta, a figura 5.2, mostra este conjunto de anéis. Os cinco anéis superiores tem três furos de 8 mm de diâmetro nominal na parte média da espessura, defasados de  $120^{\circ}$ , para dar alojamento aos apalpadores que medirão a deformação das superfícies. Com isto, tem-se uma área aparente de  $30,10 \text{ cm}^2$ . Os apalpadores são fixados através de parafusos, conforme mostra a figura 5.3.





SECÇÃO AB

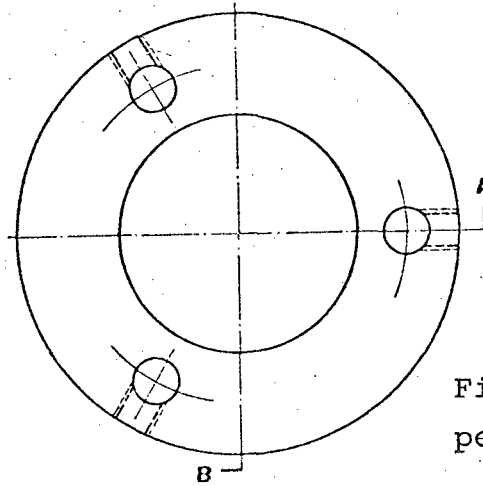


Fig. 5.2 - Anel superior do modelo

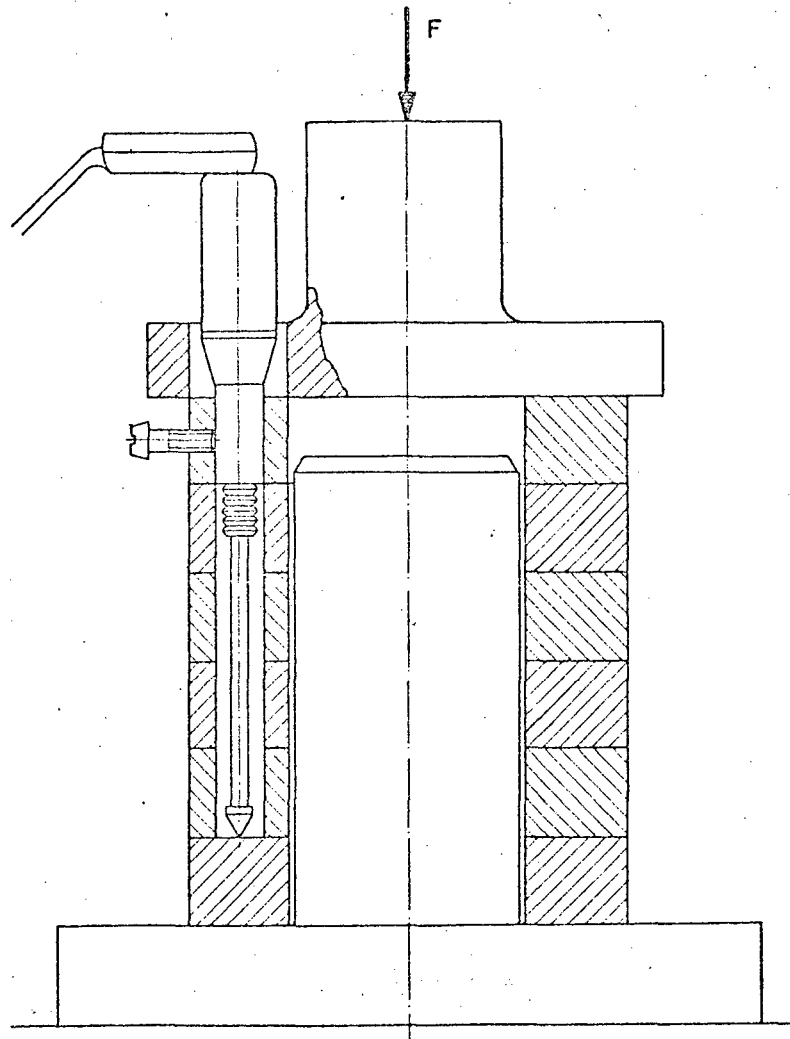


Fig. 5.3 - Modelo utilizado. Detalhe da fixação do apalpador.

### 5.2.1 - A usinagem dos corpos de prova

- a) Retificados - Os seis anéis foram colocados na mesa de uma retífica plana radial, usinados simultaneamente.

A velocidade nominal do rebolo é 0,16 m/seg; o avanço usado, foi o menor possível: 0,4 mm por passada.

Nos testes preliminares e mesmo em alguns testes definitivos (na oportunidade, são referenciados), o rebolo era afiado com ponta de diamante de maneira que o perfil tivesse forma abaulada. Isto provoca uma suave ondulosidade na superfície, resultando em valores dos parâmetros de rugosidade bem altos. Mudou-se então a maneira de afiar a ferramenta; o perfil de corte era então uma reta. Com isto conseguiu-se acabamentos superficiais com valores de rugosidade mais baixos.

- b) Torneado - Operação feita com cada elemento independentemente, fixado em placa de três castanhas. A ferramenta de corte tinha a ponta arredondada para dar um melhor acabamento superficial, usando velocidades e avanços sempre adequados para o material do anel. O equipamento usado foi um torno mecânico paralelo.

- c) Fresado - Usinagem feita com cada anel, utilizando uma fresa cilíndrica com dentes helicoidais 80 x 80. Os elementos eram presos numa morsa que estava fixa no meio da mesa da fresadora. Equipamento utilizado foi uma fresadora horizontal.

- d) Plainado - Foi feito um suporte especial para fixação dos anéis que era preso por uma morsa à mesa. Usou-se o curso máximo (650 mm); entretanto, foi utilizado apenas a usinagem de dois anéis (corresponde a 160 mm aproximadamente de espaço útil), colocado na posição média do curso. Isto é justificado para permitir usinagem com mesma velocidade de corte, pois nesta operação, a velocidade da ferramenta varia no decorrer do curso e se tem interesse em acabamentos superficiais dentro das mesmas condições de operação. Também foi utilizado o menor passo possível. Equipamento utilizado foi uma plaina limadora.

e) Rasqueteado - Operação manual executada por operário especializado neste tipo de acabamento. Inicialmente, os anéis foram retificados com o melhor acabamento possível e com verificação do número de pontos em contato com uma superfície padrão de referência eram determinadas as regiões necessárias para desbaste. A ferramenta (rasquete) foi fabricada pelo próprio operário. Categorizou-se da seguinte maneira:

GRAU DO RASQUETEAMENTO	Nº PONTOS EM CONTATO
Grosso	1,0 - 1,5 pontos/cm <sup>2</sup>
Normal	2,0 - 2,5 pontos/cm <sup>2</sup>
Fino	3,0 - 4,0 pontos/cm <sup>2</sup>

6.3 - Procedimento escolhido para determinação dos parâmetros característicos de rugosidade superficial.

O equipamento disponível no Centro Tecnológico da UFSC é o rugosímetro Dr. Perthem, cujas especificações encontram-se no item 6.5, que possibilita leitura direta para valores de  $R_a$  (CLA),  $R_s$  (rms),  $R_t$  e  $R_p$  nas diversas escalas: 0,1; 0,25; 0,5 ; 1,0 ; 2,5; 5,0; 10,0 e 25,0  $\mu$ m. Também este equipamento permite a saída do diagrama representativo do trecho de superfície analisado, com fatores de ampliação de 100.000, 40.000, 20.000, 10.000, ..., 400.

Decidiu-se analisar duas regiões de cada superfície que entrasse em contato no sentido transversal ao da usinagem. Como o modelo é constituído de 6 anéis, com 5 superfícies de aproximação, foi necessário analisar 20 regiões de cada modelo.

Para definir as características de rugosidade superficial, foram considerados os valores de  $R_a$  e  $R_t$  (DIN 4762), baseado nas considerações do apêndice 1.

No anexo 3, é apresentado a planilha para obtenção dos valores do teste. Os valores que acompanham cada teste, correspon

pondem a média das 20 regiões verificadas.

#### 5.4 - Curvas de calibração

##### 6.4.1 - Medida da deformação

Para medir a deformação, no modelo utilizado previram-se três apalpadores, com finalidade de se ter um valor médio da deformação para cada carga aplicada, sendo este valor correspondente à aproximação de cinco pares superfícies em contato.

Teve-se duas possibilidades de leitura: utilizando o aparelho de leitura TESA, com leitura analógica, ou através do Multiteste FLUKE, com mostrador digital. A tabela 5.1 apresenta o resultado das curvas de calibração para os apalpadores 1, 3 e 5, que eram conectados aos canais 1, 3 e 5 da chave seletora de canais, para as escalas de 10, 30 e 100  $\mu\text{m}$ , onde:

D = valor da deformação, em  $\mu\text{m}$ ;

LT= valor da leitura, quando utilizado o aparelho de leitura TESA, em  $\mu\text{m}$ ;

LM= valor da leitura, quando utilizado o voltímetro Multiteste FLUKE, em mV.

TAB. 5.1 - Tabela das equações resultantes das curvas de calibração para os apalpadores, quando utilizado o aparelho de leitura (AP L) TESA, ou Multímetro Digital FLUKE (MULT DIG).

ESCALA		10 $\mu$ m	30 $\mu$ m	100 $\mu$ m
AP1 / C 1	AP L TESA	D = LT.1,0203	D = LT.1,0071	D = LT.0,9978
	MULT DIG	D = LM.50,153	D = LM.147,71	D = LM.487,08
AP3 / C 3	AP L TESA	D = LT.1,0215	D = LT.1,0013	D = LT.0,9910
	MULT DIG	D = LM.49,980	D = LM.147,22	D = LM.482,72
AP5 / C 5	AP L TESA	D = LT.1,0238	D = LT.1,0069	D = LT.1,0035
	MULT DIG	D = LM.49,871	D = LM.146,86	D = LM.488,51

Nos testes preliminares, usaram-se ambas leituras e determinou-se um valor médio. Verificando o erro ocorrido no uso da leitura apenas pelo aparelho TESA, notou-se que o mesmo era aceitável (o erro percentual máximo ocorrido foi menor que 2%). Para simplificar na realização do teste definitivo, adotou-se então esta solução.

#### 5.4.2 - Medida da força

Para medição da força optou-se nos testes definitivos, pelo uso da arruela piezoelétrica cuja indicação obedece à seguinte relação:

$$F = 0,5 \cdot 10^3 \cdot VL \quad (5.2)$$

onde: F = valor da força, em kgf

VL = valor da leitura, utilizando como leitura o voltímetro Multiteste FLUKE, em mV.

relação esta obtida pelo Calibrador KISTLER e comparada com outros pesquisadores que na época trabalhavam com equipamentos semelhantes, e também comparada com os outros meios de medição de força.

Como o modelo (conjunto de seis anéis) apresenta uma área aparente de contato de  $30,10 \text{ cm}^2$ , pode-se relacionar diretamente a pressão normal de contato, dividindo a equação (6.2) pelo valor da área aparente, ou seja:

$$P_n = \frac{F}{A_a} = 16,61 \cdot VL \quad (5.3)$$

onde:

$$P_n = \text{pressão normal (em kgf/cm}^2\text{)}$$

A curva de calibração para determinação da força utilizando dinamômetro de anel, com uso de extensômetro, é dada pela equação:

$$F = 501,4 \cdot v\ell \quad (5.4)$$

onde:

$$v\ell = \text{valor da deformação dos extensômetros (soma dos quatro elementos) em } 10^{-5} \text{ } \mu\text{m.}$$

Utilizou-se para esta calibração, como carga padrão, o registro da arruela piezoelétrica. Até o momento, não se tinha um sinal firme do elemento piezoelétrico; ou, em outras palavras, para um carregamento até 1.000 kgf alcançados com vários acréscimos de carga, 6 a 7 passos, não era obtido a mesma resposta para o descarregamento correspondente. Ou melhor: a soma dos acréscimos no carregamento não era igual à soma dos decréscimos no descarregamento. Utilizou-se o "Charger Amplifier".

Realizou-se, então, 13 testes, dando apenas uma, duas, ou no máximo três passadas, a cargas e descargas de aproximadamente 1000, 2000 ou 3000 kgf (nível máximo de carga que era necessário), para que se tivesse diminuído este efeito.

Esta fonte de medição foi utilizada nos testes preliminares e foi abandonada, pois a ponte extensométrica falhou e principalmente porque se conseguiu um perfeito desempenho da arruela piezoelétrica quando da substituição do amplificador (a partir de então, usava-se "Dual Mode Amplifier").

A curva de calibração que relaciona força com a deformação do Dinamômetro de anel WAZAU, com uso de relógio comparador é representado pela equação:

$$F = 0,5554 \cdot DEF \quad (5.5)$$

onde:

F = valor da força em kgf;

DEF = deformação amplificada lida no relógio comparador, em  $\mu\text{m}$  ;

relação esta que confere com experimentos realizados por H. HARTSTEIN<sup>46</sup>. Para determinação desta equação, utilizou-se uma balança dinamométrica mecânica, cujo projeto foi desenvolvido e executado neste Centro por H. HARTSTEIN, com fator de multiplicação de  $1 \times 10,94$ , em seis ensaios. Os "pesos padrões" foram calibrados no Instituto Nacional de Pesos e Medidas, secção Porto Alegre-RS, e a carga máxima aplicada ao dinamômetro de anel foi de 650 kgf.

Como já foi dito, utilizou-se a medição de força por meio de extensômetros apenas nos testes preliminares. Para os testes definitivos, usou-se a medição de força por meio da arruela piezoelétrica. Para termos certeza de sua curva de calibração, relacionou-se o sinal resultante de uma determinada carga aplicada, com o sinal referente ao dado pelo relógio comparador e verificou-se a validade da equação (5.2).

## 5.5 - Equipamentos utilizados

### 1. Dispositivo de execução de teste.

A figura 5.1 apresenta um esquema da prensa mecânica desenvolvida especialmente para este procedimento de teste, e executada no Laboratório de Máquinas Operatrizes, CT-UFSC. A capacidade de carga normal é de 3.000 kgf.

### 2. Medição da força.

- a) Dinamômetro de anel WAZAU, com uso de extensômetros - O dinamômetro de anel WAZAU, tem capacidade de carga até 3.500 kgf. Os extensômetros eram da Hottinger B.M., Alemanha, código 3/120 LA 21, com fator  $K = 1,95 \pm 1\%$ . O sinal dos extensômetros era captado pela ponte extensométrica digital, da BLH Eletronics, INC-E.U.A., associada ao indicador digital modelo 904.
- b) Dinamômetro de anel WAZAU, com relógio comparador - O relógio comparador era fixo a uma alavanca que transmitia a deformação do anel, amplificada mecanicamente, no sentido da aplicação da carga. A sensibilidade do relógio utilizado é de  $1 \mu\text{m}$ .
- c) Com uso de arruela piezoelétrica - A arruela piezoelétrica-KIAG-SWISS, tipo 902 A, Sn 57.297, com capacidade de 3.500 kgf, sensibilidade de  $42,1 \text{ pC/kp}$ , era associada ao "Dual Mode Amplifier", da Kistler, modelo 504D147. O aparelho de leitura utilizado era o voltímetro digital FLUKE. Também foi utilizado para calibrar a arruela, o calibrador Kistler, tipo 5351.

### 3. Medição da deformação.

Foram utilizados os apalpadores TESA de códigos BI 285, BI 150 e GI 087, cujo erro máximo de medida corresponde a 2% do valor máximo da escala. Eram associados a um selet TESA que possui 5 canais. Usou-se o aparelho de leitura TESA, código



GN22, que possui as seguintes escalas: 300, 100, 30, 10 e 3  $\mu\text{m}$ . Também era possível obter a leitura através do voltímetro digital FLUKE. Os apalpadores foram calibrados com blocos padrão JENA - com grau de precisão original zero.

#### 4. Determinação dos parâmetros de rugosidade.

Os parâmetros  $R_a$  e  $R_t$  (DIN 4762), foram obtidos pelo rugosímetro Dr. Perthem, constituído de três elementos: uma mesa para acomodação do modelo, associada a um apalpador (cujas características são: tipo T25, Sistema de numeração 30.465, valor máximo ( $W + R_t$ ) = 25  $\mu\text{m}$ , raio do estilete = 4  $\mu\text{m}$ ), o rugosímetro propriamente dito, onde o sinal obtido pelo apalpador é amplificado e apresentado através de mostrador analógico - (Perth-O-METER, tipo W1Be) e é o registrador da rugosidade analisada, com diversos graus de amplificação (Perth-O-Graph, tipo R-100 T).

### 5.6 - Testes preliminares

#### 5.6.1 - Obtenção da primeira curva de carregamento

Ao iniciarem-se os experimentos, fixou-se como objetivo determinar os parâmetros característicos da rigidez normal, para até um limite máximo de pressão normal de 50  $\text{kgf/cm}^2$ , limite este raramente ultrapassado em juntas. Para isto, obteve-se a primeira curva de carregamento, vide figura 5.4, a exemplo da obtida por CONNOLLY<sup>5</sup>, usando o modelo AAA, de ferro fundido, retificado. Conforme pode ser notado, a curva resultante se assemelha bem a obtida por CONNOLLY. Entretanto, algumas dúvidas surgiram:

- 1) Como neste estudo, deve-se trabalhar dentro de um regime elástico, terá ocorrido na primeira etapa de um carregamento, toda a deformação plástica proveniente do amassamento da rugosidade?

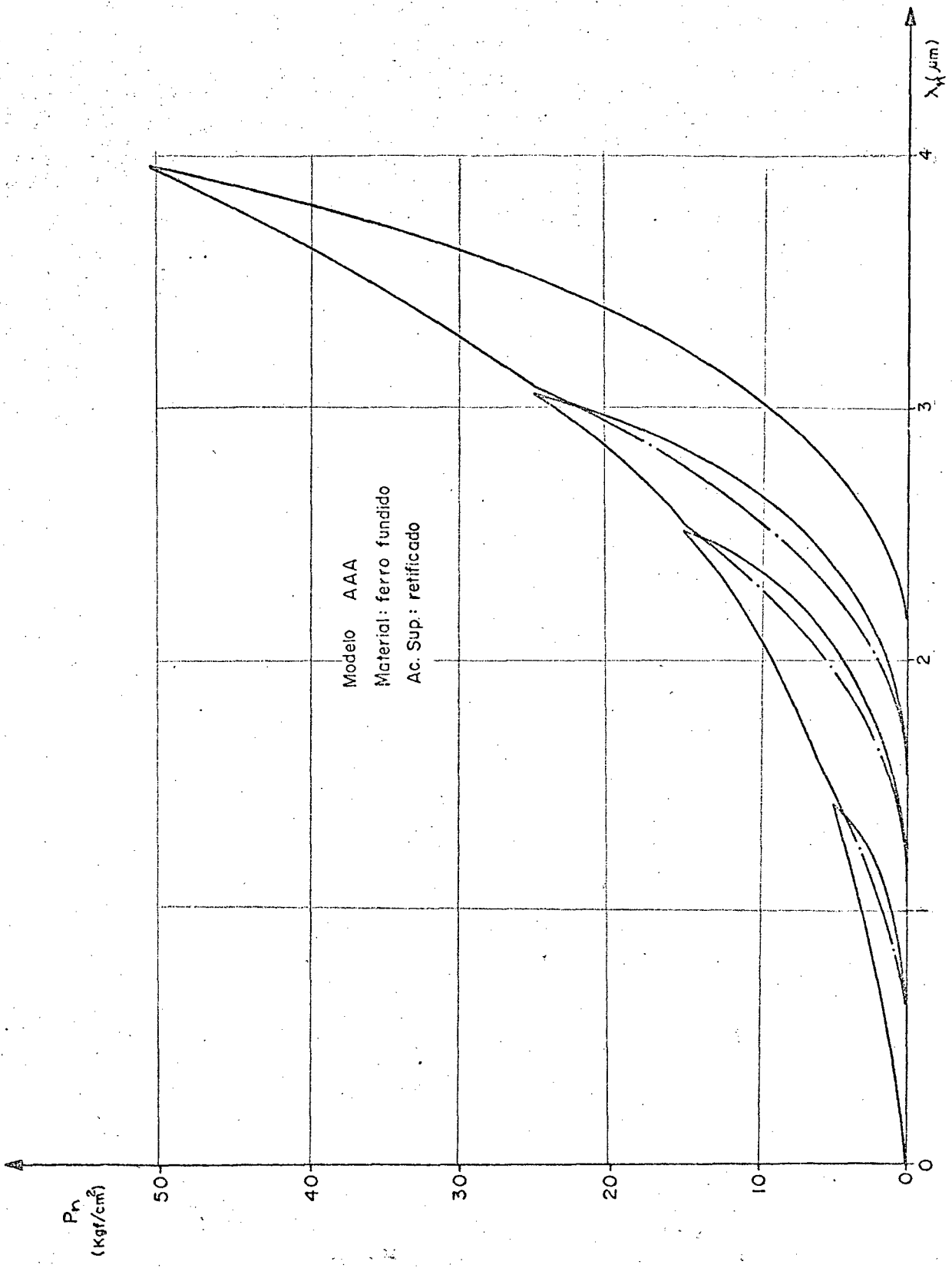


Fig. 5.4 - Curva do primeiro carregamento.

- 2) Para um novo ciclo de carregamento, as curvas do novo carregamento até o nível da carga anterior e a curva do descarregamento anterior não coincidem? São curvas independentes formando laço de histerese?
- 3) As curvas de carregamento e descarregamento para níveis de carga diferentes, podem ser representadas como uma única?

Outros testes foram realizados na tentativa de responder a estas perguntas e obteve-se a figura 5.5, utilizando também o modelo AAA, ferro fundido, retificado. Seria importante registrar que para cada novo conjunto de testes, os acabamentos dados às superfícies estavam intactas, sem terem suportado qualquer solicitação a não ser a da operação de usinagem. Notou-se, então, que para um determinado nível de carga, não basta apenas um ciclo de carregamento até este limite máximo para que se tenha a curva, no regime elástico. Isto ocorreu para todos os níveis e a figura 5.6 mostra com mais detalhe o comportamento da deformação plástica: o primeiro carregamento é o de principal importância, entretanto não é o bastante, e os demais são para obtenção de uma melhor acuidade.

Um outro fator importante notado, é que após toda deformação plástica ter tomado lugar, os testes executados posteriormente apresentam repetibilidade, ou seja, obtem-se curvas iguais, se não for ultrapassado o limite máximo deste nível.

A segunda pergunta também teve resposta positiva: existe histerese; as curvas de carregamento e descarregamento formam um laço. Pode-se considerá-las como curvas independentes.

A respeito da terceira dúvida, pode-se mostrar a figura 5.7. As curvas que compõem esta figura são as obtidas da figura 5.5, quando apenas se tem deformações dentro do regime elástico. Tem-se curvas a níveis de pressão normal de 5, 15, 25 e 50 kgf/cm<sup>2</sup>, e verificou-se o que era de se esperar: curvas diferentes para diferentes níveis de pressão, mas não obedecendo o critério de quanto maior carregamento maior rigidez.

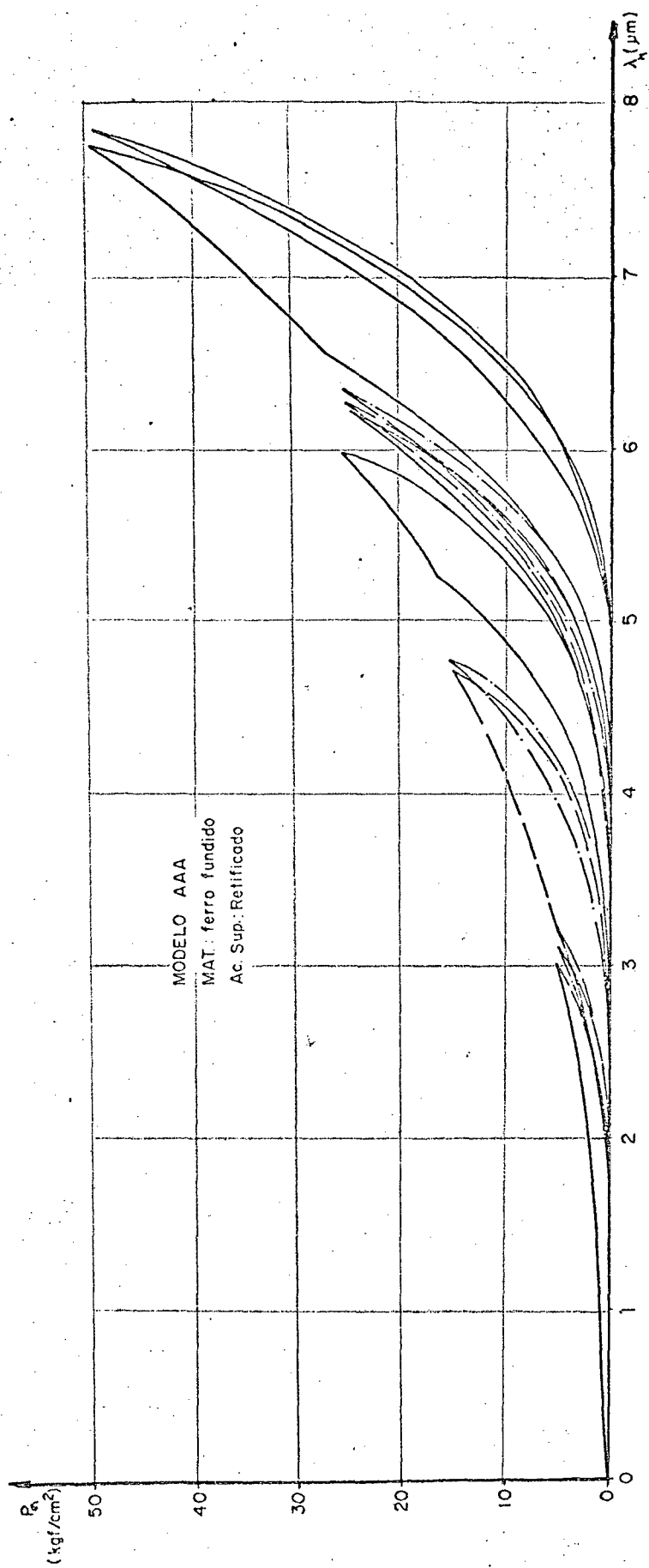


Fig. 5.5 - Curvas para determinação do regime elástico de cada superfície, para os diversos níveis de carga.

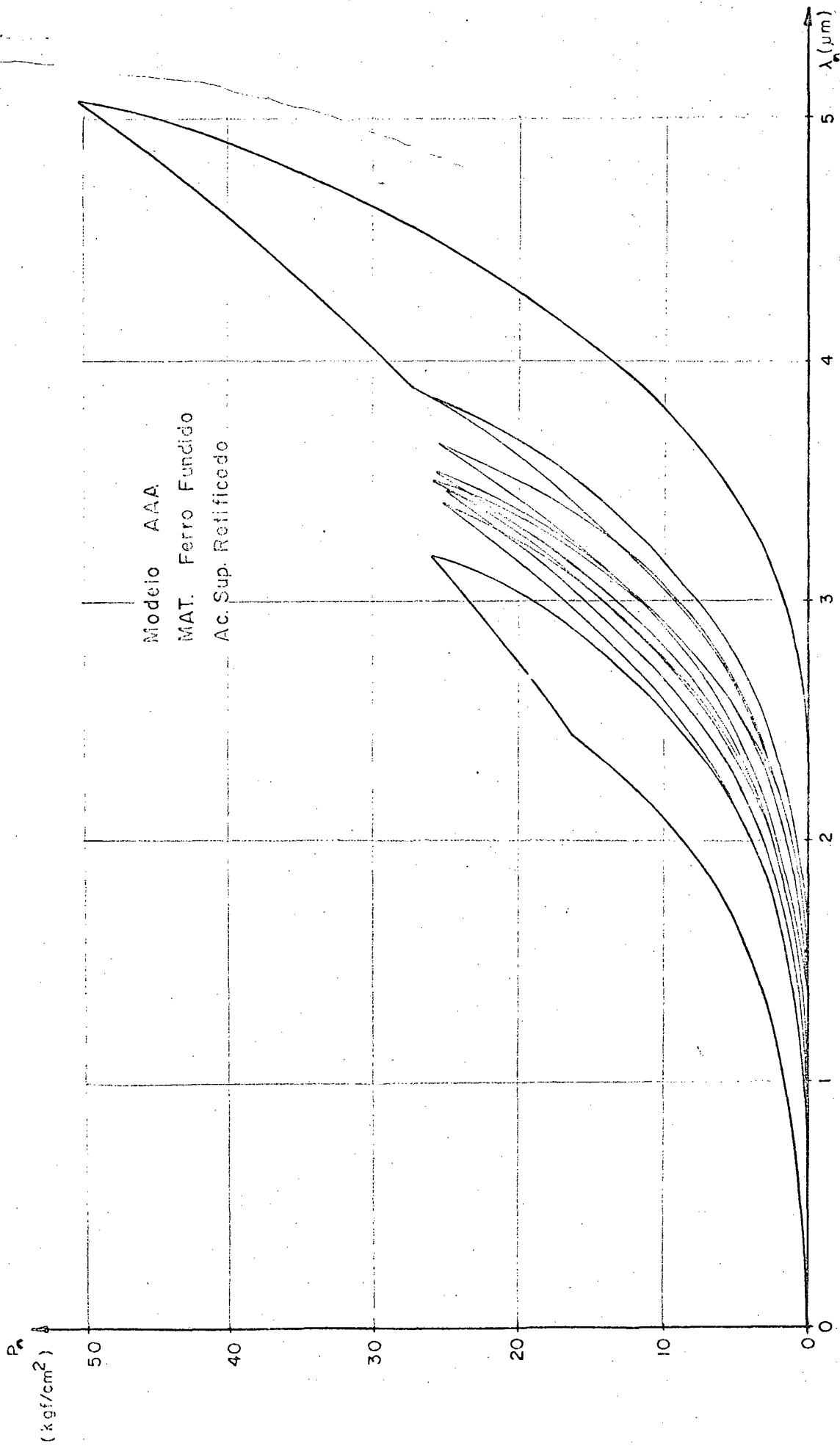


Fig. 5.6 - Detalhe do número de ciclos de carregamento, para se obter o comportamento elástico das rugosidades de superfície.

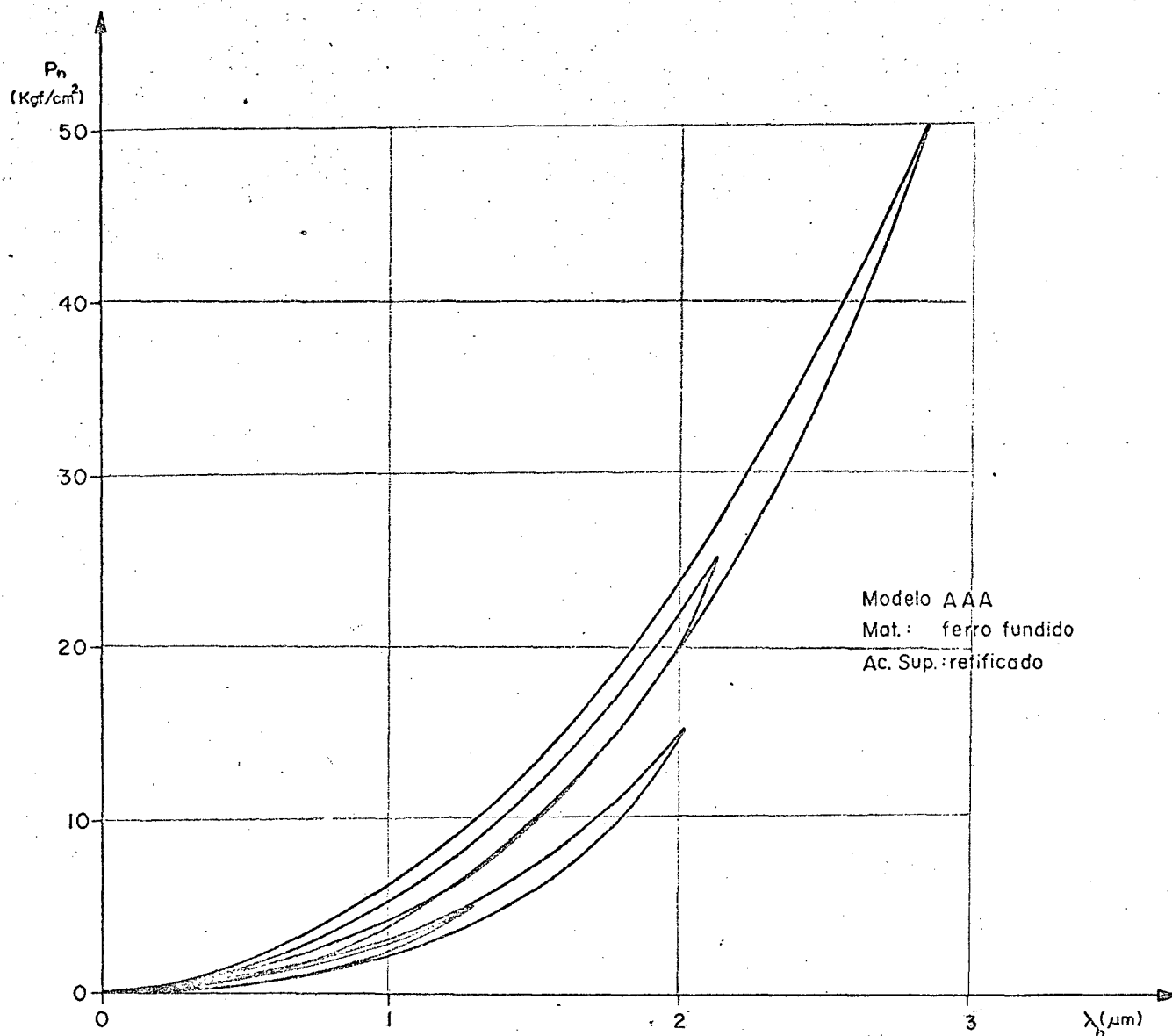


Fig. 5.7 - Curvas representativas do comportamento das rugosidades dentro do regime elástico, para os diversos níveis (contínuos) de carga.

### 5.6.2 - Testes preliminares propriamente ditos

Dos testes anteriormente citados, não se pode obter a orientação para realizar os testes definitivos. Resolveu-se então verificar:

- a) influência do primeiro nível de cargas;
- b) outros testes, fixando como primeiro carregamento  $5 \text{ kgf/cm}^2$ .

A partir dos dados obtidos determinou-se os parâmetros C e M calculados através do método dos mínimos quadrados. Pode-se concluir que há repetibilidade de testes, ou melhor, para testes realizados logo após, sem que haja separação das superfícies, os valores obtidos são bem próximos. A tabela 1 do Apêndice 2 mostra este fato.

Comparando os parâmetros obtidos para o mesmo modelo quando aplicado inicialmente 5, depois 10, 15, 20 e  $25 \text{ kgf/cm}^2$ , não se verificou uma ordem coerente. Pode ser verificado nos testes de 96 a 100, apresentados nas figuras 5(a, b, c, d, e, f), do Apêndice 2, como exemplo.

Mais testes foram também realizados e chegou-se a duvidar do equipamento de medição. Nova calibração foi feita, e verificou-se a validade das equações experimentais de calibração obtida anteriormente. Entretanto a ponte extensométrica digital apresentou defeito em seu funcionamento e teve-se que recorrer aos demais meios de medição de força. Usou-se a arruela piezoelétrica Kistler acoplada ao "Dual Amplifier", e Multiteste digital, especificados no item 5.5.

Vale ainda salientar, que durante os testes definitivos, obtinha-se calibração em intervalo de tempo, para dar confiança nos valores obtidos.

## 5.7 - Testes definitivos

### 5.7.1 - Generalidades

Denominou-se testes definitivos àqueles realizados após os testes preliminares e que serão levados em consideração, para a determinação dos parâmetros específicos de rigidez normal. Antes de serem executados, fixaram-se os seguintes objetivos:

- A) determinar dos parâmetros de rigidez normal C e M, para os materiais e acabamentos planejados inicialmente, com testes cujo primeiro nível de carga era de  $5 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais, a níveis de 10, 15, 20, 25, 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- B) Verificar a influência do primeiro nível de carga nos parâmetros C e M de rigidez normal:
- 1º nível:  $10 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais testes 20, 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$
  - 1º nível:  $15 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais testes 25, 35 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$
  - 1º nível:  $20 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais testes 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$
  - 1º nível:  $25 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais testes 35 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$

Para simplificação dos testes, utilizou-se somente o retificado como acabamento superficial no aço 1020 e ferro fundido.

### 5.7.2 - Preparação e execução do experimento.

#### a) modelo -

- forma geométrica e acabamento superficial;
- remoção de rebarbas e limpeza das superfícies;
- análise da rugosidade superficial;
- montagem do conjunto de anéis;

#### b) preparação do teste propriamente dito

- aquecimento dos equipamentos - em dias normais, de 15 a 20 min; em dias mais úmidos e frios, de 2 a 3 horas;
- colocação do modelo na correta posição, na base da Prensa Mecânica;
- preparação da Prensa Mecânica - posicionamento do suporte



- que sustenta o parafuso transmissor da porca;
- fixação dos apalpadores.

c) Procedimento de teste

- 1 - zeragem nos aparelhos de leitura de medição;
- 2 - relatório de pré-carga - entende-se por relatório de pré-carga aos ciclos de carga a que o modelo é submetido para que haja amassamento da rugosidade, fazendo com que toda a deformação plástica correspondente a este nível de carga, já tenha ocorrido. Em geral, era executado 10 ciclos de carga, para cada nível. O anexo 4 apresenta um tipo deste relatório;
- 3 - nova zeragem nos aparelhos de leitura de medição;
- 4 - teste propriamente dito. Fixou-se em 6, o número de pontos para a determinação de cada curva: carregamento e descarregamento. O anexo 5 apresenta um modelo da planilha usada (eram usadas 2 vias) para coleta dos dados.
- 5 - volta ao item 1, até que todos os níveis de carga tenham sido efetuados.

5.7.3 - Determinação dos parâmetros C e M.

Foi montado um programa de computador para a determinação dos parâmetros C e M, com base nos dados de teste. A figura 6.13 apresenta um esquema deste programa, em que:

- IFLAG - controla a sequência do programa;
- Entrada dos dados da planilha - o programa recebe todos os dados contidos nas planilhas: dados obtidos (resultados do procedimento de teste) e dados específicos (parâmetros que especificam o teste e suas condições: número de teste, temperatura, umidade, data, etc.);
- Escrita dos dados da planilha - planejou-se uma listagem em forma de relatório, com os dados obtidos e específicos do teste;
- Determinação dos valores de pressão e deformação - estes valores foram determinados em função dos resultados das equações de calibração, apresentadas nos itens 5.4.1 e 5.4.2.

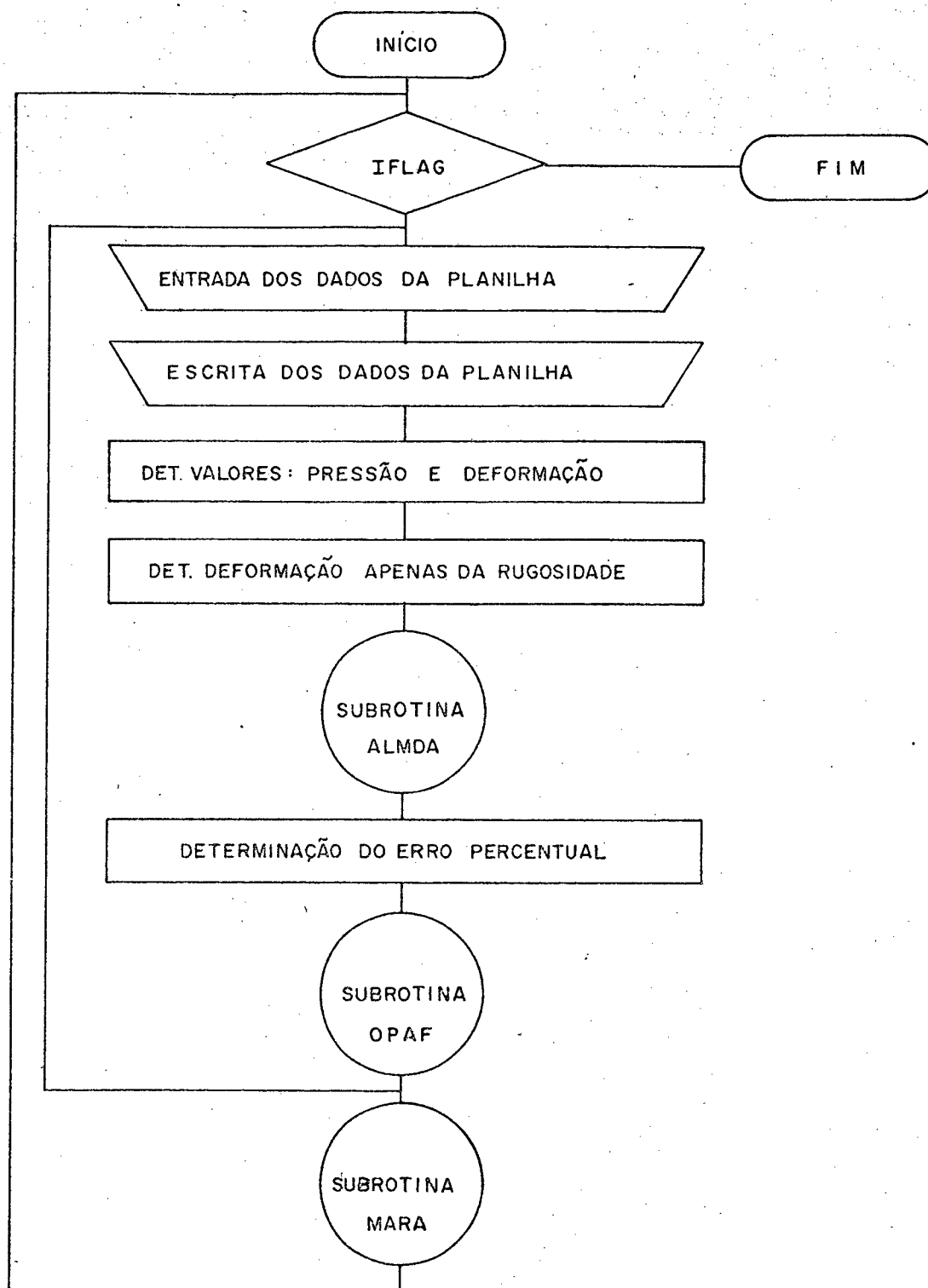


Fig. 5.8 - Fluxograma do procedimento de cálculo para determinação de C e M.

- Determinação da deformação apenas da rugosidade. O valor da deformação calculada no ítem anterior, corresponde a um valor médio dos três pontos medidos através dos apalpadores. Diminuiu-se deste valor uma porção correspondente à deformação do corpo sólido equivalente dividida pelo número de pares superfícies em contato.
- Subrotina ALMDA - Esta subrotina calcula o valor de C e M para as curvas de carregamento, média e descarregamento. O resultado acompanha o relatório.
- Determinação do erro percentual - Determinação esta, feita por comparação das curvas aproximadas em relação aos dados obtidos. Também é registrado este valor no relatório do teste. (Anexo 6)
- Subrotina OPAF - Subrotina que plota os pontos em gráfico, bem como escreve as três curvas características. Não se obteve curvas correspondentes a todos os testes por serem bastante semelhantes, mas grande parte delas foram feitas.
- Subrotina MARA - Os passos anteriores são feitos para todos os testes. Entretanto sabe-se que cada modelo é submetido a um conjunto de testes sendo cada teste a um nível de carga diferente, conforme os ítems 5.7.1 e 5.7.2 - parte C. Dos testes preliminares verificou-se que não se pode pre-estabelecer uma lógica da determinação dos valores de C e M em função do nível de carga. Esta subrotine faz o ajustamento, através dos mínimos quadrados dos valores de C e M em função do nível de carga. Definiu-se então, os parâmetros C\* e M\* como sendo os valores de C e M para uma pressão média de  $25 \text{ kgf/cm}^2$ , dado pelas equações deste ajustamento. Após cada conjunto de teste, esta subrotine prevê a listagem de um relatório destes testes, contendo a especificação do material, acabamento superficial, código do modelo e os números dos testes, bem como os parâmetros C e M calculados para a curva de carregamento, média e descarregamento. Também são apresentadas as equações ajustadas dos parâmetros C e M em função do nível de carga e os valores de C\* e M\*, para cada caso. O anexo 7 apresenta um exemplo desse relatório em que os parâmetros C\* e M\* correspondem aos C(25) e M(25), respectivamente.

#### 5.7.4 - Parâmetros obtidos

Com os resultados de testes individuais e de conjunto de testes, descritos no ítem anterior montou-se a "Biblioteca de dados e resultados da determinação experimental dos parâmetros de rigidez normal" obedecendo ordem de numeração crescente dos testes (a partir do teste 100), com apenas algumas observações que se fazem necessárias e o Resumo dos resultados da determinação experimental dos parâmetros de rigidez normal - vol. I e II, exemplares de publicação interna do CT-UFSC. O vol. I apresenta os relatórios dos conjuntos de testes em ordem da numeração crescente dos testes (a partir do teste 100), enquanto que o vol. II coleciona estes mesmos relatórios, mas já classificando-os em relação ao material e o acabamento superficial, conforme apresentamos neste ítem, e pré-estabelecido em 5.7.1.

PARTE A - primeiro ciclo de carga =  $5 \text{ kgf/cm}^2$ ; demais níveis: 10, 15, 20, 25, 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ .

PARTE B - Influência do primeiro nível de carga.

- 1º nível:  $10 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais de 20, 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Neste caso, denominou-se retificado 10;
- 1º nível  $15 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais de 25, 35 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Idem, retificado 15;
- 1º nível:  $20 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais de 30, 40 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Idem, retificado 20;
- 1º nível:  $25 \text{ kgf/cm}^2$  e os demais de 35 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Idem, retificado 25.

Nota sobre a nomenclatura das tabelas a seguir:

As tabelas a seguir, que apresentam os resultados dos parâmetros C e M obtidos, tem duas codificações: a que segue a ordem crescente do capítulo e outra constituída de uma letra e dois números. A letra representa os estudos acima definidos (parte A e B) e o primeiro número, o material do modelo (1 = ferro fundido; 2 = aço 1020, 3 = bronze) e o outro representa o acabamento superficial analisado. Em geral, a referência do tipo de a

cabamento superficial acompanha a nomenclatura da tabela.

Notas sobre a montagem das tabelas.

- conjunto de teste corresponde a numeração dos testes executados. Por ex: 199-206, são resultados dos testes 199, 200, 201, ..., 206;
- modelo - nome dado ao modelo;
- rugosidade - valores de  $R_a$  e  $R_t$  (DIN 4762) característicos da superfície analisada;
- curva carregamento, curva média, curva descarregamento - no procedimento de cálculo, procurou-se obter parâmetros para curva considerando a histerese (existe uma curva de carregamento e outra de descarregamento) e para a curva média;
- $C_1, M_1$  - parâmetros correspondentes ao primeiro nível de carga. Por ex.: para o conjunto de teste 199-206, corresponderia aos parâmetros para o teste 199;
- $C_2, M_2$  - parâmetros correspondentes ao último nível de carga. No mesmo exemplo acima, corresponderia ao teste 206;
- $C^*, M^*$  - parâmetro médio definido em 5.7.3 (Subrotina MARA);
- $C_1, C_2, C^*$  - significa que o parâmetro C varia de um valor  $C_1$  no primeiro nível de carga a  $C_2$  do último nível de carga, resultando num valor médio definido  $C^*$ .

Nota sobre análise das tabelas.

Os valores médios dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  são calculados, para cada curva em função da classificação dos níveis de rugosidade, (valores de  $R_a$  e  $R_t$ ), conforme distribuição de STUDENT<sup>47</sup>, com confiabilidade de 80%.  $\bar{X}$  representa o valor da média;  $\bar{S}_X$  o desvio da média e  $\underline{d}$  o coeficiente de dispersão.

## A.1 - FERRO FUNDIDO

TAB. 5.2 - A.1.1 - Retificado Cruzado\*

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
191A- 198	AAA	0,57	4,69	0,28	0,39	0,35	0,68	0,40	0,49	0,31	0,44	0,39	0,60	0,37	0,45	0,34	0,48	0,44	0,54	0,35	0,41
199 - 206	ABA	0,50	3,64	0,24	0,36	0,30	0,69	0,43	0,52	0,27	0,39	0,33	0,62	0,40	0,47	0,29	0,42	0,37	0,55	0,38	0,43
207 - 214	ACA	0,61	5,63	0,12	0,19	0,16	0,77	0,54	0,63	0,14	0,22	0,18	0,66	0,51	0,58	0,17	0,25	0,21	0,56	0,47	0,53
215 - 222	ANA	0,72	6,66	0,22	0,42	0,33	0,75	0,41	0,53	0,25	0,46	0,37	0,67	0,38	0,49	0,28	0,50	0,40	0,59	0,26	0,45

Análise da Tabela 5.2:

Pode-se considerar, todas as superfícies analisadas, com mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 0,60 \mu\text{m}$  e  $R_t = 5,16 \mu\text{m}$ . Os parâmetros médios estão apresentados na Tabela 6.6.

TAB. 5.3 - Parâmetros médios: retificado cruzado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d
C*	0,29	0,07	0,30	0,32	0,08	0,30	0,36	0,08	0,28
M*	0,54	0,05	0,11	0,50	0,05	0,12	0,46	0,04	0,12

\*) - definiu-se de retificado cruzado, ao modelo, cuja montagem das superfícies retificadas, fazem com que a orientação das estrias tenham forma de cruz.

TAB. 5.4 - A.1.2 - Retificado\*

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
101 - 108	ABA	1,61	13,60	0,31	0,18	0,22	0,60	0,55	0,60	0,31	0,21	0,24	0,60	0,51	0,56	0,38	0,24	0,29	0,46	0,47	0,49
109 - 116	ANA	1,41	12,83	0,52	0,67	0,60	0,57	0,32	0,40	0,54	0,68	0,61	0,59	0,32	0,40	0,63	0,87	0,76	0,43	0,25	0,32
122 - 125**	AOA	1,68	14,41	0,52	0,71	0,64	0,58	0,39	0,44	0,55	0,75	0,67	0,51	0,37	0,42	0,78	1,08	0,98	0,37	0,25	0,29
128 - 135	ACA	1,50	13,05	0,24	0,42	0,31	0,56	0,32	0,43	0,25	0,42	0,32	0,56	0,32	0,43	0,29	0,56	0,43	0,43	0,25	0,33
423 - 430	AAA	0,75	5,70	0,35	0,76	0,64	0,53	0,31	0,36	0,37	0,77	0,65	0,52	0,30	0,36	0,44	0,92	0,78	0,39	0,26	0,29
431 - 438	ABA	0,39	4,36	0,81	0,92	0,98	0,55	0,29	0,33	0,84	0,92	1,00	0,53	0,29	0,33	1,03	1,03	1,17	0,39	0,26	0,26
439 - 446	ACA	0,26	3,37	0,36	0,56	0,48	0,58	0,34	0,43	0,37	0,57	0,49	0,58	0,34	0,42	0,46	0,70	0,63	0,43	0,28	0,32
607 - 614	ACA	0,68	5,74	0,67	0,98	0,84	0,63	0,39	0,47	0,76	1,07	0,92	0,56	0,36	0,44	0,83	1,16	1,00	0,50	0,34	0,40
623 - 630	ANA	0,53	4,76	0,54	0,82	0,78	0,74	0,37	0,46	0,58	0,89	0,84	0,68	0,35	0,43	0,62	0,95	0,90	0,63	0,33	0,41
631 - 638	AME	0,58	5,12	0,78	1,60	1,15	0,78	0,29	0,48	0,81	1,66	1,21	0,77	0,28	0,46	0,95	2,16	1,60	0,66	0,21	0,36

## Análise da Tabela 5.4:

Neste caso, distingue-se dois graus de acabamento, com relação aos parâmetros de rugosidade: a) dos testes 101 - 108 a 128 - 135, com valores médios de  $R_a = 1,55 \mu\text{m}$  e  $R_t = 13,47 \mu\text{m}$  (estes, tiveram usinagem com rebolo de face abaulada); b) dos conjuntos de testes 423 - 430 a 631 - 638, com valores médios de  $R_a = 0,35 \mu\text{m}$  e  $R_t = 4,84 \mu\text{m}$ . Os parâmetros médios estão apresentados nas tabelas 6.8 e 6.9.

TAB. 5.5 - parte a) - Parâmetros médios: retificado grosso.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,38	0,22	0,53	0,39	0,21	0,50	0,49	0,26	0,49
$M^*$	0,48	0,12	0,23	0,46	0,09	0,18	0,38	0,10	0,25

\*) - Definiu-se retificado, ao modelo cuja montagem das superfícies retificadas fazem com que a orientação das estrias fiquem paralelas.

\*\*\*) - Este conjunto de testes apresentou problema nos apalpadores. Determinou-se para os testes que se comportaram bem, os valores de  $C^*$  e  $M^*$ , embora não se levasse em conta estes resultados.

TAB. 5.6 - parte b) - Parâmetros médios: retificado fino

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,81	0,14	0,29	0,85	0,15	0,30	1,01	0,20	0,34
M*	0,42	0,04	0,15	0,41	0,03	0,12	0,34	0,04	0,18



TAB. 5.7 - A.1.3 - Torneado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
172 - 179	ADB	2,48	20,10	0,34	0,79	0,60	0,73	0,36	0,48	0,35	0,79	0,62	0,74	0,36	0,48	0,41	0,91	0,76	0,63	0,32	0,39
180 - 187	AEB	2,62	20,30	0,83	1,13	1,00	0,73	0,43	0,53	0,86	1,17	1,03	0,75	0,42	0,53	1,01	1,67	1,41	0,65	0,32	0,42
188 - 195	AFB	1,98	15,50	0,28	0,64	0,42	0,75	0,44	0,59	0,28	0,68	0,44	0,75	0,42	0,58	0,32	0,96	0,58	0,66	0,33	0,49
495 - 502	AQB	1,53	14,85	0,60	1,04	0,82	0,51	0,27	0,35	0,62	1,03	0,83	0,50	0,28	0,35	0,71	1,12	0,94	0,40	0,26	0,30
503 - 510	ARB	2,42	18,60	0,34	0,57	0,48	0,63	0,42	0,49	0,35	0,58	0,49	0,64	0,42	0,49	0,42	0,71	0,59	0,53	0,36	0,42
551 - 558	AFB	1,99	14,50	0,39	0,50	0,46	0,80	0,64	0,69	0,76	0,60	0,56	0,83	0,59	0,65	1,32	0,73	0,71	0,71	0,55	0,60
559 - 566	AEB	1,88	15,00	0,54	0,72	0,60	0,65	0,57	0,62	0,56	0,81	0,67	0,62	0,53	0,58	0,58	0,91	0,74	0,60	0,50	0,55
567 - 574	ADB	1,67	12,60	0,40	0,52	0,46	0,73	0,63	0,67	0,43	0,62	0,52	0,67	0,59	0,62	0,48	0,72	0,58	0,61	0,55	0,58

Análise da Tabela 5.7:

Pode-se considerar todas as superfícies analisadas com o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 2,07 \mu\text{m}$  e  $R_t = 16,43 \mu\text{m}$ . Os parâmetros médios estão apresentados na Tabela 6.11.

TAB. 5.8 - Parâmetros médios: torneado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,61	0,10	0,34	0,65	0,10	0,31	0,79	0,14	0,35
$M^*$	0,55	0,06	0,20	0,54	0,05	0,18	0,47	0,05	0,22

TAB. 5.9 - A.1.4 - Fresado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
287 - 294	AGC	1,57	14,6	1,57	2,85	2,33	0,73	0,36	0,48	1,61	2,87	2,40	0,71	0,36	0,47	1,83	3,23	2,91	0,62	0,33	0,39
295 - 302	AHC	1,63	14,3	1,39	2,15	1,74	0,67	0,46	0,56	1,42	2,21	1,79	0,67	0,45	0,95	1,58	2,83	0,21	0,60	0,39	0,48
303 - 310	AIC	1,26	12,3	1,79	3,29	2,43	0,64	0,35	0,45	1,85	3,35	2,48	0,62	0,35	0,45	2,23	4,14	2,99	0,48	0,29	0,38

Análise da Tabela 5.9:

Pode-se considerar todas as superfícies analisadas, com o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 1,49 \mu\text{m}$  e  $R_t = 13,73 \mu\text{m}$ . Os parâmetros médios estão apresentados na Tabela 6.13.

TAB. 5.10 - Parâmetros médios: fresado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	2,17	0,41	0,17	2,22	0,41	0,17	2,70	0,47	0,16
M*	0,50	0,06	0,11	0,49	0,05	0,11	0,42	0,06	0,13

TAB. 5.11 - A.1.5 - Plainado\*

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
319 - 326	AKD	2,13	17,17	0,44	0,59	0,52	0,64	0,37	0,47	0,49	0,62	0,55	0,49	0,36	0,44	0,68	0,80	0,73	0,26	0,29	0,32
327 - 334	AJD	2,48	18,30	0,47	1,22	0,77	0,75	0,35	0,54	0,48	1,28	0,81	0,75	0,34	0,52	0,54	1,65	1,08	0,66	0,27	0,42
335 - 342	AUD	2,61	17,80	0,36	1,26	0,84	0,66	0,27	0,40	0,37	1,29	0,86	0,66	0,27	0,40	0,46	1,62	1,08	0,51	0,21	0,31
351 - 358	ALD	2,35	17,90	0,33	0,81	0,58	0,67	0,31	0,46	0,34	0,84	0,60	0,67	0,31	0,45	0,40	1,05	0,77	0,56	0,24	0,35

Análise da Tabela 5.11:

Pode-se considerar todas as superfícies analisadas, com o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 2,39$  m e  $R_t = 17,93$  m. Os parâmetros médios estão apresentados na Tabela 6.15.

TAB. 5.12 - Parâmetros médios: Plainado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			'DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,68	0,12	0,22	0,71	0,13	0,22	0,92	0,16	0,21
M*	0,47	0,05	0,12	0,45	0,04	0,11	0,35	0,04	0,14

\*) - Definiu-se plainado, ao modelo cuja montagem das superfícies plainadas, fazem com que a orientação das estrias tenha forma paralela.

TAB. 5.13 - A.1.6 - Plainado cruzado\*

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	G <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
343 - 350	ATD	2,66	17,00	1,26	2,92	1,98	0,63	0,29	0,45	1,29	3,11	2,09	0,63	0,27	0,43	1,51	4,59	2,92	0,53	0,16	0,32
511 - 518	ATD	2,52	18,50	2,72	7,73	4,97	0,94	0,44	0,64	3,28	8,43	5,72	0,81	0,41	0,58	3,89	9,00	6,48	0,69	0,39	0,53
519 - 526	ALD	2,47	16,20	1,27	2,59	2,00	0,76	0,40	0,53	1,30	2,72	2,09	0,76	0,39	0,52	1,46	3,72	2,78	0,69	0,30	0,42
527 - 534	AKD	2,84	19,20	0,84	1,67	1,17	0,73	0,43	0,58	0,85	1,83	0,24	0,72	0,41	0,56	0,95	2,98	1,84	0,65	0,27	0,43

Análise da Tabela 5.13:

Pode ser considerado, que todas as superfícies, tenham o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 2,52 \mu m$  e  $R_t = 17,47 \mu m$ . Os parâmetros médios estão na Tabela 6.17.

TAB. 5.14 - Parâmetros médios: Plainado Cruzado.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	1,72	0,52	0,28	1,81	0,53	0,27	2,51	0,64	0,23
M*	0,52	0,07	0,13	0,50	0,07	0,13	0,39	0,07	0,16

- \*) - definiu-se plainado cruzado, ao modelo cuja montagem das superfícies plainadas, fazem com que a orientação das estrias fiquem cruzadas.
- \*\*) - desconsidera-se este conjunto de testes por seus resultados diferirem dos demais.

TAB. 5.15 - A.1.7 - Rasqueteado Grosseiro

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
399 - 406	AME	0,93	10,20	0,64	1,01	0,85	0,65	0,36	0,45	0,67	1,03	0,87	0,64	0,36	0,45	0,81	1,22	1,07	0,50	0,31	0,37

TAB. 5.16 - A.1.8 - Rasqueteado normal

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
407 - 414	APF	0,61	8,80	0,48	0,78	0,66	0,57	0,36	0,43	0,49	0,80	0,67	0,56	0,36	0,42	0,57	1,00	0,81	0,45	0,29	0,35

TAB. 5.17 - A.1.9 - Rasqueteado Fino

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
415 - 422	ASG	0,56	7,59	0,45	0,85	0,64	0,60	0,35	0,45	0,46	0,87	0,66	0,60	0,34	0,44	0,52	1,09	0,80	0,51	0,28	0,37

Análise das Tabelas 5.15, 5.16, 5.17:

Nestes casos como não foi possível realizar mais testes, considerou-se apenas estes parâmetros, não arbitrando quaisquer valores para o desvio da média e dispersão.

## A.2 - AÇO 1020

TAB. 5.18 - A.2.1 - Retificado Cruzado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
239 - 246	BAA	1,56	13,60	0,25	0,53	0,40	0,72	0,30	0,45	0,29	0,57	0,45	0,60	0,28	0,40	0,34	0,61	0,49	0,49	0,26	0,36
247 - 254	BBA	1,29	12,16	0,25	0,48	0,41	0,69	0,36	0,44	0,28	0,51	0,44	0,62	0,35	0,41	0,31	0,54	0,47	0,54	0,33	0,38
255 - 262	BCA	1,54	12,90	0,21	0,37	0,31	0,56	0,33	0,41	0,24	0,49	0,34	0,55	0,30	0,38	0,28	0,44	0,37	0,46	0,28	0,34

Análise da Tabela 5.18:

Pode ser considerado que todas as superfícies analisadas, tem o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 1,46 \mu m$  e  $R_t = 12,87 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.22.

TAB. 5.19 - Parâmetros médios: Retificado Cruzado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,37	0,06	0,15	0,41	0,07	0,15	0,44	0,07	0,15
$M^*$	0,44	0,02	0,03	0,40	0,02	0,04	0,36	0,02	0,06

TAB. 5.20 - A.2.2 - Retificado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
223 - 230	BAA	1,67	13,10	0,66	0,92	0,80	0,53	0,32	0,39	0,69	0,99	0,85	0,50	0,34	0,37	0,72	1,05	0,90	0,47	0,29	0,35
231 - 238	BBA	1,21	12,60	0,43	0,82	0,65	0,71	0,27	0,41	0,49	0,87	0,70	0,61	0,25	0,37	0,55	0,92	0,75	0,53	0,23	0,34
452 - 459	BAA	0,39	4,88	0,43	0,43	0,43	0,47	0,34	0,38	0,46	0,46	0,46	0,43	0,32	0,36	0,48	0,50	0,49	0,41	0,30	0,34
599 - 606	BMG	0,71	6,05	0,53	0,68	0,69	0,69	0,35	0,42	0,57	0,74	0,73	0,64	0,34	0,40	0,61	0,79	0,78	0,60	0,32	0,37
615 - 622	BAA	0,39	3,51	0,67	1,20	0,88	0,68	0,26	0,45	0,68	1,24	0,93	0,67	0,26	0,44	0,75	1,52	1,20	0,60	0,20	0,35
669 - 676	BAA	0,52	4,73	0,26	0,77	0,55	0,65	0,26	0,39	0,27	0,80	0,57	0,64	0,25	0,38	0,32	1,03	0,72	0,51	0,18	0,30

Análise da Tabela 5.20:

Neste caso, distinguiu-se dois graus de acabamento, com relação aos parâmetros de rugosidade: a) dos conjuntos de testes 223 - 230 e 231 - 238, com valores médios de  $R_a = 1,44 \mu m$  e  $R_t = 12,85 \mu m$ ; b) conjunto de testes 452 - 459 a 669 - 671 com valores médios de  $R_a = 0,50 \mu m$  e  $R_t = 4,79 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados nas tabelas 6.24 e 6.25.

TAB. 5.21 - parte a) - Parâmetros médios: retificado grosseiro

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,73	0,16	0,10	0,78	0,23	0,14	0,99	0,20	0,09
M*	0,40	0,03	0,04	0,37	0,00	0,00	0,35	0,02	0,02

TAB. 5.22 - parte b) - Parâmetros médios: retificado fino

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,64	0,16	0,30	0,67	0,17	0,30	0,80	0,24	0,37
M*	0,41	0,03	0,08	0,40	0,03	0,09	0,34	0,02	0,09

TAB. 5.23 - A.2.3 - Torneado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
263 - 270	BDB	1,80	15,00	0,22	0,41	0,32	0,69	0,46	0,54	0,22	0,43	0,32	0,69	0,45	0,54	0,25	0,53	0,38	0,61	0,39	0,48
271 - 278	BEB	2,22	15,80	0,33	0,39	0,36	0,48	0,44	0,47	0,34	0,41	0,37	0,49	0,43	0,47	0,39	0,51	0,43	0,40	0,37	0,41
279 - 286	BFB	1,95	15,50	0,49	0,77	0,60	0,58	0,42	0,51	0,51	0,83	0,62	0,58	0,40	0,50	0,58	1,15	0,76	0,49	0,31	0,43
575 - 582	BDB	1,41	10,00	0,35	0,57	0,44	0,79	0,55	0,65	0,39	0,64	0,50	0,71	0,52	0,60	0,43	0,71	0,56	0,65	0,50	0,56
583 - 590	BEB	1,33	9,77	0,43	0,46	0,51	0,75	0,61	0,63	0,45	0,51	0,55	0,72	0,59	0,61	0,47	0,55	0,59	0,69	0,57	0,58
591 - 598	BFB	1,56	11,30	0,58	0,88	0,78	0,79	0,52	0,59	0,66	0,98	0,87	0,70	0,49	0,55	0,75	1,08	0,96	0,61	0,46	0,51

## Análise da Tabela 5.23:

Neste caso distingue-se dois graus de acabamento, com relação aos parâmetros de rugosidade: a) conjunto de testes 263 - 270 a 279 - 286, com valores médios de  $R_a = 1,95 \mu m$  e  $R_t = 15,43 \mu m$ ; b) conjuntos de testes 575 - 582 a 591 - 598 com valores médios de  $R_a = 1,43 \mu m$  e  $R_t = 10,34 \mu m$ . Os valores médios estão apresentados nas tabelas 6.27 e 6.28.

TAB. 5.24 - Parâmetros médios: torneado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,43	0,17	0,35	0,44	0,18	0,37	0,52	0,23	0,39
M*	0,51	0,04	0,07	0,50	0,04	0,07	0,44	0,04	0,08

TAB. 5.25 - Parâmetros médios: torneado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,58	0,20	0,31	0,64	0,22	0,31	0,70	0,24	0,32
M*	0,62	0,03	0,05	0,59	0,04	0,05	0,55	0,04	0,07



TAB. 5.26 - A.2.4 - Fresado.

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
311 - 318	BGC	1,23	10,70	0,55	0,91	0,71	0,63	0,45	0,54	0,57	0,94	0,73	0,64	0,44	0,53	0,68	1,22	0,92	0,51	0,37	0,44
661 - 668	BHC	1,20	16,67	1,43	2,49	2,03	0,78	0,50	0,61	1,49	3,03	2,30	0,75	0,44	0,57	1,55	3,60	2,59	0,72	0,39	0,54
677 - 684	BGC	1,77	13,76	1,43	2,81	2,02	0,71	0,44	0,59	1,50	2,95	2,13	0,76	0,43	0,59	1,85	4,51	3,22	0,64	0,32	0,44

Análise da Tabela 5.26:

Neste caso, distingue-se dois graus de acabamento superficial em relação aos parâmetros de rugosidade: a) do conjunto de teste 311 - 318, com valores de  $R_a = 1,23 \mu m$  e  $R_t = 10,70 \mu m$ ; b) dos conjuntos de testes 661 - 668 e 677 - 684, com valores médios de  $R_a = 1,49 \mu m$  e  $R_t = 15,22 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados nas tabelas 6.30 e 6.31.

TAB. 5.27 - para este caso, adotou-se os parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  como valores médios e considerou-se o desvio da média como 20% do valor da média e dispersão de 0,17 e 0,13 para o  $C^*$  e  $M^*$  respectivamente, valores estes, maiores que os correspondentes para o fresado, ferro fundido.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,71	0,14	0,17	0,57	0,11	0,17	0,68	0,14	0,17
$M^*$	0,54	0,11	0,13	0,53	0,11	0,13	0,44	0,09	0,13

TAB. 5.28 - parte b) - Parâmetros médios: Fresado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	2,03	0,02	0,00	2,22	0,26	0,05	2,91	0,49	0,15
$M^*$	0,60	0,03	0,02	0,58	0,03	0,02	0,49	0,08	0,14

TAB. 5.29 - A.2.5 - Plainado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
359 - 366	BJD	2,02	18,20	1,06	2,29	1,73	0,62	0,27	0,39	1,07	2,35	1,78	0,61	0,26	0,38	1,17	2,75	2,14	0,54	0,22	0,31
535 - 542	RID	2,06	17,30	1,09	2,14	1,87	0,73	0,34	0,41	1,08	2,15	1,91	0,73	0,34	0,41	1,64	2,38	2,30	0,46	0,31	0,32
543 - 550	BJD	2,14	17,50	1,22	2,14	1,81	0,67	0,41	0,51	1,26	2,23	1,88	0,67	0,40	0,50	1,47	2,90	2,38	0,56	0,32	0,41

Análise da Tabela 5.29:

Pode ser considerado, que todas as superfícies analisadas tem o mesmo grau de acabamento, com valores médios de  $R_a = 2,14 \mu m$  e  $R_t = 17,67 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.33.

TAB. 5.30 - Parâmetros médios: Plainado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	1,80	0,08	0,04	1,86	0,07	0,04	2,27	0,13	0,05
M*	0,44	0,07	0,15	0,43	0,07	0,15	0,35	0,06	0,16

TAB. 5.31 - A.2.6 - Plainado Cruzado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
367 - 374	BID	1,98	16,10	0,88	1,85	1,40	0,64	0,29	0,40	0,90	1,88	1,44	0,63	0,29	0,39	1,00	2,10	1,69	0,55	0,26	0,33

Análise da Tabela 5.31:

Para este caso, adotou-se os parâmetros C\* e M\* do conjunto de teste 367 - 374 como valores médios e considerou-se o desvio da média como 20% do valor médio e dispersão de 0,28 e 0,15 para o C\* e M\* respectivamente, valores estes, pouco maiores que os correspondentes ao plainado cruzado, ferro fundido.

TAB. 5.32 - Parâmetros médios: Plainado Cruzado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d
C*	1,40	0,42	0,28	1,44	0,43	0,28	1,69	0,51	0,28
M*	0,40	0,06	0,15	0,39	0,06	0,15	0,33	0,05	0,15

TAB. 5.33 - A.2.7 - Rasqueteado normal

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
391 - 398	BKE	0,69	9,40	0,34	0,66	0,53	0,63	0,40	0,46	0,35	0,68	0,54	0,61	0,40	0,47	0,42	0,83	0,63	0,49	0,34	0,41

TAB. 5.34 - A.2.8 - Rasqueteado fino

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
375 - 378	BLF	0,53	0,78	0,34	0,22	0,46	0,57	0,55	0,46	0,35	0,24	0,47	0,55	0,53	0,45	0,40	0,37	0,58	0,44	0,41	0,37

TAB. 5.35 - A.2.9 - Rasqueteado grosseiro

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
383 - 390	BMG	0,66	10,40	0,68	0,97	0,89	0,60	0,33	0,42	0,68	1,00	0,92	0,63	0,32	0,42	0,72	1,27	1,09	0,61	0,25	0,36

Análise das Tabelas 5.33, 5.34, e 5.35:

Nestes casos, como não foi possível realizar mais testes, considerou-se apenas estes parâmetros, não arbitrando quaisquer valores para o desvio da média e a dispersão.

## A.3 - MATERIAL BRONZE

TAB. 5.36 - A.3.1 - Torneado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
479 - 486	CAB	0,79	7,45	1,04	1,29	1,07	0,53	0,30	0,41	1,11	1,33	1,14	0,48	0,30	0,38	1,16	1,37	1,20	0,45	0,29	0,36

Análise da Tabela 5.36:

Considerou-se, neste caso, desvio da média e dispersão de 30% para o C\* e 10% para o M\*, com base nos valores encontrados para este acabamento no ferro fundido e o aço. Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.40.

TAB. 5.37 - Parâmetros médios: Torneado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	1,07	0,32	0,30	1,14	0,34	0,30	1,20	0,36	0,30
M*	0,41	0,04	0,10	0,38	0,04	0,10	0,36	0,04	0,10

TAB. 5.38 - A.3.2 - Plainado

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUCOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
487 - 494	CBO	2,92	13,50	1,03	1,44	1,34	0,71	0,42	0,50	1,08	1,49	0,41	0,67	0,41	0,48	1,13	1,55	1,48	0,64	0,41	0,46

Análise da Tabela 5.38:

Considerou-se, neste caso, desvio da média e dispersão de 15% para o  $C^*$  e  $M^*$ , com base nos valores encontrados para este acabamento para o ferro fundido e o aço.

TAB. 5.39 - Parâmetros médios: Plainado

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d	$\bar{X}$	$S_{\bar{X}}$	d
$C^*$	1,34	0,20	0,15	1,41	0,21	0,15	1,48	0,22	0,15
$M^*$	0,50	0,08	0,15	0,48	0,07	0,15	0,46	0,07	0,15

## B.1 - Material: FERRO FUNDIDO

TAB. 5.40 - B.1.1 - Retificado .10

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
136 - 139	AAA	1,32	11,50	0,12	0,13	0,13	0,61	0,54	0,57	0,12	0,14	0,13	0,63	0,54	0,58	0,17	0,24	0,22	0,47	0,37	0,40
154 - 158	ABA	1,25	10,58	0,31	0,51	0,40	0,48	0,33	0,40	0,32	0,51	0,41	0,48	0,33	0,40	0,44	0,64	0,56	0,34	0,27	0,29
159 - 163	ACA	1,97	13,50	0,17	0,32	0,25	0,57	0,38	0,47	0,18	0,33	0,26	0,57	0,38	0,47	0,23	0,45	0,35	0,45	0,30	0,36
447 - 451	ATA	0,52	4,07	0,58	0,92	0,73	0,44	0,25	0,34	0,60	0,92	0,75	0,43	0,25	0,33	0,73	1,03	0,91	0,34	0,22	0,26

## Análise da Tabela 5.40:

Neste caso, pode ser distinguido dois graus de acabamento, com referência aos parâmetros de rugosidade: a) dos conjuntos 136 - 139 a 159 - 163, com valores médios de  $R_a = 1,51 \mu m$  e  $R_t = 11,86 \mu m$ ; b) do conjunto 447 - 451, com valor de  $R_a = 0,52 \mu m$  e  $R_t = 4,07 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados nas tabelas 6.44 e 6.45.

TAB. 5.41 - parte a) - Parâmetros médios: Retificado 10.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,26	0,15	0,52	0,27	0,15	0,53	0,38	0,19	0,46
M*	0,48	0,09	0,18	0,48	0,10	0,19	0,35	0,06	0,16

TAB. 5.42 - parte b) adotou-se o desvio da média como 20% da média e a dispersão como 0,20 para o C\* e M\*.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,73	0,15	0,20	0,75	0,15	0,20	0,91	0,18	0,20
M*	0,34	0,07	0,20	0,33	0,07	0,20	0,26	0,05	0,20

TAB. 5.43 - B.1.2 - Retificado 15

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
140 - 143	ABA	1,92	12,88	0,29	0,32	0,31	0,40	0,35	0,38	0,29	0,32	0,31	0,41	0,36	0,39	0,36	0,43	0,41	0,32	0,28	0,30
164 - 167	AAA	1,53	11,30	0,15	0,24	0,18	0,60	0,43	0,53	0,15	0,25	0,19	0,59	0,43	0,52	0,22	0,34	0,27	0,45	0,34	0,40
168 - 171	ANA	1,31	10,90	0,14	0,14	0,14	0,41	0,35	0,40	0,15	0,15	0,15	0,42	0,35	0,41	0,23	0,28	0,24	0,25	0,18	0,24
475 - 478	ABA	0,91	5,21	0,46	0,56	0,52	0,34	0,33	0,31	0,47	0,55	0,52	0,34	0,34	0,31	0,56	0,59	0,61	0,26	0,33	0,26
715 - 718	ANE	0,94	2,88	0,54	0,70	0,60	0,42	0,29	0,37	0,55	0,72	0,62	0,41	0,28	0,36	0,70	0,94	0,83	0,32	0,21	0,27

Análise da Tabela 5.43:

Neste caso, pode ser distinguido dois tipos de superfícies, no que se refere aos parâmetros de rugosidade: a) dos conjuntos de testes 140 - 143 ao 168 - 171 com valores médios de  $R_a = 1,59 \mu m$  e  $R_t = 11,69 \mu m$ ; b) dos conjuntos de testes 475 - 478 e 715 - 718, com valores médios de  $R_a = 0,58$  e  $R_t = 4,05 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados nas tabelas 6.47 e 6.48.

TAB. 5.44 - Parâmetros médios: Retificado 15 - parte a)

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,21	0,10	0,42	0,22	0,09	0,38	0,31	0,10	0,30
M*	0,44	0,09	0,19	0,44	0,09	0,16	0,31	0,09	0,26

TAB. 5.45 - Parâmetros médios: Retificado 15 - parte b)

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,56	0,12	0,10	0,57	0,15	0,13	0,72	0,34	0,22
M*	0,34	0,09	0,12	0,34	0,08	0,11	0,27	0,02	0,03



TAB. 5.46 - B.1.3 - Retificado 20

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
144 - 147	ACA	1,60	11,54	0,32	0,33	0,31	0,47	0,46	0,49	0,32	0,33	0,31	0,50	0,47	0,51	0,46	0,46	0,43	0,39	0,38	0,41
639 - 642	ABA	0,57	4,78	0,99	1,10	1,08	0,39	0,32	0,36	1,02	1,12	1,10	0,38	0,31	0,36	1,26	1,45	1,35	0,30	0,24	0,29
685 - 688	ANA	0,80	5,08	0,74	1,00	0,89	0,39	0,25	0,34	0,77	1,03	0,93	0,37	0,25	0,33	1,05	1,22	1,22	0,26	0,20	0,23

Análise da Tabela 5.46:

Neste caso, pode ser distinguido dois graus de acabamento superficial, com relação aos parâmetros de rugosidade:

a) conjunto de testes 144 - 147, com  $R_a = 1,60 \mu m$  e  $R_t = 11,54 \mu m$ ; b) conjuntos de testes 639 - 642 e 685 - 688, com valores médios de  $R_a = 0,69 \mu m$  e  $R_t = 4,93 \mu m$ .

TAB. 5.47 - parte a) - adotou-se a dispersão como valor de 0,40 e 0,25 para o C\* e M\* respectivamente e os desvios da média com valores de 40% e 20% da média, respectivamente para o C\* e M\*.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,31	0,12	0,40	0,31	0,12	0,40	0,43	0,17	0,40
M*	0,49	0,10	0,25	0,51	0,10	0,25	0,41	0,08	0,25

TAB. 5.48 - parte b) - Parâmetros médios: Retificado 20

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,99	0,29	0,14	1,02	0,26	0,12	1,29	0,20	0,07
M*	0,35	0,03	0,04	0,35	0,05	0,06	0,26	0,09	0,16

TAB. 5.49 - B.1.4 - Retificado 25

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
148 - 150	ANA	1,50	10,52	0,22	0,44	0,19	0,61	0,35	0,62	0,31	0,46	0,30	0,50	0,35	0,50	0,43	0,87	0,39	0,39	0,17	0,40
655 - 657	ANA	0,26	2,67	0,64	0,70	0,65	0,36	0,31	0,35	0,72	0,82	0,74	0,32	0,27	0,31	0,81	0,95	0,83	0,28	0,23	0,28
689 - 691	ACA	0,53	4,92	0,36	0,63	0,34	0,51	0,34	0,51	0,42	0,73	0,40	0,45	0,30	0,45	0,49	0,84	0,47	0,40	0,26	0,40
719 - 721	ANA	0,22	2,12	0,26	0,31	0,26	0,50	0,43	0,50	0,31	0,37	0,31	0,45	0,39	0,45	0,35	0,44	0,36	0,40	0,34	0,40
730 - 732	ACA	0,17	2,14	0,47	0,55	0,50	0,45	0,36	0,44	0,61	0,64	0,63	0,36	0,31	0,36	0,78	0,75	0,78	0,29	0,27	0,29

## Análise da Tabela 5.49:

Neste caso, pode ser distinguido dois graus de acabamento, com referência aos parâmetros de rugosidade: a) conjunto de teste 148 - 150, com  $R_a = 1,50 \mu m$  e  $R_t = 10,52 \mu m$ ; b) dos conjuntos de testes 655 - 657 a 730 - 732, com valores médios de  $R_a = 0,30 \mu m$  e  $R_t = 2,96 \mu m$ .

TAB. 5.50 - parte a) - adotou-se a dispersão como 0,40 e 0,25 para o C\* e M\* respectivamente e o desvio da média com valores de 40% e 20% da média, respectivamente para o C\* e M\*.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,19	0,08	0,40	0,30	0,12	0,40	0,39	0,16	0,40
M*	0,62	0,12	0,25	0,50	0,10	0,25	0,40	0,08	0,25

TAB. 5.51 - parte b) - Parâmetros médios: Retificado 25.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,44	0,14	0,40	0,52	0,16	0,38	0,61	0,19	0,38
M*	0,45	0,06	0,16	0,39	0,06	0,18	0,34	0,05	0,19

## B.2 - Material: AÇO 1020

TAB. 5.52 - Retificado 10

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
460 - 464*	BCA	0,49	4,23	1,05	1,11	1,12	0,37	0,25	0,30	1,08	1,14	1,16	0,36	0,24	0,29	1,31	1,41	1,42	0,27	0,18	0,21
465 - 469	BBA	0,74	5,54	0,32	0,53	0,42	0,43	0,28	0,36	0,33	0,54	0,44	0,43	0,28	0,35	0,41	0,69	0,57	0,32	0,21	0,26
470 - 474	BAA	0,49	4,43	0,43	0,52	0,50	0,45	0,36	0,38	0,45	0,52	0,51	0,44	0,37	0,38	0,58	0,54	0,62	0,31	0,36	0,30
710 - 714	BBA	0,19	2,02	0,37	0,36	0,34	0,44	0,39	0,42	0,37	0,37	0,35	0,44	0,38	0,42	0,43	0,47	0,43	0,37	0,31	0,35

Análise da Tabela 5.52:

Pode-se considerar que todas as superfícies analisadas tem o mesmo grau de acabamento, com valores de  $R_a = 0,47 \mu m$  e  $R_t = 4,00 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.56.

TAB. 5.53 - Parâmetros médios: Retificado 10.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,42	0,09	0,19	0,43	0,09	0,19	0,54	0,11	0,18
$M^*$	0,39	0,03	0,08	0,38	0,04	0,09	0,30	0,05	0,15

\*) - Desprezou-se este conjunto de testes, devido diferirem bastante dos demais.

TAB. 5.54 - B.2.2 - Retificado 15.

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_c$ ( $\mu m$ )	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$	$C_1$	$C_2$	$C^*$	$M_1$	$M_2$	$M^*$
643 - 646	BCA	0,35	2,93	0,59	0,60	0,58	0,46	0,33	0,41	0,60	0,61	0,60	0,45	0,33	0,40	0,74	0,72	0,74	0,37	0,29	0,32
647 - 650	BBA	0,54	4,87	0,50	0,82	0,58	0,54	0,34	0,47	0,52	0,84	0,60	0,52	0,33	0,46	0,65	1,10	0,79	0,43	0,26	0,36
651 - 654	BMG	0,71	6,26	0,90	1,17	0,98	0,48	0,34	0,44	0,93	1,19	1,01	0,47	0,34	0,43	1,14	1,50	1,26	0,39	0,28	0,35
726 - 729	BBA	0,22	3,42	0,77	0,72	0,79	0,34	0,29	0,31	0,79	0,75	0,80	0,33	0,28	0,31	0,96	0,93	1,00	0,25	0,20	0,23

Análise da Tabela 5.54:

Pode-se considerar que todas as superfícies tem o mesmo grau de acabamento com valores de  $R_a = 0,46 \mu m$  e  $R_c = 4,37 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.58

TAB. 5.55 - Parâmetros médios: Retificado 15.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
$C^*$	0,73	0,16	0,26	0,75	0,16	0,26	0,95	0,19	0,25
$M^*$	0,41	0,06	0,17	0,40	0,05	0,16	0,32	0,05	0,19

TAB. 5.56- B.2.4 - Retificado 20

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C*	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M*
698 - 701	BID	0,70	4,35	1,59	1,93	1,73	0,33	0,23	0,31	1,66	1,97	1,80	0,32	0,23	0,29	2,13	2,43	2,30	0,23	0,18	0,21
702 - 705	BMG	0,65	4,72	0,35	0,34	0,34	0,40	0,36	0,39	0,35	0,35	0,35	0,40	0,35	0,38	0,43	0,45	0,44	0,32	0,28	0,31
706 - 709	BAA	0,80	5,47	0,40	0,55	0,46	0,40	0,32	0,37	0,41	0,55	0,47	0,40	0,33	0,37	0,50	0,67	0,57	0,32	0,28	0,30
722 - 725	BID	0,17	2,51	0,72	0,80	0,75	0,36	0,27	0,33	0,75	0,82	0,77	0,34	0,27	0,32	0,96	1,02	0,99	0,26	0,21	0,24

Análise da Tabela 5.56:

Pode-se considerar que todas as superfícies tem o mesmo grau de acabamento com valores médios de  $R_a = 0,58 \mu m$  e  $R_t = 4,26 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.60

TAB. 5.57 - Parâmetros médios: Retificado 20.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,52	0,23	0,41	0,53	0,24	0,41	0,67	0,31	0,43
M*	0,36	0,03	0,08	0,36	0,04	0,09	0,28	0,04	0,13

TAB. 5.58 - B.2.4 - Retificado 25.

CONJUNTO TESTE	MODELO	RUGOSIDADE		CURVA CARREGAMENTO						CURVA MÉDIA						CURVA DESCARREGAMENTO					
		$R_a$ ( $\mu m$ )	$R_t$ ( $\mu m$ )	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*	C1	C2	C*	M1	M2	M*
658 - 660	BBA	0,79	8,11	0,54	0,66	0,53	0,32	0,25	0,32	0,61	0,77	0,59	0,29	0,21	0,29	0,68	0,89	0,65	0,25	0,17	0,25
692 - 694	BBA	0,58	5,50	0,39	0,50	0,40	0,36	0,29	0,35	0,42	0,54	0,44	0,33	0,27	0,32	0,46	0,59	0,48	0,30	0,25	0,29
695 - 697	BCA	0,69	6,30	0,44	0,50	0,44	0,40	0,37	0,40	0,47	0,56	0,47	0,38	0,34	0,37	0,51	0,63	0,51	0,35	0,31	0,35

Análise da Tabela 5.58:

Pode-se considerar que todas as superfícies tem o mesmo grau de acabamento, com valores de  $R_a = 0,69 \mu m$  e  $R_t = 6,64 \mu m$ . Os parâmetros médios estão apresentados na tabela 6.62.

TAB. 5.59 - Parâmetros médios: Retificado 25.

PARÂMETRO	CARREGAMENTO			MÉDIA			DESCARREGAMENTO		
	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d	$\bar{X}$	$S\bar{X}$	d
C*	0,46	0,07	0,15	0,50	0,09	0,16	0,55	0,10	0,17
M*	0,36	0,04	0,11	0,33	0,04	0,12	0,30	0,05	0,17

## 6.8 - A tabela dos parâmetros.

A partir das tabelas 5.2 a 5.59 em que foram apresentados os resultados dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C^*$  e  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M^*$  para os diversos acabamentos superficiais e materiais ensaiados, bem como determinação dos parâmetros médios, adotando no cálculo do desvio da média uma confiabilidade de 80%, montou-se as tabelas 5.60 e 5.64.

As tabelas 5.60, 5.61 e 5.62 apresentam os valores médios de  $C^*$  e  $M^*$  acompanhados do desvio da média para os acabamentos superficiais (também são referenciados os valores dos parâmetros  $R_a$  e  $R_t$  - DIN 4762) analisados para o ferro fundido, aço 1020 e bronze respectivamente. Correspondem à parte A do estudo definido nos itens 5.7.1 e 5.7.4.

Já as tabelas 5.63 e 5.64 correspondem à parte B definida nos itens 5.7.1 e 5.7.4 onde foi proposto, analisar a influência do primeiro nível de carga nos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  de rigidez normal. Limitou-se este estudo para o retificado. Os níveis de cargas ensaiados foram: 10, 15, 20 e 25  $\text{kgf/cm}^2$ . As tabelas 5.63 e 5.64 apresentam os valores médios com o desvio da média para estes casos, bem como para o retificado 5 que corresponde ao analisado no item anterior quando o primeiro nível de carga era de 5  $\text{kgf/cm}^2$ . Correspondem respectivamente do ferro fundido e do aço 1020.

Tab. 5.60 - Valores médios dos parâmetros C\* e M\*, acompanhados do desvio da média para os diversos acabamentos superficiais do ferro fundido. Primeiro nível de carga foi de 5 kgf/cm<sup>2</sup>.

ACABAMENTOS SUPERFICIAIS	RUGOSIDADE		CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAMENTO	
	R <sub>a</sub> (µm)	R <sub>t</sub> (µm)	C*	M*	C*	M*	C*	M*
retificado cru	0,60	5,16	0,29±0,07	0,54±0,05	0,32±0,08	0,50±0,05	0,36±0,08	0,46±0,04
retificado	1,55	13,47	0,38±0,22	0,48±0,12	0,39±0,21	0,46±0,18	0,49±0,26	0,38±0,10
torneado	0,35	4,84	0,81±0,10	0,42±0,04	0,85±0,15	0,41±0,03	1,01±0,20	0,34±0,18
fresado	2,07	16,43	0,61±0,10	0,55±0,06	0,65±0,10	0,54±0,05	0,79±0,14	0,47±0,05
plainado	1,49	13,73	2,17±0,41	0,50±0,06	2,22±0,41	0,49±0,05	2,70±0,47	0,42±0,06
plainado cruza	2,39	17,93	0,69±0,12	0,47±0,05	0,71±0,13	0,45±0,04	0,92±0,16	0,35±0,04
do	2,52	17,47	1,72±0,52	0,52±0,07	1,82±0,53	0,50±0,07	2,51±0,64	0,39±0,07
rasque-	0,56	7,46	0,64	0,45	0,66	0,44	0,80	0,37
teado	0,61	8,80	0,66	0,43	0,67	0,42	0,81	0,35
gross.	0,93	10,20	0,85	0,45	0,87	0,45	1,07	0,37



Tab. 5.61 - Valores médios dos parâmetros C\* e M\*, acompanhados do desvio da média para os diversos acabamentos superficiais do aço 1020. Primeiro nível de carga foi de 5 kgf/cm<sup>2</sup>.

ACABAMENTO SUPERFICIAL	RUGOSIDADE		CARRREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAMENTO	
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C*	M*	C*	M*	C*	M*
Retificado cruzado.	1,46	12,87	0,37±0,06	0,42±0,02	0,41±0,07	0,40±0,02	0,44±0,07	0,36±0,02
	1,44	12,85	0,73±0,16	0,40±0,03	0,78±0,23	0,37±0,00	0,99±0,20	0,35±0,02
	0,50	4,79	0,64±0,03	0,41±0,03	0,67±0,17	0,40±0,03	0,80±0,24	0,34±0,02
Torneado	1,99	15,43	0,43±0,17	0,51±0,04	0,44±0,18	0,50±0,04	0,52±0,23	0,44±0,04
	1,43	10,34	0,58±0,20	0,62±0,03	0,64±0,22	0,59±0,04	0,70±0,24	0,55±0,04
Fresado	1,23	10,70	0,71±0,14	0,54±0,11	0,57±0,11	0,53±0,11	0,68±0,14	0,44±0,09
	1,49	15,22	2,03±0,02	0,60±0,03	2,22±0,26	0,58±0,03	2,91±0,49	0,49±0,08
Plainado cruzado	2,14	17,67	1,80±0,08	0,44±0,07	1,86±0,08	0,43±0,07	2,27±0,13	0,35±0,16
	1,98	16,10	1,40±0,42	0,40±0,06	1,44±0,43	0,39±0,06	1,69±0,51	0,33±0,05
Rasqueado	0,53	7,80	0,46	0,46	0,47	0,45	0,58	0,37
normal	0,69	9,40	0,53	0,46	0,54	0,47	0,63	0,41
gross.	0,66	10,40	0,89	0,42	0,92	0,42	1,09	0,36

Tab. 5.62 - Valores dos parâmetros C\* e M\*, acompanhados do desvio da média para os diversos acabamentos superficiais ensaiados no bronze. Primeiro nível de carga foi de 5 kgf/cm<sup>2</sup>.

ACABAMENTO SUPERFICIAL	RUGOSIDADE		CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAMENTO	
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C*	M*	C*	M*	C*	M*
Torneado	0,79	7,45	1,07±0,32	0,41±0,04	1,14±0,34	0,38±0,04	1,20±0,36	0,46±0,04
Plainado	2,92	13,50	1,34±0,20	0,50±0,08	1,41±0,21	0,48±0,07	1,48±0,22	0,46±0,07

Tab. 5.63 - Influência do primeiro nível de carga. Valores dos parâmetros C\* e M\*, acompanhados dos desvios da média. Análise do retificado, ferro fundido, com primeiros carregamentos a 5, 10, 15, 20 e 25 kgf/cm<sup>2</sup>

ACABAMENTO SUPERFICIAL	RUGOSIDADE		CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAMENTO	
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C*	M*	C*	M*	C*	M*
Retificado 5	1,55	13,47	0,38±0,22	0,48±0,12	0,39±0,21	0,46±0,09	0,49±0,26	0,38±0,10
	0,35	4,84	0,81±0,14	0,42±0,04	0,85±0,15	0,41±0,03	1,01±0,20	0,34±0,04
Retificado 10	1,51	11,86	0,26±0,15	0,48±0,09	0,27±0,15	0,48±0,10	0,38±0,19	0,35±0,06
	0,52	4,07	0,73±0,15	0,34±0,07	0,75±0,15	0,33±0,07	0,91±0,18	0,26±0,05
Retificado 15	1,59	11,69	0,21±0,10	0,44±0,09	0,22±0,09	0,44±0,08	0,31±0,10	0,31±0,09
	0,58	4,05	0,56±0,12	0,34±0,09	0,57±0,15	0,34±0,08	0,72±0,34	0,27±0,02
Retificado 20	1,60	11,54	0,31±0,12	0,49±0,10	0,31±0,12	0,51±0,10	0,43±0,17	0,41±0,08
	0,69	4,93	0,99±0,29	0,35±0,03	1,02±0,26	0,35±0,05	1,29±0,20	0,26±0,09
Retificado 25	1,50	10,52	0,19±0,08	0,62±0,12	0,30±0,12	0,50±0,10	0,39±0,16	0,40±0,08
	0,30	2,96	0,44±0,14	0,45±0,06	0,52±0,16	0,39±0,06	0,61±0,19	0,34±0,05

Tab. 5.64 - Influência do primeiro nível de carga. Valores médios dos parâmetros C\* e M\*, acompanhados dos desvios das médias. Análise do retificado, Aço 1020, com primeiros carregamentos a 5, 10, 15, 20 e 25 kgf/cm<sup>2</sup>

ACABAMENTO SUPERFICIAL	RUGOSIDADE		CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAMENTO	
	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	C*	M*	C*	M*	C*	M*
Retificado 5	1,44	12,85	0,73±0,16	0,40±0,03	0,78±0,23	0,37±0,00	0,99±0,20	0,35±0,02
Retificado 10	0,50	4,79	0,64±0,16	0,41±0,03	0,67±0,17	0,40±0,03	0,80±0,24	0,34±0,02
Retificado 15	0,48	4,06	0,42±0,09	0,39±0,03	0,43±0,09	0,38±0,04	0,54±0,11	0,30±0,05
Retificado 20	0,46	4,37	0,73±0,16	0,41±0,06	0,75±0,16	0,40±0,05	0,95±0,19	0,32±0,05
Retificado 25	0,58	4,26	0,52±0,23	0,36±0,03	0,53±0,24	0,36±0,04	0,67±0,31	0,28±0,04
Retificado 25	0,69	6,64	0,46±0,07	0,36±0,04	0,50±0,09	0,33±0,04	0,55±0,10	0,30±0,05

## C A P Í T U L O 6

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE RIGIDEZ TANGENCIAL

## 6.1 - Generalidades

O objetivo deste capítulo é de, a partir de experimentos, obter os parâmetros característicos de rigidez tangencial R e S. Com base na equação (3.3) e (3.4); obtêm-se

$$\lambda_t = \frac{R}{(P_n)S} P_t \quad (6.1)$$

para o carregamento não simultâneo.

Devido a complexidade deste experimento, limitou-se ao estudo para o ferro fundido, retificado cruzado. Conseguindo-se provar a teoria de BACK (que relaciona os parâmetros de rigidez normal e tangencial com os módulos de elasticidade) para este caso, extrapola-se para os demais materiais e acabamentos superficiais em estudo.

## 6.2 - Procedimento experimental

Com algumas adaptações na prensa mecânica, cujo esquema está mostrado na figura 5.1, que consiste na adaptação de um elemento transmissor de torque ao modelo, através de cabos de aço e roldanas, pode-se realizar o experimento. A figura 6.1 mostra uma vista parcial das adaptações realizadas, e a figura 6.2 apresenta uma vista geral do mecanismo pronto para ensaio. A aplicação da carga é feita pelo enchimento do reservatório de água, usando contra-pesos para o descarregamento. A aplicação do torque é feita em dois pontos simétricos do elemento transmissor para dar distribuição uniforme de pressão em toda superfície.

O modelo testado é o mesmo apresentado para os testes de rigidez normal.

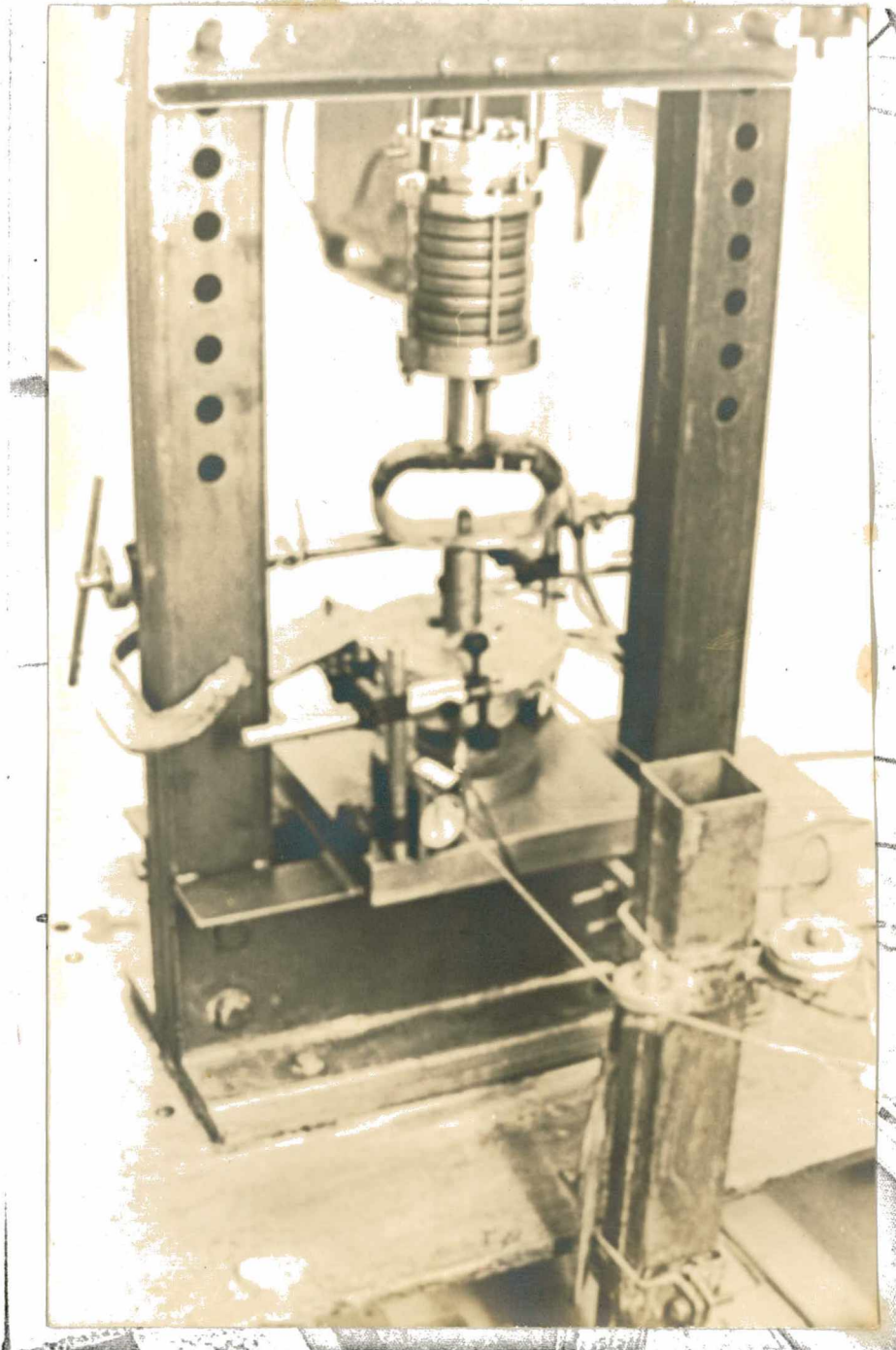


Fig. 6.1 - Detalhe das adaptações da prensa mecânica para realizar os testes de rigidez tangencial.

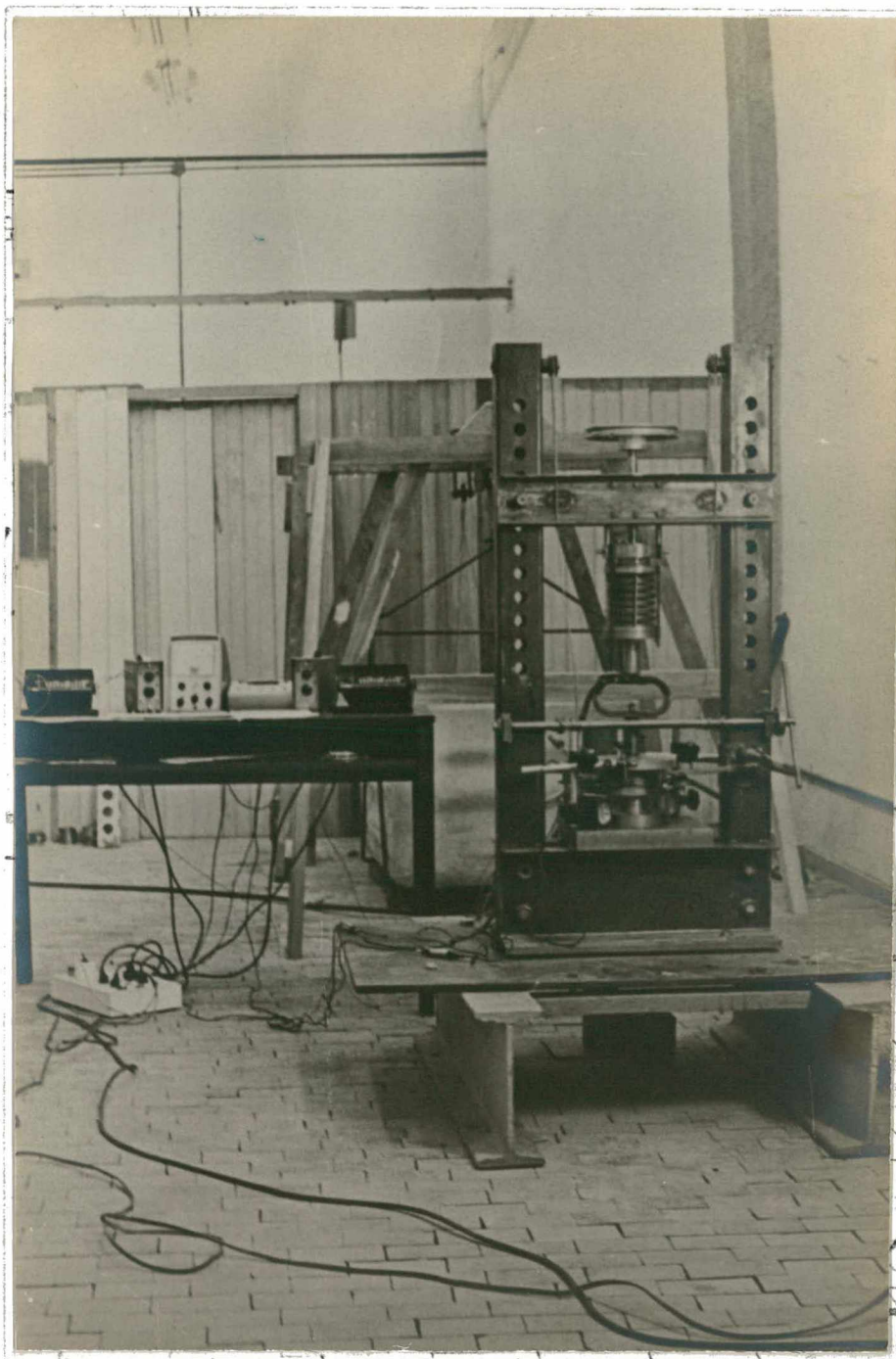


Fig. 6.2 - Vista geral do mecanismo para realização do teste de rigidez tangencial.

## 6.2.1 - Equipamento utilizado.

## a) medição de força

Precisou-se do controle de medição de força normal e tangencial. A arruela piezoelétrica utilizada para aplicação de carga normal foi mantida em sua posição original enquanto que para a carga tangencial, foi utilizada a arruela piezoelétrica KISTLER, para tração, tipo 9331, SN 60497, que apresentou a seguinte relação:

$$F = 0,5 \cdot 10^3 \text{ VL} \quad (6.2)$$

em que VL é o valor lido no Multimeter digital FLUKE, em mV, e o resultado desta equação nos dá a força em kgf. A equação (6.2) apresentada pelo fabricante foi conferida em testes com uso de balança dinamométrica mecânica<sup>46</sup>.

Dividindo a equação (6.2) pelo valor da área aparente, obtêm-se:

$$P = 16,66 \text{ VL} \quad (6.3)$$

em que P é obtida em kgf/cm<sup>2</sup>.

## b) medição da deformação

Utilizou-se dois apalpadores TESA, código JA188 e B6073 que a partir de então, serão denominados AP2 e AP4, respectivamente, que eram conectados aos canais C2 e C4. Estes apalpadores foram calibrados com os blocos padrão JENA - grau de precisão original 0. Foi utilizado o aparelho de leitura TESA. A tabela 6.1 apresenta as equações resultantes da calibração onde vl é o valor lido no aparelho de leitura TESA, em  $\mu\text{m}$ , e VR é o valor real da medida, em  $\mu\text{m}$ .

TAB. 6.1 - Equações das curvas de calibração dos apalpadores.

APALPADOR	E S C A L A S		
	10 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
AP2/C2	VR = 1,2546 vl	VR = 1,2469 vl	VR = 1,2437 vl
AP4/C4	VR = 0,9979 vl	VR = 0,9981 vl	VR = 0,9854 vl



Os apalpadores foram montados em bases magnéticas, fixas à base da prensa. A posição dos apalpadores correspondem a um diâmetro de 182 mm. As deformações obtidas foram corrigidas para o diâmetro médio dos anéis, igual a 57,5 mm. Ou seja, os valores obtidos pelas equações da curva de calibração, acham-se ampliados de 3,165.

#### 6.2.2 - Procedimento de cálculo

O diagrama de bloco apresentado na figura 6.3 esquematiza o procedimento de cálculo para determinação dos conjuntos de valores da pressão tangencial  $P_t$  e deformação tangencial da superfície usinada  $\lambda_t$ . Abaixo, é descrito e justificado cada passo deste procedimento.

- Dados da planilha - Os dados para os cálculos foram obtidos em planilhas (duas vias) acrescida de um adendo: ocorre que a deformação exige um certo tempo para sua acomodação. Neste adendo são registrados os valores da pressão e deformação de minuto a minuto, até que se tenha duas leituras repetidas. Estes valores, então, são anotados na planilha. (Anexo 7 e 8)

- Pressão tangencial  $P_t$  - obtém-se o conjunto de valores de  $P_t$ , aplicando a equação (7.4) para cada ponto.

- Valor real da deformação VR2, VR4 - Os conjuntos de valores de VR2 e VR4, correspondentes aos AP2 e AP4, são obtidos quando se utilizam as equações das curvas de calibração, apresentadas na tabela 7.1.

- Valor médio da deformação VMD - O conjunto de valores VMD é a média de  $VR2(I) + VR4(I)$ .

- Valor médio da deformação por superfície VDS - O modelo é constituído de vários anéis e assim a resposta da deformação corresponde à soma de todas as deformações das superfícies. Obtém-se  $VDS(I)$ , dividindo-se  $VD(I)$  pelo número de superfícies em contato.

- Valor médio da deformação por superfície, no diâmetro médio do módulo VDSC - O conjunto de valores de VDS acha-se amplificado de 3,165, devido à posição dos apalpadores. Obtém-se  $VDSC(I)$  di-

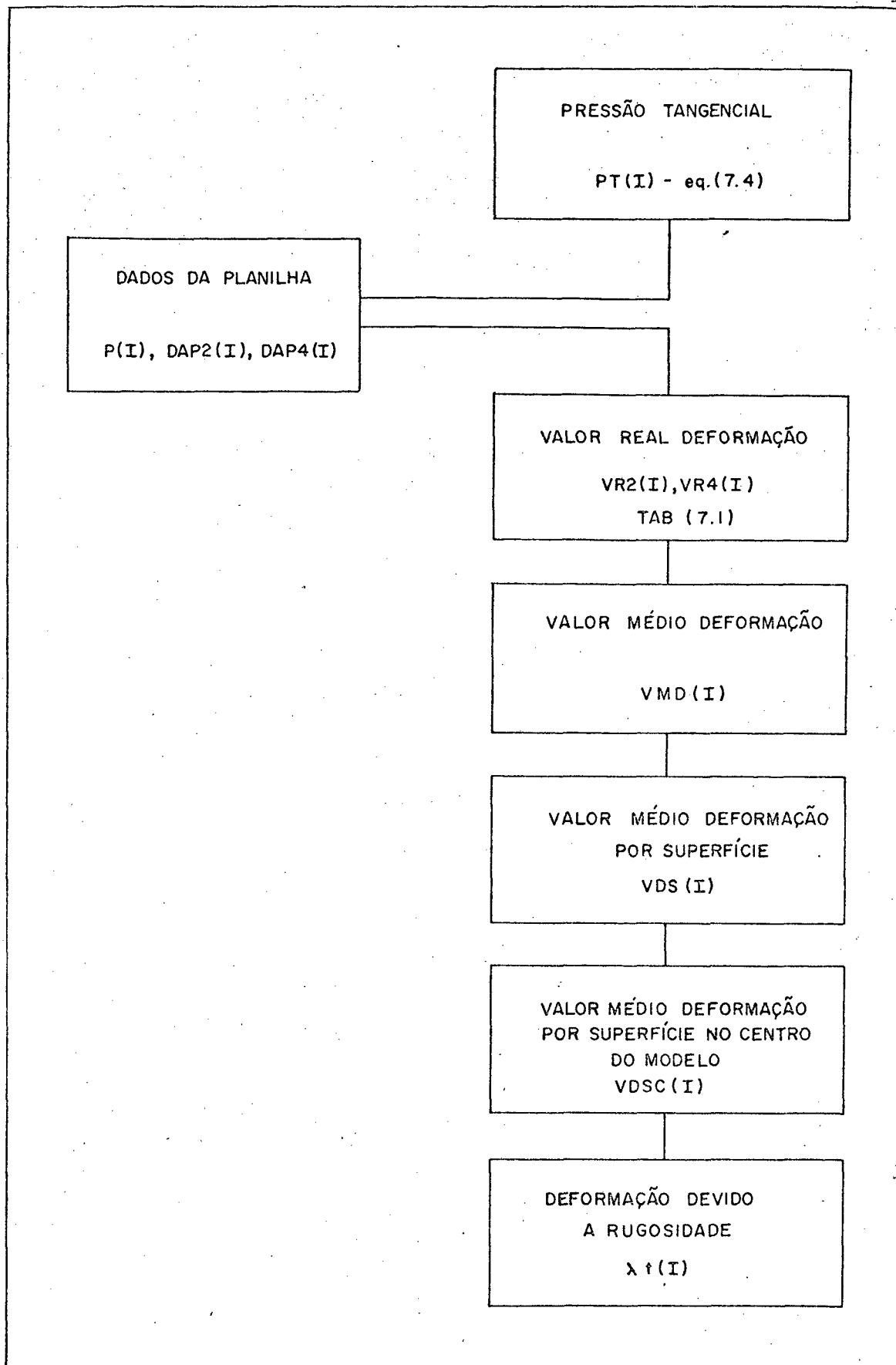


Fig. 6.3 - Diagrama de bloco do procedimento de cálculo para determinação dos conjuntos de valores de  $P_t$  e  $\lambda_t$ .

vidindo VDS(I) por 3.165.

- Deformação devido à rugosidade  $\lambda_t$  - obtém-se o conjunto  $\lambda_t(I)$ , quando for diminuído de VDSC(I), o valor correspondente à deformação do corpo sólido:

$$\lambda_t(I) = \text{VDSC}(I) - \text{PT}(I) * 57,5/G$$

### 6.3 - Carregamento não simultâneo - curvas e parâmetros obtidos.

Conforme conclusões obtidas pelas figuras 3.3 e 3.4, o valor da flexibilidade tangencial para altas cargas torna-se independente do acabamento superficial. Limitou-se, então, em analisar o comportamento da deformação tangencial para pressões normais de 15, 25, 35 e 50 kgf/cm<sup>2</sup>. As figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam as curvas para cada caso, acima mencionado. Observando as curvas obtidas por outros pesquisadores (onde era obtida apenas uma curva representativa do regime elástico das deformações das rugosidades), resolveu-se, então, obter para cada caso, no mínimo mais de uma curva. As figuras 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11, apresentam apenas as curvas correspondentes ao comportamento elástico das rugosidades para cada nível de pressão normal analisado. Nota-se que realmente, uma curva bastaria para ser representativa de tal regime. A tabela 6.2, apresenta o parâmetro  $K_t$  obtido com base na equação 3.2, para cada curva, bem como o valor médio. Com este valor montou-se a figura 6.12 de  $K_t$  em função de  $P_n$ , onde se nota a tendência da curva tornar-se assintota, ou seja, para maiores valores de  $P_n$ , o valor de  $K_t$  permanecerá constante.

Para os valores médios de  $K_t$ , para os diversos níveis de carga normal e com base na equação (3.3), montou-se os gráficos 6.13, 6.14 e 6.15 onde se tem a variação do parâmetro R em função de S para as curvas do carregamento, média e descarregamento. Verifica-se para os três casos que a curva correspondente ao teste de  $P_n = 15 \text{ kgf/cm}^2$  está bem afastada das demais.

Deve-se ressaltar que quando da aplicação da carga normal, anterior à aplicação de carga tangencial, obedeceu-se à ordem do primeiro nível de carga de 5 kgf/cm<sup>2</sup> e os demais de 10,

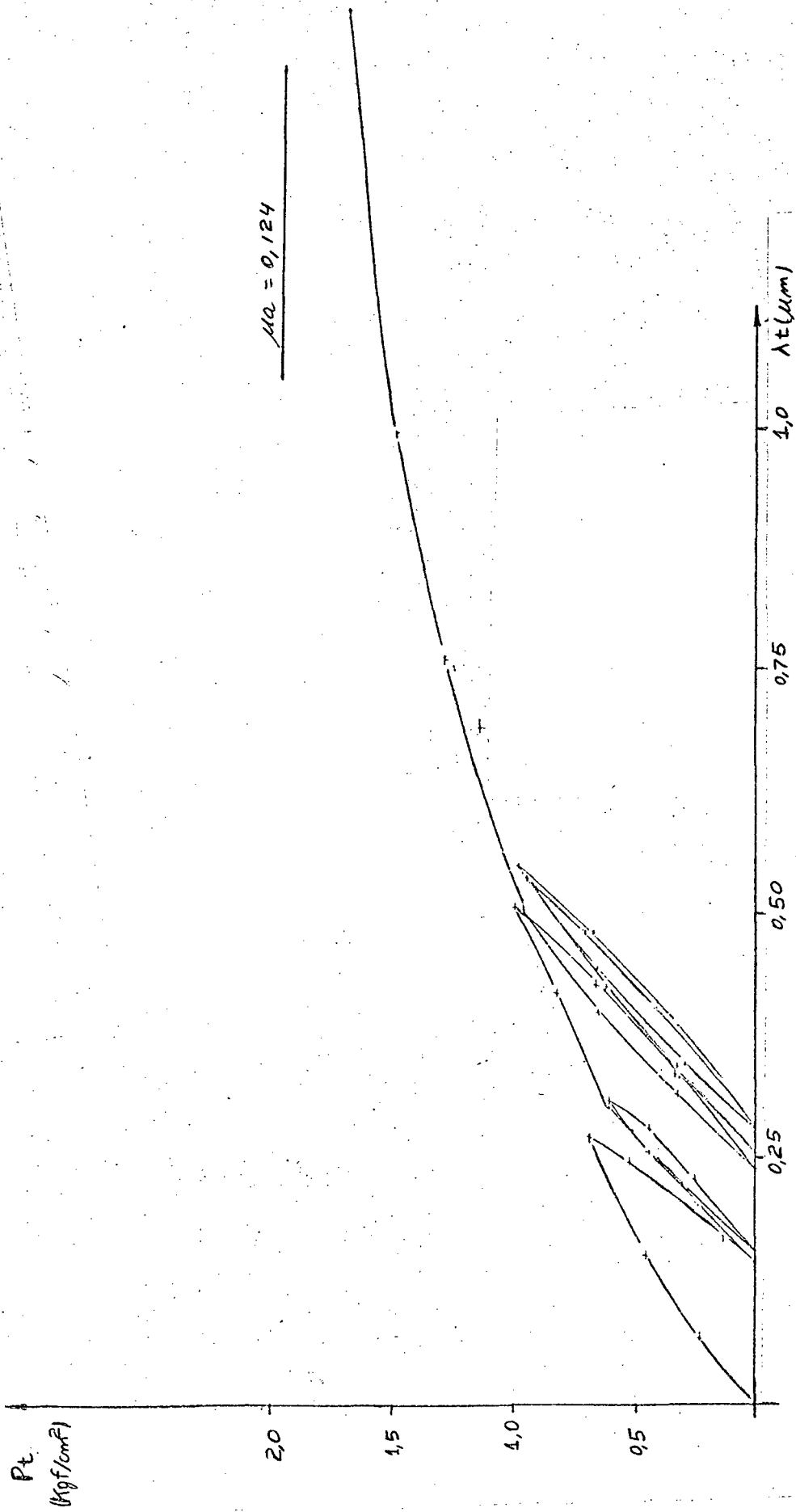


Fig. 6.4 - Curvas experimentais para o carregamento não simultâneo,  $P_n = 15 \text{ kgf/cm}^2$ .

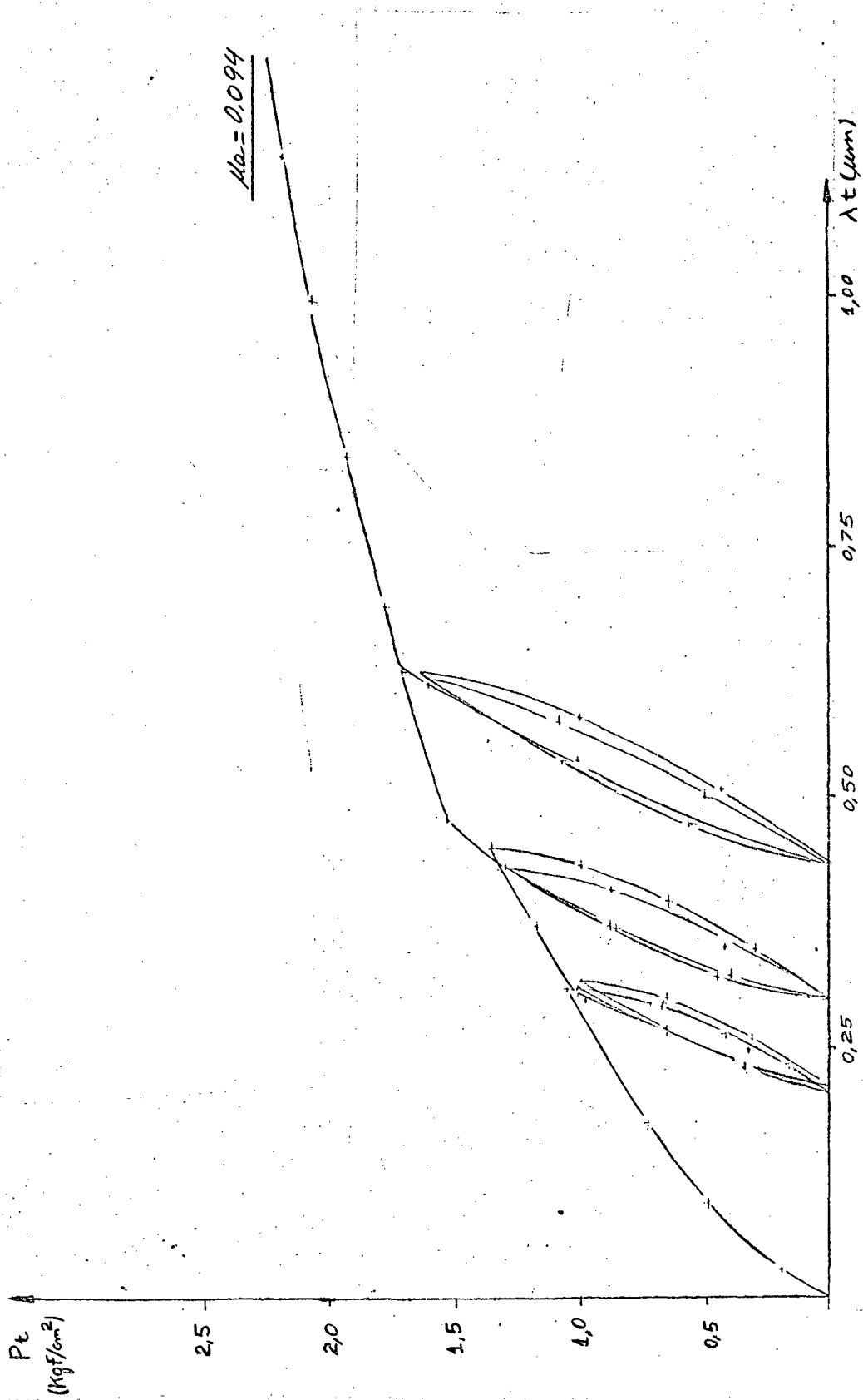


Fig. 6.5 - Curvas experimentais para o carregamento não simultâneo,  $P_n = 25 \text{ kgf/cm}^2$ .

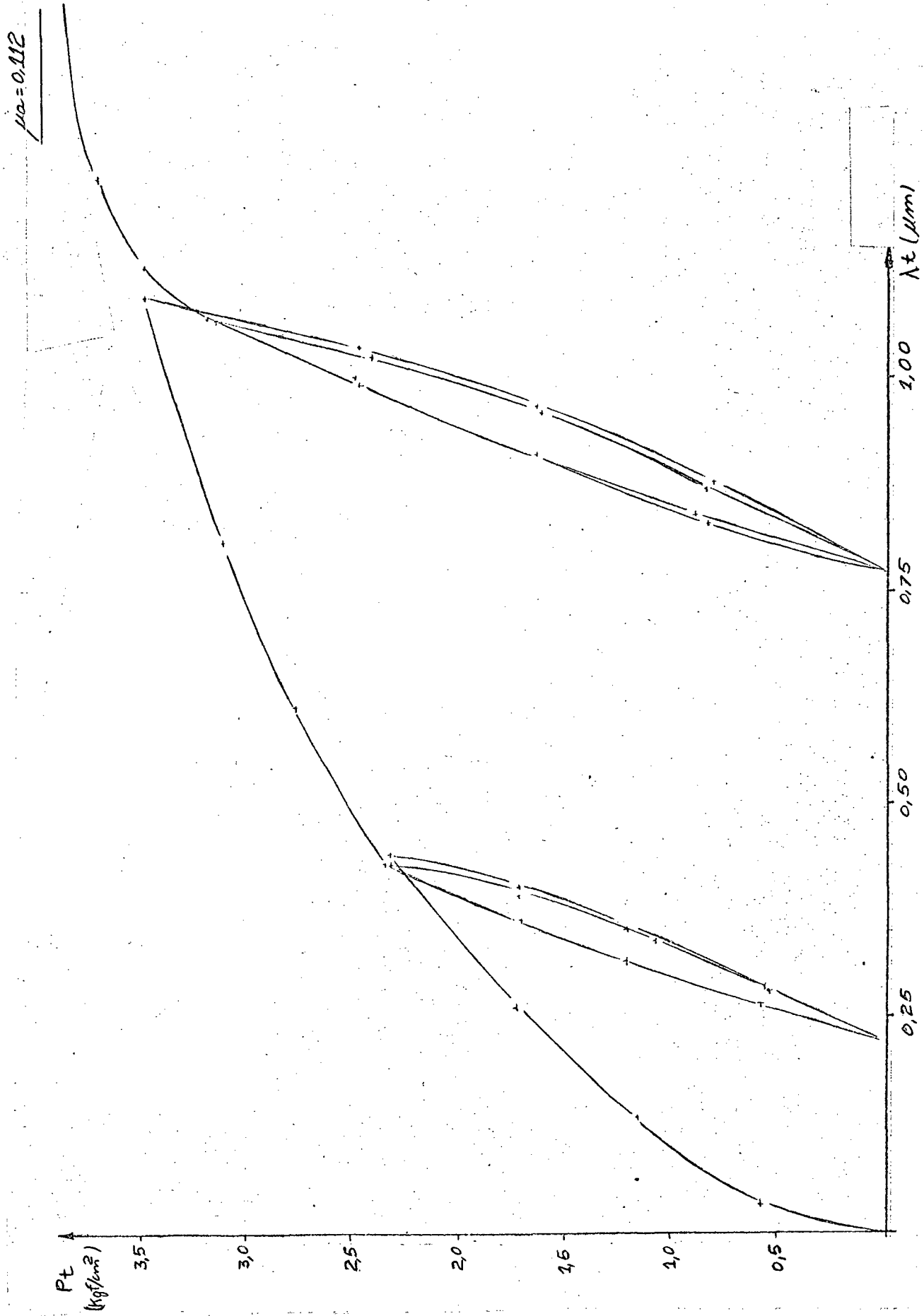


Fig. 6.6 - Curvas experimentais para o carregamento não simultâneo,  $P_n = 35 \text{ kgf/cm}^2$ .

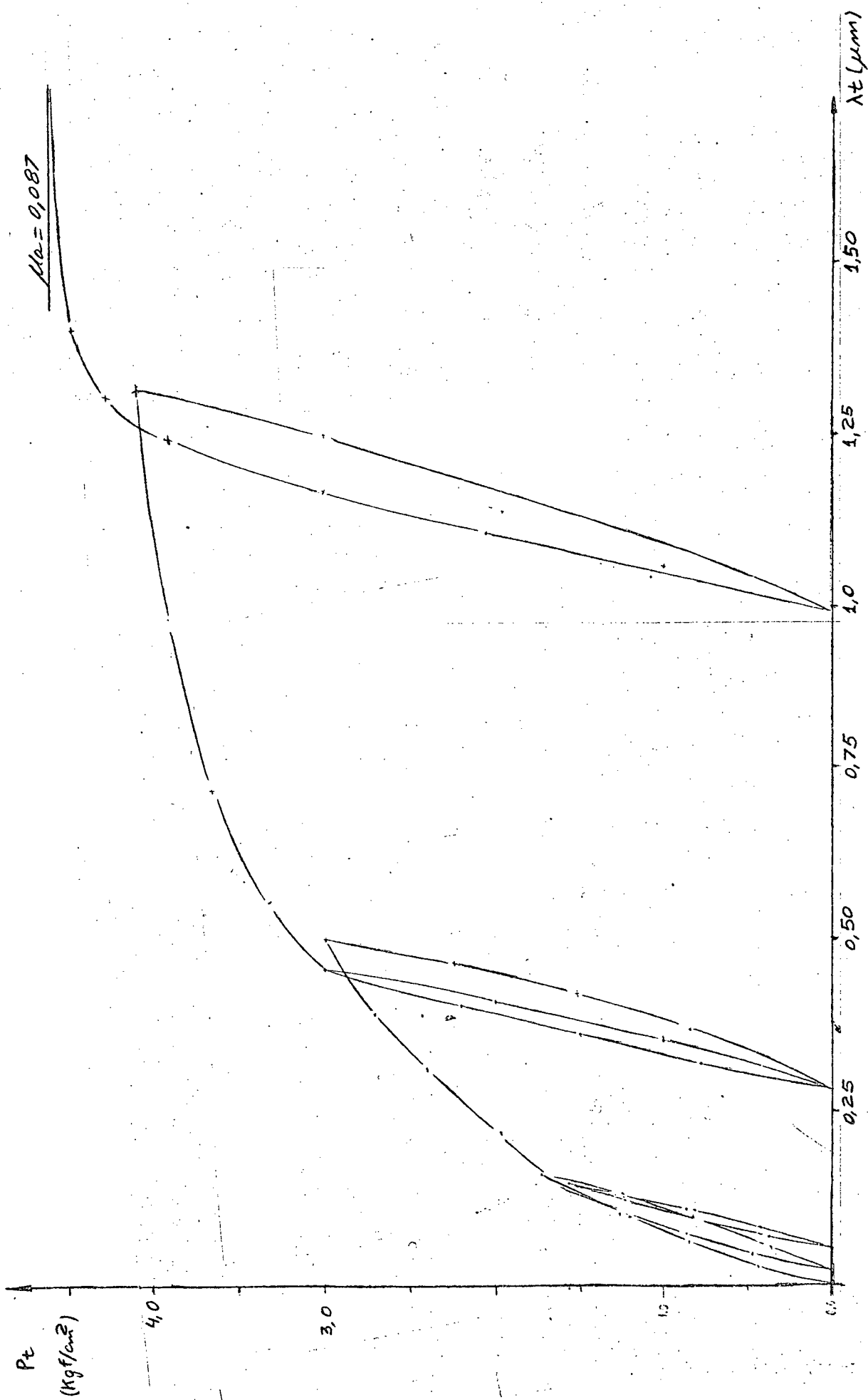


Fig. 6.7 - Curvas experimentais para o carregamento não simultâneo,  $P_n = 50 \text{ kgf/cm}^2$ .

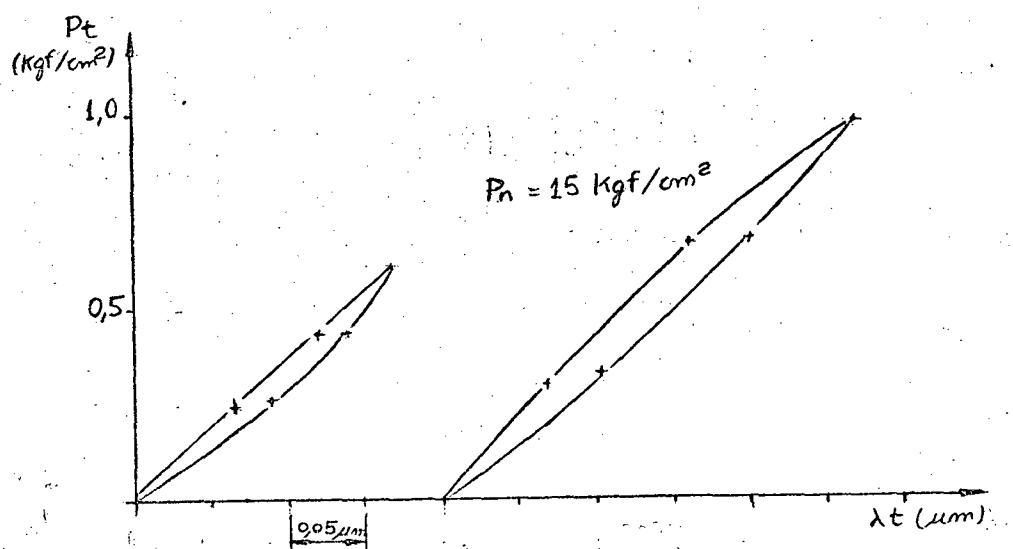


Fig. 6.8 - Comportamento elástico das rugosidades para dois níveis de pressão tangencial, sob pressão normal  $P_n = 15 \text{ kgf/cm}^2$

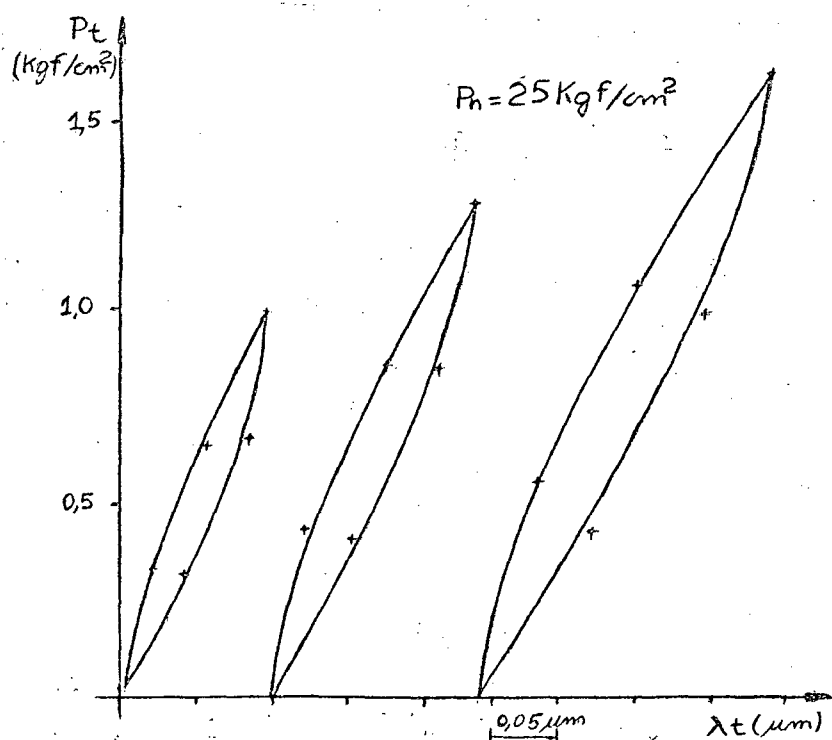


Fig. 6.9 - Comportamento elástico das rugosidades para dois níveis de pressão tangencial, sob pressão normal  $P_n = 25 \text{ kgf/cm}^2$ .



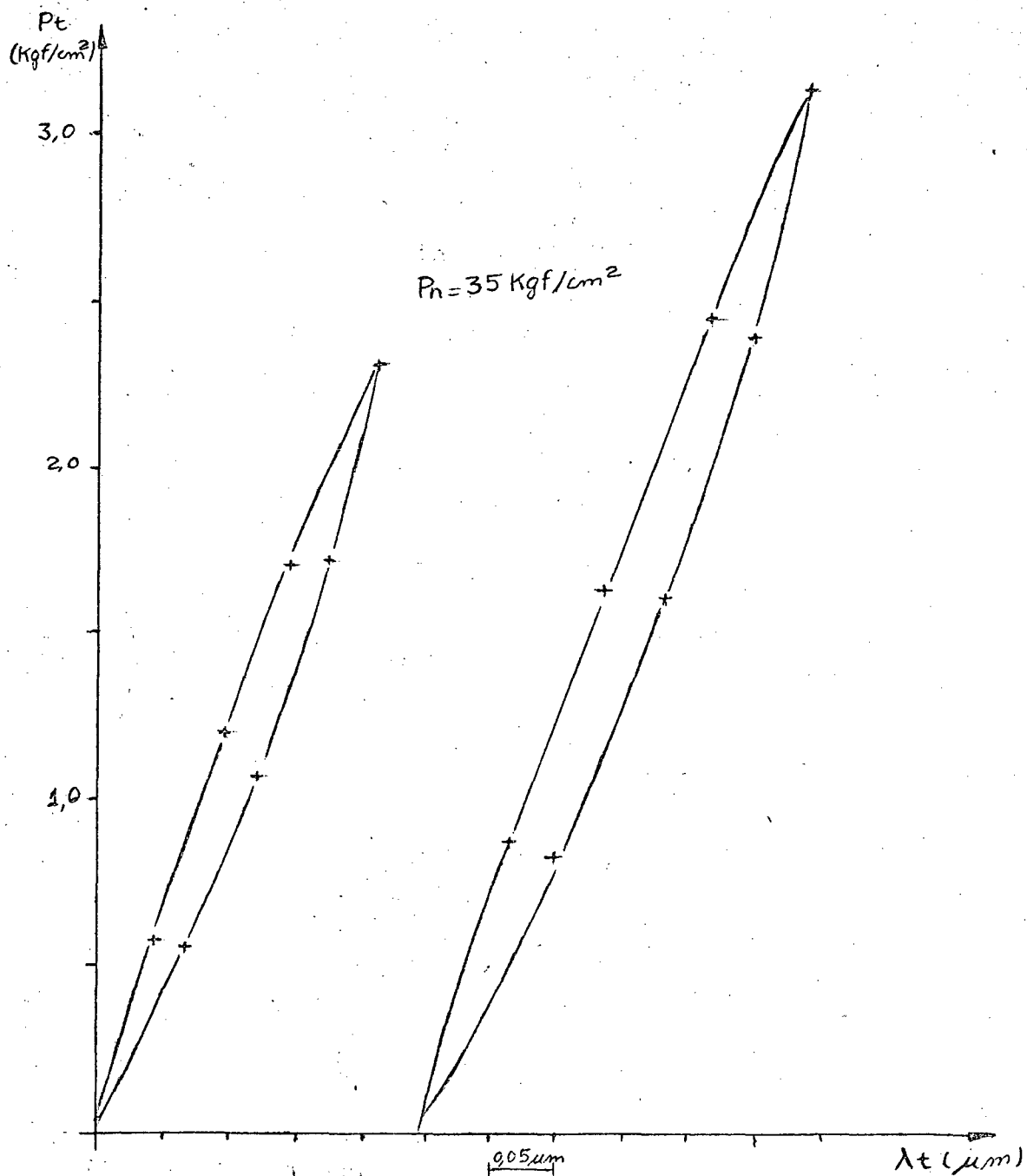


Fig. 6.10 - Comportamento elástico das rugosidades para dois níveis de pressão tangencial, sob pressão normal  $P_n = 35 \text{ kgf/cm}^2$ .

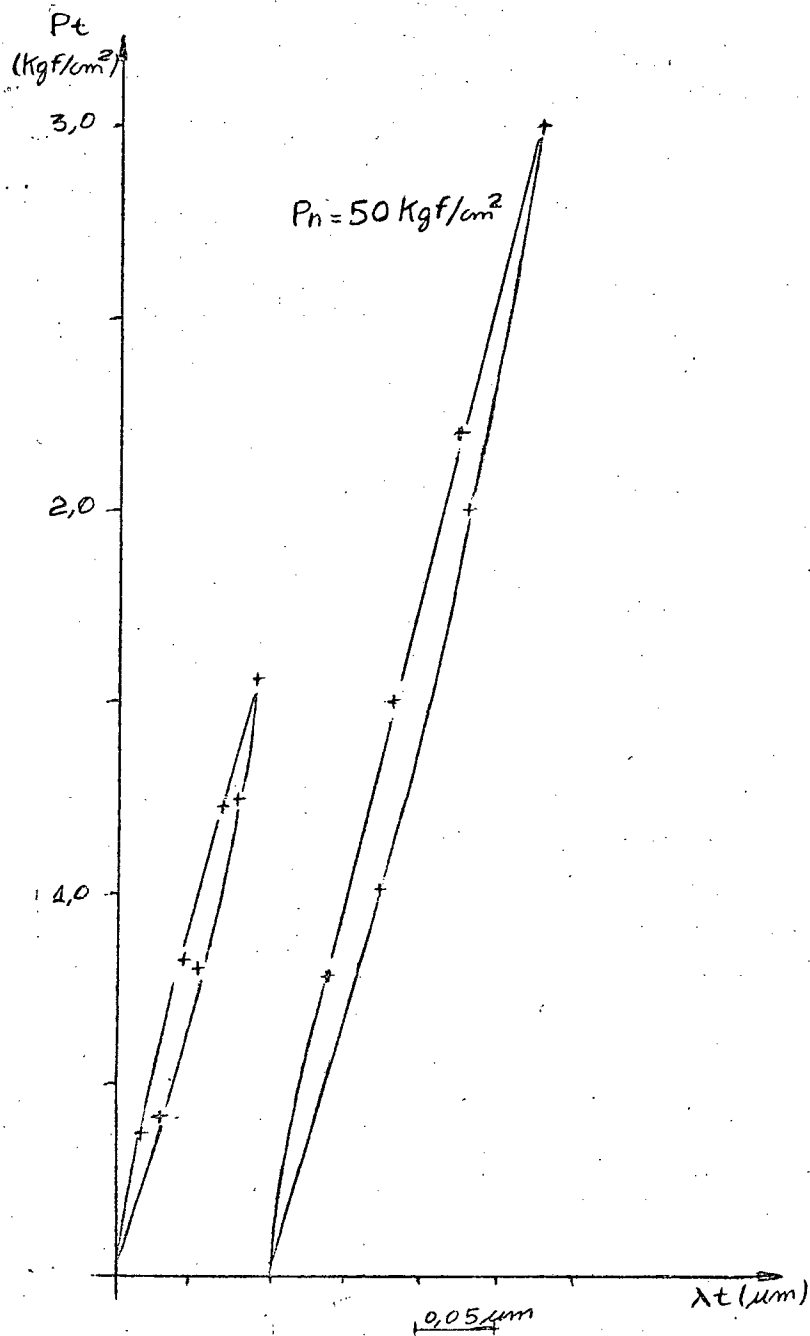


Fig. 6.11 - Comportamento elástico das rugosidades para dois níveis de pressão tangencial, sob pressão normal  $P_n = 50 \text{ kgf/cm}^2$ .

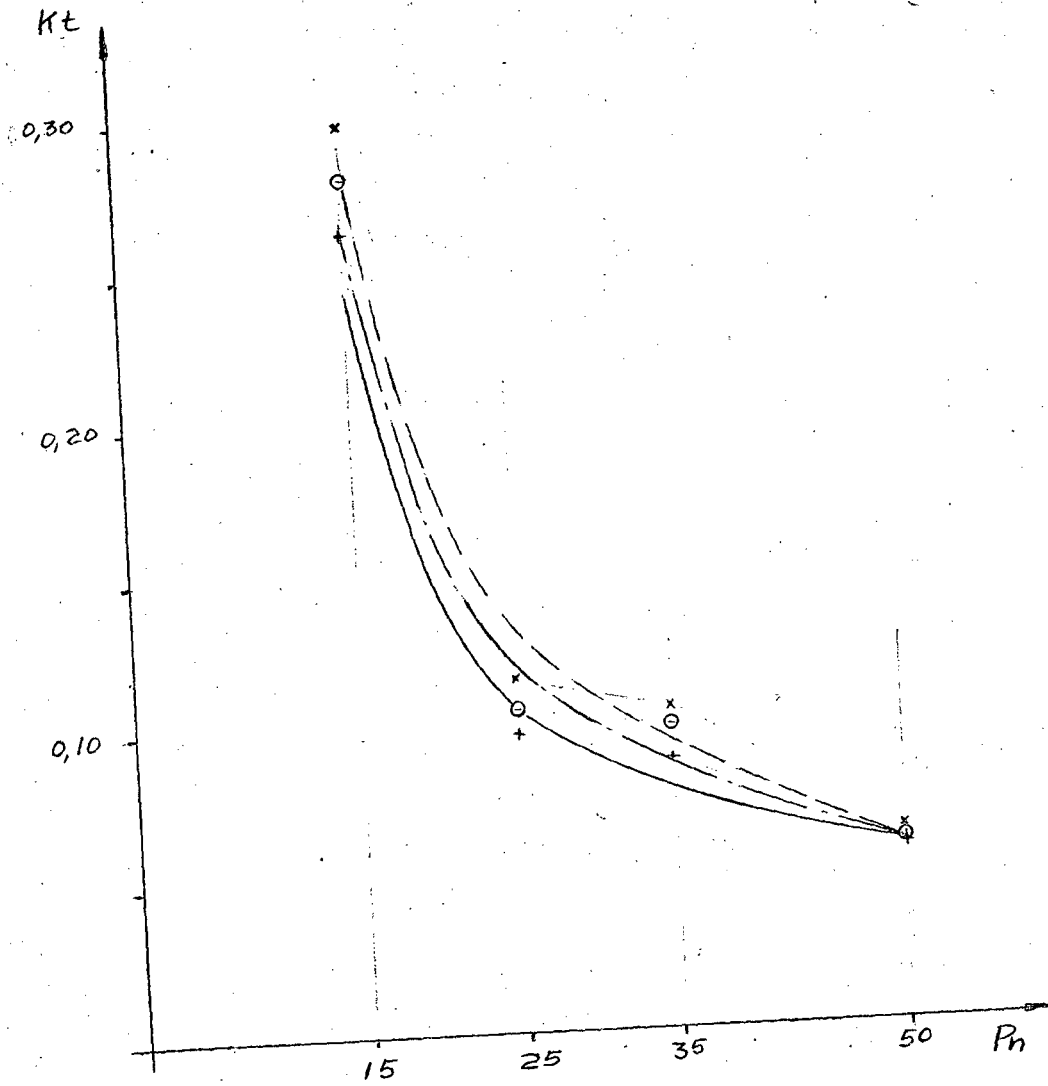


Fig. 6.12 - Gráfico de  $K_t$  em função de  $P_n$ .

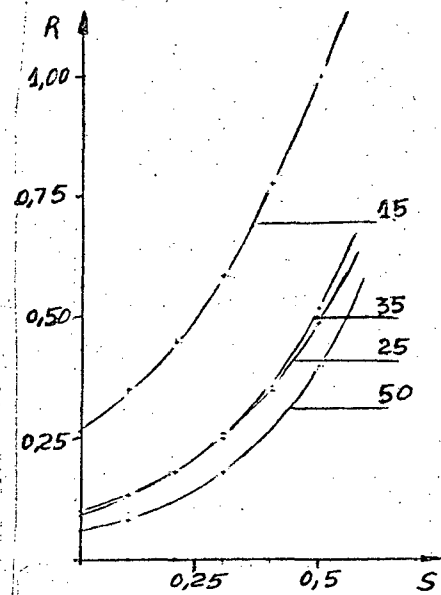


Fig. 6.13 - Relação de R em função de S. Curva carregamento.

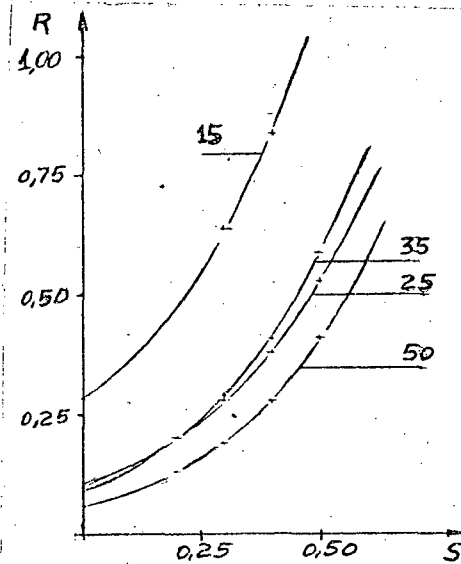


Fig. 6.14 - Relação de R em função de S. Curva média.

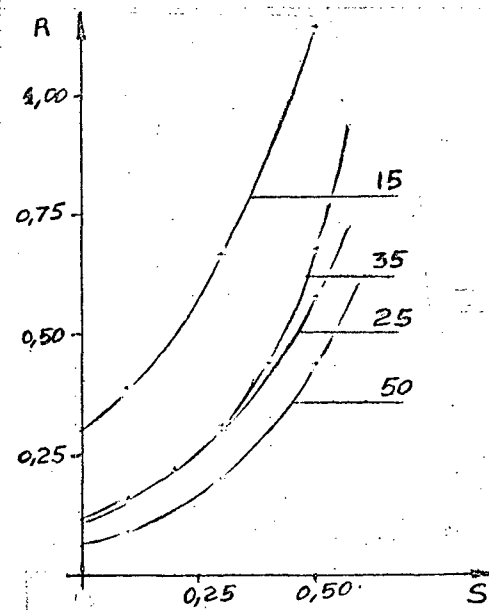


Fig. 6.15 - Relação de R em função de S. Curva descarregamento.

TAB. 6.2 - Valores dos parâmetros  $K_t$ , para as diversas curvas ( $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ ) para as pressões normais de estudo.

$P_N$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$K_t$				
	CURVA	$c_1$	$c_2$	$c_3$	VM
15	carregamento	0,267	0,261	-	0,264
	média	0,298	0,271	-	0,284
	descarregamento	0,314	0,282	-	0,298
25	carregamento	0,090	0,093	0,109	0,097
	média	0,099	0,102	0,119	0,106
	descarregamento	0,106	0,110	0,128	0,115
35	carregamento	0,086	0,090	-	0,088
	média	0,092	0,106	-	0,099
	descarregamento	0,096	0,116	-	0,106
50	carregamento	0,057	0,057	-	0,057
	média	0,057	0,059	-	0,058
	descarregamento	0,062	0,061	-	0,062

15, ... até os limites pré-estabelecidos. Quando se chegou a este limite, foi executado o teste de rigidez normal (obtenção da curva do regime elástico da rugosidade, sob aplicação de carga normal) para se obter os valores de C e M para cada caso.

Assim, adotou-se o valor de 0,5 para o parâmetro S, com base nos resultados de outros pesquisadores e obteve-se o valor correspondente de R. Foi montada a tabela 6.3, onde são apresentados os diversos parâmetros ( $K_t$ , R, S, C e M) para as curvas de carregamento, média e descarregamento para os quatro níveis de carga.

Com base nas tabelas 5.3 e 5.60 onde está apresentada a média do valor definido de  $C^*$  e  $M^*$  (parâmetros médios para uma pressão normal igual a 25 kgf/cm<sup>2</sup>), nota-se que os valores dos parâmetros C e M, calculados com base na curva representativa do carregamento normal de 25 kgf/cm<sup>2</sup>, estão dentro da faixa limitada pelo desvio da média (Tab. 6.3).

Da mesma forma que se definiu os valores de  $C^*$ , pode-

TAB. 6,3 - Parâmetros  $K_t$ , R, S, C e M, para o carregamento, média e descarregamento, para as pressões de 15, 25, 35 e 50  $\text{kgf/cm}^2$ .

$P_n$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Parâmetros	CURVAS		
		carregamento	média	descarregamento
15	$K_t$	0,264	0,284	0,298
	R	1,020	1,100	1,150
	S	0,500	0,500	0,500
	C	0,320	0,360	0,410
	M	0,490	0,440	0,390
25	$K_t$	0,097	0,106	0,115
	R	0,490	0,530	0,580
	S	0,500	0,500	0,500
	C	0,250	0,260	0,370
	M	0,460	0,440	0,330
35	$K_t$	0,088	0,099	0,106
	R	0,520	0,590	0,680
	S	0,500	0,500	0,500
	C	0,360	0,370	0,460
	M	0,340	0,330	0,260
50	$K_t$	0,057	0,058	0,062
	R	0,400	0,410	0,440
	S	0,500	0,500	0,500
	C	0,280	0,280	0,350
	M	0,370	0,370	0,310

se definir parâmetros equivalentes para pressões de 35 e 50  $\text{kgf/cm}^2$ . Utilizando as equações de ajustamento dos parâmetros C e M em função do nível de carga, e considerando as pressões normais de 35 e 50  $\text{kgf/cm}^2$ , tem-se então a tabela 6.4.

Assumindo que o valor de M seja igual a 0,5, conforme a tabela 6.4, (onde se comete um pequeno erro, principalmente para  $P_n = 50 \text{ kgf/cm}^2$ ) e determinando o valor de R, com base na equação (3.17):

TAB. 6.4 - Valores médios dos parâmetros C e M, a partir das equações de ajustamento para  $P_n = 25, 30$  e  $50 \text{ kgf/cm}^2$

$P_n$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Parâmetros	CURVAS		
		Carregamento	média	Descarregamento
25	C	0,29±0,07	0,32 ±0,08	0,36 ±0,08
	M	0,54±0,05	0,50±0,05	0,46 ±0,04
35	C	0,31±0,08	0,35±0,08	0,39 ±0,09
	M	0,49±0,06	0,45±0,05	0,42 ±0,05
50	C	0,36±0,09	0,39±0,10	0,36 ±0,11
	M	0,41±0,07	0,39±0,06	0,37 ±0,06

$$R = 2(1 + \mu) C M \quad (6.5)$$

e considerando  $\mu = 0,28$ , valor médio determinado no capítulo 5; tem-se:

$$R^+ = 1,28 C \quad (6.6)$$

Na tabela 7.5 estão apresentados os parâmetros R e  $R^+$ . Como pode ser observado, comparando os parâmetros R, (obtidos experimentalmente), com  $R^+$  (obtido a partir de resultados experimentais dos parâmetros de rigidez normal e do coeficiente de Poisson), nota-se a tendência de aproximação destes parâmetros. Comparando os resultados apresentados na tabela 3.2, verifica-se que estes apresentados pela tabela 6.5, tem melhor acuidade.

#### 6.4 - Carregamento simultâneo.

As figuras 6.16, 6.17 e 6.18 apresentam as curvas experimentais obtidas para aplicação simultânea de cargas normais e tangenciais, com fatores  $\alpha$  iguais a 0,025, 0,040 e 0,060 respectivamente e as figuras 6.19, 6.20 e 6.21 apresentam duas curvas representativas do regime elástico para cada  $\alpha$  para  $P_n$  igual a 25 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ .

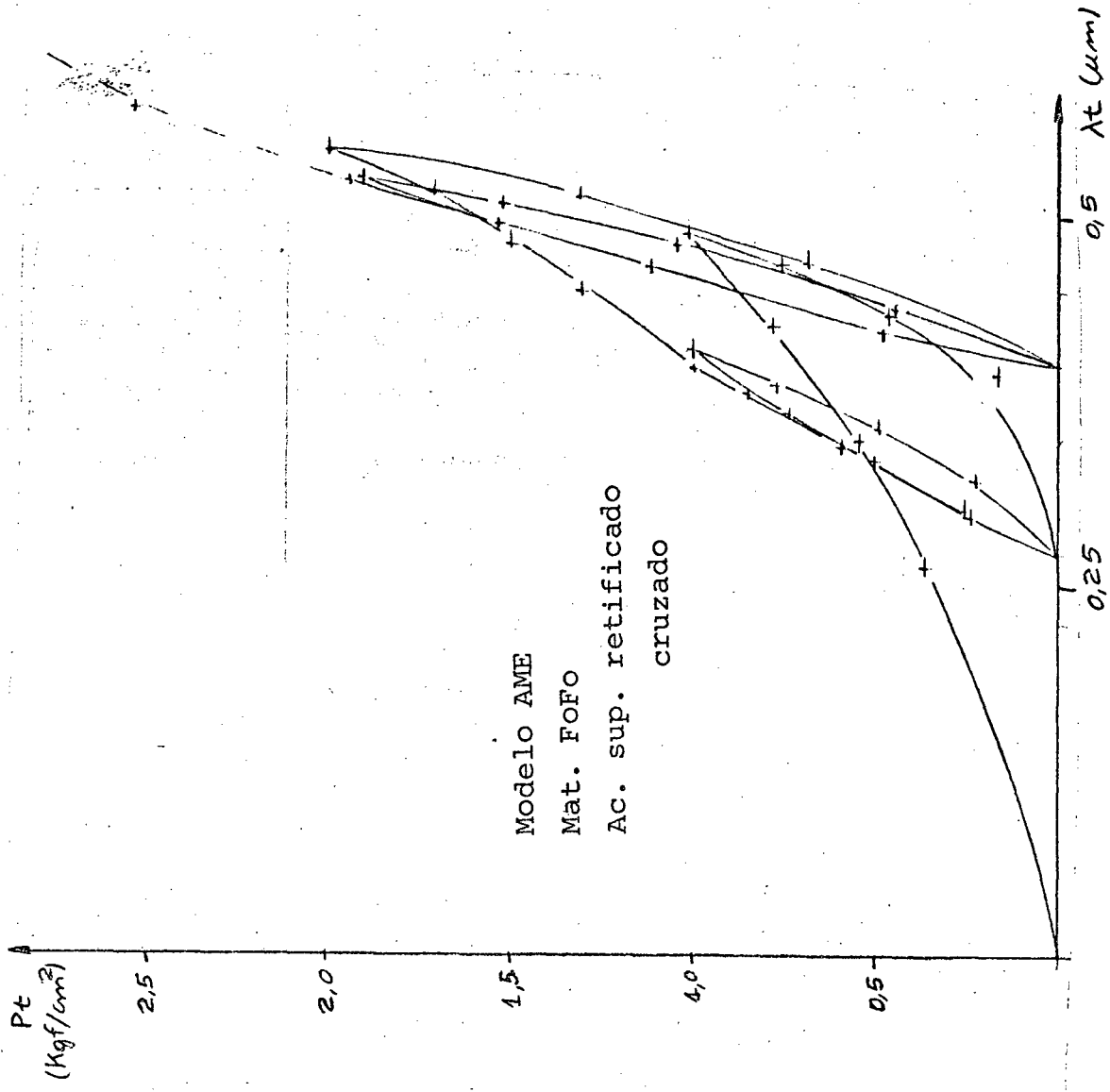


Fig. 6.17 - Curva experimental para o carregamento simultâneo  $\alpha = 0,040$

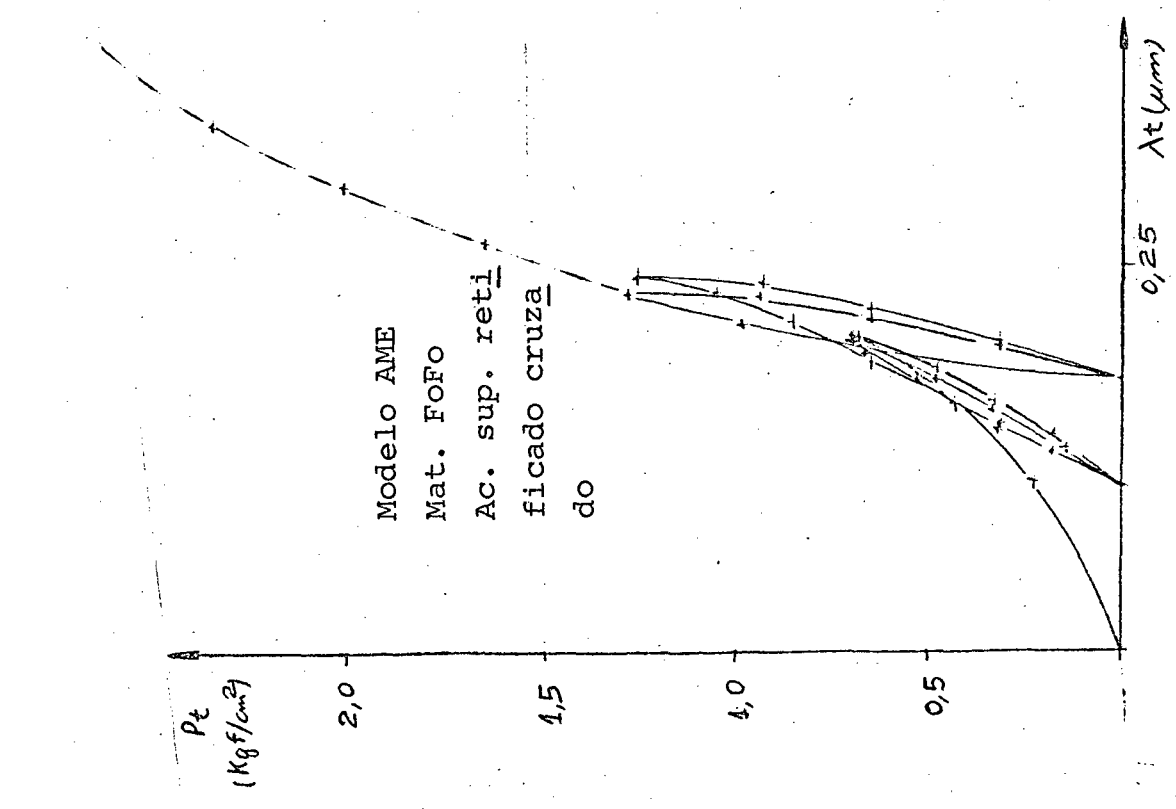


Fig. 6.16 - Curva experimental para o carregamento simultâneo  $\alpha = 0,025$



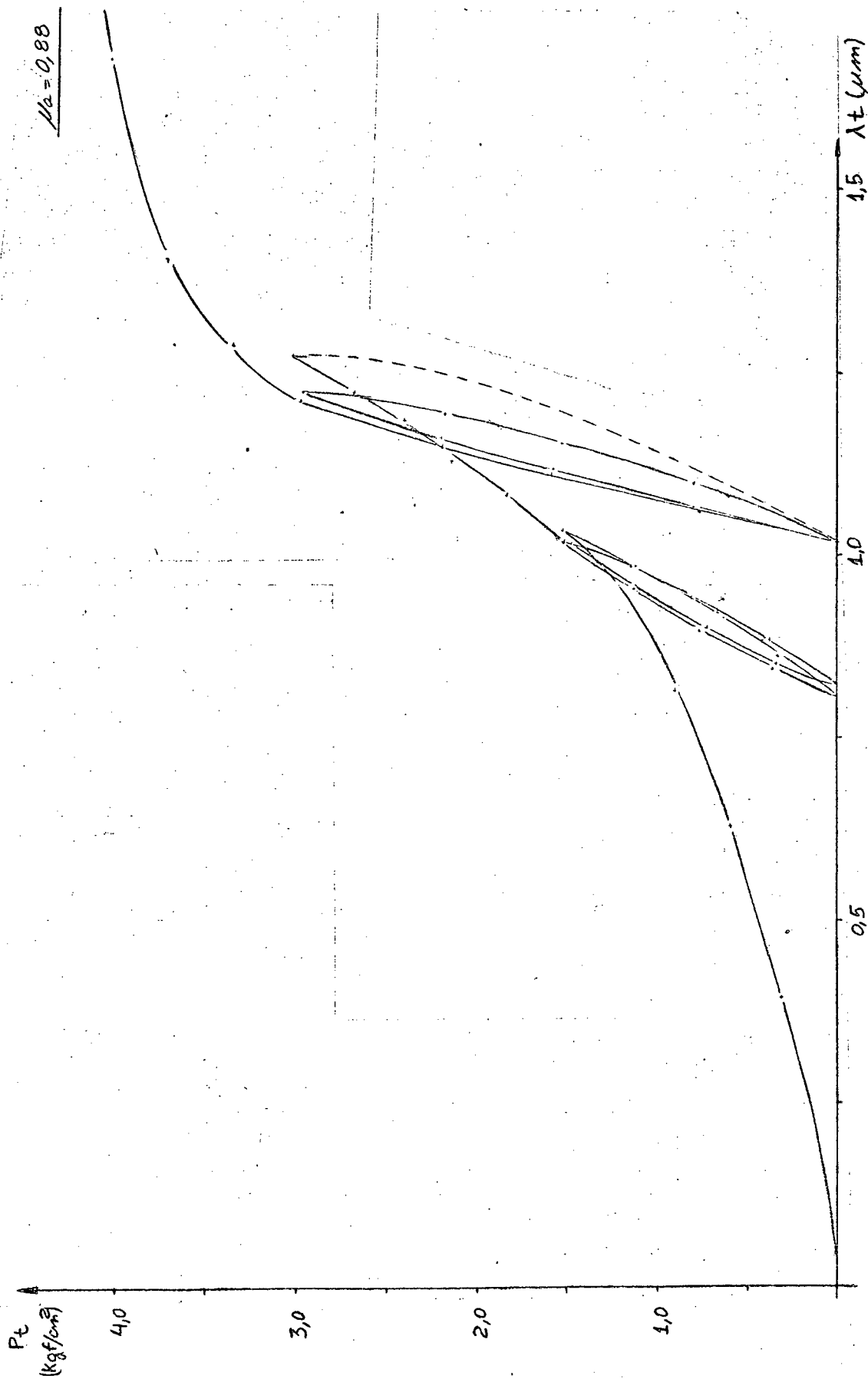


Fig. 6.18 - Curva experimental para o carregamento simultâneo  $\alpha = 0,060$

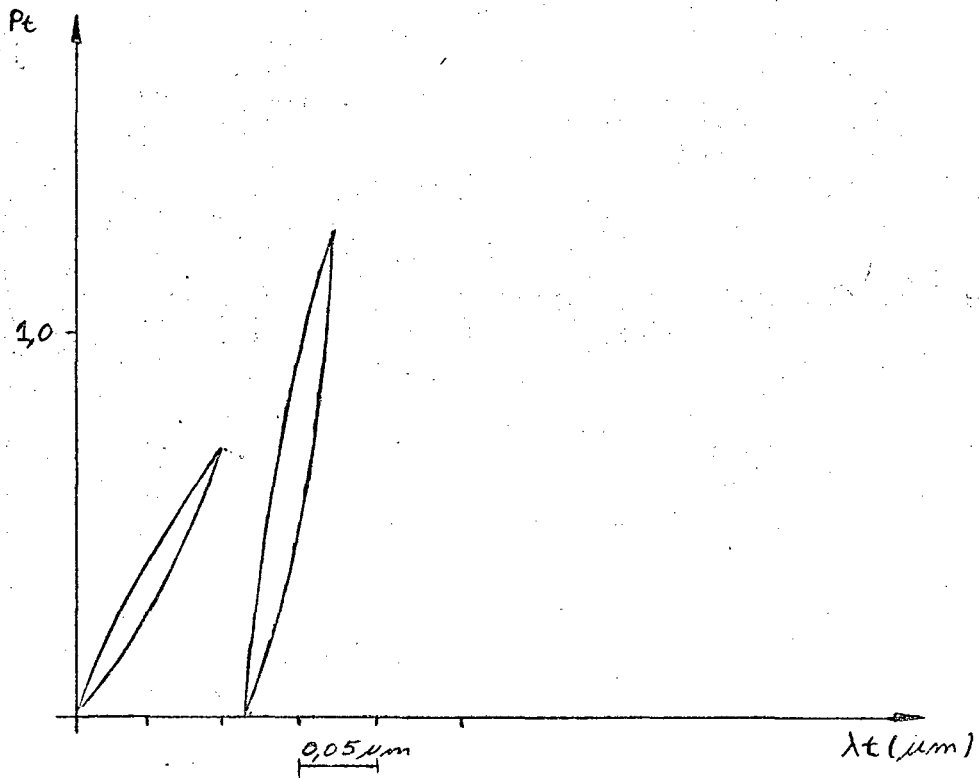


Fig. 6.19 - Curvas representativas do regime elástico  $\alpha = 0,025$

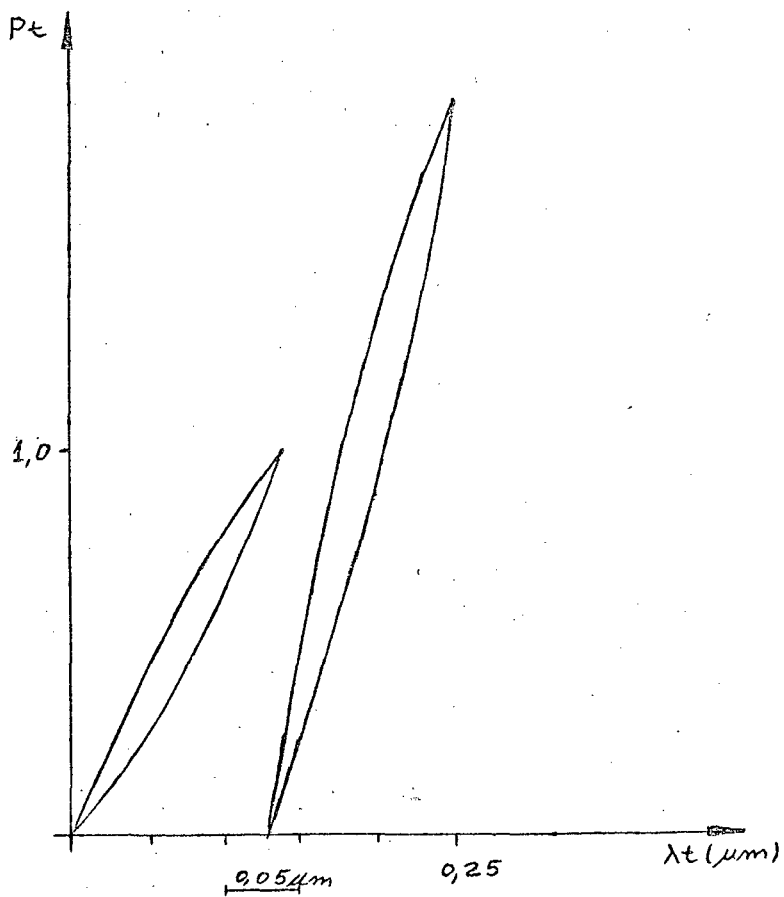


Fig. 6.20 - Curvas representativas do regime elástico  $\alpha = 0,040$

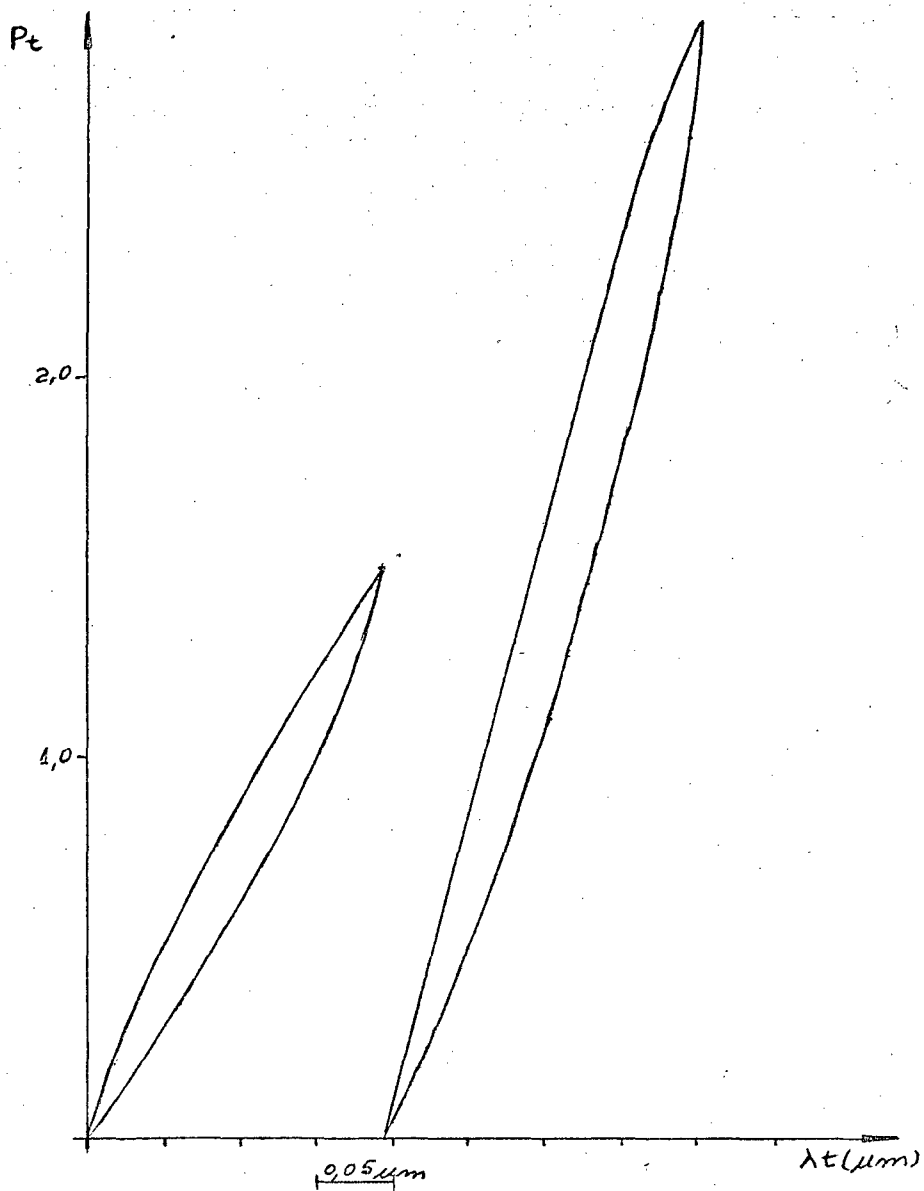


Fig. 6.21 - Curvas representativas do regime elástico  
 $\alpha = 0,060$ .

TAB. 6.5 - Tabela de comparação dos valores de R e R<sup>+</sup>, para as curvas de carregamento, média e descarregamento e P<sub>n</sub> = 25, 35 e 50 kgf/cm<sup>2</sup>.

P <sub>n</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Parâmetro	CURVAS		
		Carregamento	média	descarregamento
25	R	0,49	0,53	0,58
	R <sup>+</sup>	0,37±0,09	0,41±0,10	0,46±0,10
35	R	0,52	0,59	0,68
	R <sup>+</sup>	0,40±0,10	0,45±0,10	0,50±0,10
50	R	0,40	0,41	0,44
	R <sup>+</sup>	0,46±0,12	0,50±0,13	0,46±0,14

Pode ser observado nas figuras 6.16, 6.17 e 6.18, que as curvas se comportam exatamente conforme dedução teórica apresentada no capítulo 3: o primeiro carregamento simultâneo é representado por uma parábola, e a curva do descarregamento é menos rígida do que a do novo carregamento.

As figuras 6.22 e 6.23, apresentam as curvas representativas para o regime elástico para o carregamento simultâneo para os diversos valores de  $\alpha$ , respectivamente para P<sub>n</sub> = 25 e 50 kgf/cm<sup>2</sup>, e para comparação, estão também representadas as curvas para o caso do carregamento não simultâneo. Como pode ser observado, tem-se curvas de mesma forma e principalmente mesma inclinação. Pode-se concluir que para o regime elástico, não é de importância se a aplicação de carga for simultânea ou não. Então, a conclusão do item anterior também é válida para este caso.

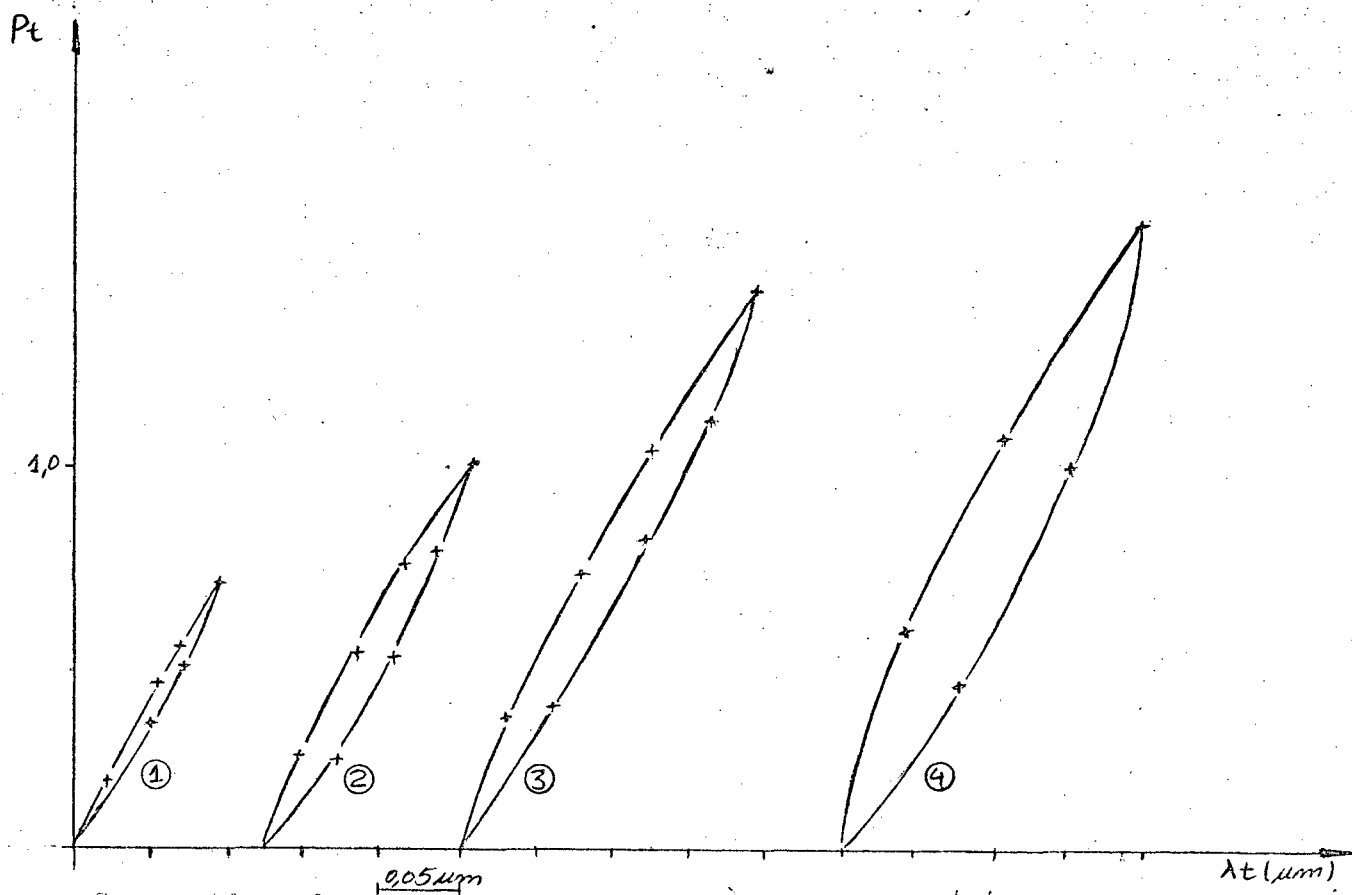


Fig. 6.22 - Comparação das curvas representativas do regime elástico do carregamento simultâneo: curvas 1 ( $\alpha = 0,025$ ), 2 ( $\alpha = 0,040$ ) e 3 ( $\alpha = 0,060$ ); e o carregamento não simultâneo: curva 4, para  $P_n = 25 \text{ kgf/cm}^2$ ,

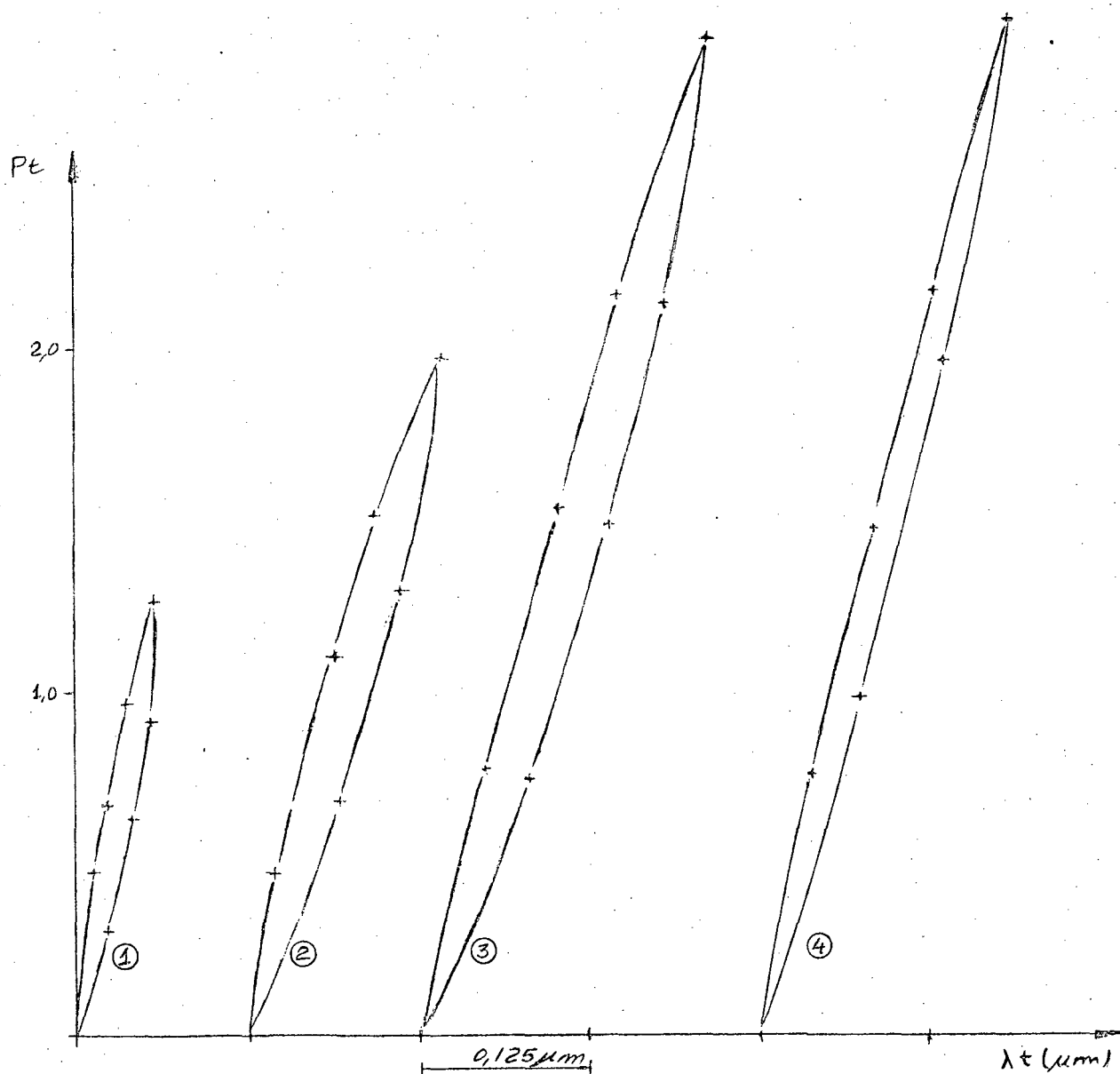


Fig. 6.23 - Comparação das curvas representativas do regime elástico do carregamento simultâneo: curvas 1 ( $\alpha = 0,025$ ) 2 ( $\alpha = 0,040$ ) e 3 ( $\alpha = 0,060$ ); e o carregamento não simultâneo: curva 4, para  $P_n = 50 \text{ kgf/cm}^2$ .

## C A P Í T U L O 7

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados experimentais, passa-se agora a análise e discussão dos mesmos.

## 7.1 - Módulos de Elasticidade

Foram adotados dois métodos para determinação experimental do módulo  $E$ . Para o aço 1020, ambos apresentaram resultados próximos, mas divergiram para o ferro fundido. Para o bronze, somente foi usado o método considerando o corpo sólido equivalente.

Comparando com os valores de  $E$ , tabelados por outros pesquisadores, verifica-se que para o caso do aço, o valor médio experimental é um pouco superior ao tabelado (15%); para o caso do ferro fundido, o valor obtido pelo uso de extensômetros foi 15% menor que o valor tabelado ( $0,8 \cdot 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>), enquanto que com uso do corpo sólido equivalente o erro foi de aproximadamente 50%. Para o bronze, o valor experimental difere do tabelado ( $1,0 \cdot 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>) de aproximadamente 15%.

Na sequência de cálculos apresentada no capítulo 6 para determinação dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$ , diminuiu-se da deformação média calculada, a parcela correspondente ao corpo sólido equivalente, utilizando o módulo  $E$  obtido pelo método do corpo sólido equivalente. Verificando o erro acarretado com esta consideração, nota-se que para o aço e o bronze é permissível. Para o ferro fundido é que é mais crítico.

Entretanto, a parcela proveniente da deformação do corpo sólido é bem pequena. Pode-se então aceitar os valores obtidos para o ferro fundido, sem necessitar novos cálculos com o valor obtido pelo uso de extensômetros.

Para verificar a validade da relação da rigidez normal e tangencial com os módulos de elasticidade normal e tangencial, foi necessário determinar o coeficiente de Poisson para o ferro fundido (material ensaiado). O valor obtido foi  $0,28 \pm 0,03$ , enquanto que o tabelado é  $0,25$  (nota-se que o valor mínimo experimental é o mesmo do tabelado). Para esta verificação utilizou-se do valor médio =  $0,28$ .

## 7.2 - Os parâmetros $C^*$ e $M^*$ de rigidez normal

Este item é analisado em função das tabelas 5.63 a 5.67.

### 7.2.1 - Material da junta

Foi proposto no item 2.4.1, que o parâmetro  $C$  fosse inversamente proporcional ao módulo de elasticidade do material e que se pode obter o valor de  $C$  para outro material, com mesmo acabamento superficial, adotando a relação:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{E_2}{E_1} \quad (7.1)$$

em que os índices 1 e 2 representam os dois materiais diferentes, de mesmo acabamento superficial. Isto considerando  $M$  com um valor de  $0,5$ .

Reunindo, das tabelas 5.63, 5.64 e 5.65, os mesmos acabamentos superficiais (comparando os valores de  $R_a$  e  $R_t$ ), para materiais diferentes, obteve-se a tabela 7.1. Não foi incluído o retificado grosseiro,  $F_oF_o$  ( $R_a = 1,50 \mu m$  e  $R_t = 13,20 \mu m$ ), por apresentar dispersão de 53%.

Verifica-se que  $M$  pode ser assumido como o valor de  $0,5$ . Nota-se a tendência de validade da equação 7.1. Por exemplo (considerando a curva média):





- 1) Retificado: para o maior  $C^*$  de  $F_0F_0$ , e o menor do aço, tem-se uma relação  $C_1^* / C_2^* = 2,0$  ( $E_2/E_1 = 2,60$ );
- 2) Torneado: para o valor médio de  $C^*$  de  $F_0F_0$ , e o menor do aço, tem-se:  $C_1^* / C_2^* = 2,5$  ( $E_2/E_1 = 2,60$ );
- 3) Torneado: para o valor médio de  $C^*$  do bronze e o menor do aço, tem-se:  $C_1^* / C_2^* = 2,71$  ( $E_2/E_1 = 3,01$ );
- 4) Plainado cruzado: para o maior valor de  $C^*$  de  $F_0F_0$ , e o menor do aço, tem-se:  $C_1^* / C_2^* = 2,33$  ( $E_2/E_1 = 2,60$ ).

Entretanto, para o fresado e o plainado, isto não aconteceu:

- a) para os resultados encontrados para o fresado, nota-se que este acabamento parece não se modificar diante da mudança do material (o parâmetro  $C^*$  permanece o mesmo para o ferro fundido e o aço);
- b) para o caso do plainado, a situação se inverteu: o parâmetro  $C^*$  é bem maior para o aço 1020, do que para o ferro fundido ( $C_1^* / C_2^* = 2,62$ , para os valores médios). Entretanto, se for comparado o plainado, para o ferro fundido e o bronze, verifica-se que para o menor valor de  $C^*$  do bronze e o maior do  $F_0F_0$ , tem-se  $C_1^* / C_2^* = 1,43$ , e para os valores médios experimentais de  $E$ , tem-se  $E_2/E_1 = 1,16$ . Deve-se então desconsiderar os resultados obtidos para o aço 1020.

### 7.2.2 - Altura da aspereza

Foi concluído no item 2.4.2, que para um determinado tipo de usinagem, as superfícies com menores alturas de asperezas (melhor grau de acabamento superficial) são mais rígidas, e consequentemente apresenta menores valores de  $C$  - o valor de  $M$  igual a 0,5.

A tabela 5.63 (valores dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$ , para o ferro fundido) apresenta o retificado em dois graus, no que se refere aos parâmetros de rugosidade. Passa-se a chamar de retificado grosseiro e retificado fino. Verifica-se que o retificado grosseiro é bem mais rígido do que o retificado fino (a relação dos parâmetros  $C^*$  é aproximadamente 0,5). A tabela 6.66 apresenta os valores obtidos para  $C^*$  e  $M^*$ , ferro fundido, quando as superfícies tiveram seus primeiros níveis de carga a 5, 10, 15, 20 e 25 kgf/cm<sup>2</sup>. Nota-se, mais uma vez que o ferro fundido, retificado não segue as conclusões dos outros pesquisadores<sup>1,5,8</sup>.

Verificando para o retificado - aço 1020 (TAB. 5.64), tem-se a validade da influência da altura da aspereza (item 2.4.2), bem como para o fresado - aço 1020.

Entretanto para o torneado - aço 1020, nota-se que a altura da aspereza tem influência contrária ao que se esperava, isto é, para superfícies mais rugosas, o parâmetro  $C^*$  é menor.

### 7.2.3 - Orientação das estrias de usinagem.

Da análise da influência da orientação das asperezas, apresentada no item 2.4.2, concluiu-se que, quando se aumenta a área real de contato, aumenta-se conseqüentemente a rigidez da junta.

Para verificar esta influência, podem ser comparado os parâmetros para o retificado cruzado com o retificado (paralelo) e o plainado cruzado e o plainado (paralelo), apresentados nas tabelas 5.63 e 5.64. Nota-se que o retificado cruzado, tanto para o ferro fundido, como para o aço 1020, é mais rígido (o parâmetro  $C^*$  é menor) do que o retificado, para mesma altura de aspereza. Para justificar estes resultados, pode-se inicialmente dizer, que no retificado cruzado tem-se melhor distribuição de pressão. Inicialmente as áreas individuais de contato são de pequeno valor. Devido aos primeiros carregamentos, se obtém grandes deformações plásticas devido ao amassamento dos picos das asperezas e as áreas individuais tornam-se maiores e suportam maior carga.

Compara-se agora, o plainado (paralelo) com o plainado cruzado, para o aço 1020 e FoFo: para o FoFo, nota-se que o plain

nado cruzado é menos rígido do que o montado em paralelo; para o aço 1020, verifica-se que o plainado cruzado é levemente mais rígido do que o plainado. Pode-se justificar os resultados obtidos para o aço 1020, dizendo que não se tinha um controle rigoroso, quando se montava as superfícies em paralelo. Não se podia admitir ter um perfeito endentamento das estrias de usinagem. Pode-se então desconsiderar os resultados obtidos para o plainado (paralelo) - aço 1020. Conclusão semelhante ao item 7.2.1.

Os resultados do ferro fundido (plainado cruzado ser menos rígido do que o plainado), concordam com os obtidos por Schlosser(19), que verificou esta influência com o plainado, de forma que se tinha grandes passos e isto possibilita um controle do endentamento.

É provável que a diferença entre os resultados do retificado cruzado e retificado e do plainado cruzado e plainado, tenha ocorrido devido a impossibilidade de controle do paralelismo e passo das estrias de usinagem, e posterior endentamento na montagem.

#### 7.2.4 - Influência do primeiro nível de carga.

As tabelas 5.66 e 5.67 apresentam os resultados dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$ , para o retificado, quando o primeiro carregamento é de 5, 10, 15, 20 e 25 kgf/cm<sup>2</sup>. As figuras 7.1, 7.2 e 7.3, apresentam os valores médios dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  obtidos, bem como o desvio da média para os níveis de carga analisados, respectivamente para o retificado grosseiro - FoFo, retificado fino - FoFo, retificado fino - Aço 1020.

Para os três casos, pode-se considerar que o parâmetro  $M^*$  não varia conforme o nível do primeiro carregamento. Entretanto, para o parâmetro  $C^*$  existe variação:

- retificado grosseiro - FoFo (fig. 7.1): excetuando o teste correspondente ao primeiro nível de carga igual a 20 kgf/cm<sup>2</sup>, nota-se que  $C^*$  decresce para níveis de carga maiores (a superfície torna-se mais rígida). Recomenda-se analisar mais este ponto.  $M^*$  pode ser assumido como valor médio: carregamento  $M^* = 0,50$ , média  $M^* = 0,48$  e descarregamento  $M^* = 0,37$ .
- retificado fino - FoFo (fig. 7.2) - idem conclusão anterior .

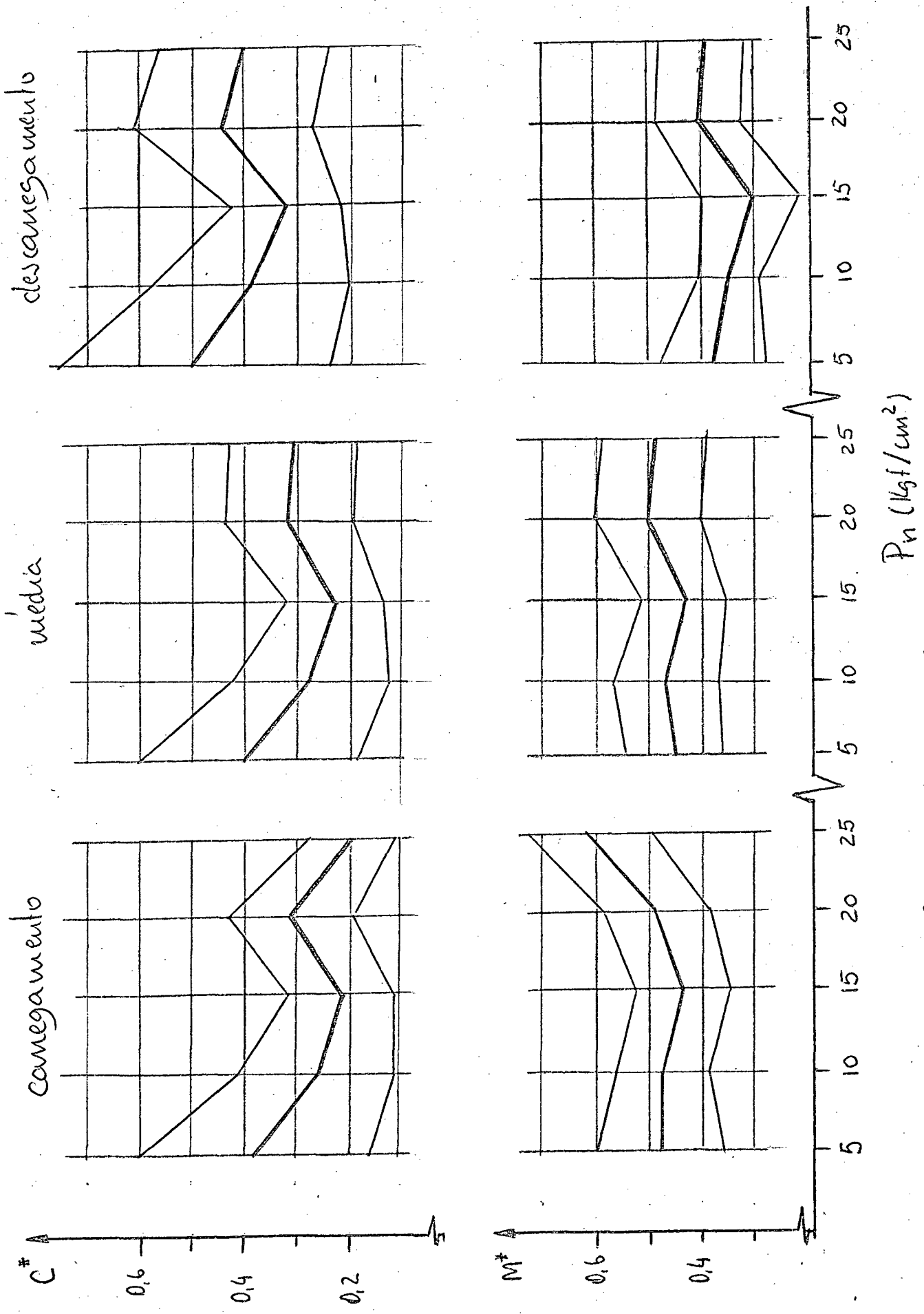


Fig. 7.1 - Influência do primeiro nível de carga - FoFo - retificado grosseiro.

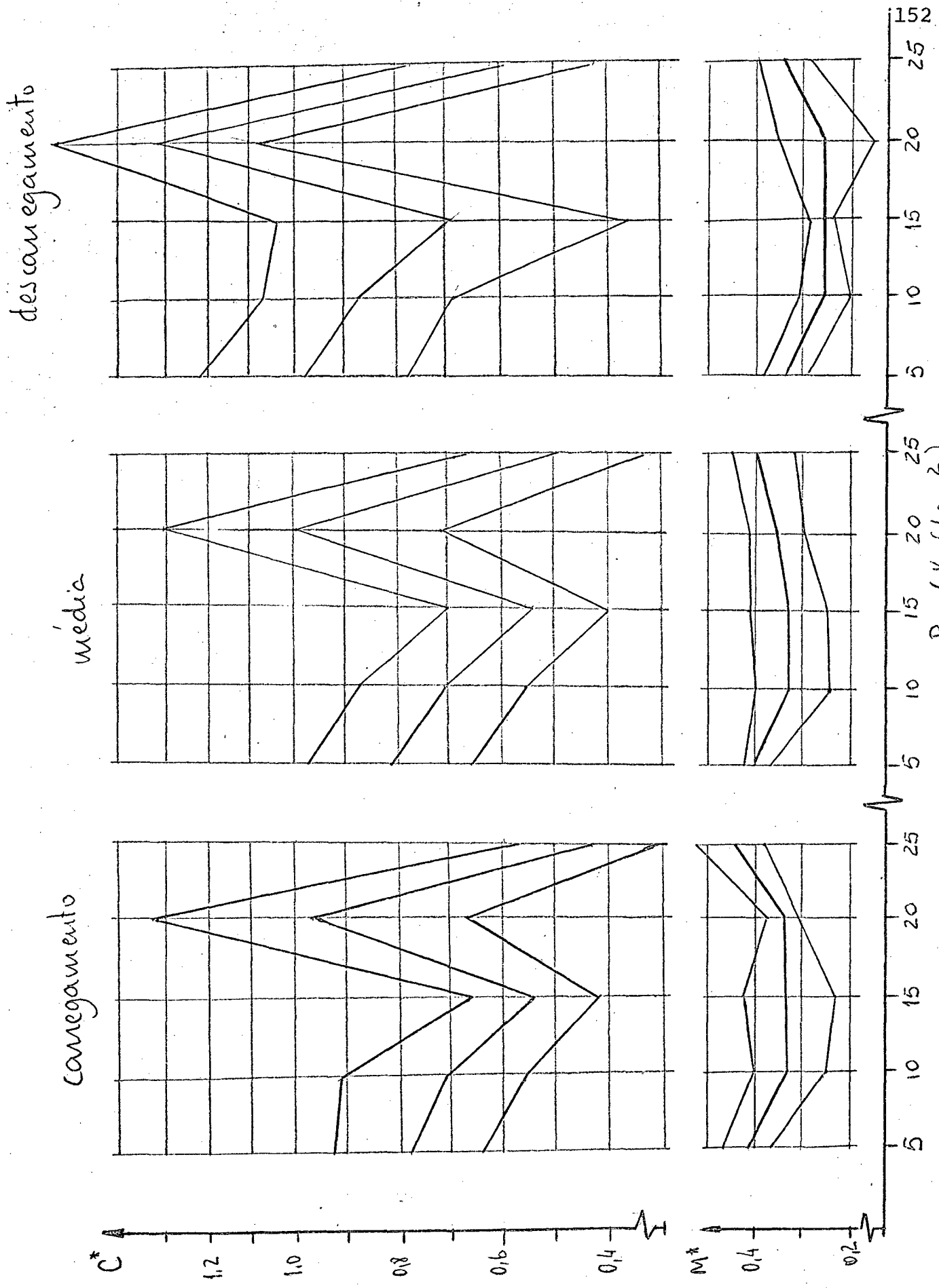


Fig. 7.2 - Influência do primeiro nível de carga - FoFo - retificado fino.

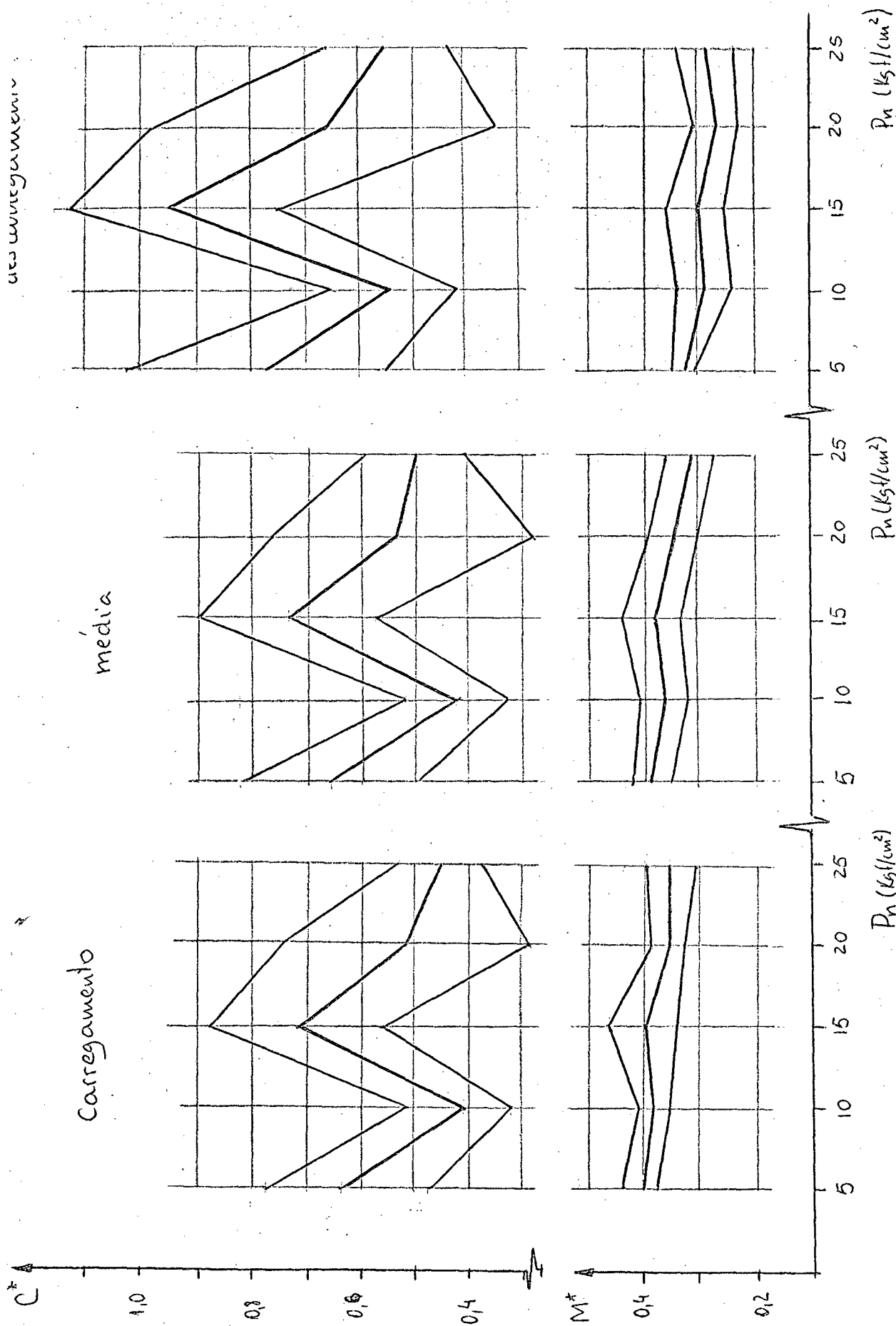


Fig. 7.3 - Influência do primeiro nível de carga - Aço 1020 - retificado fino.

Valores médios de  $M^*$ : carregamento  $M^* = 0,38$ , média  $M^* = 0,36$ ; descarregamento  $M^* = 0,29$ .

- retificado fino - Aço 1020 - excetuando o teste correspondente ao primeiro nível de carga igual a  $10 \text{ kgf/cm}^2$ , nota-se que  $C^*$  tende a crescer até o nível de  $15 \text{ kgf/cm}^2$  e decrescer para os demais níveis (melhor rigidez). Recomenda-se analisar mais este ponto.  $M^*$  pode ser assumido como valor médio: carregamento  $M^* = 0,39$ , média  $M^* = 0,37$  e descarregamento  $M^* = 0,31$ .

#### 7.2.5 - Comparação com os valores obtidos por LEVINA <sup>1</sup>

Comparando os resultados apresentados nas tabelas 5.63 e 2.4, tem-se a tabela 7.2. LEVINA <sup>1</sup> obteve os parâmetros  $C$  e  $M$  a pressões máximas de  $25 \text{ kgf/cm}^2$ . Neste trabalho foram calculados os parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  - calculados a partir das equações de ajustamento, para pressões também de  $25 \text{ kgf/cm}^2$ . Na tabela 7.2, passa-se a denominar ambos os parâmetros  $C$  e  $M$ , respectivamente.

TAB. 7.2 - Comparação dos parâmetros obtidos com os de LEVINA <sup>1</sup>

Acabamento sup.	Mat.	Rugosidade		Q nº de pontos/cm <sup>2</sup>	C	M	ref.
		R <sub>a</sub> (µm)	R <sub>t</sub> (µm)				
rasquetead do fino	FoFo		6-8	3 - 4	0,50	0,50	1
		0,56	7,46	3 - 4	0,66	0,44	tab. 6.63
retificado	FoFo	1,00			0,6-0,7	0,40	1
		1,55	13,47		0,39±0,21	0,46±0,18	tab.
		0,35	4,84		0,85±0,15	0,41±0,03	6.63

Com apenas dois casos em comum, nota-se a tendência de se coincidirem os resultados:

- para o rasqueteadado fino, se por cálculos, fosse adotado o valor de  $M = 0,5$ , o parâmetro  $C$  deveria diminuir e se aproximar do valor obtido por LEVINA.



- para o retificado, se fosse linearizar os parâmetros obtidos em função dos parâmetros de rugosidade ter-se-ia valores correspondentes ao da referência 1, para  $R_a = 1,0 \mu\text{m}$ .

### 7.3 - Comparação dos parâmetros R e $R^+$ .

#### 7.3.1 - A tabela 6.5

Da proposta (2,3) de se obter os parâmetros de rigidez tangencial a partir dos parâmetros de rigidez normal, em função da relação dos módulos de elasticidade, obteve-se a equação (6.5) ou

$$R = (1 + \mu) C \quad (7.5)$$

quando se considera  $S = M = 0,5$ .

Obteve-se o valor experimental de  $\mu = 0,28$ , para o ferro fundido (material analisado) e a partir da equação (7.5), calculou-se os valores de  $R^+$ . Conforme pode ser verificado (Tab. 6.5), o valor R experimental, tende a se aproximar da faixa de valores de  $R^+$  (o valor de C é apresentado pela média, acompanhado do desvio da média). Considerando satisfatórios estes resultados utilizando a equação (7.5), obtém-se os valores de R para outros materiais e acabamentos superficiais.

#### 7.3.2 - Extrapolação para os demais materiais e acabamentos superficiais

Considerando a equação (7.5) e utilizando os valores tabelados do coeficiente de Poisson para o ferro fundido ( $\mu = 0,25$ ) e aço 1020 ( $\mu = 0,30$ ), tem-se nas tabelas 8.4 e 8.5 o parâmetro  $R^*$  de rigidez tangencial para o ferro fundido e aço 1020 respectivamente, para o parâmetro S com valor 0,5, obtido a partir do parâmetro  $C^*$ , tabela 5.63 e 5.64.

TAB. 7.4 - Parâmetro R\* de rigidez tangencial para o ferro fundido e os diversos acabamentos superficiais calculado a partir do parâmetro C\*, M = 0,5, S = 0,5.

Acabamento Superficial	Rugosidade		R*		
	Ra (µm)	Rt (µm)	Carregamento	Média	Descarregamento
Retificado cruzado	0,60	5,16	0,36±0,09	0,40±0,10	0,45±0,10
Retificado	1,55	13,47	0,48±0,28	0,49±0,26	0,61±0,33
	0,35	4,84	1,01±0,13	1,06±0,19	1,26±0,25
Torneado	2,07	16,43	0,76±0,13	0,81±0,13	0,99±0,18
Plainado	2,39	17,93	0,86±0,15	0,89±0,16	1,15±0,20
Plainado cruzado	2,52	17,47	2,15±0,65	2,28±0,66	3,14±0,80
fino	0,56	7,46	0,80	0,83	1,00
Rasquetado normal	0,61	8,80	0,83	0,84	1,01
grosseiro	0,93	10,20	1,06	1,09	1,34

TAB. 7.5 - Parâmetro R\* de rigidez tangencial, para o aço 1020 e os diversos acabamentos superficiais, calculado a partir do parâmetro C\*,

M = 0,50 , S = 0,5.

Acabamento Superficial	Rugosidade		R*		
	Ra (µm)	Rt (µm)	Carregamento	média	descarregamento
Retificado cruzado	1,46	12,87	0,48±0,08	0,53±0,09	0,57±0,09
Retificado	1,44	12,85	0,95±0,21	1,01±0,30	1,29±0,26
	0,50	4,79	0,83±0,04	0,87±0,22	1,04±0,31
Torneado	1,99	15,43	0,56±0,22	0,57±0,23	0,68±0,30
	1,43	10,34	0,75±0,26	0,83±0,29	0,91±0,31
Plainado cruzado	1,98	16,10	1,82±0,55	2,42±0,56	2,20±0,66
fino	0,53	7,80	0,60	0,61	0,75
Rasquetado normal	0,69	9,40	0,69	0,70	0,82
grosseiro	0,66	10,40	1,16	1,20	1,42

## CONCLUSÕES

Com base na análise (teórica e experimental da relação da pressão e deformação normal de superfícies em contato, obteve-se os parâmetros característicos de rigidez normal de superfícies usinadas. Pode-se concluir que:

- a) excetuando os resultados obtidos para o fresado (aço 1020 e FoFo) e o plainado - aço 1020, as tabelas 5.63, 5.64 e 5.65 apresentavam os valores dos parâmetros  $C^*$  e  $M^*$  para os demais acabamentos superficiais e os materiais analisados;
- b) o parâmetro  $M^*$  pode ser assumido com 0,5;
- c) pode-se obter o parâmetro  $C$  característico de uma superfície usinada, de um determinado material, conhecendo-se o parâmetro correspondente de outro material, com mesmo acabamento superficial (em função da relação dos módulos de elasticidade, equação 7.5);
- d) para o retificado - FoFo e o torneado - aço 1020, a altura da aspereza tem efeito contrário ao que se esperava: para superfície mais rugosa, tem-se melhor rigidez.
- e) os resultados apresentados para verificação da influência da orientação das estrias, entre o retificado cruzado e o retificado, e o plainado cruzado e plainado tenha ocorrido devido a impossibilidade de controle de paralelismo e passo das estrias na usinagem e posterior endentamento na montagem.

Pode-se dar validade à proposta de BACK (relação de rigidez normal e tangencial de superfícies usinadas é igual a relação dos módulos de elasticidade normal e transversal do material. A partir disto, pode-se obter os parâmetros característicos de rigidez tangencial ( $S = 0,5$ ), para os acabamentos superficiais ensaiados do ferro fundido e do aço 1020 e que são apresentados nas tabelas 7.4 e 7.5, respectivamente.

## SUGESTÕES

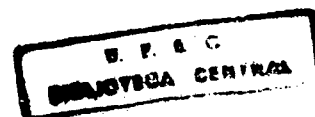
Algumas lacunas merecem ser analisadas para dar um complemento a este trabalho:

- 1 - A influência do primeiro nível de carga, nos parâmetros de rigidez normal, (recomenda-se o uso de outro acabamento superficial);
- 2 - Determinação dos parâmetros de rigidez normal para o fresado (ferro fundido e aço 1020) e o plainado - aço 1020;
- 3 - Verificar a influência dos parâmetros de rigidez normal para o retificado - FoFo e o torneado - aço 1020 nos parâmetros de rigidez normal (para outros graus dos acabamentos superficiais).

Sugere-se que se faça um estudo sobre a área real de contato.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 LEVINA, Z.M. and RESHETOV, D.N. - Machine design for contact stiffness - Machine and Tooling - Vol. 36 - 1965.
- 2 BACK, N. - Deformation in machine tool joints - Ph.D. Thesis - UMIST - 1972.
- 3 BACK, N. - Rigidez normal e tangencial de superficies usinadas - Congresso Engenharia Mecânica - Rio de Janeiro - 1973.
- 4 DREYHAUPT, W., Aystetten - Stand der Oberflächenprüfung und-normung us Deutschland - Werkstatt un Betrieb 108 (1975)8, pag. 523.
- 5 CONNOLLY, R. and THORNLEY, R.H. - The significance of Joints on the overall deflection of machine tool structures - Int. MTDR Conf. - 1965.
- 6 TENNER, O.G. - Contact stiffness of friction slideways Machine and tooling - Vol. 39 - 1968.
- 7 DOLBEY, M.P. and BELL, R. - The contact stiffness of Joints at low apparent interface pressure - Annals of the CIRP - 1970.
- 8 LEVINA, Z.M. - Research on the static stiffness of Joints in machine tool - 8th. Int. MTDR Conf. - 1967.
- 9 OSTROVSKII, V.I. - The influence of machining methods on slideway contact stiffness - Machine and Tooling - Vol. 36 - 1965.
- 10 THORNLEY, CONNOLLY, BARASH and KOENIGSBERGER - The effect of surface topography upon the static stiffness of machine tool Joints - Proc. Int. Mechanical Engenner - 1967.



- 11 DEKONINCK, C. - Experimental investigation of the normal and dynamic stiffness of metal Joints - 10th Int. MTDR Conf. - Vol. 9 - 1969.
- 12 KRAGELSKII - Friction and Wear - Cap. 2 - Review of previous investigations: The approach of rough surfaces and the area of contact.
- 13 BACK and BURDEKING - An elastic mechanism for the micro-sliding characteristics between contacting machined surfaces - a ser publicado.
- 14 DEKONINCK, C. - Experimental study of the normal static of metallic contact surface of Joints.
- 15 BUC, J. e NOWICKI, B. - The measurement of the real  $\bar{a}$ -area of contact between two metal surfaces - 8th. Int. MTDR Conf. - 1967.
- 16 GREENWOOD, J.A. - The area of contact between rough surface and flats - J. of Lubrification Technology- 1967.
- 17 SCHOFIELD, R.E. e THORNLEY, R.H. - Mathematical expression for surface finish characteristics - Conf. of Properties and Metrology of Surfaces - Oxford (1968).
- 18 SCHOFIELD, R.E. e THORNLEY, R.H. - Calculating the elastic and plastic components of deflection on plane joints formed from machined surface.
- 19 SCHLOSSER, E. - Der Einfluss Ebener Verschraubter Fugen auf das Statische Verhalten von Werkzeugmaschinen ges tellen - Werkstattstechnik und Maschinenbau, Helf 1 (1957).
- 20 CONNOLLY, SHOFIELD e THORNLEY - The approach of machine surface with particular reference to their hardness - 8th Int. MTDR Conf. - 1967.

- 21 LEVINA, Z.M. - Calculation of contact deformation in sliding - Machine and Tooling - Vol. 36 - 1965.
- 22 KIRSANOVA, V.N. - The shear compliance of flat Joints - Machine and Tooling - Vol. 38 - 1967.
- 23 MASUKO, ITO e FUJIMOTO - Behaviour of the horizontal stiffness and the inicio sliding on the bolted Joints under the normal pre load - 12th. Int. MTDR Conf.- 1971.
- 24 ITO e MASUKO - Experimental study on the optimum interface pressure on a bolted joint, considering the damping capacity.
- 25 ABNT NB-93 - Rugosidade superficial - 1964.
- 26 DIN 4762 - Inclusion de las diferencias de forma de 2<sup>a</sup> a 5<sup>a</sup> ordem en superficies a la vista de cortes de superficies - DIN - manual 1, Normas fundamentales para la técnica mecânica - Editorial Balzola, Bilbao , 1970 , pag. 131.
- 27 STEMMER, C.E. - Projeto e construção de máquinas - Cap. VIII - Acabamento Superficial, pag. 187, Editora Globo, Porto Alegre - 1974.
- 28 PERTH-O-METER - Typ W1Be - Catálogo - Dr. Ing. Perthen , GMBH - Messgeräte - und Apparateban.
- 29 LEMBRANDO E INOVANDO - Mundo Mecânico - Ano 1, nº 3, Setembro/76 - Editora Mas Gruenwald & Cia. Ltda, pag.29.
- 30 DIN 4760 - Conceptos para la forma de superficies - DIN - manual 1, Normas fundamentales para la técnica mecânica - Editorial Balzola, Bilbao, 1970, pag. 127.
- 31 DIN 50125 - Zug proben, DIN Taschenbuck 19 - Material prüfnormer für metallische Werkstoffe Beuth - Vertrieb GmbH, 1973, pag. 135.



- 32 ANDREW, C., COCKBURN, J.A. e WARING, A.E. - Metal surfaces in contact under normal forces: some dynamic stiffness and damping characteristics - Proc. Int. Mechanical Engineer - 1967/68 - Vol. 182 - Pt 3 K.
- 33 CORBACK, K. - Die dynamische steifigked ruhender und beweglicher verbindungen an Werkzeugmaschinen - Maschinemarkt n° 79 - 1966.
- 34 HARRIGTON e SCHOFIELD - The effect of Joints on the static stiffness and energy dissipation properties of overhung boring bars.
- 35 CONNOLLY, R. e THORNLEY, R.H. - Determining the normal stiffness of Joints faces - ASME - paper n° 67 - prod. 6 - 1967.
- 36 PIC - Pressure in machine slideways - Machine and Tooling, Vol. 35 - n° 12 - 1964.
- 37 TENNER, O.G. - Feed and friction forces in precision machine - Machines and Tooling, Vol. 39 - n° 9
- 38 LEVINA, Z.M. - Determining the maximum pressures on machine slideway - Machines and Tooling - Vol. 39 - n°1
- 39 REASON, R.E. - Some approaches to the measurement of waviness - 6th. Int. MTDR Conf. - 1965.
- 40 BACK, N.; BURDEKIN, N. e COWLEY, A. - Review of the research on fixed and sliding Joints.
- 41 SCHOFIELD e THORNLEY - The elastic am plastic component of deflection of joints formed from machined surfaces with flatness error .
- 42 THORNLEY e LEES - Some static and dynamics characteristics of bonded machined joints faces.

- 43 TRAUER, R.O. - Procedimento para determinar os valores do coeficiente de cisalhamento - M.Sc. Tese - UFSC - 1974.
- 44 DEN HARTOG - Advanced Strength of Materials - McGraw-Hill - 1965.
- 45 TIMOSHENKO - Strength of materials - parte II - D. Van Nostrand - 1964.
- 46 HARTSTEIN, Helio - Contribuição a análise de rigidez estática da estrutura de tornos universais - M.Sc. Tese - UFSC - 1973.
- 47 BOWKER e LIEBERMAN - Engineering Statistics, Prentice-Hall, Inc. 1959, pag. 558.

## APÊNDICE 1

## RUGOSIDADE SUPERFICIAL

## 1 - Generalidades

Durante a pesquisa bibliográfica, notou-se que o controle de rugosidade superficial referenciados pelos diversos autores <sup>1,2,5,6</sup>, variavam: uns indicavam valores correspondentes a CLA (Center Line Average); outros usavam o valor máximo do "pico a vale" e alguns usavam ambos os parâmetros. Estes valores correspondem ao parâmetro  $R_a$  = desvio médio aritmético da aspereza, definido como valor médio aritmético das distâncias absolutas  $h_i$  do perfil real ao perfil médio (fig. 3), num comprimento de referência  $l$  (vide figura 1), dado pela equação:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_i| dx \quad (1)$$

que é padronizado pela ABNT NB 93 - 1964 <sup>25</sup>, e pela DIN 4762/1 - 1960 <sup>26</sup>, e o parâmetro  $R_t$  = profundidade máxima de aspereza, definido como a distância máxima entre o perfil de base e o perfil de referência, padronizado pela DIN 4762/1 e apresentado no apêndice da NB 93 - 1964.

## 2 - Normas DIN

A norma DIN 4762/1, publicada em 1960 <sup>26</sup>, adota o sistema E, que se baseia na linha envoltória descrita pelos centros dos dois círculos de raios  $R$  e  $r$  que rolam sobre o perfil efetivo (ver figura 2), prevê os seguintes parâmetros característicos de rugosidade superficial:

## a) Medidas verticais:

- $W$  = profundidade de onda;
- $R_t$  = profundidade máxima da aspereza, definida acima (Figura 3);
- $R_p$  = profundidade média (Fig. 4), definido como distância média entre o perfil de referência e o perfil real, dado pela equação:

$$R_p = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} h_i \cdot dx \quad (2)$$

- $R_a$  = desvio médio aritmético da aspereza, definido acima, (Figura 3).

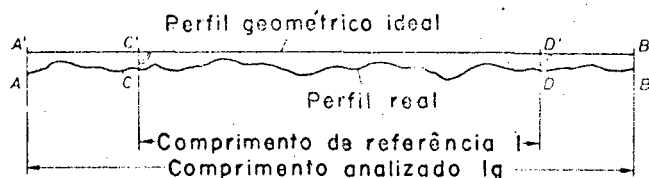


Fig. 1 - Comprimento analisado e comprimento de referência.

## b) Medidas horizontais:

- $A_w$  = valor médio aritmético de todas as distâncias  $a_{wi}$  das cristas de ondas contínuas (pontos I, K, L, etc. da Figura 5) do perfil real, medido dentro do comprimento de referência de ondas ( $l_w$ );
- $A_r$  = valor médio aritmético de todas as distâncias  $a_{ri}$  das cristas das ranhuras contínuas (pontos S, T, U, etc., da Figura 5) do perfil real;
- $l_t$  = comprimento de contato a uma profundidade  $C$ . Transladando o perfil de referência de uma quantidade  $C$ , perpendicularmente a um perfil geométrico ideal, este cortará o perfil real nos trechos  $l_{c1}, l_{c2}, \dots, l_{cn}$ . O comprimento de sustentação  $l_t$  é a soma das projeções dos trechos  $l_{c1}, l_{c2}, \dots, l_{cn}$ , no perfil geométrico ideal (soma dos comprimentos  $l'_{c1}, l'_{c2}, \dots, l'_{cn}$ ;

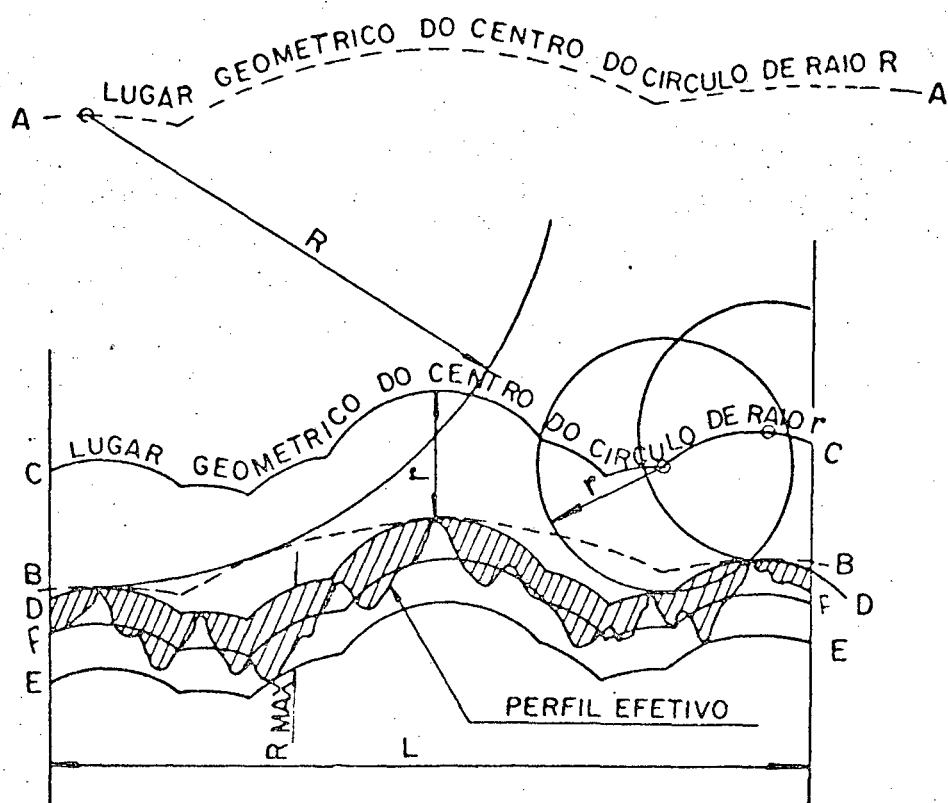


Fig. 2 - Sistema E - função da linha envoltória descrita pelos centros dos dois círculos de raios  $R$  e  $r$ .  
Sistema M - toma como referência a linha média  $FF$ , das linhas  $DD$  e  $EE$ .

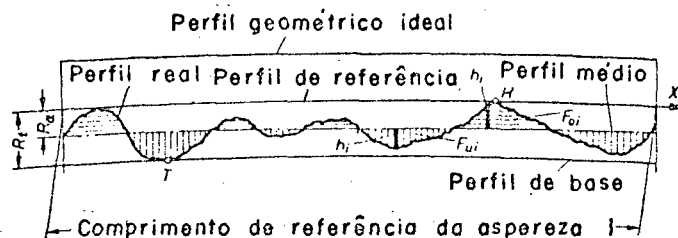


Fig. 3 - Posição do perfil de referência em relação ao perfil real. Perfil médio, perfil de base, profundidade máxima de aspereza e distâncias  $h_1$ , para determinar o valor do desvio médio aritmético  $R_a$ .

na figura 6). É comum se referenciar na nomenclatura do comprimento de contacto com profundidade  $C$ . Por exemplo:  $\lambda_t 0,25 = \dots$ , significa que o valor corresponde ao comprimento de contato a uma profundidade  $C = 0,25 \mu\text{m}$ ;

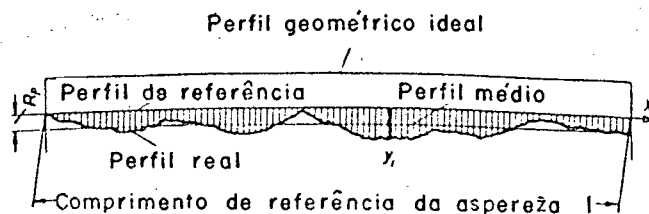


Fig. 4 - Perfil de referência, perfil real e perfil médio, bem como profundidade  $Y_i$ , para determinação da profundidade média  $R_p$ .

-  $t_p$  = fração de contato - valor percentual do comprimento de contato a uma profundidade  $\lambda_t$  em relação ao comprimento de referência  $l$ , dado por:

$$t_p = 100 \cdot \frac{\lambda_t}{l} \quad | \% | \quad (4)$$

Também aqui é comum referenciar-se à profundidade  $C$ . Por exemplo:  $t_p 0,25 = \dots$ . Seria, entretanto, válido ressaltar que esta norma é omissa em termos de padronização ou orientação dos valores de  $C$ . Cabe salientar que a nomenclatura dada aos parâmetros, está baseada no apêndice da NB 93 - 1964.

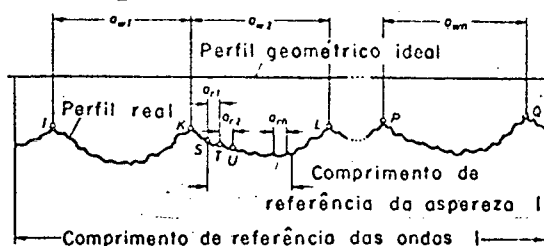


Fig. 5 - Distâncias  $a_{r1}, a_{r2}, \dots, a_{rn}$  de cada uma das cristas da aspereza para determinação de  $A_r$ , e distâncias  $a_{w1}, a_{w2}, \dots, a_{wn}$  de cada crista de onda para determinação da distância entre ondas  $A_w$ .

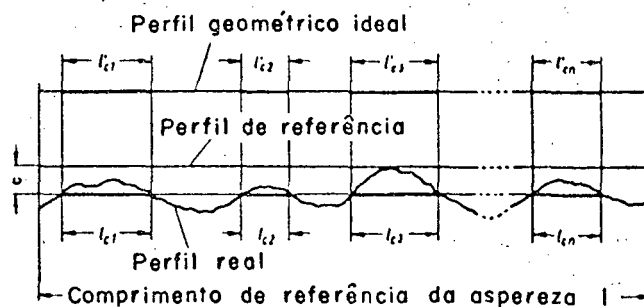


Fig. 6 - Trechos  $l_{c1}, l_{c2}, \dots, l_{cn}$  e  $l'_{c1}, l'_{c2}, \dots, l'_{cn}$ , para determinação do comprimento de conta a uma profundidade  $C$ .

$$R_z = \frac{1}{5} (z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5)$$

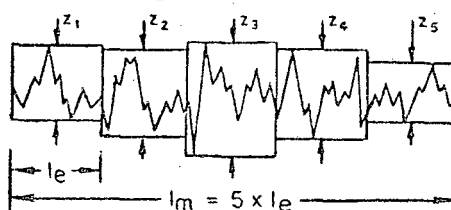


Fig. 7 - Determinação da média das profundidades máximas da aspereza ( $R_z$ ).

Outra norma que também padroniza parâmetros de rugosidade de superficial é a DIN 4768, publicada em 1970, que se baseia no sistema M. Na Figura 2, tem-se que AA e CC são geradas a partir do deslocamento dos círculos de raios  $R$  e  $r$  sobre o perfil efetivo. Deslocando estas linhas, paralelamente a elas mesmas e perpendiculares ao perfil geométrico, até tocarem no perfil efetivo, obtêm-se então as linhas BB e DD.

No sistema E, a rugosidade é definida como sendo o erro do perfil efetivo em relação à linha DD. O erro da linha DD em relação a linha BB é denominado ondulação. O erro da linha BB em relação ao perfil geométrico é chamado erro de forma.

Para o sistema M, a linha de referência é a linha média DD, em que a soma das áreas acima da linha média é igual a soma das áreas abaixo desta. A partir desta referência, pode-se calcular  $R_a$ ,  $R_s$  (RMS), e deslocando a linha envoltória até tangenciar

o ponto mais baixo do perfil - obtêm-se a linha EE, para determinação dos parâmetros  $R_t$  e  $R_z$ .

Resumindo, pode-se dizer: o sistema E tem como referência para determinação dos parâmetros a linha BB e DD, enquanto o sistema M tem como referência a linha FF (Figura 2).

A norma DIN 4768 - 1970, define uma nova variável, cujo símbolo é  $R_z$ , denominada como valor médio das profundidades máximas da aspereza, cujo valor é determinado pela equação (vide Figura 7):

$$R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \quad (5)$$

Como se verifica, pode-se ter, para uma determinada superfície, dois valores diferentes para o mesmo parâmetro. Por exemplo, o parâmetro  $R_a$ : um obedecendo a DIN 4762 e outro a DIN 4768.

Um outro parâmetro definido também, é o  $R_s$  (RMS - Root Mean Square Average), denominado desvio médio quadrático, definido pela raiz quadrada da média dos quadrados das distâncias absolutas  $h_i$  do perfil real ao perfil médio, num comprimento de referência  $l$ , e que é dado pela equação:

$$R_s(\text{RMS}) = \frac{1}{L} \int_0^L h_i^2 \cdot dx \quad (6)$$

Na bibliografia consultada<sup>4,27,28,29</sup> tal parâmetro é referenciado, mas em nenhuma oportunidade é frisado se é um valor normalizado pela norma DIN 4768. Não possuindo cópia ou exemplar da dita norma, é apresentado esse parâmetro, apenas como um valor característico de rugosidade, mas sua normalização merece confirmação.



### 3. - Norma ABNT NB 93 - 1964

Esta norma apresenta como avaliação de rugosidade o parâmetro  $R_a$  (CLA), denominado desvio médio aritmético definido pela equação (1), e adota o "sistema M", que tem por base a linha média, definido anteriormente. Recomenda ainda que os valores de  $R_a$  devem seguir a série de números normalizados  $R_{10}$  de 0,008 a 100  $\mu\text{m}$ .

No apêndice desta norma<sup>25</sup>, são apresentados "outros parâmetros que servem para caracterizar a rugosidade da superfície", tais como:

- desvio médio quadrático -  $R_q$  (RMS), que corresponde ao  $R_s$ , anteriormente descrito;
- altura das irregularidades dos 10 pontos -  $R_z$ , "diferença entre o valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais salientes e o valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais reentrantes, medidos a partir de uma linha paralela à linha média, não interceptando o perfil e no comprimento da amostragem", bem diferente do  $R_z$  - padronizado pela DIN 4768;
- altura máxima das irregularidades -  $R_{\text{max}}$ , que corresponde ao  $R_t$  - DIN 4762;
- profundidade média -  $R_p$ , corresponde ao  $R_p$  - DIN 4768;
- coeficiente de esvaziamento -  $K_e$ , relação entre a profundidade média e a altura máxima das irregularidades:

$$K_e = \frac{R_p}{R_{\text{max}}} \quad (7)$$

- coeficiente de enchimento -  $K_p$ , diferença entre a unidade e o coeficiente de esvaziamento:

$$K_p = 1 - K_e \quad (8)$$

- comprimento de contato a uma profundidade  $C$  -  $L_C$ , que corresponde a  $\lambda_{tC}$ ;

- Fração de contato -  $T_c$  , que corresponde ao  $t_p$  , só que na DIN 4762 este é apresentado sobre forma percentual.

#### 4. - Comentários sobre Pesquisa dos Parâmetros Característicos Normalizados.

Conforme foi apresentado no item 2 , existem duas normas DIN para padronização dos parâmetros característicos de rugosidade superficial: a DIN 4762, que adota o sistema E, e a DIN 4768, que adota o sistema M . Isto gera uma complicação aos próprios usuários, quanto a orientação que se deveria esperar de uma norma: ambas são usadas, e são conflitantes entre si, conforme já explanado.

Pesquisa realizada por W. DREYHAUPT <sup>4</sup> sobre a padronização de testes de rugosidade e normalização na Alemanha Ocidental, apresentou resultados bastante interessantes. Consistiu na aplicação de questionário em 72 indústrias que usam o controle de rugosidade em seus elementos de fabricação.

No anexo 1 , tem-se as 10 perguntas formuladas, bem como os resultados avaliados. Os comentários após o resultado de cada item são opiniões do autor do trabalho.

Como pode ser concluído, espera-se que novas normas sejam elaboradas com maior especificação do procedimento de análise para não dar margem a que pessoas inaptas e desconhecedoras do assunto realizem o teste aleatoriamente. Na ausência dessa norma, recomenda-se que as medidas dos parâmetros de rugosidade sejam acompanhadas do sistema base de referência, bem como as características do apalpador.

Um exemplo claro foi sentido por este autor, quando da visita à Volkswagen do Brasil S.A., ocasião em que se calibrou o rugosímetro pertencente ao Centro Tecnológico da UFSC: um modelo padrão de rugosidade fornecia dois valores correspondentes para o  $R_a$ : um dado pela fabricante ( $R_a = 1,42 \mu\text{m}$ ) e outro fornecido pela co-irmã da Alemanha ( $R_a = 1,37 \mu\text{m}$ ).

5. - Os parâmetros característicos de rugosidade superficial utilizado nos diversos países.

No anexo 2, está apresentado um quadro comparativo entre os parâmetros característicos, normalizados de rugosidades superficiais em diferentes países, obtido também do trabalho de W. DREYHAUPT<sup>4</sup> e acrescentado o da Norma Brasileira. A grandeza mais utilizada é o desvio médio aritmético -  $R_a$  (NB 93 - 1964<sup>25</sup>), que só não tem uso no Japão; corresponde a 95,0% dos países mencionados. Os outros mais usados, conforme nomenclatura DIN 4678 e 4672, são  $R_z$  e  $R_t$ , cada uma com 80,0% e 50,0%, respectivamente. Os demais, são utilizados para estudos mais específicos.

6. - Definição dos parâmetros de rugosidade que foram utilizados nos ensaios.

A necessidade do estudo que ora foi desenvolvido é o de estabelecer quais parâmetros que devem ser determinados, para que uma superfície esteja bem especificada. Como foi concluído, só o parâmetro  $R_a$  previsto pela ABNT NB 93 não satisfaz quanto a uma boa especificação da superfície.

Decidiu-se, então, determinar para cada superfície o valor dos parâmetros  $R_a$  e  $R_t$ , obedecendo a norma DIN 4762, já que são os parâmetros mais utilizados, e o parâmetro  $R_z$  não poderia ser obtido com o equipamento disponível.

## APÊNDICE 2

## Testes preliminares propriamente ditos

Como não se tinha ainda nada de concreto para realizar os testes definitivos, resolveu-se verificar:

- a) Influência do primeiro nível de carga (nos testes anteriores usou-se sempre o limite do primeiro carregamento de aproximadamente  $5 \text{ kgf/cm}^2$ ); realizou-se mais alguns testes, de n<sup>os</sup> 64 e 72, com os modelos AAA, de ferro fundido, retificado, cujas cargas do primeiro nível são de 25 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . As figuras 1 e 2, mostram estas curvas e mais as representativas dos testes de n<sup>os</sup> 51 e 55, que vão a níveis de 25 e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ , respectivamente, mas que tiveram seu primeiro limite de carga de  $5 \text{ kgf/cm}^2$ . Isto pareceu merecer um estudo mais detalhado.
- b) Outros testes, fixando como primeiro carregamento  $5 \text{ kgf/cm}^2$ ;
  - b.1) conjunto de testes n<sup>os</sup> 76, 77 e 78, usando modelo ABA, de ferro fundido, retificado, a níveis de carga correspondentes a 5, 15 e  $25 \text{ kgf/cm}^2$  (veja figura 3-a, b, c, d).
  - b.2) conjunto de testes n<sup>os</sup> 89, 90, 91, 93 e 94, com modelo AAA, de ferro fundido, retificado, a níveis de carga correspondentes a 5,0 ; 7,5 ; 10,0 ; 12,5 e  $15,0 \text{ kgf/cm}^2$  (veja figura 4-a, b, c, d, e, f).
  - b.3) conjunto de testes n<sup>os</sup> 96, 97, 98, 99 e 100, com modelo AAA, de ferro fundido, retificado a níveis de carga correspondentes a 5, 10, 15, 20 e  $25 \text{ kgf/cm}^2$  (veja figura 5-a, b, c, d, e, f).

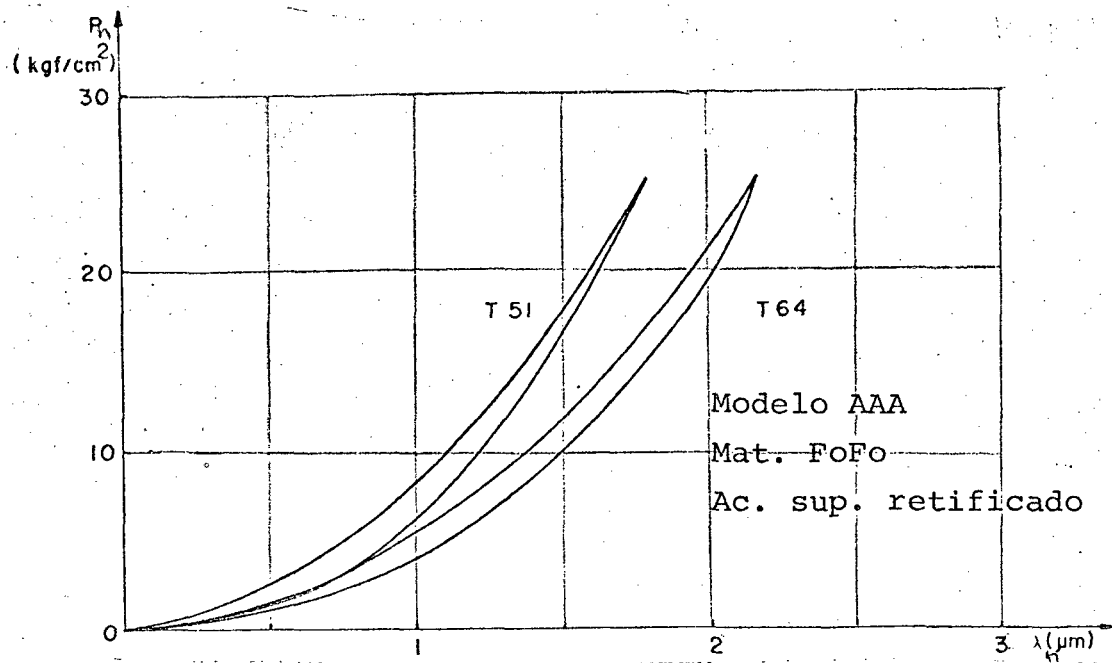


Fig. 1 - Influência do primeiro nível de carga: T51 - 1º nível = 5 kgf/cm<sup>2</sup>; T64 - 1º nível = 25 kgf/cm<sup>2</sup>

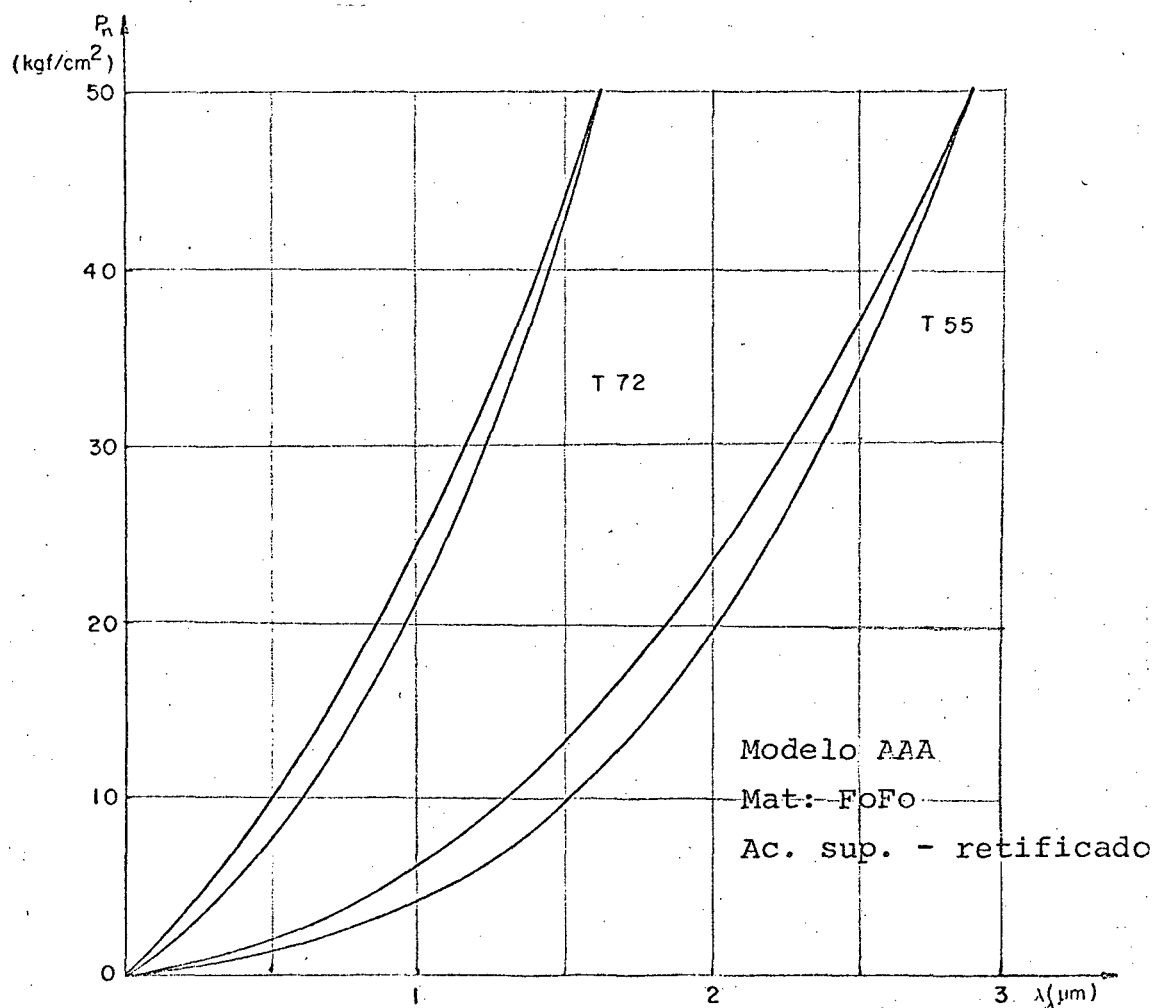
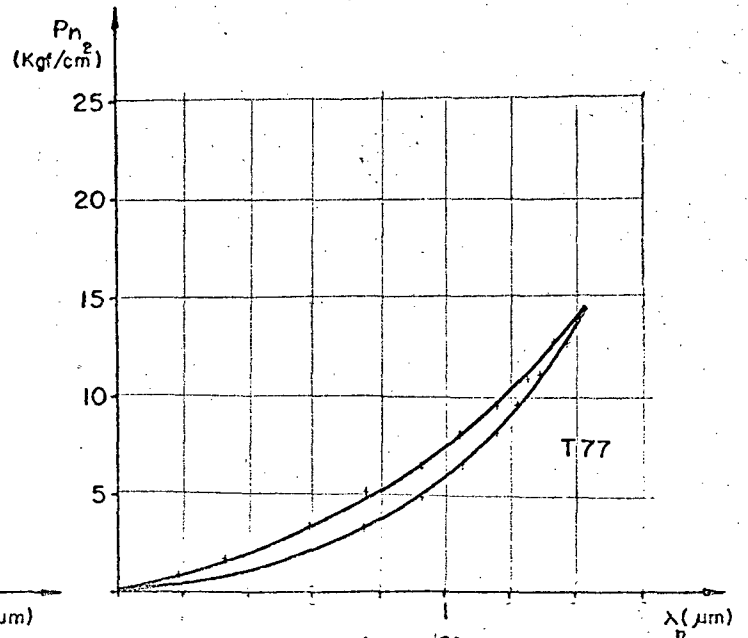
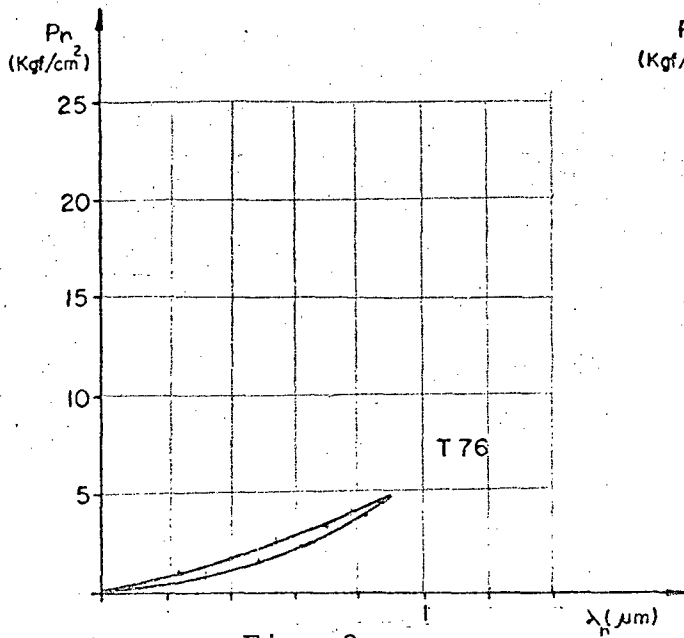


Fig. 2 - Influência do 1º nível de carga; T55 - 1º nível = 5 kgf/cm<sup>2</sup>; T72 - 1º nível = 50 kgf/cm<sup>2</sup>.



Modelo ABA  
 Material: ferro fundido  
 Ac. Sup.: retificado

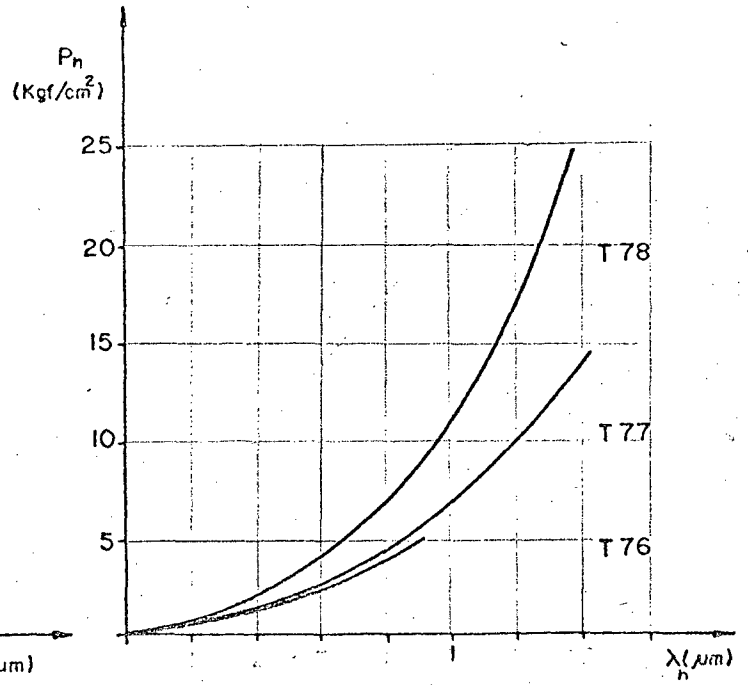
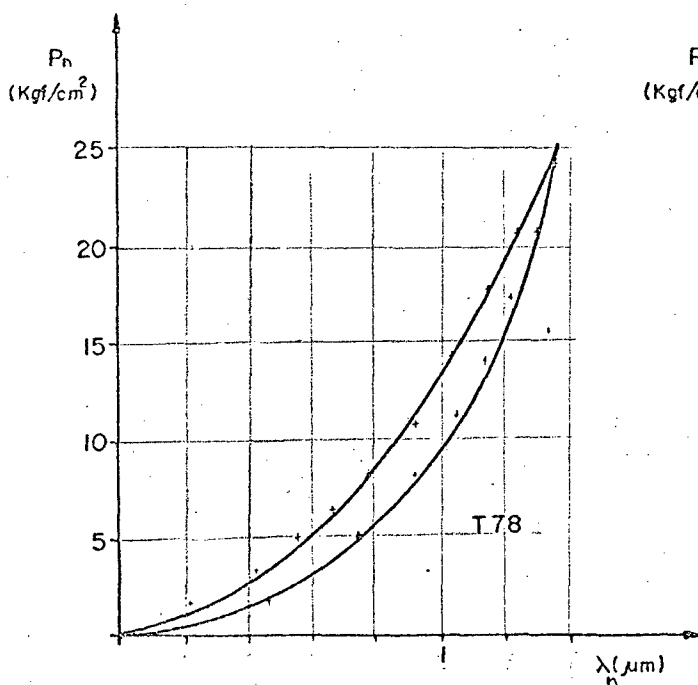


Fig. 3-a,b,c - curvas representativas do regime elástico das rugosidades a níveis de cargas de 5, 15 e 25 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente.  
 d - comparação das curvas anteriores, substituindo-as por uma representante média.

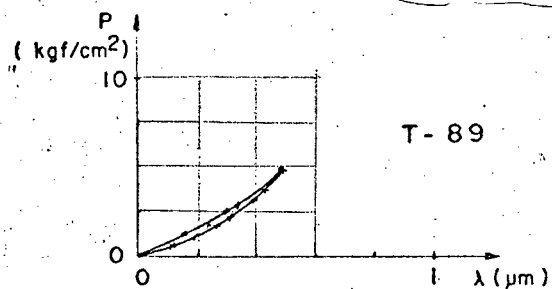


Fig. 4a

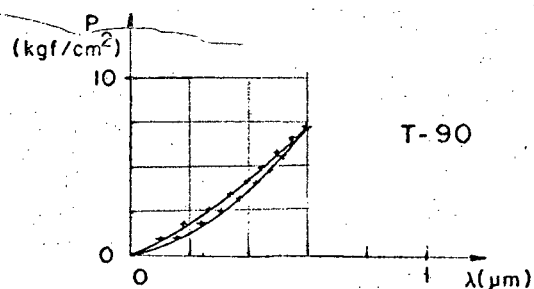


Fig. 4b

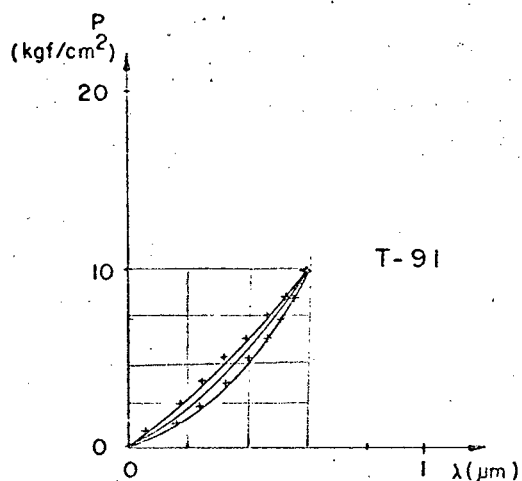


Fig. 4c

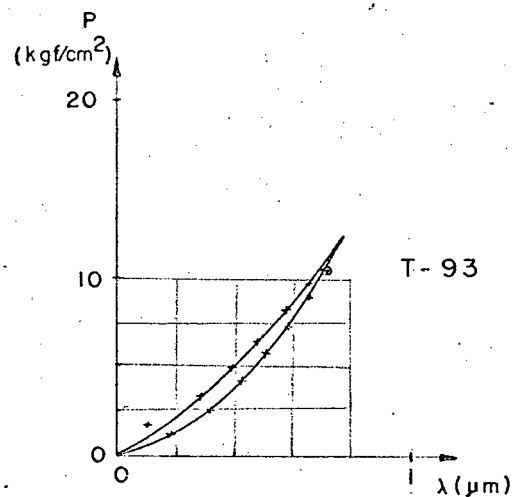


Fig. 4d

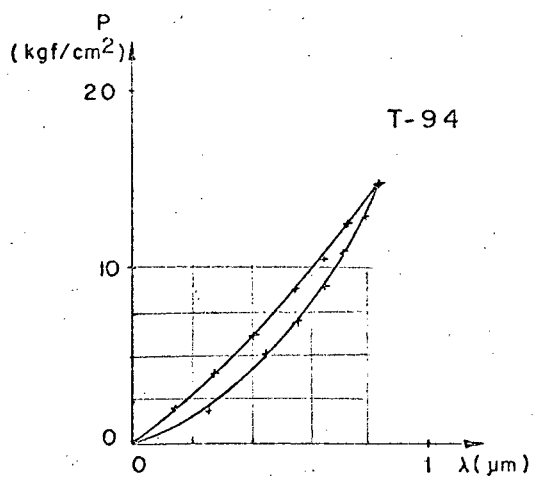


Fig. 4e

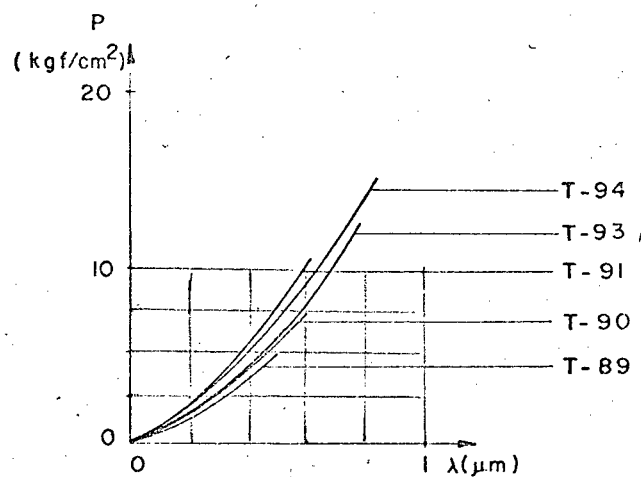


Fig. 4f

Fig. 4-a,b,c,d,e - curvas representativas do regime elástico das rugosidades a níveis de cargas de 5; 7,5; 10; 12,5 e 15 respectivamente.  
f - comparação das curvas anteriores substituindo-as por uma representante média.

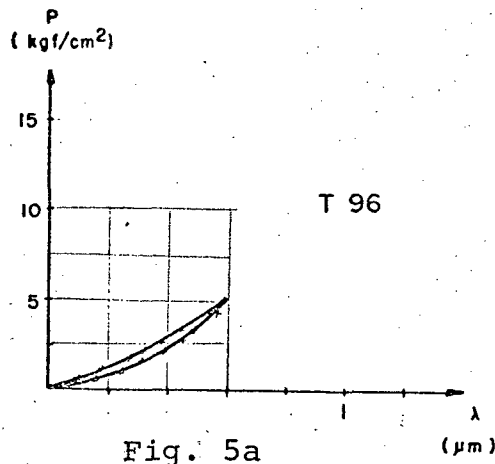


Fig. 5a

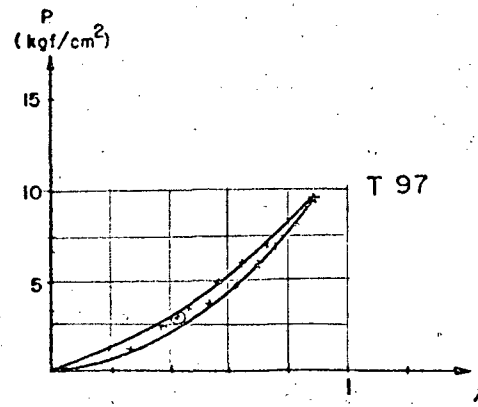


Fig. 5b

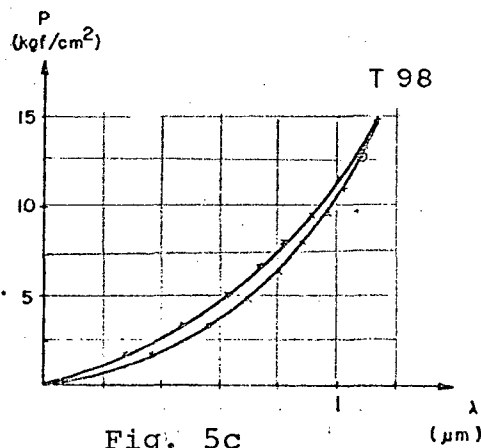


Fig. 5c

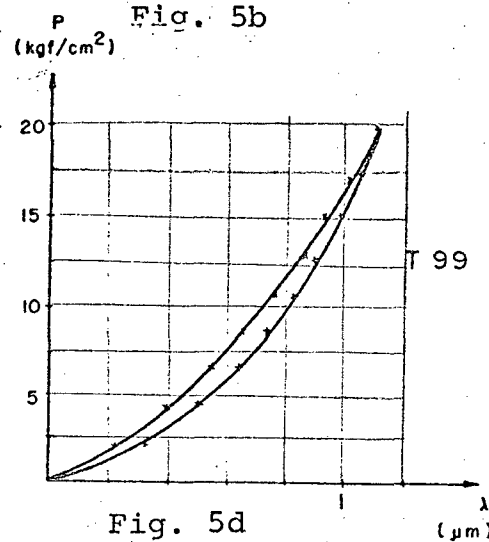


Fig. 5d

Modelo: AAA  
 Material: ferro fundido  
 Ac. Sup.: retificado

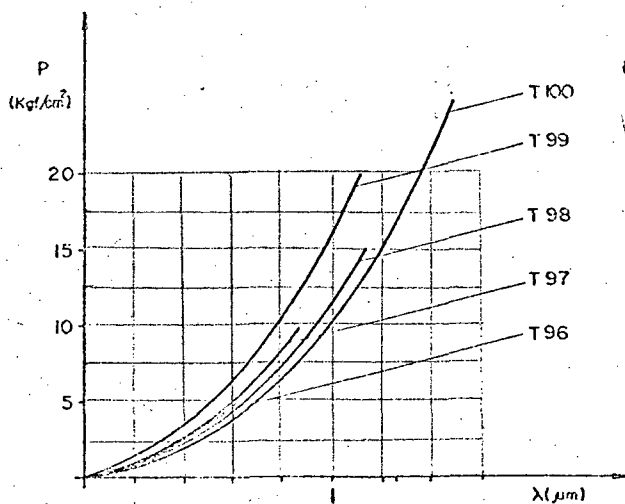


Fig. 5f

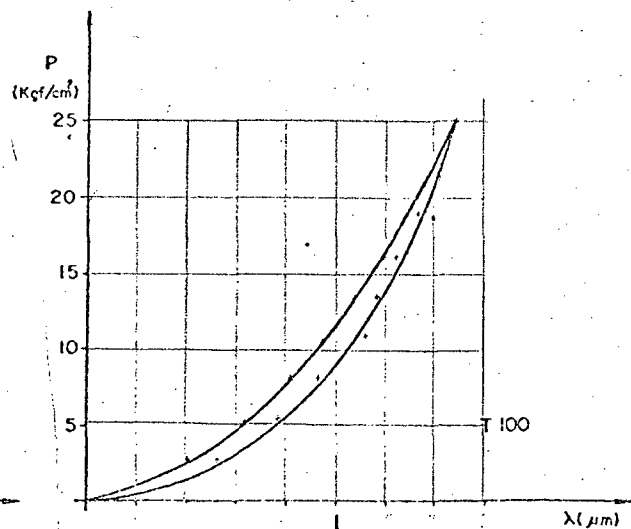


Fig. 5e

Fig. 5-a,b,c,d,e - curvas representativas do regime elástico da rugosidade a níveis de carga de 5, 10, 15, 20 e 25 respectivamente.

f - comparação das curvas anteriores, substituindo-as por uma representante média.



Calculou-se os parâmetros "C" e "M" a partir do método dos mínimos quadrados, através de programa de computador para três curvas: a de carregamento; a de descarregamento; e uma curva média que substituisse as duas anteriores citadas, caso não ocorresse histerese.

A tabela 1, abaixo, apresenta os parâmetros calculados para a verificação da influência do primeiro nível de carga.

TAB. 1 - Resultado dos parâmetros "C" e "M" calculados através do método dos mínimos quadrados.

TESTE Nº	1º NÍVEL CARGA	CARGA MAX.	CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAM.	
			C	M	C	M	C	M
62	25,0	23,9	0,33	0,49	0,35	0,48	0,51	0,35
63	25,0	23,8	0,33	0,50	0,35	0,48	0,46	0,39
64	25,0	24,0	0,35	0,47	0,37	0,46	0,49	0,35
50	5,0	24,0	0,47	0,44	0,50	0,43	0,58	0,38
51	5,0	23,8	0,41	0,49	0,48	0,43	0,56	0,39
52	5,0	25,0	0,47	0,44	0,49	0,43	0,64	0,34
72	50,0	47,5	0,10	0,60	0,11	0,58	0,18	0,45
54	5,0	47,7	0,51	0,39	0,54	0,38	0,74	0,30
55	5,0	47,7	0,45	0,44	0,57	0,38	0,71	0,32
56	5,0	48,1	0,43	0,44	0,51	0,39	0,62	0,34

Teve-se a intenção de mostrar não só os testes específicos ao qual foram referidos, mas outros testes executados imediatamente em seguida, para mostrar a repetibilidade. Determinando os valores médios para cada nível, tem-se a tabela 2, abaixo:

TAB. 2 - Resultados dos valores médios dos parâmetros "C" e "M", a partir da Tabela 6.2.

TESTE Nº	1º NÍVEL CARGA	CARGA MAX.	CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAM.	
			C	M	C	M	C	M
62,3,4	25,0	24,0	0,34	0,49	0,36	0,47	0,49	0,36
50,1,2	5,0	24,0	0,41	0,46	0,49	0,43	0,59	0,37
72	50,0	47,5	0,10	0,60	0,11	0,58	0,18	0,45
54,5,6	5,0	48,0	0,46	0,42	0,54	0,38	0,69	0,32

A tabela 2 abaixo, apresenta os parâmetros "C" e "M" para os diversos conjuntos apresentados na tabela 2.

TAB. 3 - Resultados dos parâmetros "C" e "M" calculados pelo método dos mínimos quadrados.

TESTE Nº	1º NÍVEL CARGA	CARGA MAX.	CARREGAMENTO		MÉDIA		DESCARREGAM.	
			C	M	C	M	C	M
76	5,0	4,9	0,30	0,63	0,32	0,64	0,39	0,50
77	5,0	14,3	0,25	0,64	0,27	0,61	0,48	0,37
78	5,0	25,4	0,18	0,61	0,25	0,49	0,40	0,34
89	5,0	5,0	0,13	0,81	0,15	0,73	0,17	0,66
90	5,0	7,5	0,10	0,87	0,13	0,73	0,16	0,60
91	5,0	10,0	0,07	0,88	0,07	0,87	0,14	0,59
93	5,0	12,5	0,13	0,62	0,14	0,62	0,20	0,47
94	5,0	15,2	0,07	0,88	0,13	0,63	0,19	0,48
96	5,0	4,9	0,17	0,79	0,20	0,70	0,23	0,59
97	5,0	9,6	0,18	0,68	0,21	0,60	0,25	0,52
98	5,0	15,0	0,21	0,59	0,26	0,52	0,31	0,45
99	5,0	19,8	0,14	0,65	0,17	0,57	0,22	0,48
100	5,0	25,0	0,24	0,52	0,29	0,46	0,36	0,40

A partir destes resultados, passou-se às primeiras conclusões: estranhou-se o comportamento dos parâmetros, pois como pode ser notado através das figuras 5 (a, b, c, d, e, f), onde estão representados os testes 96, 97, 98, 99 e 100, a ordem crescente da rigidez é para as curvas representativas para os seguintes níveis de carga: 25, 15, 5, 10 e 20 kgf/cm<sup>2</sup>, quando era de se esperar, obter-se curvas de maior rigidez para níveis de maiores cargas. Entretanto, esta ordem lógica aconteceu para os testes 76, 77 e 78 (vide figura 3 - a, b, c, d) e novamente não aconteceu para os testes 89, 90, 91, 93 e 94, conforme pode ser verificado através da figura 4 (a, b, c, d, e, f), onde a ordem crescente de rigidez correspondeu aos níveis de cargas máximas de : 5,0 ; 7,5 ; 10,0 ; 15,0 e 10,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Concluindo: não se conseguiu com estes testes determinar uma lógica ou uma tendência do comportamento das curvas características do ensaio.

Isto levou a duvidar do equipamento de medição e fez-se nova calibração. Até este instante utilizava-se para medição de força, o dinamômetro de anel WAZAU, com uso de extensômetros, e para medição dos deslocamentos os apalpadores com as duas possibilidades de leitura. Refez-se, então, alguns testes com os blocos padrão e obteve-se resultados semelhantes aos apresentados pela tabela 5.1 .

Restou, então, verificar a medição da força. Como a ponte extensométrica digital apresentou defeito em seu funcionamento, teve-se que recorrer aos demais meios previstos. Com a troca do amplificador, para uso da arruela piezoelétrica, conseguiu-se, além do sinal firme, obter curva de calibração próxima às obtidas por outros pesquisadores que na época utilizavam equipamentos semelhantes. Antes era utilizado o "Charger Amplifier" e passou-se a utilizar o "Dual Amplifier", que se acham especificados no item 5.5 .

Para se ter maior segurança no uso deste equipamento, determinou-se a curva de calibração através do "Calibrador", quando obteve-se a equação (5.2). Outra comparação foi executada com a montagem da medição de força com o dinamômetro WAZAU com uso do

relógio comparador, e também com leitura simultânea do sinal da arruela piezoelétrica, através de pesos conhecidos (pesos padrão), utilizando novamente a balança dinamométrica mecânica e verificou se plenamente a validade da equação (5.2).

## A N E X O 1

QUESTIONÁRIO APLICADO A 72 FIRMAS DA ALEMANHA OCIDENTAL, QUE UTILIZAM CONTROLE DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM SEUS ELEMENTOS DE MÁQUINAS.

POR: W. DREYHAUPT, AYSTETTEN (4)

Perguntas:

01. O controle de rugosidade é uma operação comum em sua indústria ?
02. Usa-se aparelhos específicos ou corpos de comparação para este controle ?
03. Quais os parâmetros mais frequentemente (70%) utilizados:  $R_t$ ,  $R_a$  ou  $R_z$  ?
04. Obtém-se também o diagrama, através do registrador, durante as medidas ?
05. Os valores dos parâmetros da rugosidade são obtidos do diagrama ou através de aparelho de leitura ?
06. Usa-se filtros na obtenção do diagrama ?
07. A escolha do filtro é por conta do operador ou segue alguma norma ?
08. Quantos conjuntos de apalpadores estão à disposição: 1, 2 ou mais de 2 ?
09. A escolha do conjunto de apalpador é deixada por conta do operador ou se segue alguma norma ?
10. Existe algum apalpador de superfície de referência à disposição ?

Respostas:

01. 96,0% das indústrias consultadas usam o controle de rugosidade.

02. 98,5% das indústrias consultadas usam ensaios com rugosímetros.

36,0% usam também corpos de comparação.

1,5% usam só corpos de comparação.

03. Muitas das empresas não usam a determinação de uma grandeza com predominância de 70% . Em consequência disso a soma dos percentuais das respostas é maior do que 100%, mas o resultado esclarece o que é mais usado:

$R_a = 41\%$

$R_t = 79\%$

$R_z = 14\%$

Em geral, as firmas que medem  $R_a$  estão ligadas com o estrangeiro, por transações comerciais ou dependência social ou de capital.

04 e 05. 40% das indústrias consultadas, das que medem  $R_t$  ou  $R_z$ , o determinam do diagrama;

33% usam o aparelho de leitura;

27% usam ambas as soluções.

Mesmo o DNA (Apêndice das Normas Alemãs), em contraposição com a ISO, não permite o uso de determinação de valores através de gráficos; na prática isto não ocorre.

06. 51% das indústrias consultadas trabalham sempre com filtro;

15% usam parcialmente o filtro (com ou sem);

34% não usam filtros.

Isto mostra bem a confusão desta área de controle de rugosidade. Um diagrama é plotado para determinação de um perfil real da superfície. Em consequência disto, não se pode concluir a fidelidade dos diagramas. Inclusive pode ocorrer o caso de se ter dois diagramas semelhantes que pertençam a

duas superfícies bem distintas que seriam consideradas parecidas, obedecendo a esse critério. Por isto, podemos aceitar que alguns rugosímetros não possuam filtros.

07. 36% das indústrias consultadas, das que usam filtros, deixam a escolha por conta do operador;  
20% orienta-se pelo fabricante do equipamento;  
18% elaborou normas próprias;  
26% adota a norma DIN 4768, mesmo estando eles ensaiando  $R_t$ .  
Também aqui se nota a complicação do uso de normas, pois o uso de vários filtros fornece variações ainda maiores dos resultados.

08. 29% das indústrias consultadas possuem um conjunto de apalpador;  
12% possuem dois;  
59% possuem mais do que dois.

Pode-se concluir que a maioria das indústrias poderia solucionar o problema de medição de natureza diferente.

09. 68% das indústrias consultadas, deixa a escolha do conjunto de apalpador por conta do operador;  
32% desenvolveram normas específicas.

Deve-se supor que apenas o menor número de operadores está ciente de que os diversos apalpadores ocasionam uma falsificação da superfície que, por sua vez, não pode ser considerada, como a ação de filtragem, e que pode produzir resultados bastante diferentes. A maioria dos operadores escolhe apalpadores de acordo com a forma geométrica do corpo de prova. Em consequência disso, não se deve admirar que lugares diferentes (fornecedor e comprador) determinem valores de medidas diferentes. Não se deve concluir disto que as grandezas medidas não servem para nada, mas sim, nota-se uma falta de normalização.

10. 58% das indústrias consultadas, possui um apalpador da superfície de referência. É usado para os casos dúbios.

Com isso, nota-se que já foi reconhecido que apenas com um apalpador de superfície de referência, podem ser evitados erros de medidas. Infelizmente, esse sistema não é utilizado na prática. Em consequência, deve-se tentar normalizar um sistema que reproduza o ensaio, da forma mais fiel e que possa ser efetuado no menor tempo possível.



## ANEXO 2

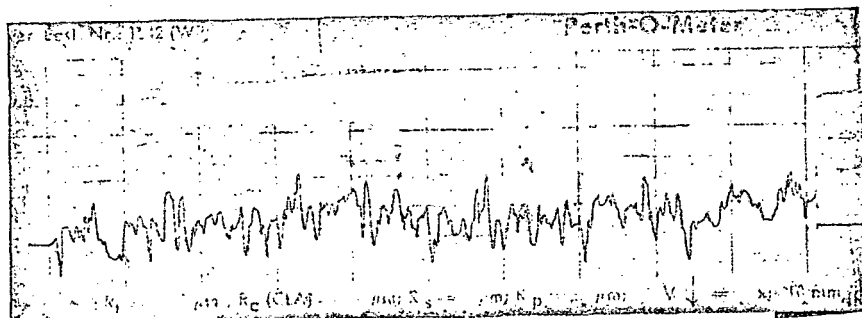
Quadro comparativo entre parâmetros específicos normalizados de superfície em diferentes países.

Países e suas diversas normas. Nome dos parâmetros normalizados característicos de rugosidade superficial.	FRANÇA E 05-015 (1969)	Alemanha Oriental TGL 0-4762 (1963)	Alemanha Ocidental DIN 4762 (1960) DIN 4768/1 (1970)	Argentina IRAM 5065 (1964)	Áustria ONORM M 1115 (1956)	Dinamarca DS 940 (1963)	Espanha UNE 1037 (1951)	U.S.A. ASA B46.1 (1962)	Hungria MSZ 4721 (1958)	Itália UNI 3963	Japão JIS B 0601 (1955)	Países Baixos NEN 630 (1967)	Polônia PN58/N - 04250	Polônia STAS 5730-66	Grã-Bretanha BS 1134 (1961)	Suécia SMS 671 (1964)	Suíça VSM 58300 (1960)	Tchecoslováquia CSN 01 4450 (1960)	Rússia BOST 2789-59	Brasil ND-93 (1964)	
Profundidade do perfil	Pt				W+Rt										H3						
Profundidade de onda	Wt																				
Profundidade máxima da aspereza	Rt	Rt	Rt		Rt	Rmax			Rmax				Rmax	Rmax		Rmax			Rmax		
Profundidade média de onda	W		W		W						W				H2						
Média das profundidades máximas da aspereza	R	Rz	Rz	hpl		RR Rz	H		Rz	R	Hmax		Rz	Rz	H1	H		Ru Rs	Rz	Rz	
Profundidade máxima de onda	Wmax																				
Profundidade máxima da rugosidade	Rmax		Rmax															Rmax			
Afastamento médio da crista da onda	Aw		Aw		Aw																
Afastamento médio da ranhura da crista	AR	Ar	AR															Av As			
Fração de contato do perfil	(Tp)c (Tw)c (TR)c		tp		tap				tp							K13		te			
Profundidade ajustada do perfil	Pp																				
Profundidade ajustada de onda	Wp																				
Profundidade média	Rp	Rp	Rp			Ru			Rt	Re						G	Rp				
Média aritmética da profundidade de perfil	Pa																				
Média aritmética da profundidade de onda	Wa																				
Desvio médio aritmético da aspereza	Ra	Ra	Ra	hm	Ra	Ra	hm	AA	Ra	Ra		Ra	Ra	Ra	CLA	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
Complemento da parte de sustentação	Kp					Kt			Kp	Kv						1-k	Kp Kps				

## ANEXO 3

ANÁLISE DE RUGOSIDADE  
 MODELO ANA Material: Fofo Ac. Sup retificado  
 Temp: 20°C Umidade 77% DATA 09/07/75  
 Hora 13:30 - Operador Osvaldo

Ra ( $\mu\text{m}$ )			Rt ( $\mu\text{m}$ )		
P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	VM	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	VM
1,66	1,39		15,9	11,2	
1,40	1,37		14,9	12,0	
1,41	1,32		13,8	13,8	
1,88	1,50		13,0	12,2	
1,10	1,28		11,7	11,4	
1,39	1,51		10,0	13,3	
1,20	1,20		12,1	11,5	
1,50	1,40		12,7	13,1	
1,40	1,40		12,9	12,8	
1,38	1,40		11,5	16,8	
1,38			12,83		



## A N E X O 4

## RELATÓRIO DO CARREGAMENTO ANTERIOR

AO TESTE Nº 109

ZERAGEM				CARREGAMENTO				DESCARREGAMENTO			
CARGA	AP1	AP3	AP5	CARGA	AP1	AP3	AP5	CARGA	AP1	AP3	AP5
—	—	—	—	299	9,3	11,0	16,5	—	4,0	5,2	8,3
—	—	—	—	309	5,7	5,8	5,7	—	0,4	—	0,6
—	—	—	—	309	5,5	5,9	8,0	—	0,3	—	0,3
—				318				—			
—				308				—			
—				313				—			
—				309				—			
—				306				—			
—				313				—			
—	—	—	—	315	5,2	5,4	7,8	—	—	—	—
—	—	—	—	321	5,2	5,5	7,8	—	—	—	—



## ANEXO 6

Relatório de Teste de obtenção dos Parâmetros  
de rigidez normal

CENTRO TECNOLÓGICO - UFSC

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RIGIDEZ NORMAL

TESTE N. - 109

MATERIAL - FERRO FUNDIDO  
MODELO - ANA  
ACAB SUP - RETIFICADO

PRE CARGA - 5.0KGF/CM\*\*2

DIA - 23/ 10/ 75      TEMP - 25.5 C  
HORA - 14.10 H      UMIDADE - 68.0

RA(CLA) = 1.41UM      RT = 12.83UM

## DADOS DA PLANILHA

DINAM ANEL LEIT	AP LEITURA TESA		
	AP1	AP2	AP3
56.	1.7	2.1	3.4
106.	2.9	3.1	5.1
154.	3.7	3.8	6.3
204.	4.5	4.5	7.0
254.	5.0	5.0	7.7
308.	5.5	5.6	8.3
258.	5.0	5.2	7.8
207.	4.5	4.7	7.3
155.	3.9	4.1	6.5
107.	3.2	3.5	5.3
55.	2.3	2.4	3.0

SOLUCAO DEF = C\*P\*\*M

## PARAMETROS CALCULADOS

CARREGAMENTO		MEDIA		DESCARREGAMENTO	
C	M	C	M	C	M
0.513	0.585	0.538	0.546	0.564	0.516

P(I)	DRUG(I)	DCAR(I)	DMED(I)	DESC(I)	ERPER(I)
0.9307	0.4798	0.4920	0.5179	0.0000	-2.5285
1.7617	0.7359	0.7148	0.7351	0.0000	2.8757
2.5594	0.9106	0.8894	0.9023	0.0000	2.3272
3.3904	1.0598	1.0486	1.0528	0.0000	0.2153
4.2214	1.1570	1.1921	1.1874	0.0000	-3.0364
5.1189	1.2624	0.0000	1.3199	1.3120	-3.9305
4.2879	1.1767	0.0000	1.1976	1.1973	-1.7496
3.4403	1.0843	0.0000	1.0613	1.0685	1.4618
2.5760	0.9581	0.0000	0.9055	0.9201	3.9626
1.7783	0.7970	0.0000	0.7388	0.7598	4.6686
0.9141	0.5140	0.0000	0.5128	0.5387	-4.8197

## A N E X O 7

Relatório do conjunto de testes da obtenção dos parâmetros de rigidez normal.

## RESULTADO DOS PARAMETROS CALCULADOS

MATERIAL FERRO FUNDIDO

MODELO - ANA

ACAB SUP. - RETIFICADO

PRE CARGA - 5.0KGF/CM\*\*2

RA(CLA) = 1.41UM RT = 12.83UM

TESTE	CARGA MAX.	CARREGAMENTO		MEDIA		DESCARREGAMENTO	
		C	M	C	M	C	M
109	5.	0.513	0.585	0.538	0.548	0.564	0.516
110	10.	0.538	0.480	0.573	0.451	0.610	0.423
111	15.	0.563	0.433	0.608	0.403	0.656	0.373
112	20.	0.571	0.408	0.611	0.386	0.653	0.364
113	25.	0.562	0.399	0.597	0.379	0.631	0.360
114	30.	0.590	0.386	0.649	0.357	0.711	0.328
115	40.	0.582	0.370	0.629	0.347	0.677	0.327
116	50.	0.668	0.320	0.683	0.316	0.874	0.249

CARREGAMENTO C = 0.5072 + 0.0027\*P(I)  
M = 0.5382 + -0.0047\*P(I)

C(25) = 0.5755 M(25) = 0.4200

MEDIA C = 0.5466 + 0.0026\*P(I)  
M = 0.5009 + -0.0041\*P(I)

C(25) = 0.6131 M(25) = 0.3961

DESCARREGAMENTO C = 0.5421 + 0.0053\*P(I)  
M = 0.4825 + -0.0046\*P(I)

C(25) = 0.6759 M(25) = 0.3650

Planilha de dados para obtenção dos parâmetros característicos de rigidez tangencial.

Teste n° T41 Modelo ARB Mat: Fofo  
 Ac. Sup. retificado Temp: 20°C Umid 81,0  
 Hora : 9:55h Dia 30/08 obs —

CARGA		DEFORMAÇÃO			
Arr. Piezo.		AP2		AP4	
—		—		—	
15		0,6		3,10	
28		1,85		6,10	
42		3,60		10,20	
32		3,50		8,80	
9		3,20		4,50	
—		3,10		2,85	

