

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO E ESCOLHA DE UMA SUPERFÍCIE  
SEGUNDO SUA FUNÇÃO E FABRICAÇÃO

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA

FLONIANÓPOLIS, ABRIL DE 1992

AVALIAÇÃO E ESCOLHA DE UMA SUPERFÍCIE TÉCNICA  
SEGUNDO SUA FUNÇÃO E FABRICAÇÃO

NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA

ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

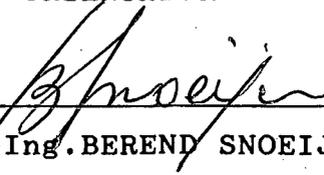
DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA  
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr-Ing. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER

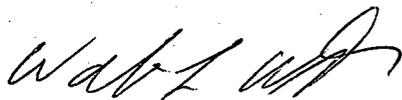
ORIENTADOR



Prof. Dr-Ing. BEREND SNOEIJER

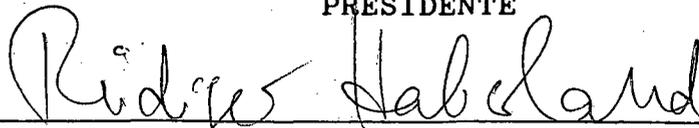
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:



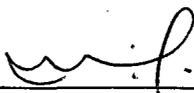
Prof. Dr-Ing. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, UFSC

PRESIDENTE



Prof. Dr-Ing. RÜDIGER HABERLAND

UNIVERSIDADE DE KAISERSLAUTERN, RFA



Prof. BENEDITO DE MORAES PURQUÉRIO, Phd  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, USP



Prof. Dr-Eng. LOURIVAL BOEHS, UFSC



Prof. Dr-Eng. ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JR., UFSC

Em memória à minha avó  
NOEMIA FISCHER GOMES DE MATTOS

## Agradecimentos

Aos Professores Ph.D. Arno Blass, Dr.Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.Eng.Mec. Lourival Boehs e Dr.Ing. Berend Snoeijer agradeço pela seriedade, competência e justiça com que julgaram o meu pedido de admissão no Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da UFSC.

Ao Prof.Dr.Ing. Walter Lindolfo Weingaertner agradeço ainda pela minuciosa leitura deste trabalho, pelas sugestões e críticas construtivas feitas ao mesmo. Aos professores participantes da banca do exame de qualificação Dr.Eng.Mec. Lourival Boehs, Ph.D. Nelson Back e Dr.Eng.Mec. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. também agradeço pelas críticas e sugestões.

Ao Prof.Dr.Ing. Rüdiger Haberland pelo reconhecimento deste trabalho, pelas críticas construtivas e pelo esforço em tentar que eu concluísse o mesmo.

As amigas alemãs Wilthrud Oster e Christiane Stefani agradeço não só pelo incansável apoio com a língua alemã, mas também pelo acolhimento da minha pessoa no âmbito de suas famílias onde eu encontrei o calor da minha terra distante.

Ao meu pai pelo dedicado trabalho de procurador. Aos amigos Elizena Stein, Nelson e Cláudia Mattos agradeço pelo constante apoio e incentivo à conclusão deste trabalho.

A Sra. Helga Wahre agradeço o apoio prestado durante a minha permanência na Alemanha. Ao Prof. Antônio Carlos Maranhão de Aguiar, chefe do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pela oportunidade de concluir este trabalho. Ao DAAD e a UFPE agradeço o apoio financeiro.

## Biografia

- 27.02.54 Noemia Gomes de Mattos de Mesquita nasceu no Recife, Pernambuco, Brasil. Filha de Raimundo Fonsêca de Mesquita e Maria Rita Gomes de Mattos de Mesquita.
- 1961-1964 Curso primário no Instituto Santa Izabel, em Olinda.
- 1965-1969 Ginásio no Ginásio Imaculado Coração de Maria, em Olinda.
- 1970-1972 Científico no Colégio de São Bento, em Olinda.
- Jan. 1973 Aprovação no vestibular para Engenharia Mecânica da UFPE, no Recife.
- 1973-1977 Curso de graduação em Engenharia Mecânica na UFPE, em Recife.
- desde 1978 Professora do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, em Recife.
- 1978-1980 Mestrado em Engenharia Mecânica na UFSC, em Florianópolis.
- 1985-1990 Bolsista do DAAD na Universidade de Kaiserslautern, em Kaiserslautern, na República Federal da Alemanha.
- Dez.1990 Admissão no Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da UFSC.

## Resumo

Este trabalho apresenta uma nova abordagem das superfícies técnicas, através de seis fatores de avaliação. Com estes fatores de avaliação é descrita uma superfície técnica ideal, que atende às exigências de funcionamento de uma superfície que desliza e é lubrificada (SDL); por exemplo, uma guia.

As influências do complexo de fabricação sobre os fatores de avaliação são qualitativamente verificadas para o torneamento e retificação; exemplificando-se assim, como é possível, através dos fatores de avaliação, uma aproximação entre a superfície ideal e a superfície real.

Os diversos parâmetros de qualificação de uma superfície técnica, como, por exemplo, o desvio médio aritmético de rugosidade  $R_a$  ou a profundidade média de rugosidade  $R_z$ , são classificados e comparados, segundo o tipo de informação que podem conter, bem como ordenados de acordo com os fatores de avaliação.

Os parâmetros das superfícies técnicas são medidos em corpos de prova torneados, fresados, aplainados, limados, retificados e lapidado. Com o resultado das medidas é possível se escolher o melhor parâmetro para cada um dos fatores de avaliação. Um novo parâmetro surge, para a avaliação qualitativa dos "plateaux" das superfícies.

Uma sistematização para a avaliação e escolha de uma superfície, segundo sua função e fabricação, é possível através dos fatores de avaliação.

## Abstract

This work presents a new approach to technical surfaces by means of six evaluation factors. With these evaluation factors an ideal surface is described, which fulfills the functioning requirements of a lubricated, sliding surface (SDL); for instance a machine way.

The influences of the manufacturing facilities on the evaluation factors are qualitatively verified for turning and grinding; thus, exemplifying, through the evaluation factors, that an approximation between the ideal surface and the actual surface is possible.

The various qualification parameters of a technical surface, for instance, the arithmetic average roughness  $R_a$  or the value of the maximum height of the profile  $R_z$ , are classified and compared, according to the type of information they may contain and ordered according to the evaluation factors.

The parameters of technical surfaces are measured in turned, milled, shaped, filed, ground and lapped specimens. With the result of the measurements, it is possible to choose the best parameter for each evaluation factor. A new parameter comes out for the qualitative evaluation of the "plateaux" surfaces.

A systematization for the evaluation and selection of a surface, according to its function and manufacturing is, possible through the evaluation factors.

## Sumário

	Pág
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA TÉCNICA.....	3
2.1 Exigências ao Preenchimento da Função da Superfície Técnica.....	3
2.2 Problemas de Projeto, de Fabricação e de Medição.....	9
2.2.1 Fixação da Superfície Ideal.....	10
2.2.2 Fabricação da Superfície Real.....	11
2.2.3 Controle da Superfície Real.....	12
2.2.4 Tribologia.....	15
3. ETAPAS PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
4. AVALIAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE COM BASE NAS EXIGÊNCIAS AO PREENCHIMENTO DA SUA FUNÇÃO.....	19
4.1 Exemplo de uma Superfície Lubrificada de Deslizamento...	19
4.2 Propriedades Exigidas.....	21
4.2.1 Precisão de Forma.....	21
4.2.2 Resistência ao Desgaste.....	21
4.2.3 Capacidade de Deslizar.....	26
4.2.4 Amortecimento do Desgaste Inicial.....	28
4.2.5 Capacidade de Suportar Carga.....	29
4.2.6 Capacidade de Reter o Lubrificante.....	31
4.2.7 Dissipação de Calor e Temperatura de Contacto.....	33
4.3 Exigências Microgeométricas e Fatores de Avaliação.....	35
4.3.1 Desvio Geométrico.....	37
4.3.2 Tipo de Perfil.....	38
4.3.3 Dependência da Direção.....	39
4.3.4 Ângulos.....	41
4.3.5 Reentrâncias.....	41
4.3.6 Elevações.....	42
5. AVERIGUAÇÃO DO COMPLEXO DE INFLUÊNCIAS DA USINAGEM SOBRE UMA SUPERFÍCIE TÉCNICA.....	45
5.1 Peça.....	49
5.2 Ferramenta.....	50
5.3 Cinemática.....	55
5.3.1 Velocidade de Corte.....	55
5.3.2 Avanço.....	56
5.3.3 Profundidade de Corte.....	57

5.4	Máquina Ferramenta.....	58
6.	DEDUÇÃO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SUPERFÍCIES TÉCNICAS.....	63
6.1	Informações dos Parâmetros da Superfície Técnica.....	64
6.2	Comparação dos Parâmetros para os Fatores de Avaliação..	68
6.2.1	Desvios do Perfil, Distribuição das Amplitudes e a Função Beta.....	72
6.2.2	Parâmetros para Observação da Periodicidade de uma Superfície.....	75
6.2.3	Desvios do Perfil, Curva de Abbott e um Novo Parâmetro para a Apreciação Quantitativa das Superfícies Platafórmicas.....	77
6.3	O Teste de Kolmogorov-Smirnov e o Tamanho da Amostra para a Medição de Superfícies.....	78
7.	CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARA APRECIAÇÃO DE SUPERFÍCIES TÉCNICAS.....	82
7.1	Realização dos Experimentos.....	82
7.2	Avaliação das Medições dos Experimentos.....	84
7.3	Parâmetros para os Fatores de Avaliação que Descrevem a Microgeometria de uma Superfície.....	102
8.	SISTEMÁTICA DA ESCOLHA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	105
8.1	Fluxograma da Sistematização.....	105
8.2	Exemplo de uma Escolha.....	109
9.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	115
10.	BIBLIOGRAFIA.....	118
	Anexos.....	129

## 1. INTRODUÇÃO

A descrição de uma superfície técnica é extremamente complexa. Pesquisadores continuam tentando descrevê-las cada vez mais precisamente. Só a completa descrição das superfícies técnicas permitirá prever se as exigências feitas a elas estão preenchidas de modo que elas venham a exercer bem sua função e as peças desempenhar melhor sua finalidade.

A escolha do processo de fabricação para a usinagem de uma peça cuja superfície tem uma função a preencher, era feita experimentalmente, sem que para tal se dispusessem de dados técnicos, figura 1. Este antigo caminho para o preenchimento desta função era subjetivo, não sistemático, não reprodutivo, não explicável e não programável. As causas e os fundamentos deste preenchimento eram em geral desconhecidas.

Devido aos resultados positivos deste método experimental existem hoje conhecimento e experiência e é impressindível o desenvolvimento de um método para a descrição das superfícies técnicas. O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para avaliar e escolher superfícies técnicas segundo sua função e fabricação.

Para desenvolver este método é necessário esclarecer a interligação entre função, exigência ao preenchimento da função e características de fabricação da superfície técnica. Isto só é possível através de uma completa descrição da superfície. Com este novo método o caminho para o preenchimento da função se tornará objetivo, sistemático, reprodutível, explicável e programável.

As funções de uma superfície técnica estão definidas na norma DIN 4764 e pelos autores Halbig e Noppen /1,2,3/. Para um bom preenchimento da função é necessário se conhecer as exigências a esta superfície técnica para se determinar uma superfície ideal. A superfície medida (superfície efetiva) aproxima-se tanto mais da superfície real quanto mais eficiente forem os fatores de avaliação da superfície técnica. As exigências ao preenchimento da função são satisfeitas através de características tecnológicas e geométricas adequadas. Este trabalho será dirigido principalmente para as características geométricas.

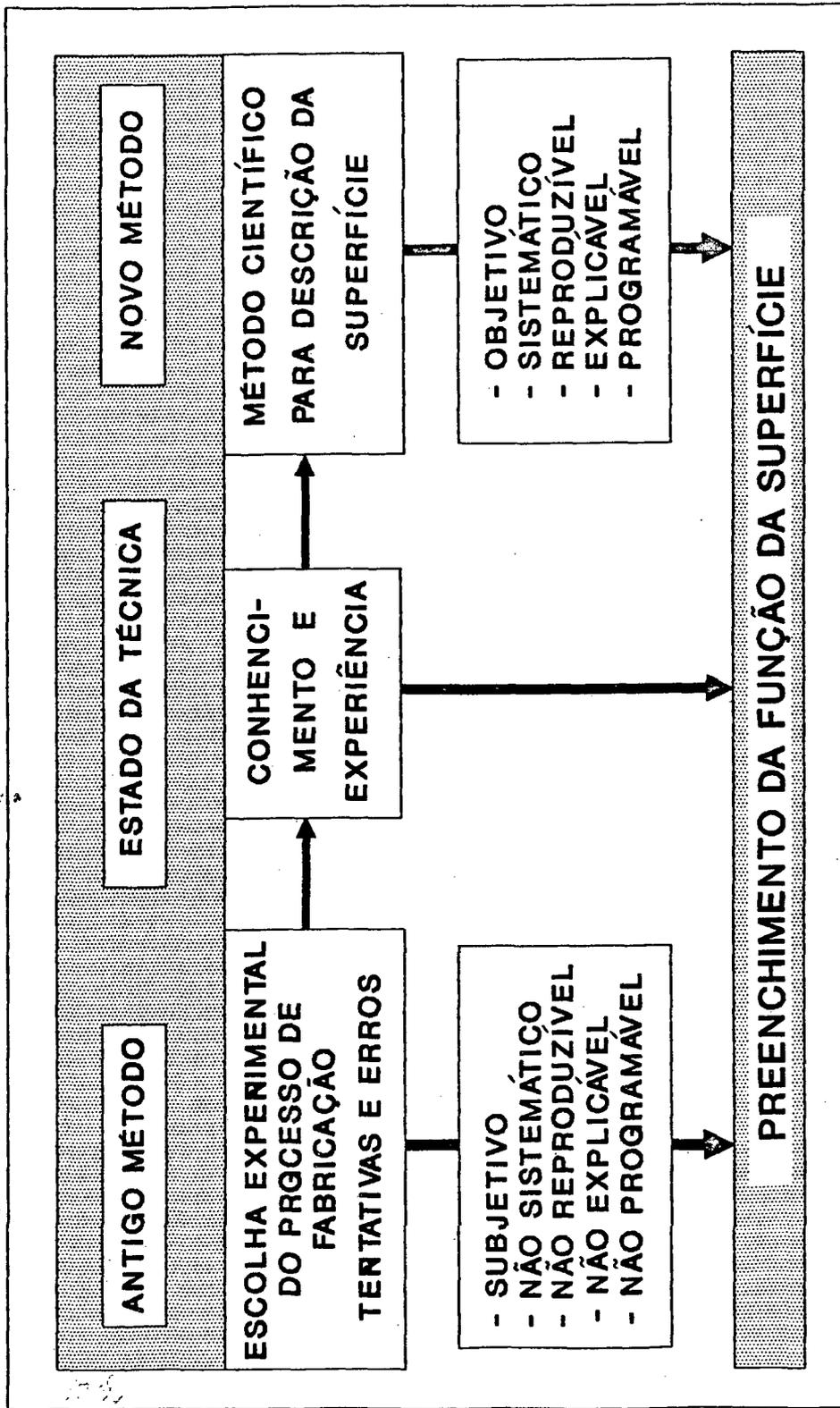


Figura 1: Caminho para preenchimento da função da superfície

## 2. ESTADO DA TÉCNICA

### 2.1 Exigências ao preenchimento da função da superfície técnica

Segundo Schmaltz o conceito de superfície está ligado com a noção de interior e exterior. Uma superfície, como a chamada folha de Möbius, a qual tem apenas 1 lado, não tem nenhum lado que se possa dizer interior ou exterior e não é de maneira alguma a limitação de um corpo. Esta folha não pode, por isto, receber o nome de superfície. Uma superfície é caracterizada por delimitar um pedaço de espaço fechado /4/. Não se pode pensar em uma superfície sem a noção do corpo, o qual ela delimita. Superfície técnica é então a superfície de corpos, que têm uma utilização na técnica.

Este conceito básico de superfície é imprescindível para o entendimento de sua problemática. Os conceitos de superfície verdadeira ou real, de superfície efetiva e de superfície geométrica são também de suma importância dentro deste tema. A superfície a qual resulta do processo de fabricação é a superfície real. Ela separa o corpo do meio ambiente. A superfície efetiva é uma reprodução aproximada da superfície real, obtida através de uma técnica de medição. Sobre a superfície efetiva, os processos de medição e as condições de medição têm uma extraordinária influência. A superfície geométrica é uma superfície ideal, cuja forma nominal está definida através de um desenho ou outros dados técnicos /15,133/.

Cada superfície técnica tem uma função a preencher. Para tal é necessário que ela tenha determinadas propriedades. Por esta razão, o estudo da superfície técnica abrange tanto a topografia como também as propriedades da camada limite. Esta camada tem, em consequência do seu processo de fabricação e em consequência do contacto com o meio-ambiente, propriedades físicas e químicas diferentes das do material não perturbado no interior do corpo /4,5,6,7,8/.

A estrutura de uma superfície metálica é constituída das seguintes camadas /4,6/: camada de sujeiras ( $\approx 3$  nm); camada de absorção ( $\approx 0,3$  nm); camada oxidada (1 a 10 nm); camada deformada ( $> 5$   $\mu$ m) e material básico.

A interligação entre função, exigências para o preenchimento da função da superfície técnica e sua fabricação compreende uma área muito ampla e complexa, figura 2-1.



Figura 2-1: Interligação entre função, exigências ao preenchimento da função e fabricação de superfícies técnicas.

## Função

A designação dos diferentes tipos de superfícies de peças, as quais são usadas na engenharia e na mecânica fina, são definidas segundo o tipo de solicitações que aparecem mais frequentemente /1/. Esta designação foi aceita e usada em diferentes trabalhos como tipos de funções de superfícies /2,3,9/.

A superfície técnica de um corpo pode ser na prática solicitada de várias maneiras, por exemplo /3,10/:

- solicitação do meio-ambiente e do clima (solicitações não mecânicas);
- solicitações térmicas e de radiações físicas;
- solicitações eletro-químicas;
- solicitações de correntes elétricas;
- solicitação de pressão estática e/ou dinâmica;
- solicitação mecânica;
- solicitações tribológicas e
- solicitações biológicas.

As possíveis combinações destas solicitações são tão multiformes que uma subdivisão sistemática das funções, segundo seu tipo de solicitação, não é mais nítida. Por esta razão, será adotada aqui a subdivisão segundo os tipos de solicitações mais freqüentes:

- superfície sob solicitação mecânica não existente ou muito pequena;
- superfície sob solicitação de tensão sem movimento relativo em relação a contra-superfície do corpo de contacto.
- superfície sob solicitação de atrito e com movimento relativo em relação a contra-superfície.

Os outros tipos de solicitação, como por exemplo as solicitações tribológicas foram consideradas, aqui neste trabalho, de acordo com o tipo de utilização da peça, como propriedades exigidas, tais como resistência ao desgaste, capacidade de deslizar, propriedades de atrito.

## Exigências às Superfícies Técnicas

Para que as exigências ao preenchimento da função sejam satisfeitas, é preciso que certas propriedades tecnológicas (propriedades físicas e químicas) e geométricas estejam presentes. A clas-

sificação das propriedades das superfícies e os seus ensaios foi apresentada pela primeira vez por Wolf /11/ e é até hoje ainda adotada /3,6,9,12,13/.

Para se constatar a eficiência da função é indispensável se determinar o estado das camadas da superfície através de diferentes métodos de medição e observação. O estado da superfície depende:

- das propriedades físicas como estrutura, dureza ou tensões;
- das propriedades químicas como composição e afinidade de reações e
- das propriedades geométricas como forma de cristalização, rugosidade, ondulações ou desvio de forma

As propriedades físicas e químicas são verificadas através de ensaios do material e as propriedades geométricas através de ensaios de forma e de superfície. As seis diferentes ordens de desvios de forma são esclarecidas na figura 2-2.

Desvio de forma de 1ª ordem - é o tipo de desvio que pode ser constatado ao examinar-se todo o perfil efetivo. Desvios de forma de 2ª a 5ª ordem - são aqueles desvios da superfície efetiva, os quais podem ser constatados no exame de uma secção desta superfície.

Ondulações - são desvios de forma de 2ª ordem, na maioria das vezes desvios periódicos, que se apresentam na superfície efetiva. Nos desvios desta ordem a relação entre comprimentos de onda e amplitude fica em geral entre 1000 para 1 e 100 para 1. A maioria é reconhecida em mais de um período de onda.

Rugosidade - desvios de forma de 3ª a 5ª ordem são desvios que se repetem regularmente ou irregularmente e cuja relação entre comprimento de onda e amplitude ficam em geral entre 100 para 1 e 5 para 1.

Uma separação exata das ordens de grandeza do desvio de forma, ondulação e rugosidade nem sempre é possível. Os desvios de forma compreendem não somente a topografia como também a camada limite as quais se sobrepõem na 4ª, 5ª e 6ª ordem.

DESVIOS DE FORMA (representada numa seção do perfil)	EXEMPLO PARA OS TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLOS PARA A CAUSA DA ORIGEM DOS DESVIOS
1 <sup>a</sup> ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalado	Defeitos nas guias das máquinas ferramentas, deformação por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido a temperatura, desgaste.
2 <sup>a</sup> ordem: Ondulação 	Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça.
3 <sup>a</sup> ordem: 	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta, avanço ou profundidade de corte
4 <sup>a</sup> ordem: 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de formação de cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postigo de corte), deformação do material por jato de areia, formação de ressaltos pelo tratamento galvânico.
5 <sup>a</sup> ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (por exemplo: decapagem), processos de corrosão.
6 <sup>a</sup> ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material, tensões e deslizamentos na rede cristalina.
	Superposição dos desvios de forma de 1 <sup>a</sup> a 4 <sup>a</sup> ordem	

Figura 2-2: Desvios de forma das superfícies técnicas.

Os desvios de forma de 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> ordem (ondulação, rugosidade (ranhuras) e rugosidade (fendas)) abrangem a área de medição de superfícies e serão levadas em consideração aqui neste trabalho. Os outros tipos de desvios não serão examinados pois eles abrangem as áreas de medições de forma e de materiais.

Schmaltz /4/ estabeleceu o limite entre macro e micro-geometria através de uma área cujo comprimento do lado é de 1mm. A micro-geometria compreende regiões no interior da área de um quadrado de lado igual a 1mm, ou de um círculo de perímetro igual a 1mm. A micro-geometria deve ser determinada com uma precisão básica de  $10^{-6}$  mm. Relações de locais em faixas maiores que 1mm<sup>2</sup> pertencem à macro-geometria.

Superfícies geométricas como plano, cilindro, esfera, etc. nem sempre são ideais para o preenchimento da função. A forma ideal da superfície, a qual satisfaz todas as exigências, resulta de uma superposição de alguns perfis.

#### Fabricação - Técnicas de Fabricação

A técnica de fabricação é a técnica pela qual, através da transformação ou mudança de forma do material da peça bruta, surgem peças com forma geométrica definida. Uma peça de construção é uma peça que dentro de um projeto tem exigências de função determinada para serem preenchidas. A norma DIN 8580 dá uma visão geral dos processos de fabricação existentes. Os principais grupos de fabricação são os seguintes:

- criação de forma (fundição e metalurgia do pó);
- modificação de forma (conformação);
- separação (usinagem)
- junção (soldagem, rebitagem);
- revestimento (pvd, cvd, gavanização) e
- modificação das propriedades dos materiais (têmpera, magnetização).

Aqui neste trabalho será considerado o sub-grupo usinagem do grupo separação.

Os diferentes processos de fabricação produzem peças com diferentes superfícies. Os fatores de influência responsáveis por isto podem ser divididos em 5 grupos: máquina; peça; ferramenta; cinemática e meio-ambiente.

## 2.2 Problemas de projeto, de fabricação e de medição

Para se entender melhor a problemática entre função, exigências e fabricação de superfícies técnicas é importante dividir este problema em 3 grupos /17,18,19,20,21/, figura 2-3:

- 1- o problema de projeto;
- 2- o problema de fabricação e
- 3- o problema de medição.

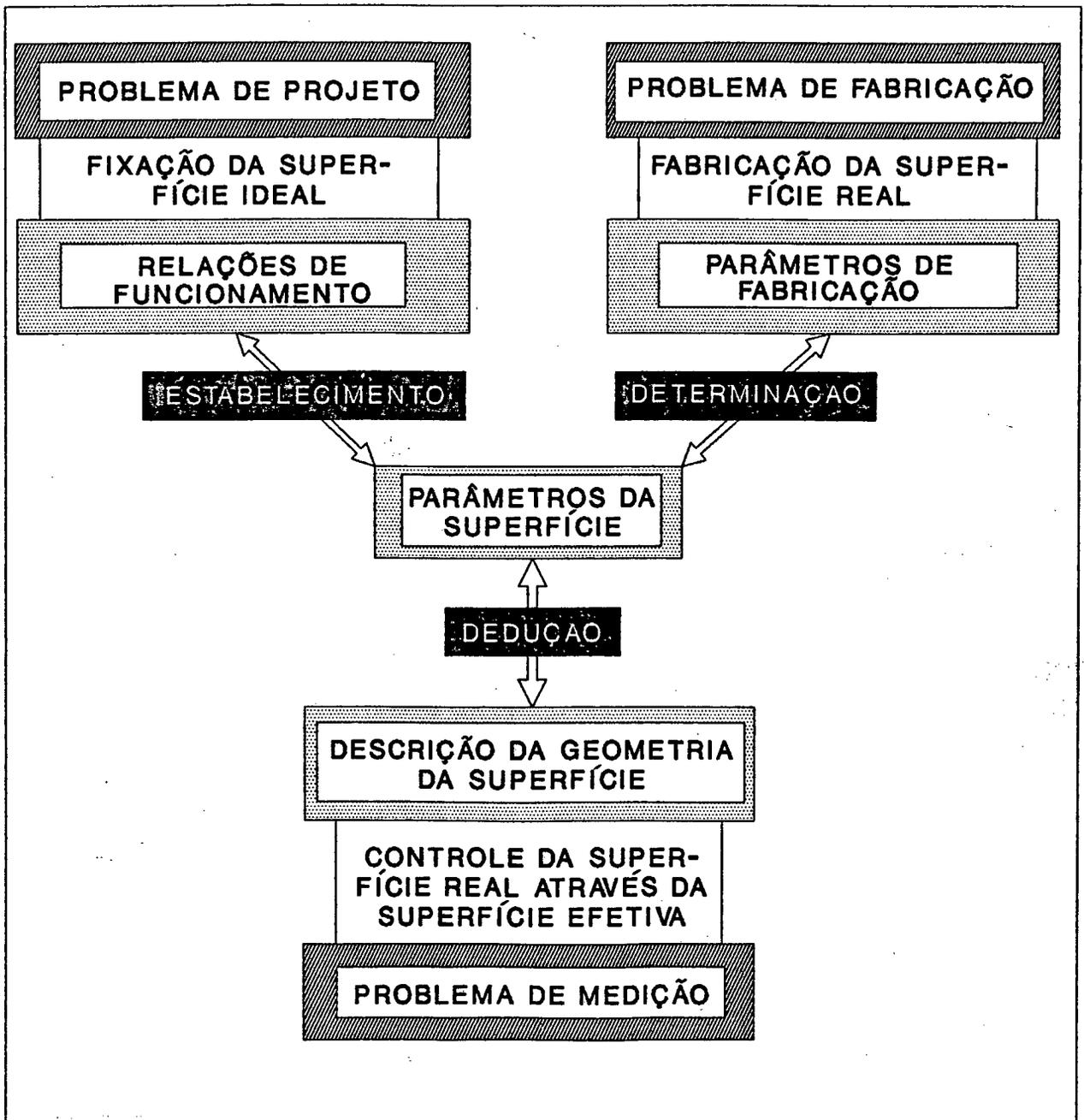


Figura 2-3: O problema de projeto, de fabricação e de medição.

O problema de projeto - a relação entre os parâmetros da superfície e as relações de funcionamento precisa ser quantitativamente, e ou pelo menos qualitativamente fixado (Estabelecimento da superfície ideal). Neste ponto é necessário ainda um grande esforço até que o projetista tenha a seu dispor as informações que lhe permitam estabelecer com segurança a exigida qualidade da função e tempo de vida. Resumindo-se, é necessário se constatar que no estado atual da técnica, uma avaliação justa da função da superfície apenas é possível em casos especiais.

O problema de fabricação - para se alcançar na fabricação a melhor aproximação possível da superfície real para a superfície ideal, é preciso que seja formulada e apresentada uma relação qualitativa e/ou quantitativa entre os processos de fabricação, os parâmetros de fabricação e os parâmetros da superfície (Fabricação da superfície real).

O problema de medição - é preciso que os parâmetros da superfície, os quais permitam uma descrição quantitativa e/ou qualitativa da superfície, sejam deduzidos (Controle da superfície real). Nesta área as pesquisas sobre superfície chegaram nos últimos anos bem próximas da solução. Certamente existe uma limitação a se notar, que é a complexidade dos novos parâmetros propostos. Complexidade esta na obtenção e ainda na sua possibilidade de aplicação para o uso prático do dia a dia, o que torna estes parâmetros impróprios. Isto acontece devido aos princípios estatísticos/matemáticos e correlacionários empregados.

### 2.2.1 Estabelecimento da superfície ideal

A pesquisa tenta já há algum tempo relacionar as propriedades geométricas da superfície com a qualidade funcional. Esta relação até agora ainda não é clara e na maioria das vezes não completamente formulada.

As propriedades tecnológicas e sua influência sobre o comportamento funcional da superfície estão sendo da mesma forma examinadas /10,40,41,42/. Através da usinagem com ferramentas de corte com geometrias definidas foram fabricadas superfícies, as quais apresentam na sua micro-estrutura características típicas. Estas

características se manifestam diferentemente segundo as condições de corte e o material usados /42/.

Nenhuma superfície tem propriedades (mecânicas, metalúrgicas, elétricas, óticas ou químicas) completamente homogêneas. Pode-se, porém, sob o ponto de vista funcional, tratar as propriedades exigidas, como por exemplo a capacidade de deslizar, a resistência ao desgaste e a retenção do lubrificante como fatores geométricos /37/.

As exigências micro-geométricas, as quais têm que ser atendidas, para que uma dada função seja preenchida, foram apresentadas por Halbig /2/. Porém estas exigências devem ser esclarecidas através da possível quantização de expressões do tipo: desvio geométrico grande, pequeno e muito pequeno ou inclinação do perfil grande e pequena.

As propriedades exigidas para a garantia funcional da superfície foram apresentadas por Noppen e Sigala /3/. A experiência mostra que as afirmações da enorme quantidade de parâmetros utilizada não são suficientes para indicar a ligação entre as propriedades geométricas, as funções e a fabricação da superfície /43,44,45,46, 47/. Por isto, fatores de avaliação das propriedades geométricas têm que ser deduzidos a partir das exigências do funcionamento da superfície.

### 2.2.2 Fabricação da superfície real

A superfície de uma peça é a parte da peça que é mais fortemente solicitada no exercício de sua função. Solicitações como torção, flexão, atrito e corrosão influenciam a peça mais intensamente em sua topografia do que em seu núcleo.

Durante a fabricação de uma peça surgem em sua topografia e em sua camada limite diferentes tipos de desvios de forma. Os desvios de forma são na sua maioria mudanças indesejáveis.

Em diferentes processos de fabricação apresentam-se diferentes mudanças indesejáveis, as quais são compostas de fatores mecânicos, térmicos e químicos. Estas mudanças indesejáveis e importunas são reconhecidas com freqüência somente depois de um certo tempo

de funcionamento da peça montada, cuja resistência ou desempenho diminui perante uma certa solicitação.

Apesar do esforço dos pesquisadores para tornar clara a influência do processo sobre a superfície /7,80,82,83,84,85,86,87, 91/, vale ainda hoje o que Balint disse em 1966: "ainda se deve pesquisar, de que maneira a fabricação da peça deve ser conduzida, para que as modificações indesejáveis na sua superfície sejam evitadas. Ainda melhor seria, se fosse possível, atingir imediatamente as propriedades e estado que elevem a resistência perante a solicitação existente".

### 2.2.3 Controle da superfície real

A complexidade do problema "superfície" e os diferentes tipos de objetivos dos engenheiros e cientistas em diferentes áreas são a razão para que tenha sido deduzida uma grande quantidade de parâmetros para a determinação da superfície (hoje cerca de 50 parâmetros). Uma parte destes parâmetros é supérflua ou sem significado ou ambos. Como exemplo pode-se citar a diferença do valor entre  $R_a$  (desvio médio aritmético de rugosidade, ver definição tabela II nos anexos) e  $R_q$  (desvio médio quadrático da rugosidade, ver definição na tabela II dos anexos) por exemplo, é na prática menor que o erro de medição /22/. Hoje em dia existem microprocessadores que trabalham com até 25 parâmetros. Mas fundamentalmente existe o seguinte problema: "Que superfície com qual parâmetro e para que função?"

É pouco importante se fazer uma grande apresentação de superfícies através de uma infinidade de medidas, quando estas medidas não têm nenhuma relação com a função da peça /24/.

Foram propostos em diversos trabalhos diferentes métodos para descrição ou caracterização das superfícies /25,26,27,28,29,30,31, 32,33/. Os parâmetros como profundidade média da rugosidade ( $R_z$ ), desvio médio aritmético ( $R_a$ ) ou profundidade máxima da rugosidade ( $R_{max}$ ) sozinhos, não são suficientes para descrição da estrutura da superfície que garanta a sua funcionalidade. A necessidade de um método universal para medição da textura da superfície já foi expressa por muitos. Falta porém por um lado o conhecimento da preparação da superfície que seja exigida e ideal para uma deter-

minada função e por outro lado a capacidade de se medir e representar claramente as propriedades da superfície.

A figura 2-4 mostra uma superfície torneada que foi medida tri-dimensionalmente. A apresentação espacial da superfície permite fazer afirmações sobre o processo de fabricação que foi utilizado para obtê-la, bem como sobre a superfície propriamente dita /64, 136,139/.

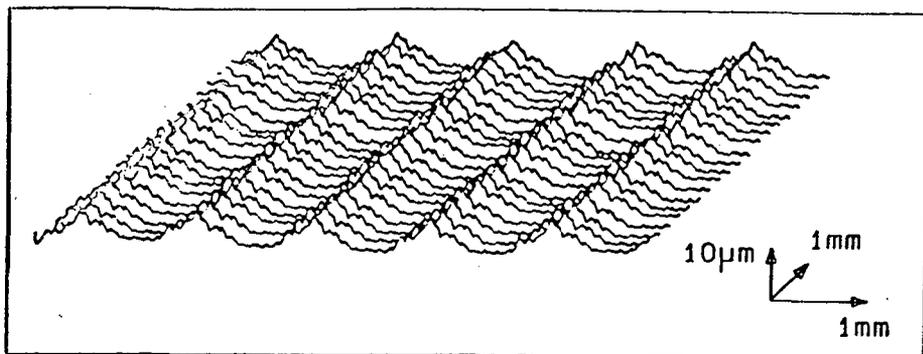


Figura 2-4: Apresentação espacial de uma superfície torneada.

Para a descrição de uma superfície técnica existe uma série de parâmetros estabelecidos que em parte foram adotados nas normas. Estes parâmetros porém não satisfazem em todos os casos. Por isto pesquisadores desta área propuseram parâmetros e funções estatísticos e de correlação /24,25,27,28,32,33,48,49,50,51,52,53/.

Segundo Stauffert e Mathias, para uma clara descrição de um perfil são necessários 6 parâmetros. Estes são o desvio médio quadrático da rugosidade  $R_q$ , a profundidade média da rugosidade  $R_z$ , o coeficiente de simetria da curva de distribuição de amplitude  $S_k$  (ver definição na tabela V dos anexos), a curtose  $K_u$  (ver tabela V dos anexos) na direção vertical e a distância média das irregularidades do perfil  $S_m$  (tabela III dos anexos) e desvio das distâncias das irregularidades do perfil  $S_{rms}$  para a descrição das propriedades na direção horizontal. Com estes seis parâmetros são descritos com suficiente precisão cada sinal aleatório, independente do tipo de sua distribuição.

Peklenik constatou em sua pesquisa, que para uma completa descrição de uma superfície, é exigido que se abranjam as propriedades micro-geométricas em todas as três coordenadas. Neste sentido foram propostos dois métodos /54,55/:

1. Método de medição para determinação de uma superfície através do cálculo da função de correlação transversa e
2. Método de medição para determinar a isotropia micro-geométrica de uma superfície através do cálculo da função de auto-correlação.

Através de técnicas estatísticas podem ser retiradas mais informações do perfil de medição /20,32,56,57,58,61,80/.

Um sistema de superfície, que sob condições regulares de funcionamento deve ser examinado quanto ao seu comportamento, apresenta uma região no espaço, a qual também tem que ser descrita na sua natureza com métodos analíticos apropriados. Devido ao fato que neste caso se trata de um campo estocástico tridimensional, o tratamento numérico do problema é extraordinariamente difícil. Além disso, tem-se que a caracterização da superfície deve ser compreensível para o uso prático. Ambas as exigências são diametralmente opostas e por esta razão difíceis de serem cumpridas /25/.

Para diversas medições de rugosidade executadas em superfícies usinadas com diferentes processos de fabricação resultam valores médios que têm diferentes desvios. A imprecisão da medida pode dar-se não só através do aparelho de medição, como também através da irregularidade da superfície a ser testada. Neste contexto se faz frequentemente a pergunta /53,59,60/:

"Quantas vezes se deve medir, para se atingir um resultado representativo?"

Para se determinar as propriedades da superfície dispõe-se hoje de uma grande quantidade de processos de medição e ensaio. O processo de medição com apalpamento contínuo é no momento ainda o processo usado com mais frequência para a averiguação dos desvios de forma das superfícies /62,63/.

Como foi intensivamente examinado, o apalpamento mecânico (com agulhas de aço ou diamante), influencia a medição da superfície de maneiras diferentes, por exemplo através do desgaste do corpo de prova, da variação da força de medição e da velocidade de apalpamento dos diferentes tipos de sistemas /18,64,65,66,67/.

Tanto o crescimento da automatização como também a exigência de domínio do processo requerem da técnica de medição sensores, que testem a superfície, de forma rápida, livre de perturbações e em processo (on line). Isto apenas pode ser preenchido restritamente pelos sistemas mecânicos. Por esta razão foram desenvolvidos nos últimos anos sensores que não tocam a superfície. Estes sensores trabalham na sua maioria segundo o princípio de medição óptico /68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,134,135/.

#### 2.2.4 Tribologia

Na figura 2-1 foi apresentada a interligação entre função, exigências ao preenchimento da função e fabricação de superfícies técnicas. As funções das superfícies foram divididas, segundo o tipo de solicitação que aparece com mais freqüência, em três grupos. O problema essencialmente complexo se encontra no terceiro grupo, que é o grupo das superfícies solicitadas por atrito e que têm um movimento relativo com suas contra-superfícies. Neste trabalho será examinada mais de perto a função de uma Superfície de Deslizamento Lubrificada (SDL), que é uma função tribológica.

Há muito tempo atrás, já se tentava melhorar a potência mecânica das máquinas simples, lubrificando-se com óleo ou gordura, os elementos desta máquina, os quais tinham um movimento relativo entre si. Porém só há pouco tempo é que os problemas de atrito, desgaste e lubrificação têm sido considerados como uma disciplina científica (Tribologia).

Devido aos diferentes tipos de interesses e objetivos, existe uma série de disciplinas científicas que se ocupam dos problemas tribológicos /88/. Por exemplo:

- a ciência dos materiais (desenvolvimento e modificações de materiais de atrito);
- a química (desenvolvimento de materiais lubrificantes, problemas da camada limite);
- a física (estudo de novos materiais para revestimento);
- o projeto (configuração geométrica para elevação da rigidez, amortecimento de vibração);
- a fabricação (fabricação cujas superfícies com uma função tribológica) e
- a metrologia (automatização do sistema tribológico).

Os novos conceitos, os quais surgem juntos a estas disciplinas, estão sendo reestudados, avaliados e estruturados dentro da TRIBOLOGIA /88/.

Mais de 90% das superfícies técnicas que exigem certo grau de acabamento são utilizadas em processos tribológicos. A perda de energia decorrente do atrito e desgaste, representa uma alta perda econômica /90,91/.

Para que os aspectos tribológicos sejam estruturados da melhor forma possível, é preciso que sejam tomadas medidas de otimização de projeto, de lubrificação e dos materiais técnicos. A escolha do processo de fabricação mais apropriado para realizar as exigências de projeto ainda é um tema que precisa continuar sendo estudado /57,88,89,90,93,94/.

### 3. ETAPAS PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO TRABALHO

A fabricação correta e repetitiva de uma superfície técnica para uma determinada aplicação dependia da experiência do operador. A fim de que se possa fabricar um componente para uma aplicação específica empregando-se o processo de fabricação ou a seqüência de processos de fabricação corretos, o projetista deve definir com clareza quais os valores característicos que a superfície do componente deve preencher. Como não existe ainda uma metodologia clara de medição e correlação dos valores característicos de medição da superfície com o processo de fabricação se propõe o desenvolvimento de um método científico que efetue este correlacionamento.

Para que o objetivo deste trabalho seja atingido é preciso que fatores de avaliação, que possam caracterizar uma superfície, sejam deduzidos e definidos. Os valores ideais dos fatores de avaliação, os quais serão definidos com base nas exigências ao cumprimento da função, têm que ser comparados, para vários processos de fabricação, com os valores medidos destes fatores, de modo que se torne possível a escolha do processo de fabricação mais adequado, figura 3-1.

O objetivo deste trabalho será atingido com o desenvolvimento das seguintes etapas:

- descrição das exigências a uma superfície técnica para o preenchimento da sua função;
- caracterização de uma superfície técnica ideal com base nas exigências ao preenchimento da função (um exemplo tribológico);
- descrição do complexo de influências da usinagem sob uma superfície técnica;
- determinação do tamanho de amostra para as medições de modo a se atingir um resultado representativo;
- dedução e definição dos fatores de avaliação para caracterizar a superfície técnica e

- caracterização, de superfícies usinadas, através de fatores de avaliação com ajuda de um software.

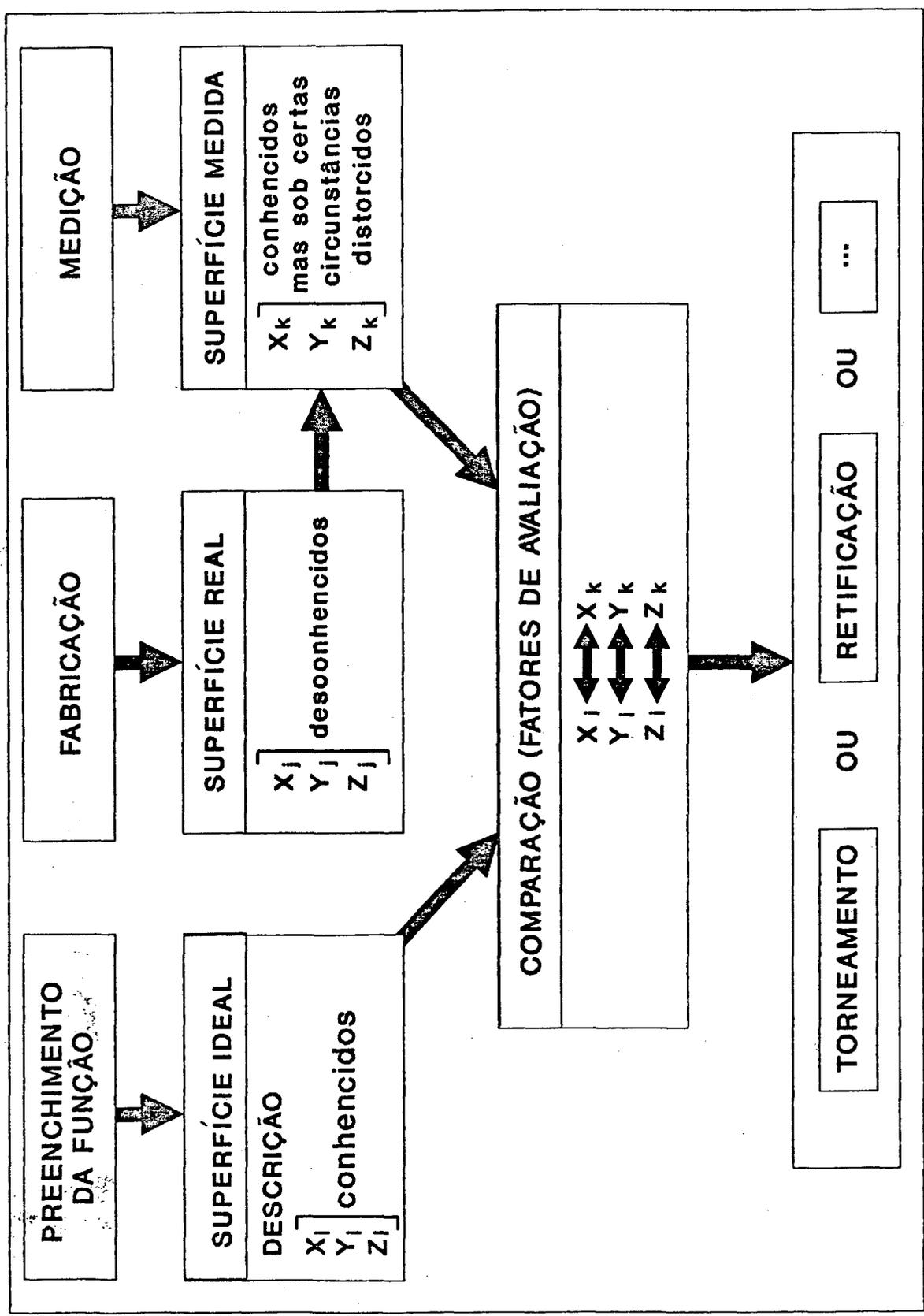


Figura 3-1: Escolha do melhor processo de fabricação em função dos fatores de avaliação

#### 4. AVALIAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE COM BASE NAS EXIGÊNCIAS AO PREENCHIMENTO DA SUA FUNÇÃO

As funções das superfícies técnicas foram divididas no capítulo 2 segundo o tipo de solicitação mais freqüente. O primeiro grupo de funções trata de superfícies não solicitadas mecanicamente, neste grupo não está presente ou não é exigida uma "contra superfície". Superfícies de carcaça de máquinas, de calibres e para contactos elétricos são exemplos de superfícies deste primeiro grupo. No segundo grupo têm-se as superfícies solicitadas sob tensões (tração, compressão, etc.), no qual a superfície principal está parada em relação a contra-superfície. São exemplos de superfícies do segundo grupo: superfícies de elementos de fixação como parafusos e rebites; superfícies de encaixe como chavetas. O terceiro grupo compreende as superfícies solicitadas por atrito, no qual está presente um movimento relativo entre a superfície principal e a contra-superfície. Por exemplo: superfícies de deslizamento como guias de máquinas ferramentas; superfície de rolamento como nos mancais de rolamento ou ainda superfícies de frenagem como em tambores de freio.

Um problema essencialmente difícil está no terceiro grupo. Superfícies solicitadas por atrito podem facilmente sofrer danos e quando a solicitação específica torna-se alta demais pode conduzir à falha da peça. A superfície deve ter uma forma tal que a solicitação específica se torne a menor possível.

##### 4.1 Exemplo de uma superfície lubrificada de deslizamento

Devido ao grande número de aplicações na indústria mecânica e pela particular dificuldade em definir no projeto o processo de fabricação e as características da superfície, aqui será mostrada, como exemplo, uma superfície solicitada por atrito, que desliza e é lubrificada (SDL). Segundo Noppen /3/ as propriedades exigidas para este tipo de superfície são:

- precisão de forma;
- resistência ao desgaste;
- capacidade de deslizar;
- amortecimento ao desgaste inicial;
- capacidade de suportar carga (resistência à deformação) e

- capacidade de reter o lubrificante.

No processo de deslizamento surge, devido ao atrito, calor que deve fluir. A transmissão de calor tem que se dar na zona de contacto. Temperaturas excessivamente elevadas nas áreas de atrito e deslizamento podem provocar uma dilatação térmica indesejável e uma mudança na estrutura cristalina dos picos de rugosidade. Mudança na estrutura cristalina pode levar a uma mudança de dureza. Com isto uma outra exigência à SDL pode ser uma dissipação de calor adequada.

As propriedades de uma superfície técnica foram divididas em tecnológicas e geométricas (veja fig. 2-1, sub-capítulo 2.1). Ambas as propriedades representam um importante papel para o preenchimento da função. Aqui será dado mais ênfase às propriedades geométricas e examinada a sua influência no comportamento da função.

A superfície fabricada (superfície real) tem que ter uma determinada micro-geometria para que com isto as propriedades exigidas sejam observadas e a função garantida. Esta característica será aqui chamada de "exigências micro-geométricas" ao preenchimento da função.

Cada propriedade exigida deve ser associada a uma topografia teórica da superfície, topografia esta que preencha da melhor forma possível as necessidades desta propriedade. A superfície teórica ideal resulta da superposição de todas as superfícies ideais para cada propriedade exigida.

Já que para a função da SDL as propriedades exigidas estão fixadas, deverá ser averiguada a forma do perfil que melhor se adequa a estas propriedades.

## 4.2 Propriedades exigidas

Uma superfície ideal que garanta a função de uma SDL deverá preencher diversas propriedades.

### 4.2.1 Precisão de forma

Devido ao fato do desvio de forma ser averiguado através dos ensaios de forma e não de superfície, aqui não será levada em conta a precisão de forma para a determinação da superfície ideal de uma SDL.

Do trabalho de Strohmaier /94/ que fez um levantamento junto a algumas firmas, pode-se concluir que as SDL na prática são fabricadas com tolerâncias entre IT6 e IT4.

Segundo Dreyhaupt é muito importante, para uma superfície que desliza, em primeiro lugar se determinar a precisão de forma e só depois que esta tiver um grau satisfatório deve-se determinar finalmente a qualidade da superfície /95/.

Em geral o desvio de forma é influenciado na fabricação pela máquina ferramenta. Os principais fatores de influência são os meios de fixação utilizados, a precisão de posicionamento da máquina ferramenta e a estabilidade da ferramenta. Com certeza, podem ser observado em máquinas ferramentas idênticas, diferentes desvios de forma. Isto pode ser atribuído a diferentes formas, tamanhos e estabilidades de peças brutas.

### 4.2.2 Resistência ao desgaste

Segundo a DIN 50 320, o desgaste é uma perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, causada por efeitos mecânicos, isto é, através de contacto e movimento relativo com um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso.

O processo desta perda progressiva de material pode hoje ser descrita através dos quatro principais mecanismos de desgaste /97/:

1. Adesão - formação e separação de ligações atômicas (micro-desgaste) entre corpo-básico e contra corpo;
2. Abrasão - riscamento e micro-usinagem do corpo básico através de elevações endurecidas da rugosidade do contra-corpo ou através de partículas de material endurecido entre os dois corpos;
3. Ruptura da Superfície - formação e crescimento de trincas até a separação de partículas em consequência da tensão mecânica alternante que age na região superficial do corpo básico e do contra-corpo e
4. Oxidação Tribológica - reação química do corpo-básico com partes componentes do material lubrificante ou do meio ambiente em consequência da ativação pelo atrito.

A adesão é a causa da engripamento que pode apresentar-se quando dois corpos metálicos deslizantes, em decorrência de uma sollicitação muito elevada ou em consequência de uma camada de espessura não suficiente do fluido lubrificante, não estão suficientemente separados /97/.

Como medidas para se evitar o desgaste de adesão estão:

1. lubrificação dos corpos deslizantes com separação completa na maneira do possível através de uma camada de lubrificante. Segundo Gee o efeito do lubrificante sólido pode ser muito efetivo /97/, por exemplo:
  - camadas de óxido naturalmente ou intencionalmente presentes;
  - finas camadas de materiais moles com pequena afinidade em relação ao ferro (por ex. chumbo ou índio);
  - camadas de fósforo;
  - grafite ou
  - bisulfeto de molibidênio;
2. escolha dos materiais com afinidade atômica relativamente pequena em relação ao aço. A justaposição de metais cúbicos de face centrada deve ser evitada, em lugar destes os cúbicos de

corpo centrado e os hexagonais (materiais com estrutura heterogênea) devem ser usados /e

3. tratamento superficial, em especial os tratamentos termo-químicos. A gripagem é combatida eficientemente quando se diminui a afinidade dos corpos deslizantes. Um meio efetivo são os tratamentos térmicos nos quais elementos como carbono, nitrogênio, boro, cromo ou vanádio se difundem na superfície dos pares deslizantes. /

Como fica claro dos pontos acima, a adesão não é um problema primário da topografia da superfície, mas muito mais um problema das propriedades dos materiais. / Como é conhecido dos trabalhos de Deyber, Habig e Gee /97/, a orientação dos próprios cristais e a estrutura cristalina são fatores importantes de influência da adesão. Por esta razão pode-se aqui afirmar que a adesão é influenciada principalmente pela quinta e sexta ordem dos desvios de forma de uma superfície (ver fig. 2-2).

Abrasão ou "desgaste de sulco" significa em geral desgastar ou raspar. Sob "desgaste de sulco" se entende o desgaste indesejável do material da superfície de uma peça através da penetração de um corpo de dureza elevada (um material com efeito abrasivo), que pode ser o contra-corpo ou um material entre os corpos deslizantes. /

Corpos abrasivos podem formar-se nas camadas solicitadas da superfície da peça que sofreram deformações plásticas. Elevações salientes da superfície em forma de picos se expõem a uma intensa deformação plástica, por isto devem ser evitadas.

Os diferentes efeitos resultantes da ação de partículas abrasivas nas superfícies do material são: micro-sulcos; micro-cavacos; micro-fadiga e micro-quebras (fig. 4-1). /

Um micro-sulco formado através de uma única ação abrasiva de uma partícula abrasiva isolada não conduz necessariamente a uma retirada de material. O material é deslocado através de uma deformação plástica para as margens do sulco (fig. 4-1 a). Na prática também pode aparecer um desgaste em um micro-sulco através da fadiga do material (fig. 4-1 c). No caso da formação de micro-cavacos na frente do corpo abrasivo forma-se uma partícula de

desgaste em forma de cavaco, cujo volume em caso ideal é igual ao volume do sulco (fig. 4-1b). A micro-ruptura apresenta-se em materiais frágeis e é caracterizada através da quebra de grandes partículas de desgaste do material da superfície e da pequena deformação plástica (fig.4-1 d).

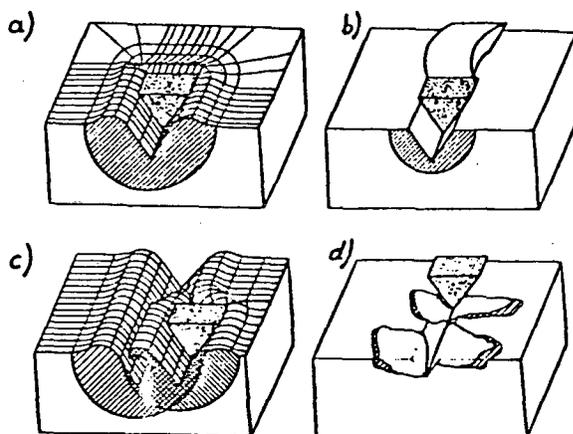


Figura 4-1: Diferentes tipos de solicitação do material através de partículas abrasivas: a) micro-sulcos; b) micro-cavacos; c) micro-fadiga e d) micro-ruptura /98/.

Como medidas para evitar abrasão/ estão segundo Habig e Gahr /97,98/:

1. escolha de um material do "corpo de base" com dureza maior que a dureza do material do "contra-corpo";
2. quando o item 1) não for possível, o "corpo base"deverá conter fases duras, como por exemplo carboneto em matriz tenaz (material duro com suficiente ductilidade);
3. contorno de grão dúctil e escolha de tamanho de grão pequeno e
4. evitar entalhes internos, como fendas ou poros. Manter pequeno o efeito de entalhe provocado pelas partículas de grafite através de uma forma apropriada (melhor esféricas que lamelas).

Ruptura da Superfície é o tipo de desgaste que sucede através de uma fadiga do material em consequência de uma deformação elástica e plástica alternante /100/.

O desgaste de fadiga surge, ao contrário dos desgastes de adesão e abrasão, também sob condições de "atrimento fluido", isto porque a solicitação dinâmica é transmitida pelo filme lubrificante. No desgaste de fadiga o desenvolvimento dos danos não é evidente no início do seu efeito. Ao contrário da abrasão e da adesão, poderia se falar de um período de incubação. Depois de decorrer um determinado tempo, aparece repentinamente a formação de

uma separação na forma de microcavidades (Pitting). Até este momento, as deformações cíclicas elásticas e plásticas levam a modificações invisíveis na camada da superfície do corpo deslizante. A contínua acumulação de energia na camada limite dos corpos de atrito, conduz pela reação de discordâncias à microtrincas e por último ao "desfolhamento" de partículas de desgaste.

Segundo Wuttke e Broszeit /97,100/ este mecanismo de desgaste é especialmente característico de mancais de rolamento e de mecanismos de engrenagem. Segundo Habig o mecanismo de desgaste "ruptura da superfície" apenas tem uma participação pequena em atritos misto e de corpo sólido. Na lubrificação hidro-dinâmica o desgaste "ruptura da superfície" é o principal mecanismo de desgaste /97/. Os experimentos de Broszeit mostraram que a duração de vida de uma peça com grandes valores de  $R_t$  (profundidade máxima de rugosidade) diminui rapidamente. A causa para isto é sobretudo a heterogeneidade das condições de ação de forças (Krafteinleitungsbedingungen), o que causa picos de tensões localizadas. Disto pode-se deduzir: quanto mais liso melhor /98/.

Medidas para evitar a "ruptura da superfície" segundo Habig são /97/:

1. empregar materiais com alta dureza e alta tenacidade (o que exige uma solução de compromisso);
2. empregar materiais homogêneos e
3. apropriar a camada limite às tensões de compressão, por exemplo, através de cementação ou nitretação.

Oxidação Tribológica é um tipo de desgaste de corrosão. As superfícies da maioria dos materiais metálicos estão, em meio ambiente normal, contedor de oxigênio, cobertos de um filme de óxido. Sob uma solicitação de deslizamento podem aparecer tensões locais altas nos pontos de contacto da rugosidade da superfície dos dois corpos sólidos. Como conseqüência camadas de óxido podem desprender-se do material da superfície e a superfície metálica fica descoberta nestes locais. Estes locais metálicos lisos (especialmente ativados através da solicitação tribológica, por exemplo, a alta temperatura local e deformação plástica), reagem novamente com o meio ambiente e/ou forma-se um novo filme de óxido. Especialmente em casos nos quais o desgaste tribo-químico acontece dentro das camadas de reações, ele é mais reduzido do que o desgaste de adesão para o mesmo par de material /98/. Segundo

Habig, a oxidação tribológica participa no mecanismo de desgaste de atrito misto dos corpos deslizantes /97/. Uma alta tensão local sob uma solicitação de deslizamento pode ser evitada se a superfície é platafórmica.

Medidas para evitar a oxidação tribológica /97,100/:

1. lubrificação hidro-dinâmica;
2. redução da pressão nominal e
3. empregar materiais intermediários e meios ambientes não oxidantes.

Os mecanismos básicos de desgaste na prática, na maioria das vezes, aparecem em processos combinados, onde um mecanismo pode ser dominante ou causativo /97,100/. A resistência ao desgaste não pode ser descrita por um parâmetro característico do material, como a resistência à tração ou à dureza. A determinação da topografia da superfície mais propícia tem que se suceder em conexão com a escolha do material e a real solicitação de atrito, levando-se em consideração a influência do meio ambiente e especialmente agindo-se contra o esperado mecanismo de desgaste.

#### 4.2.3 Capacidade de deslizar

Segundo a norma DIN 50281 se entende por deslizar um movimento de dois corpos que se deslocam um em relação ao outro, nos quais suas velocidades superficiais apresenta uma diferença de grandeza ou direção. O movimento de deslizamento está em geral ligado com atrito de deslizamento /97/. Uma boa capacidade de deslizar exige um valor de atrito baixo. Isto acontece na região de atrito misto (fig. 4-2).

O coeficiente de atrito  $\mu$  depende principalmente de três fatores /98/:

1. combinação do material do par de atrito;
2. configuração construtiva do sistema de atrito (por exemplo: tipo de lubrificante, superfícies iniciais) e
3. condições de trabalho (por exemplo: velocidade de deslizamento, solicitação).

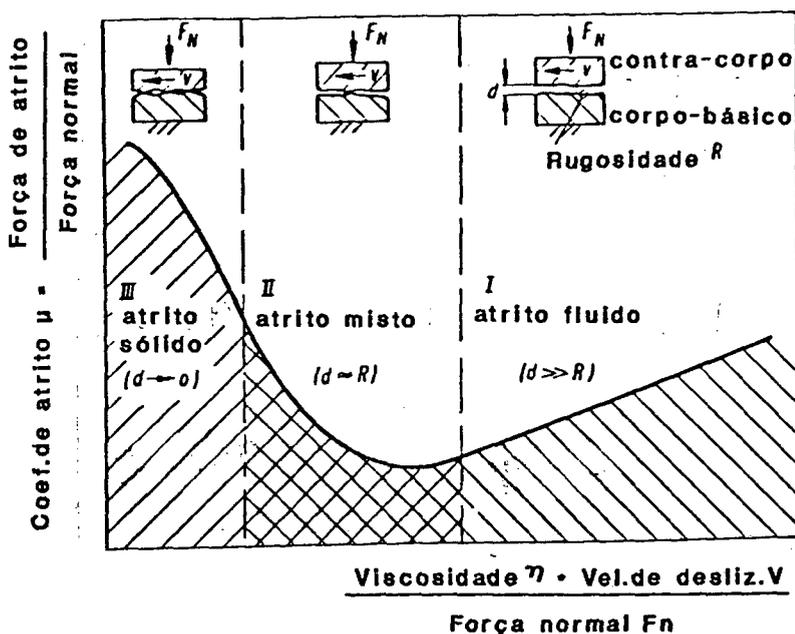


Figura 4-2: Curva do coeficiente de atrito /98/.

Na curva de atrito podem-se distinguir 3 regiões com diferentes estados de atrito. Entre dois elementos de guia parados, os quais estão ligados um ao outro sem separação do meio lubrificante, existe um estado de repouso, o assim chamado atrito de agarramento. Em pequenas velocidades de deslizamento não forma-se ainda um filme lubrificante completamente sustentador, tem-se ao mesmo tempo atrito de corpos sólidos e atrito fluido. Esta faixa de pequena velocidade de deslizamento está geralmente ligada a altos desgastes das superfícies deslizantes. Com o crescimento da velocidade atinge-se a região de atrito misto. Nesta região aparecem contactos insignificantes das irregularidades da superfície de ambos os corpos deslizantes e a força de atrito aqui medida se compõe de duas partes:

- uma parte consequente do contacto imediato das irregularidades das superfícies de ambos os corpos e
- uma outra parte é consequência do lubrificante entre ambos os corpos deslizantes. Esta componente é responsável pela ativação da força de sustentação do componente micro-hidro-dinâmico.

A terceira região é a de atrito fluido. Nesta região as áreas deslizantes estão completamente separadas uma da outra através do filme lubrificante.

Brendel mostra no seu trabalho, que para uma boa capacidade de deslizar é necessário a redução da penetração mútua de ambos os

pares deslizantes /92/. Isto é atingido através de superfícies platafórmicas e pequenos ângulos de inclinação das elevações (ângulo de encosta).

#### 4.2.4 Amortecimento do desgaste inicial

Traçando-se o valor de desgaste em função da duração de solici-tação ou em função do caminho de deslizamento, obtém-se uma curva como a esquematizada na figura 4-3 a).

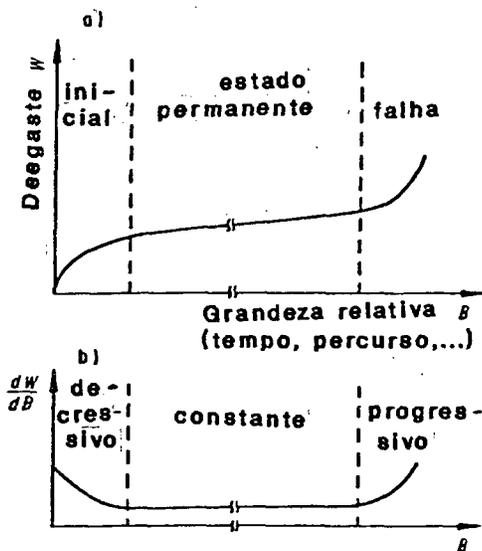
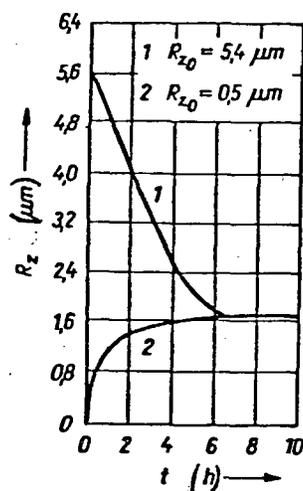


Figura 4-3: Curva da evolução do desgaste e sua derivada matemática.

Depois de um "desgaste inicial", o qual é limitado através de um mecanismo preponderante de abrasão e adesão, segue-se um período de estado permanente. O desgaste total atinge um valor crítico, seguindo-se um aumento progressivo do desgaste, o qual conduz o sistema tribológico à falha /97/. A inclinação desta curva, que é igual a sua derivada matemática, está reproduzida na parte b) da figura 4-3. Esta curva é qualificada de grandeza de medida relativa de desgaste ou ainda de taxa de desgaste e dá as mesmas informações que a curva a). A taxa de desgaste decresce durante a fase inicial, permanece então constante sob um longo período de tempo, até um progressivo aumento que avisa a falha /97,101/.

A rugosidade das superfícies tem um grande significado no período inicial de desgaste de ambas as superfícies deslizantes. Sob a condição de atrito misto e de corpo sólido, os dois corpos tocam-se em consequência de suas micro-geometrias em determinadas áreas de contacto ou pontos de contacto. Em função do contacto,

sob a influência de uma solicitação normal, a rugosidade modifica-se de forma que ambos parceiros deslizantes se adaptem um ao outro e entre eles apareça em dependência de solicitações uma correspondente rugosidade. A rugosidade que se forma pode ser maior como também menor do que a rugosidade inicial das superfícies usinadas. Segundo Hammer, forma-se basicamente em ambos os casos sob iguais condições o mesmo estado de equilíbrio (figura 4-4) /93/.



- ① Eixo de aço  
Aço St45, HRC 22-27  
 $\sigma_N = 3 \text{ MPa}$ ,  $v = 5 \text{ m/s}$
- ② Mancal de bronze

Figura 4-4: Fase de desgaste inicial para diferentes rugosidades iniciais /100/.

O comportamento do desgaste inicial é tanto mais propício quanto menor for a região de picos de rugosidade.

#### 4.2.5 Capacidade de suportar carga

Por causa da rugosidade sempre presente nas superfícies, o "corpo-básico" e o "contra-corpo" tocam-se apenas em micro áreas de contacto (área verdadeira de contacto), cuja soma constitui apenas uma pequena parte da área de contacto geométrica/97/. As solicitações mecânicas entre os corpos deslizantes é transmitida pelas micro-áreas de contacto, as quais são uma função do tempo.

Habig descreve, como é possível, indicar determinados limites sobre as tensões admissíveis dos materiais através das suas durezas /101/. "Um primeiro limite superior é dado pelo fato de a peça, a qual está sujeita a desgaste, não dever sofrer deformação plástica quando em repouso. Esta tensão relativa estimada, segundo

a hipótese da tensão de cisalhamento ou da tensão relativa, deve ficar abaixo do limite de escoamento do material empregado, onde é usado adicionalmente um fator de segurança no cálculo. Devido ao fato que o limite de escoamento em geral aumenta com a dureza do material, a capacidade de suportar carga estática é maior em materiais mais duros. Desgaste aparece apenas quando a peça solicitada movimenta-se em relação a outra. Com isto o atrito conduz a uma elevação da resistência do material. Além da exigência de se evitar a deformação plástica da peça solicitada, o volume de desgaste não deve ultrapassar, com freqüência, um valor limite admissível, e com isto não coloca a capacidade de funcionamento do sistema tribológico em questão em perigo."

Esta "elevação da resistência do material" ou melhoramento da capacidade de suportar carga é atingido depois da fase de desgaste inicial /116/.

O desgaste diminui drasticamente, quando os grãos abrasivos visivelmente não estiverem mais na situação de penetrar no material, o que é o caso quando o material da superfície é mais duro que o material abrasivo. Disto também se esclarece o comportamento do desgaste, em posição elevada e baixa, de um material em função da dureza do material abrasivo /97/.

Em materiais duros, em geral é iniciado um processo de microquebras, ao se ultrapassar o limite de elasticidade, devido principalmente por se ter associada uma pequena tenacidade à elevada dureza. Componentes no material, que apesar da alta dureza ainda apresentarem uma determinada ductilidade, atuam por esta razão positivamente. Segundo Föhl, o comportamento propício dos aços-ligas à base de manganês é atribuído a ductilidade da austenita e a alta dureza da martensita que surge através da deformação. O mesmo vale para aços com resíduos de austenita. Tanto a matriz tenaz como também a alta porcentagem de carbonetos duros podem contribuir para a diminuição do desgaste em alguns tipos de ligas de aço fundido /97/.

Segundo Beckmann os aços com um percentual de austenita remanescente (aço carbono com percentual de carbono  $> 0,8\%$ , assim como aços de alta liga de cromo e manganês e ferro fundido depois de um tratamento térmico correspondente) para elevadas solicitações de atrito apresentam a já mencionada formação de martensita por

atrito, com evidente aumento da dureza da superfície, mantendo a mesma tenacidade /116/.

Segundo Noppen /3/ é exigido uma dureza mínima de 50 HRC para uma SDL.

A capacidade de suportar carga pode ser melhorada, no que diz respeito às propriedades geométricas, aumentando-se a área verdadeira de contacto. Isto também pode ser atingido através de superfícies platafórmicas com picos de rugosidades arredondados. Quanto mais pontiagudas as elevações da rugosidade são, tanto maior é a sua penetração na superfície do par oposto. Isto pode ser explicado através da comparação entre o teste de dureza Vickers e Knoop. Através do diamante Knoop um volume menor é mais deformado do que aquele do diamante Vickers, tal que a profundidade de penetração no teste de dureza Knoop é evidentemente menor que no teste de dureza Vickers, quando se utiliza a mesma força de teste. Como consequência se tem um valor de dureza Knoop maior /101/. A razão para isto é que o diamante Vickers é mais pontiagudo (ângulo entre as faces dos lados opostos do prisma  $136^\circ$ ) que o diamante Knoop (ângulo entre as faces  $172,5^\circ$  e  $130^\circ$ ).

#### 4.2.6 Capacidade de reter o lubrificante

Sob a capacidade de lubrificar, é entendida a propriedade do material lubrificante formar camadas de moléculas orientadas, as quais reduzem a resistência ao deslizamento e ao mesmo tempo mantêm-se firmemente presas à superfície do metal /96/.

Através da lubrificação é possível, diminuir o desgaste da peça. A lubrificação pode conduzir a uma redução do atrito e da perda de energia por atrito. Na curva de Striebeck (veja fig. 4-2), o coeficiente de atrito  $\mu$  é traçado em função de uma combinação de grandezas que sobretudo são caracterizadas através da viscosidade do material lubrificante, da velocidade de deslizamento e da força normal /101/. Nesta curva foi considerado que o sistema de deslizamento é constituído de um "corpo básico" e de um "contra-corpo" com rugosidades das superfícies mensuráveis e um material lubrificante fluido. Se a soma da rugosidade  $R_t$  do corpo-básico e do contra-corpo é menor que a espessura do lubrificante, predomina um atrito fluido puro, o qual é designado de lubrificação hidro-

dinâmica. Este estado de lubrificação pode ser atingido apenas quando a combinação dos parâmetros viscosidade, velocidade de deslizamento e força normal atinge valores suficientemente altos. Além disto a estrutura construtiva e a disposição do corpo-básico e do contra-corpo permitam a formação de uma cunha do material lubrificante que se estreita na direção das linhas de fluxo do lubrificante, com isto pode se formar uma pressão no filme lubrificante a qual reage contra as forças externas aplicadas. Diminuindo-se a espessura do filme lubrificante, com a diminuição da velocidade de deslizamento ou o aumento da força normal, tal que este atinja a profundidade de rugosidade total ( $R_t$ ) do corpo-básico e do contra-corpo, a solicitação então apenas é suportada em parte pelo filme lubrificante. Uma outra parte é transmitida diretamente através do contacto das elevações da rugosidade dos corpos deslizantes. Temos então além do atrito fluido o atrito do corpo sólido (atrito misto). Desaparecendo o percentual de suporte hidrodinâmico com a diminuição do valor da combinação de parâmetros (viscosidade, velocidade de deslizamento e força normal) chega-se assim à região específica de atrito de corpos sólidos. Para o atrito de corpos sólidos, a viscosidade do material lubrificante não tem significado, porém moléculas do material lubrificante absorvidas exercem, ainda um efeito de diminuição do atrito e do desgaste /101/.

A viscosidade do material lubrificante, conforme o descrito acima, tem então uma influência sobre o coeficiente de atrito e a região do tipo de atrito (atrito sólido, atrito misto ou atrito fluido) e em consequência disto sobre o desgaste e o tipo de desgaste.

Segundo Kragelski a capacidade de lubrificação não depende apenas da viscosidade do material lubrificante. A capacidade de lubrificação depende também de quanto tempo o filme lubrificante encontra-se sobre a superfície, assim também como da composição química do material lubrificante /99/.

Como material lubrificante são utilizados sobretudo os óleos minerais, isto porque eles têm a necessária adesão às superfícies dos corpos de contacto e devido a viscosidade apropriada não são expulsas das fendas entre o par deslizante /97/.

Para se influenciar o comportamento do material lubrificante em determinados aspectos, são adicionados, ao óleo mineral, aditivos especiais, que asseguram um melhoramento da capacidade de lubrificação, da resistência do filme, um melhoramento do comportamento de atrito e desgaste o que leva a uma diminuição do processo de oxidação /96/.

Conforme o exposto aqui neste tópico a capacidade de reter o lubrificante, ou seja a capacidade de lubrificar, é função não só da viscosidade do material lubrificante e das condições de operação, mas também da topografia das superfícies. A influência da topografia das superfícies é explicitamente verificada na curva do coeficiente de atrito (figura 4-2), como foi aqui explicado. Não é objetivo deste trabalho estudar a influência do tipo de lubrificante, ou dimensionar elementos de máquinas. O objetivo aqui neste item é caracterizar a melhor topografia da superfície que atende à exigência "capacidade de reter o lubrificante". É dentro deste contexto que se pode concluir, segundo Bodschwinn, que uma SDL deve apresentar um grande percentual de ranhuras para recepção do lubrificante e além disto a superfície deve ser platafórmica /104/.

#### 4.2.7 Dissipação de calor e temperatura de contacto

No deslizamento relativo entre dois corpos é gerada uma determinada quantidade de calor como consequência da ação do atrito e da deformação dos materiais. A elevação da temperatura pode conduzir ao amolecimento e à fundição localizada do material. O calor dissipa-se dos pontos de geração de calor para dentro de ambos os corpos, onde a distribuição das isothermas depende das propriedades termo-físicas dos corpos bem como de sua micro-geometria nas posições de contacto. A intensidade da corrente térmica depende do trabalho de atrito e da dimensão da área, sob a qual ela foi gerada /99/. Segundo Kragelski o campo de temperatura, o qual espalha-se da superfície para dentro do material, conduz a uma mudança das propriedades mecânicas do material em uma camada fina da superfície.

Habig mostra a partir do trabalho de Blok e Jaeger, que a elevação da temperatura das micro regiões de contacto aumenta com uma

potência da dureza Vickers do material do corpo de contacto mais mole, o que pode ser explicado pelo fato de que com durezas crescentes, a dimensão da micro área de contacto diminui. A micro-área de contacto é formada através da deformação plástica dos picos de rugosidade, tal que sob a pré-condição de um trabalho de atrito constante, a densidade de energia de atrito aumenta em cada área de micro-contacto com o aumento da dureza de um dos corpos do par em atrito /101/.

Desta afirmação de Habig, pode-se concluir que sob condições tribológicas iguais (mesmos corpos de atrito, mesmo estado de lubrificação, mesma solicitação, etc.) a elevação de temperatura, decorrente do atrito, diminui com o aumento da região de micro contacto.

De acordo com as formulações matemáticas, estabelecidas por Carslaw, no começo do século, e reestudadas por Jaeger, a condução de calor gerado por uma fonte pontual em um corpo sólido semi-infinito e com superfície adiabática gera, no corpo, isotermas na forma de calotas semi-esféricas, com a fonte de calor ocupando o centro da calota. Se mantivermos a idéia da superfície adiabática e mudando o corpo para um cone, com a fonte de calor no vértice do cone e mantendo as características do material em análise iguais a do corpo semi-infinito, teremos que, para a mesma carga térmica, a temperatura no cone, a uma certa distância do vértice (numa superfície isotérmica) após um determinado tempo da aplicação da quantidade de calor será maior pela razão da diminuição do volume do cone, até a isotérmica em questão, em relação ao volume do corpo semi-infinito, contido no mesmo raio isotérmico. Isto significa, que quanto mais agudos forem os picos de rugosidade, tanto maior será a temperatura nas regiões de contacto.

Podemos concluir que, para uma melhor dissipação de calor, superfícies com características de rugosidade platafórmica levam a melhores resultados (temperaturas de contacto menores) que quando se tem uma característica de rugosidade com pontas pronunciadas.

### 4.3 Exigências microgeométricas e fatores de avaliação

As propriedades exigidas ( resistência ao desgaste, amortecimento do desgaste inicial, capacidade de deslizar, capacidade de reter o lubrificante, capacidade de suportar carga, condutibilidade térmica) para a função de uma SDL não podem ser observadas independentemente uma da outra. A capacidade de deslizar resulta de um atrito pequeno. O atrito não pode todavia ser separado do desgaste. Quanto maior for o atrito, tanto maior é o desgaste. Também o processo de desgaste inicial (amortecimento) é um desgaste elevado ao iniciar o funcionamento. Disto resulta que a geometria ótima da superfície para as exigências "resistência ao desgaste, capacidade de deslizar e amortecimento do desgaste inicial" tem uma forte semelhança.

A capacidade de suportar carga é influenciada pela dureza, que pode ser obtida por um tratamento de têmpera ou pelo encruamento da superfície. A dissipação do calor como mostrado no sub-capítulo 4.2.7 também é função da dureza, uma vez que, se a dureza do material de um dos corpos de contacto aumenta, a dimensão da micro-área de contacto diminui e com isto a pressão local se torna maior, gerando uma maior quantidade de calor que modifica a distribuição térmica nos corpos. Isto quer dizer que as microgeometrias ideais, se correspondem para uma superfície que satisfaz às propriedades exigidas "capacidade de suportar carga e dissipação de calor". Estas duas propriedades são tanto melhor preenchidas quanto maior for a área de contacto e quanto maior for o raio de arredondamento dos picos da rugosidade. O desgaste é influenciado pela condução térmica, pois o calor que é gerado através do processo de deslizamento, pode modificar as propriedades da superfície quando ele não é dissipado.

As propriedades exigidas para uma superfície técnica e o seu relacionamento mútuo deve ser analisados através da descrição das exigências microgeométricas ao tipo do perfil de uma SDL. A figura 4-5 apresenta uma perfil típico de uma SDL.

As exigências micro-geométricas serão descritas, como segue, através dos seguintes fatores de avaliação:

- 1°. desvios geométricos;
- 2°. tipo do perfil;

- 3°. dependência da direção;
- 4°. ângulos
- 5°. reentrâncias ou vales e
- 6°. elevações ou picos.

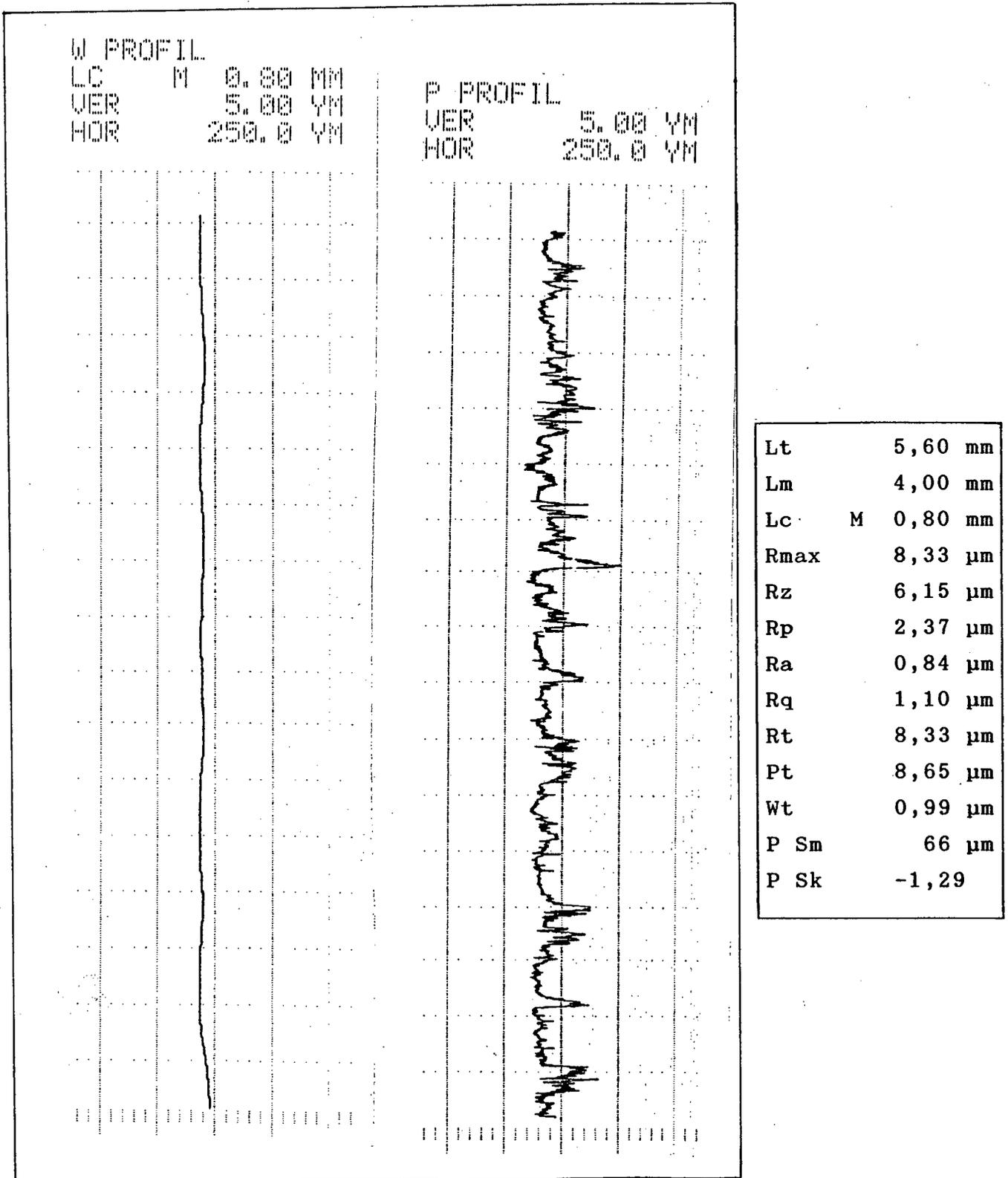


Figura 4-5: Tipo de perfil para uma SDL.

### 4.3.1 Desvios geométricos

Os desvios geométricos são definidos como sendo os desvios verticais e horizontais de uma superfície real para uma superfície geométrica. Os desvios verticais são as amplitudes com as quais os desvios ocorrem e os horizontais são os períodos. Na figura 4-6 estão apresentados os desvios geométricos: vertical através da letra A e o horizontal através de P.

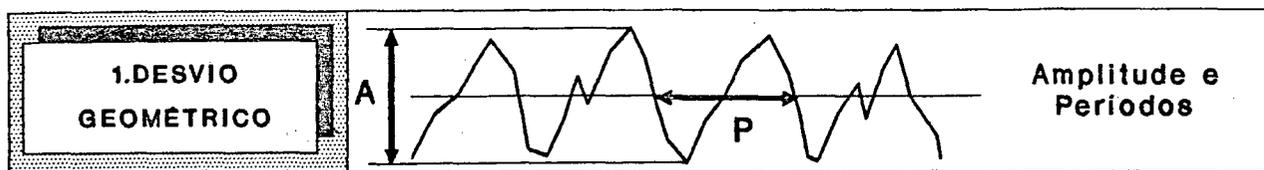


Figura 4-6: Desvios geométricos horizontal e vertical.

Existem diversas formas de interpretação dos desvios geométricos, sendo que o resultado destas interpretações expressam idéias diferentes que muitas vezes não são comparáveis entre si. Os diferentes parâmetros que podem quantitativamente caracterizar P e A estão apresentados respectivamente na tabela II e III dos anexos. Uma comparação entre estes parâmetros segundo o tipo de informação que cada um deles expressa sobre as superfícies, será feita no capítulo 6.

Os parâmetros de amplitude e período fornecem informações sobre a grandeza dos desvios de forma de  $2^a$ ,  $3^a$  e  $4^a$  ordens.

Em decorrência de ainda hoje haver uma difusão relativamente pequena de equipamentos capazes de medir os parâmetros dos desvios geométricos, na prática é usual a classificação dos desvios geométricos em por exemplo: muito grande, grande, pequeno e muito pequeno. Quando se dispõe de um padrão comparativo é possível fazer uma avaliação manual/visual da superfície. A norma DIN/ISO 1 302 divide os desvios geométricos através dos valores do desvio médio aritmético da rugosidade  $R_a$  em 12 classes, que podem com um certo treino ser identificados por tato com a unha ou com a ponta do dedo /102/.

Uma proposta para reduzir a dificuldade e subjetividade de interpretação visual/manual dos adjetivos acima citados é de se limitar os desvios geométricos em:

- "muito pequeno" às classes de superfície N1, N2 e N3 com  $Ra < 0,1\mu\text{m}$ ;
- "pequeno" às classes de superfície N4, N5 e N6 ( $0,1\mu\text{m} < Ra < 1,0\mu\text{m}$ );
- "grande" às classes de superfície N7, N8 e N9 ( $1,0\mu\text{m} < Ra < 10\mu\text{m}$ ) e
- "muito grande" às classes N10, N11 e N12 ( $Ra > 10\mu\text{m}$ ).

Uma SDL exige um desvio geométrico pequeno. É conhecido que para uma SDL um  $Ra$  entre  $0,1\mu\text{m}$  e  $1,0\mu\text{m}$  ( $0,4\mu\text{m} < Rz < 11\mu\text{m}$ ) tem mostrado o mais propício efeito de amortecimento do desgaste inicial, o mais propício micro-desgaste permanente durante a solicitação de funcionamento e o mais propício valor de atrito total. Um valor da rugosidade  $Ra$  menor que  $0,04\mu\text{m}$  deve ser evitado na prática pois com pequena rugosidade aumenta a dificuldade de se formar um filme lubrificante e o contacto metálico pode levar à adesão danificando a superfície /3,9,91,94/.

#### 4.3.2 Tipo do perfil

A observação dos desvios geométricos através de parâmetros verticais e horizontais não fornece informações sobre o tipo de perfil (como evoluem os desvios de 2ª, 3ª e 4ª ordem do perfil), e ainda se o perfil é aleatório, periódico e/ou platafórmico. Estas informações são muito importantes para o preenchimento das diferentes funções e precisam ser obtidas através dos parâmetros que fazem afirmações sobre a forma do perfil. Os parâmetros, que podem fornecer este tipo de informação, estão apresentados na tabela IV dos anexos e serão discutidos no capítulo 6. A figura 4-7 mostra exemplos dos diferentes tipos de perfis (das diferentes evoluções dos perfis).

Uma SDL exige uma superfície platafórmica por causa das propriedades exigidas "capacidade de suportar carga", "resistência ao desgaste", "capacidade de deslizar" e "capacidade de amortecer o desgaste inicial". A propriedade exigida "condutibilidade térmica" requer uma grande área de contacto, o que é também satis-

feita por um perfil platafórmico. O terceiro tipo de perfil (platafórmico, veja figura 4-7) é o mais apropriado para uma SDL.

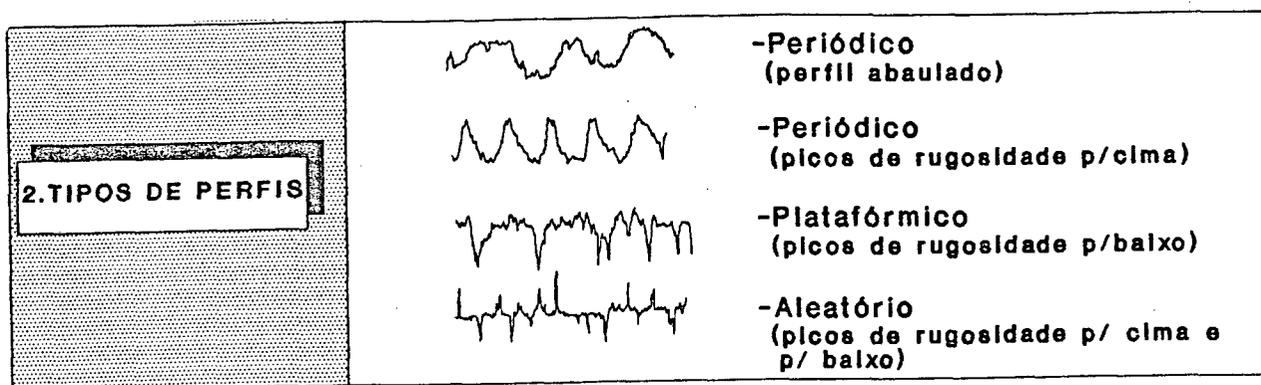


Figura 4-7: Tipos de perfis /56/.

#### 4.3.3 Dependência da direção

Cada tipo de função exige uma textura superficial diferente. Para uma superfície de vedação como no caso de flanges por exemplo, os sulcos devem ser perpendiculares à direção de possível fuga. Já para uma SDL foi verificado, por exemplo, que o comportamento do desgaste é mais propício quando a direção dos sulcos é paralela em relação à direção de deslizamento, devido a um melhor poder de reter o lubrificante /3/. Para um perfeito desempenho da função da superfície é portanto também fundamental a verificação da direção dos sulcos e não apenas ter-se um valor adequado de rugosidade.

Os acabamentos superficiais podem ser classificados em dependentes e independentes da direção de medição. As superfícies dependentes são aquelas nas quais os desvios (micro-geométricos de forma), à superfície de referência correspondente, são iguais apenas em direções de medições paralelas. As superfícies independentes são aquelas nas quais os desvios, à superfície de referência correspondente, são distribuídos sem regras, ou seja em uma amostra suficientemente grande são averiguados desvios iguais, independente da direção de medição /2/. Um exemplo de superfície dependente e independente em relação a direção de medição é dado na figura 4-8.

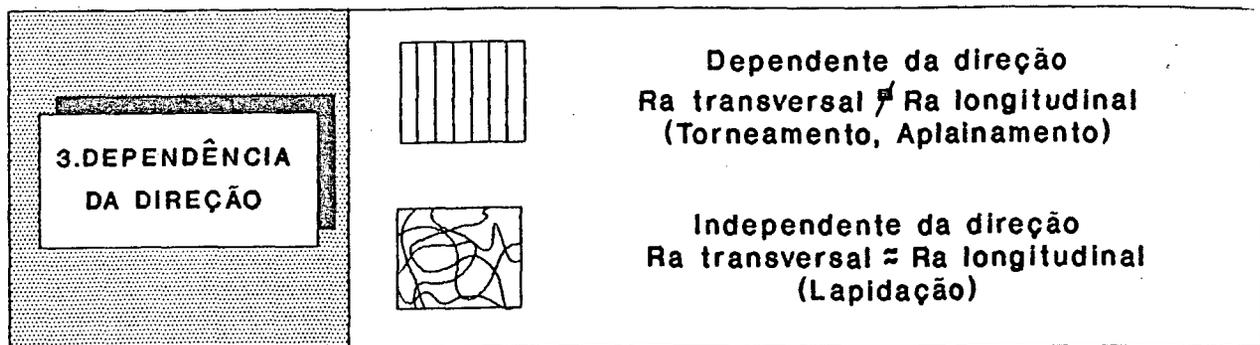


Figura 4-8: Superfície dependente e independente com relação a direção de medição.

A dependência de direção de medição está intimamente ligada com a textura da superfície /103/. As superfícies de sulcos ordenados, como por exemplo as superfícies torneadas, aplainadas ou fresadas são dependentes em relação a direção de medição. A rugosidade longitudinal e a transversal (aos sulcos) podem ser imensamente diferentes.

Uma apreciação qualitativa da dependência da direção é possível através da observação da textura da superfície. As superfícies de sulcos ordenados, B1 até B7 segundo a norma DIN 4761 ou = , $\perp$  , X, C, M e R/segundo a DIN ISO 1 302, são dependentes. As superfícies de sulcos desordenados B8 e B9 e as que não têm sulcos como por exemplo as superfícies jateadas são independentes da direção de medição. As designações B1 até B9 estão esclarecidas na tabela I dos anexos.

Os métodos de medição de rugosidade convencionais não fornecem informações satisfatórias sobre a dependência da rugosidade com a direção de medição, principalmente para as superfícies dependentes onde não se podem manter as mesmas condições de medição (comprimento de medição  $l_m$  e frequência de corte) sem que haja distorção das medidas. Com os métodos da função de autocorrelação e correlação transversa é possível se determinar quantitativamente a dependência da direção (como será mostrado no capítulo 7), /25,26/.

#### 4.3.4 Ângulos

A análise de um registro de rugosidade mostra que este pode ser aproximado por segmentos de retas que formam ângulos entre si. O ângulo de inclinação das elevações (ângulo de flanco), o ângulo de abertura das reentrâncias e o ângulo dos picos das elevações são os ângulos mais importantes que são encontrados na literatura sobre superfícies técnicas, figura 4-9.

Os ângulos de abertura e de pico são matematicamente definidos segundo as equações (20) e (21), (veja parâmetros n° 23 e 24, tabela IV dos anexos). Os ângulos de picos são calculados na região das elevações do perfil e os de aberturas na região de reentrâncias do perfil. De especial significado para uma SDL é o ângulo de inclinação das encostas das elevações, também conhecidos como ângulo de inclinação ou declive. Este ângulo é de grande influência na formação da cunha de lubrificante.

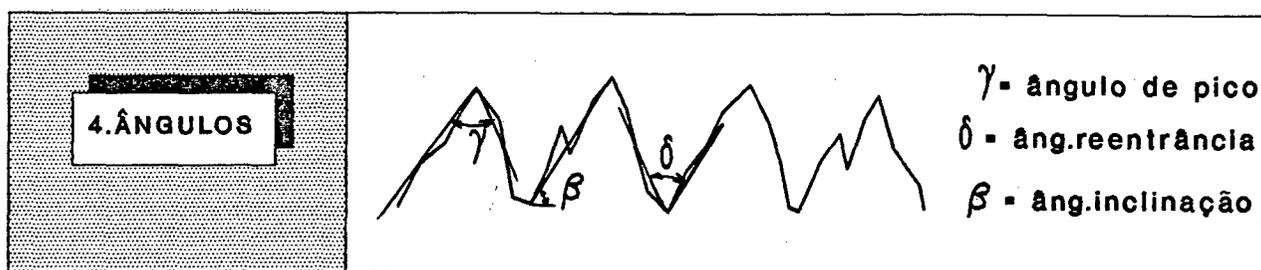


Figura 4-9: Ângulo de inclinação das elevações das reentrâncias e de picos das elevações.

O ângulo de declive foi aqui calculado através do valor médio de  $\beta$ , na região central do perfil ( equação (22), tabela IV dos anexos).

Segundo Bodschwinn /91/, os ângulos de inclinação de diferentes superfícies usinadas raramente ultrapassam  $12^\circ$  e para uma cunha lubrificante ótima eles devem ficar entre  $1$  e  $3^\circ$ .

#### 4.3.5 Reentrâncias

As reentrâncias (como fendas profundas ou depressões) da superfície para dentro do material não são observadas pelos parâmetros

usuais da superfície. Diferentes superfícies usinadas com caracter platafórmico e valor de Rz aproximadamente iguais podem ter diferentes profundidades de reentrâncias /104/. As reentrâncias ou a região de reentrância do perfil está apresentado na figura 4-10 e pode, por exemplo, ser quantitativamente determinado pelo parâmetro  $Rvk$ .

Reentrâncias são de fundamental importância para uma SDL. Esta superfície deve ter fendas profundas e depressões para reter o lubrificante.

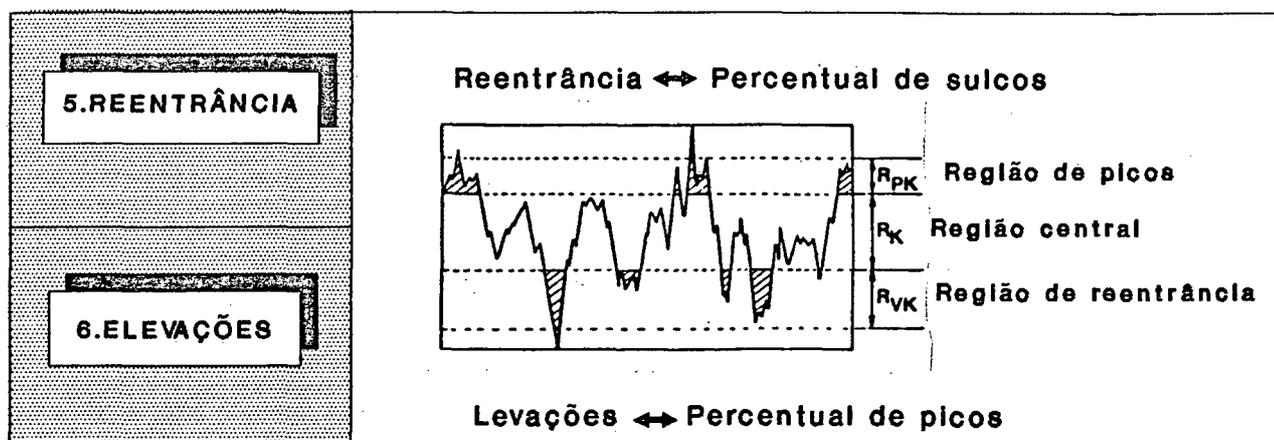


Figura 4-10: Região de picos, central (ou de núcleo) e de reentrâncias do perfil.

#### 4.3.6 Elevações

Da mesma forma como as reentrâncias, as elevações também não podem ser observadas pelos parâmetros usuais das superfícies. Elevações pontiagudas ou arredondadas dão à superfície diferentes propriedades que podem ser boas ou más para uma determinada função. As elevações ou a região dos picos do perfil também estão apresentada na figura 4-10.

Em relação à capacidade de suportar carga e à condutibilidade térmica, o preenchimento de uma SDL é tanto melhor quanto mais arredondadas forem as elevações da superfície.

A ligação entre "função" e "exigências" à uma SDL estão em resumo apresentadas nas figuras 4-11 e 4-12. A superfície ideal para uma SDL resulta de cada propriedade exigida, através da

superposição das exigências microgeométricas que atendem estas propriedades (figura 4-12).



Figura 4-11: Ligação entre função e exigências ao preenchimento da função SDL.

DESCRIÇÃO DA MICROGEOMETRIA DE UMA SDL ATRAVÉS DE:						
	1. Desvio geométrico	2. Tipo de perfil	3. Dependência da direção	4. Ângulo	5. Reentrância	6. Elevação
EXIGÊNCIAS A UMA SDL						
RESISTÊNCIA AO DESGASTE	$0,1 < Ra < 1,0$					
AMORTECIMENTO AO DESGASTE INICIAL		perfil platafórmico				pequena região de picos
CAPACIDADE DE DESLIZAR				pequeno ângulo de declive		
CAPACIDADE DE RETER O LUBRIFICANTE			superfície dependente (textura transversal à direção de deslizamento)		fendas profundas, depressões (reservatórios de lubrificante)	
CAPACIDADE DE SUPORTAR CARGA		perfil platafórmico				picos arredondados
DISSIPACÃO DE CALOR		grande área de contacto				picos arredondados
SUPERF. IDEAL	$0,1 < Ra < 1,0$	superfície platafórmica com grande área de contacto	superfície dependente da direção	pequeno ângulo de declive	grande região de reentrância	pequena região de elevações, com picos arredondados

Figura 4-12: Descrição de uma superfície ideal para a função SDL.

## 5. AVERIGUAÇÃO DO COMPLEXO DE INFLUÊNCIAS DA USINAGEM SOBRE UMA SUPERFÍCIE TÉCNICA

Como uma superfície deve ser, para preencher sua função, foi esclarecido no capítulo 4, através de um exemplo para a SDL. A descrição qualitativa desta superfície ideal, a partir de suas propriedades exigidas, foi apresentada naquele capítulo através de seis fatores de avaliação:

1. desvio geométrico;
2. tipo de perfil;
3. dependência da direção;
4. ângulos;
5. reentrâncias e
6. elevações.

Esta nova abordagem para descrição das superfícies técnicas através dos seis fatores será, neste capítulo, analisada do ponto de vista da fabricação. Aqui será verificado como o complexo de influências da usinagem pode influenciar estes seis fatores de avaliação, de modo a estabelecer uma correspondência entre os mesmos. Esta verificação será feita com base nos resultados qualitativos e quantitativos de ensaios de usinagem encontrados na literatura /105,106,107,108,109,111,129,130/. Os resultados aqui apresentados serão, na sua grande maioria, qualitativos e têm como objetivo estabelecer quais parâmetros de usinagem influenciam cada um dos fatores de avaliação. O complexo geral de influências da usinagem, sobre a qualidade superficial de uma peça, está apresentado na figura 5-1.

Segundo König as condições de corte e a geometria da ferramenta são os principais fatores de influência na qualidade da superfície /105/.

Os parâmetros de usinagem, os quais influenciam essencialmente a superfície nos seis fatores de avaliação, estão neste trabalho resumidamente apresentados nas figuras 5-2 e 5-3, para os processos de usinagem de torneamento e retificação e serão esclarecidos a seguir.

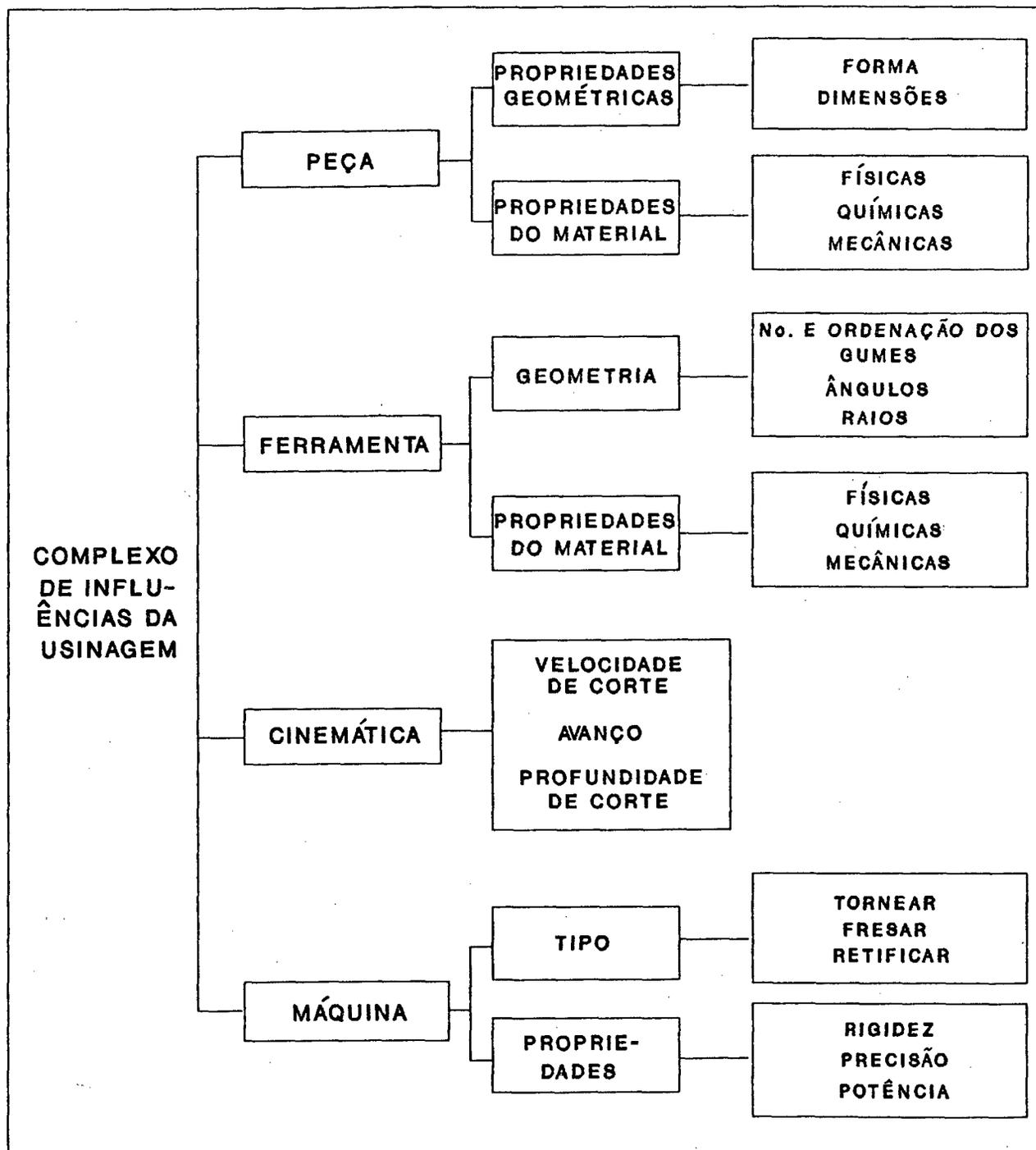


Figura 5-1: Complexo de influências da usinagem

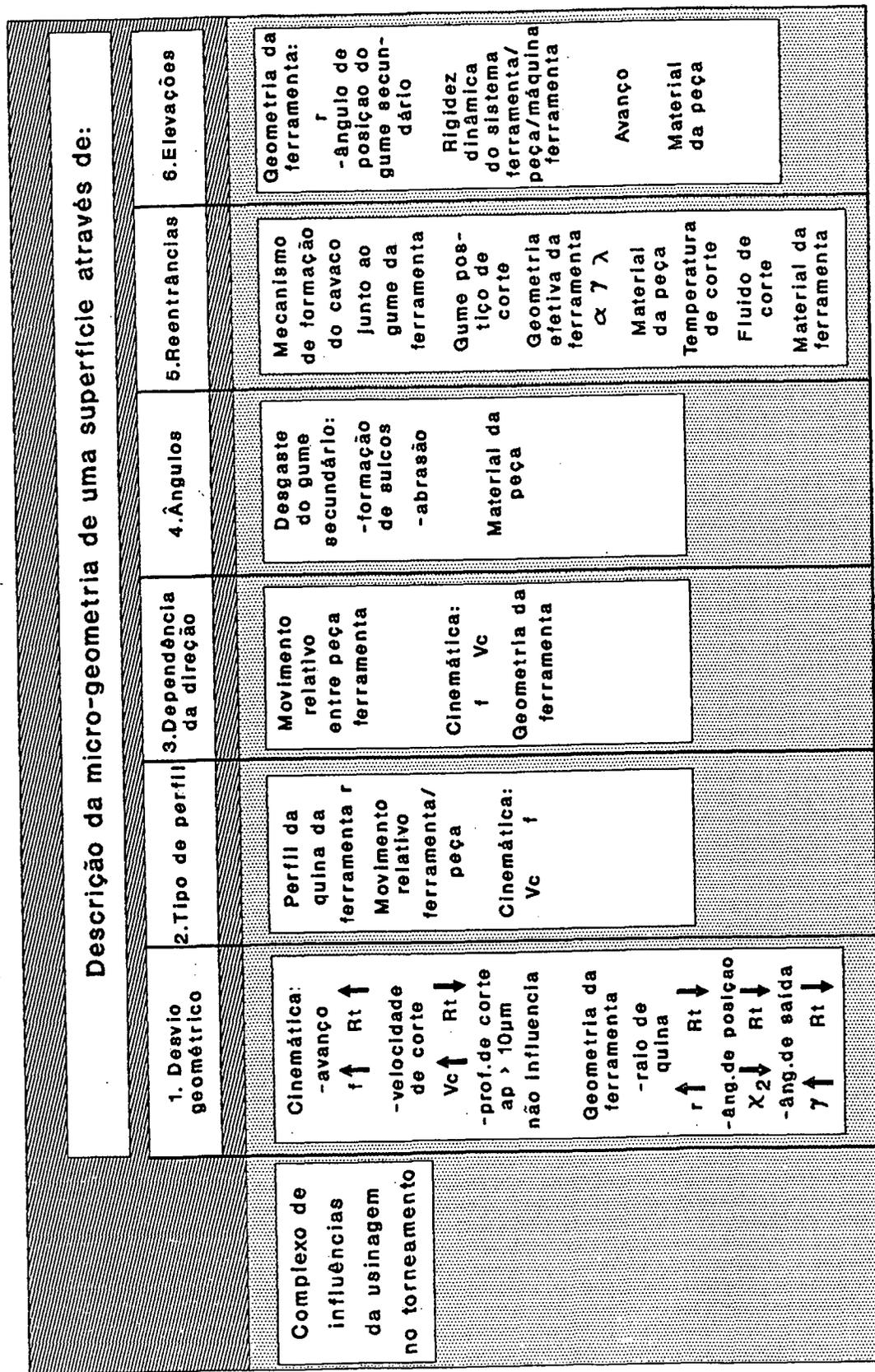


Figura 5-2: Fatores de influência do grau de acabamento de uma superfície torneada

Descrição da micro-geometria de uma superfície através de:					
1. Desvio geométrico	2. Tipo de perfil	3. Dependência da direção	4. Ângulos	5. Reentrâncias	6. Elevações
<p>Complexo de influências da usinagem na retificação</p> <p>Geometria da ferramenta: -granulometria fina ↑ Ra ↓</p> <p>Cinemática (relacionada com a taxa de retificação Q')</p> <p>-velocidade de corte Vs ↑ Rt ↓</p> <p>-Penetração de corte ae ↑ Rt ↓</p> <p>-Velocidade de avanço Vfr ↑ Rt ↑</p>	<p>Geometria da ferramenta: -tipo do processo de dressamento -granulometria</p> <p>-rugosidade efetiva do rebolo Rte</p> <p>Cinemática</p>	<p>Movimento relativo entre rebolo e peça</p> <p>-retificação de topo</p> <p>-retificação cilíndrica</p> <p>-granulometria (distância dos sulcos)</p> <p>Cinemática: Vf Vs</p>	<p>Geometria da ferramenta: -rugosidade efetiva do rebolo -granulometria</p> <p>Cinemática (relação de rotação entre rebolo e peça)</p>	<p>Geometria da ferramenta: -granulometria (posicionamento do grão em pé)</p> <p>Mecanismo de formação do cavaco junto ao grão abrasivo)</p> <p>Material da peça</p> <p>Fluido de corte</p> <p>Temperatura de corte</p>	<p>Geometria da ferramenta: -granulometria (posicionamento do grão deitado)</p> <p>Quina do grão abrasivo afiada ou cega</p> <p>Cinemática Vs</p> <p>Material da peça</p>

Figura 6-3: Fatores de influência do grau de acabamento de uma superfície retificada

## 5.1 Peça

O fator de influência "peça" pode ser dividido em dois tipos de influência: influência devido as propriedades de forma e influência do material, figura 5-1. As propriedades de forma (forma e dimensões de uma peça) não têm nenhuma influência direta sobre o acabamento superficial. A forma e dimensões de uma peça influenciam a precisão de forma (desvio de 1<sup>a</sup>. ordem), que não é objetivo dos experimentos deste trabalho, mas que tem um grande significado para o preenchimento da função de uma SDL, como foi mostrado no capítulo 4, sendo um pré-requisito para a análise de superfície.

As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais têm uma grande influência sobre os processos de deformação e separação na usinagem. Elas são em parte responsáveis pelos vales e picos da superfície resultantes do processo de formação do cavaco, em consequência sua influência na região de reentrância e elevação. Esta influência pode ser medida através das áreas A1 e A2 da curva de Abbott (ver parâmetro n° 30 da tabela V nos anexos). O aspecto da curva de Abbott muda com o tipo de perfil, como é mostrado nos perfis teóricos, figura 6-8. Nos perfis reais das superfícies o aspecto da curva de Abbott muda com os diferentes processos de fabricação. As áreas A1 e A2 mudam, entre outros parâmetros de influência, com o tipo de material. Esta influência pode ser verificada tanto no torneamento quanto na retificação, figuras 5-2 e 5-3 na coluna 5.Reentrância e 6.Elevação.

König mostra que o tipo de cavaco, obtido na usinagem com ferramenta de corte de geometria definida, depende do grau de deformação (fator de recalque) com que o mesmo foi obtido. Para materiais dúteis, cavacos obtidos com grau de deformação pequeno se apresentam na forma de fita. A medida que aumentamos o fator de recalque, pela diminuição do ângulo de saída ou pelo aumento do avanço, passamos a ter um cavaco com lamelas pronunciadas ou até cavacos cisalhados /105/, porém a formação do cavaco é também influenciada pela ductilidade, tenacidade e resistência ou seja pela estrutura do material. König apresenta no diagrama tensões X deformações os diversos tipos de cavacos: cavacos contínuos, cavacos em forma de lamelas, cavacos cisalhados e cavacos arrancados. Os cavacos arrancados, por exemplo, normalmente ocorrem na usinagem de materiais frágeis com estrutura irregular, como em alguns fer-

ros fundidos. Eles são arrancados da superfície da peça que é danificada por microlascamentos /105/. Tendo portanto o material da peça influência sobre a região de reentrância da superfície.

A usinagem provoca mudanças na camada limite tais como deformações plásticas, micro-trincas, mudanças de fase, de dureza. Estas mudanças estão ligadas à formação do gume postiço, como também à distribuição de tensões residuais introduzidas pela usinagem /8/. Esta influência pode ser observada essencialmente nos desvios de forma de 5<sup>a</sup>. e 6<sup>a</sup>. ordem.

Para materiais dúteis que tendem à formação de gume postiço em baixa velocidade de corte, podemos observar que em consequência do mecanismo cíclico de formação do gume postiço, onde uma parte deste é expulsa pela interface flanco - superfície usinada, obtemos uma piora na qualidade superficial decorrente de um aumento da velocidade de desgaste da ferramenta de corte e do incrustamento das partículas do gume postiço na superfície da peça /105, 129/.

## 5.2 Ferramenta

A influência da ferramenta deixa-se mostrar através de sua geometria e das propriedades do seu material. A forma do perfil de uma superfície é determinada através da geometria da ferramenta. O número e ordenação dos gumes junto com as condições de corte (cinemática) determinam o tipo de textura da superfície e se o tipo de perfil é periódico ou aleatório. Na usinagem com ferramentas de corte de geometria não definida (ferramentas de abrasão) a expressão "número e ordenação de gumes" pode ser correlacionada com a granulometria.

No processo de torneamento e aplainamento o raio da quina da ferramenta influencia essencialmente o acabamento superficial a ser atingido. Quanto maior for o raio da quina, tanto menor é a rugosidade ( $R_t$ ), que pode ser aproximada através da equação /105/:

$$R_{t_{th}} \approx f^2 / (8 * r) \quad (5.1)$$

onde:

$f$  = avanço

$r$  = raio da quina da ferramenta e

$Rt_{th}$  = altura total teórica da rugosidade.

Com validade no intervalo de avanço de:

$$f \leq 2 \cdot r \cdot \cos \chi \quad (5.2)$$

A pressão sobre a quina da ferramenta torna-se também menor, quanto maior for o raio da quina e com isto diminui o desgaste da quina. Existe para o raio da quina da ferramenta um valor ótimo. Se o raio é muito pequeno a quina da ferramenta pode quebrar (há aqui uma influência direta sobre  $Rt$ ). Se o raio é grande demais, o gume secundário atrita sobre a superfície já usinada da peça e causa um desgaste maior no flanco secundário /108/, assim como um aumento das vibrações que pode causar ondulações na superfície da peça. Para ferramentas de aço rápido e metal duro na usinagem de aço é usual empregar-se um raio de quina entre 0,4 e 2 mm /105/.

FORÇA PASSIVA.

#### Ângulos no Torneamento

A influência dos ângulos da ferramenta, como será explicado a seguir, se faz notar no desvio geométrico e nas reentrâncias da superfície (colunas 1 e 5 da figura 5-2).

O ângulo de saída e o ângulo de posição são os ângulos da ferramenta que têm a maior influência sobre o acabamento superficial /105/.

Com avanço constante e profundidade de corte constante, a largura do cavaco  $b$  aumenta para ângulos de posição menores. Com isto diminui a força por unidade de comprimento do gume, tal que o ângulo de posição pequeno é usado especialmente na usinagem de materiais com alta resistência para assim manter a sollicitação e o desgaste da ferramenta pequenos. Por outro lado a força passiva aumenta para ângulos de posição menores e com isto aumenta o perigo de, em função do crescimento da instabilidade do processo de usinagem, aparecer vibrações que prejudicam o acabamento superficial, tendo-se valores de rugosidade  $Rt$  maiores para pequenos ângulos de posição  $\chi$ . O ângulo de posição, na usinagem de aço, na prática tem um valor entre  $10^\circ$  e  $100^\circ$  /105/. No entanto para a usinagem de ultra-precisão, o ângulo de posição do gume secundário  $\chi_2$  assume valores em torno de  $1^\circ$  e não havendo instabilidade do processo a rugosidade  $Rt$  diminui com  $\chi_2$ , como indicado na coluna 1 da figura 5-2.

O ângulo de inclinação tem também uma influência na direção de escoamento do cavaco. Um ângulo de inclinação negativo pode fazer com que o cavaco seja desviado para cima da superfície da peça e com isto prejudicar o acabamento superficial /105/. Um grande ângulo de inclinação negativo aumenta a força passiva que exige uma estabilidade perpendicular ao eixo principal da máquina ferramenta.

O ângulo de saída é responsável pela deformação e separação do material na usinagem. Quanto maior o ângulo de saída, tanto menor são: o trabalho de deformação e de separação; a pressão sobre a quina da ferramenta e da face; a temperatura de corte; a força de corte e a força de avanço; tal que uma clara diminuição do desgaste é atingido. Em consequência da diminuição do trabalho de deformação e separação o mecanismo de formação de cavaco é mais contínuo, não introduzindo vibrações na ferramenta e consequentemente a rugosidade na peça se aproxima mais à rugosidade teórica  $R_{tth}$  (esta influência se dá diretamente na região de reentrância da superfície, coluna 5 da figura 5-2). Um ângulo de saída demasiadamente positivo diminui a resistência da cunha, permitindo novamente o aparecimento de vibrações ou a quebra da mesma. A estabilidade do gume é elevada com ângulo de saída negativo, o que é necessário por exemplo no aplainamento e na usinagem de peças com furos ou rasgos, laminadas e fundidas, onde a ferramenta está sujeita a choques mecânicos. Um ângulo de saída negativo leva, em condições de usinagem iguais, a maiores forças do que um ângulo de saída positivo. Para se manter este acréscimo de força pequeno e garantir uma boa fluência do cavaco é introduzido com frequência um ângulo de chanfro de saída negativo (chegando até a  $-25^\circ$ ), enquanto que o ângulo de saída principal mantém um valor positivo. A largura da área do chanfro é escolhida cerca de 0,5 até 1 vez o avanço /106/.

O ângulo de flanco tem uma essencial influência no desgaste do flanco. Se o ângulo de flanco é grande, segundo Könnig /105/, a cunha cortante torna-se mais fraca por duas razões: 1°) o congestionamento de calor que pode surgir na ferramenta tem como consequência a perda de dureza da ferramenta e 2°) a diminuição da resistência da cunha eleva o perigo de quebra da mesma. Se o ângulo de flanco for diminuído a variação da marca de desgaste de flanco aumenta rapidamente, diminuindo a vida útil da ferramenta de

cutte. Como tanto o aumento como a diminuição demasiados do ângulo de flanco prejudicam o resultado de trabalho, deve-se otimizar o mesmo para cada par material peça - material ferramenta. Os valores usuais de  $\alpha$  se situam entre  $4^\circ$  e  $6^\circ$  na usinagem dos aços.

A geometria efetiva da ferramenta de corte (ângulo de flanco, ângulo de saída e ângulo de inclinação) influencia, por causa da sua influência direta sobre a formação do cavaco, a rugosidade de processo (região de reentrância da superfície, como indicado na coluna 5 da figura 5-2).

O ângulo de quina assume normalmente um valor entre  $45^\circ$  e  $120^\circ$ . Ângulos de quina grande reduzem a pressão na quina da ferramenta e com isto também o desgaste da quina da ferramenta. Assim como o raio da quina da ferramenta, o ângulo da quina não deve ser tão grande a ponto de fazer o gume secundário atritar a superfície usinada da peça. O ângulo de quina é limitada através da posição do gume principal prefixada e o ângulo entre o gume secundário com a direção do avanço. Quanto menor for o ângulo de quina, tanto menor é, em consequência da concentração de calor, a vida da ferramenta /105,108/.

Na retificação influencia-se o acabamento superficial pela variação da granulometria e do grau de recobrimento no dressamento /106/. Esta influência é mais forte quanto maior a taxa de retificação.

Com o aumento do tamanho de grão diminuimos o número de gumes atuantes. Isto leva a um aumento da espessura de usinagem. A qualidade superficial obtenível fica pior, no entanto o volume usinado específico aumenta. Em decorrência disto, emprega-se granulometria grande para o desbaste e pequena para o acabamento. Esta designação mostra que a comparação do tamanho de grão deve ser sempre feita em relação a uma taxa de retificação específica. Com isto cada tamanho de grão possui uma certa faixa de utilização. Se empregamos um rebolo com granulometria fina para o desbaste com uma taxa de retificação específica grande, ela levaria a um resultado de trabalho com uma rugosidade maior do que com um rebolo com granulometria grande, que resiste facilmente aos esforços de usinagem. Por outro lado, um rebolo de granulometria grande pode ser empregado para a retificação de acabamento. Durante pequenos intervalos de tempo, até é possível se obter boas qualidades super-

ficiais, principalmente quando a rugosidade efetiva do rebolo é diminuída pelo processo de dressamento /107/.

Num teste de longa duração de retificação com rebolos de granulometria diferente verifica-se que independentemente das condições iniciais de dressamento a rugosidade obtida tende para um certo valor para cada rebolo. Pode-se afirmar que rebolos com abrasivo de granulometria fina tendem a uma rugosidade de estabilidade menor que a de rebolos com abrasivos de granulometria grosseira /107/.

Os materiais das ferramentas determinam o grau de afiação que pode ser obtido no gume. Além disto, para a usinagem de um certo material da peça, teremos mecanismos de desgaste típicos para cada material de ferramenta. Estes dois fatos se refletem diretamente sobre a qualidade superficial inicial e final da peça ao longo da vida da ferramenta. Segundo Vieregge /108/, os materiais da ferramenta estão submetidos durante seu trabalho a diferentes e muito altas solicitações e com isto eles precisam, para manter o desgaste pequeno e evitar as trincas e quebras, dispor de especiais propriedades, tais como:

1. dureza e resistência à compressão;
2. resistência a flexão e tenacidade;
3. resistência de gume;
4. resistência interna de ligação;
5. resistência a quente;
7. resistência a oxidação
8. pequena tendência para difusão e caldeamento
9. resistência a abrasão.

Também a condutividade térmica, calor específico e expansão térmica, devem ser apropriados para o caso de aplicação específica.

Não é possível se reunir o ótimo de todas as propriedades, que em parte são opostas, em um material de ferramenta /105,108/. Os principais grupos dos materiais para ferramenta segundo a sua resistência ao desgaste são citados na seguinte ordem:

- aço carbono;
- aços ferramenta;

- aços rápidos;
- stellite;
- metal duro;
- cerâmica de corte;
- nitreto de boro cúbico e
- diamante.

### 5.3 Cinemática

#### 5.3.1 Velocidade de corte

No torneamento, quando a máquina ferramenta trabalha com acoplamento entre a rotação do fuso e a rotação da árvore, o aumento da velocidade de corte ( $V_c$ ) através do aumento da rotação " $n$ " da peça significa também um aumento da velocidade de avanço ( $V_f$ ).

Em máquinas ferramentas de controle numérico programa-se a velocidade de avanço como uma grandeza independente. Quando a rotação da peça " $n$ " é aumentada e a velocidade de avanço " $V_f$ " permanece constante, o avanço " $f$ " diminui. Com isto as distâncias entre as ranhuras e as profundidades (desvios geométricos  $A$  e  $P$ , ou seja a rugosidade cinemática) diminuem, porque elas são diretamente dependentes do avanço " $f$ " (veja fórmula 5.1).

A rugosidade, na direção da velocidade de corte, denominada rugosidade de processo, é muito influenciada pela variação da velocidade de corte. Em velocidades de corte quase estáticas a adesão do cavaco sobre a face da ferramenta leva a um movimento intermitente do cavaco sobre a mesma. Como consequência temos uma dinâmica elevada de formação de cavaco. Com o aumento da velocidade de corte, temos uma diminuição da dinâmica deste mecanismo. Em altas velocidades de corte, a dinâmica de formação de cavacos tem pouco significado sobre a rugosidade. A dinâmica (variação das forças de usinagem) se reflete, em consequência da deflexão do sistema ferramenta, peça, máquina ferramenta, sobre a rugosidade de processo. Além disto, para uma certa faixa de velocidade de corte  $V_c$  temos a formação de gume postiço, que se reflete na forma de escamas na superfície da peça.

A velocidade de corte é o fator de maior influência na determina a temperatura na ferramenta e tem através disto uma influência sobre o desgaste da mesma. As causas do desgaste da ferramenta como cisalhamento de caldeamento, oxidação, deformação plástica e processos de difusão são uma função da temperatura (velocidade de corte/avanço) /105,108/.

O desgaste da ferramenta influencia tanto a rugosidade cinemática (desvios geométricos A e P, figura 4-6 e coluna 1 da figura 5-2) como também a rugosidade de processo (reentrâncias e saliências, colunas 5 e 6 da figura 5-2). A rugosidade cinemática é influenciada através da modificação do perfil da quina e/ou do gume secundário da ferramenta. A rugosidade de processo é influenciada através do desgaste de quina e do flanco da ferramenta. O desgaste do gume principal, em decorrência das condições geométricas no torneamento, não tem nenhuma influência sobre a qualidade superficial /105/.

Na retificação, a velocidade de corte tem uma grande influência sobre a amplitude da rugosidade da peça. Esta influência é tanto maior quanto maior for a taxa de retificação. Uma velocidade de retificação ( $V_s$ ) leva a uma diminuição da rugosidade ( $R_t$ ) da peça (coluna 1 da figura 5-3), desde que, com o aumento da velocidade de corte  $V_s$ , não aumentem as amplitudes de vibração do rebolo e com isto se anule o efeito de melhora da rugosidade decorrente da diminuição da espessura do cavaco. Para pequenas taxas de retificação, a influência da velocidade de retificação ( $V_s$ ) sobre o acabamento superficial da peça é menor /106/.

### 5.3.2 Avanço

No torneamento, o avanço tem uma influência direta sobre as distâncias entre as ranhuras (P) e sobre o parâmetro  $R_t$ . Como mostra a figura 5-4, quanto maior for o avanço maior é a rugosidade  $R_t$ .

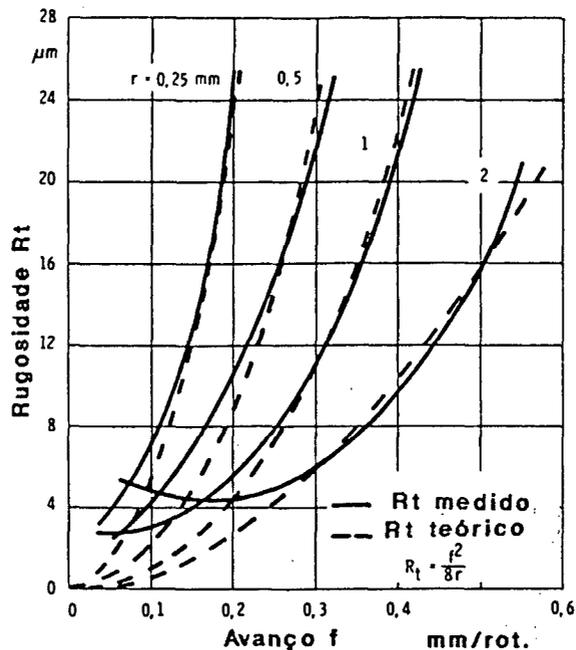


Figura 5-4: Valor atingido e medido de  $R_t$  para diferentes avanços e raios de ponta, segundo Moll e Brammertz /105/.

O avanço também influencia tanto a rugosidade cinemática, como mostra a figura 5-4, como também a rugosidade de processo por causa de sua influência sobre o desgaste da ferramenta (desgaste da quina e do flanco) /108/.

O desvio médio aritmético de rugosidade " $R_a$ " aumenta com o tempo de corte  $t$  para diferentes avanços. Quanto maior o avanço é, tanto mais acentuadamente cresce  $R_a$  em função do tempo de corte. O aumento da rugosidade com o tempo de corte é atribuído à formação de sulcos na região do gume secundário. A queda da rugosidade que muitas vezes pode ser observada logo no início de utilização de uma ferramenta nova pode ser atribuída a fenômenos de estabilização de gume.

Na retificação o acabamento superficial da peça piora com penetrações maiores na superfície de trabalho ( $a_e$ ), como também com o aumento da velocidade de avanço /107/.

### 5.3.3 Profundidade de corte

No torneamento, a profundidade de corte não tem influência no acabamento superficial quando  $a_p > a_{p\text{min}}$ . Este valor mínimo da

profundidade de corte ( $a_{pmin}$ ) está na faixa de 4 a 10  $\mu\text{m}$ , dependendo do grau de afiação do gume /105/.

Na retificação, a influência da profundidade de corte sobre o acabamento superficial é muito mais marcante do que no torneamento. Para uma determinada rugosidade efetiva, a rugosidade da peça é maior para profundidades de corte ( $a_e$ ) maiores. Quanto maior for a rugosidade efetiva, tanto maior é a influência da profundidade de corte ( $a_e$ ) /106/.

#### 5.4 Máquina ferramenta

O tipo de máquina ferramenta tem uma forte influência sobre o acabamento superficial de uma peça. As diferentes máquinas ferramentas (por exemplo torno e retificadora) empregam diferentes tipos de ferramentas, as quais apresentam movimentos relativos diferentes com a peça, durante sua usinagem, e as quais têm diferentes números e ordenação de gumes. Com isto a textura da superfície, a qual é produzida com diferentes máquinas ferramentas ou processos de fabricação, é característica destas máquinas ferramentas ou destes processos de fabricação. A dependência da direção (coluna 3 nas figuras 5-2 e 5-3) depende do movimento relativo peça X ferramenta e depende também do tipo da ferramenta que varia com o tipo de máquina ferramenta/processo de fabricação.

O tipo de perfil apresentado por uma superfície também depende do tipo da máquina ferramenta e sua ferramenta. Um perfil periódico pode ser mais esperado do processo de fabricação de torneamento do que do de retificação.

A rugosidade cinemática (desvios geométricos A e P) de superfícies usinadas por uma plaina ou uma politriz, é de uma ordem de grandeza muito diferente. Segundo a norma DIN 4766 os valores de  $R_a$  para processos de aplainamento ficam entre 0,2 e 50  $\mu\text{m}$  e para polimento entre 0,006 e 0,05  $\mu\text{m}$  /110/. Quanto aos desvios P, que são os períodos (as distâncias entre os picos das ranhuras), apesar de não se ter na literatura valores tabelados, esta diferença é bem mais marcante pois para o aplainamento o valor de P é dado pelo avanço transversal da ferramenta e para o polimento P assume valores aleatórios.

Os diferentes ângulos e os percentuais de reentrância e elevação, os quais surgem nas superfícies usinadas, decorrentes do emprego de diferentes máquinas ferramentas ou processos de fabricação, são diferentes por causa das diferentes ações das ferramentas destas máquinas.

Diferentes máquinas ferramentas de um mesmo processo de fabricação influenciam os desvios geométricos com a sua rigidez e precisão. A rigidez da máquina pode ser dividida em estática, dinâmica e térmica /111/, figura 5-5.

TIPO DE RIGIDEZ	CAUSA	EFEITO
ESTÁTICA	FORÇA CONSTANTE	FLEXÃO DO SISTEMA MÁQUINA/PEÇA/FERRAMENTA NA REGIÃO ELÁSTICA
DINÂMICA	FORÇA DE SOLICITAÇÃO	VIBRAÇÃO NO SISTEMA MÁQUINA/PEÇA/FERRAMENTA
TÉRMICA	ATRITO	AQUECIMENTO DO SISTEMA MÁQUINA/PEÇA/FERRAMENTA COM SUBSEQÜENTE DILATAÇÃO

Figura 5-5: Observação da rigidez

A rigidez estática e térmica influenciam a precisão de forma da peça, ao passo que o acabamento superficial é influenciado pela rigidez dinâmica.

Se tivermos vibrações regenerativas superpostas ao processo de corte, então, segundo Vieregge, teremos uma diminuição da vida da ferramenta e uma piora do acabamento superficial /108/. O efeito da vibração regenerativa pode ser prevenido através de máquinas e ferramentas rígidas e pesadas, através de uma melhor fixação da ferramenta, do uso de lunetas bem como também através de ferramentas especiais com vários gumes com os quais as componentes radiais da força de usinagem se anulam e nenhum momento de flexão é provocado. As vibrações regenerativas podem ser eliminadas através da diminuição da seção efetiva de corte e da velocidade de corte. Vibrações sobrepostas no entanto também podem trazer vantagens quando as frequências e amplitudes estiverem sincronizadas com as

condições de corte. Assim Kondratov e Barmann atingiram uma vida da ferramenta mais longa no torneamento com aço rápido quanto maior era a frequência sobreposta. Na aplicação do metal duro foram atingidos melhores resultados para frequências mais baixas. Optiz e seus colaboradores mostraram que alterações periódicas da espessura do cavaco diminuem o desgaste de cratera, mas aumentam o desgaste de flanco.

A máquina ferramenta deve produzir a peça na precisão de medida e forma exigida assim como com um determinado acabamento superficial. Isto é possível quando a ferramenta é conduzida perante a peça com precisão suficiente durante seu movimento de corte. A precisão da máquina ferramenta é influenciada por /111/:

1. montagem e fundamentos, em especial a eficiência do isolamento contra as influências de perturbação, como forças, abalos e variações de temperatura;
2. precisão de fabricação da máquina ferramenta, isto é a precisão com a qual os elementos de guia foram fabricados e montados;
3. precisão de trabalho, isto é, comportamento de precisão durante o funcionamento sob efeito das forças de usinagem e movimentos e
4. comportamento do desgaste, isto é o comportamento da precisão sob um longo intervalo de tempo.

O acabamento superficial de uma peça é influenciado pela precisão de trabalho da máquina (o 3° tipo de influência). Os outros tipos de influência (1°, 2° e 4°) têm um efeito sob a precisão de forma e medida da peça.

Uma alta precisão da máquina ferramenta pode ser obtida, se a máquina tem uma alta medida de rigidez em todas as áreas de trabalho /111/.

### Fluido de corte

Além da escolha da ferramenta, a escolha do fluido de corte é também de grande significado, pois as propriedades físicas e químicas (biológicas) do fluido de corte influenciam o processo de usinagem em proporções decisivas.

Durante a usinagem a ferramenta sofre uma intensa solicitação mecânica e térmica. A energia mecânica na zona de cisalhamento e atrito são quase que totalmente transformadas em calor /105/.

A conseqüência destas solicitações são: o desgaste de adesão, caracterizado pelo cizalhamento de partículas caldeadas, em baixa velocidade de corte; o desgaste de abrasão, em toda faixa de velocidade de corte; assim como também os processos de difusão e oxidação, os quais só têm relevância a partir de determinadas temperaturas.

Os fluidos de corte têm importantes funções na usinagem:

- aumentar a vida da ferramenta de corte e
- melhorar o acabamento superficial.

Isto é possível através dos efeitos:

- condução de calor para fora da cunha e
- diminuição de atrito.

A influência da composição do fluido de corte deixa-se notar através do seu efeito sobre o tipo de desgaste, principalmente na rugosidade de processo (coluna 5 das figuras 5-2 e 5-3) /105,107/.

Com o fluido de corte pode-se em primeira linha influenciar o desgaste de adesão, o qual surge através da variação periódica do gume postiço, em uma determinada faixa de velocidade /105/. No torneamento de aço com ferramentas de aço rápido é observada uma forte tendência para formação de gumes postiços. Na usinagem de aço com ferramentas de metal duro, o perigo é menor e com ferramentas cerâmicas quase não se forma gume postiço de corte /106/.

Na usinagem com corte interrompido, o aparecimento de partículas caldeadas por compressão, na faixa de velocidade de corte baixa, deixa-se combater efetivamente através de lubrificação.

A flutuação do gume postiço em baixas velocidades de corte permite que o fluido de corte penetre nas zonas de contacto. Em velocidades de corte crescentes - em área decrescente de formação de gume postiço - a penetração do fluido de corte nas zonas de contacto torna-se muito difícil. Ao mesmo tempo, o aumento da temperatura conduz a deformação plástica da ferramenta e ao processo de difusão. Um resfriamento da região local de corte torna-se então necessário /105/.

Na retificação, a grande quantidade de calor, a qual é gerada na usinagem, conduz a uma sollicitação térmica considerável da peça e da ferramenta /107/. A aplicação de um fluido de corte é quase sempre necessária, porque o espaçamento entre cavaco e ferramenta, em termos comparativos, é pequeno e para manter uma contínua capacidade de corte dos gumes o empastamento do rebolo deve ser evitado.

É possível aumentar a produtividade no processo de retificação pela lubrificação. Como se trata de um processo de corte interrompido continuamente, o fluido lubrificante entre grãos ativos e peça é renovado. Com isto temos uma diminuição do coeficiente de atrito entre peça e ferramenta, o que tem como consequência direta uma diminuição da temperatura de contacto entre ferramenta e peça. Disto resulta que o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação plástica e não escoia lateralmente, permitindo que os cavacos iniciem sua formação para uma menor penetração inicial do gume abrasivo. A aplicação de um fluido de corte não lubrificante, como as emulsões ou soluções aquosas também reduz a temperatura na região de usinagem, porém não com tanta eficiência como os óleos com aditivos de extrema pressão /107/.

Podemos resumir que o fluido de corte tem as seguintes funções:

- a redução do atrito entre os grãos abrasivos do rebolo e a peça, assim como entre o aglomerante e a peça através da formação de um filme lubrificante estável;
- a refrigeração da superfície da peça através da absorção e do transporte de calor;
- a limpeza e conservação do rebolo e
- a proteção da máquina e do material da peça contra corrosão.

## 6. DEDUÇÃO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA SUPERFÍCIES TÉCNICAS

Uma descrição matemática precisa de uma superfície técnica só é possível com um número muito grande de parâmetros, isto porque ela é uma função aleatória no campo dos reais ( $R^{**3}$ ). Esta descrição não teria muita aplicação prática. O objetivo deste trabalho não é esta descrição matemática precisa, mas sim uma descrição da superfície sob consideração do maior número possível informações com um número mínimo de parâmetros.

A caracterização de uma superfície técnica através de um único parâmetro é muito difícil, porque os fatores de avaliação (1. desvio geométrico, 2. tipo de perfil, 3. dependência da direção, 4. ângulos, 5. reentrâncias e 6. elevações) têm diferentes caracteres e/ou unidades.

O grande número de parâmetros da superfície, que atualmente são obtidos na medição prática, resultam de diferentes tipos de ensaios, dos quais os mais importantes são mostrados na figura 6-1.

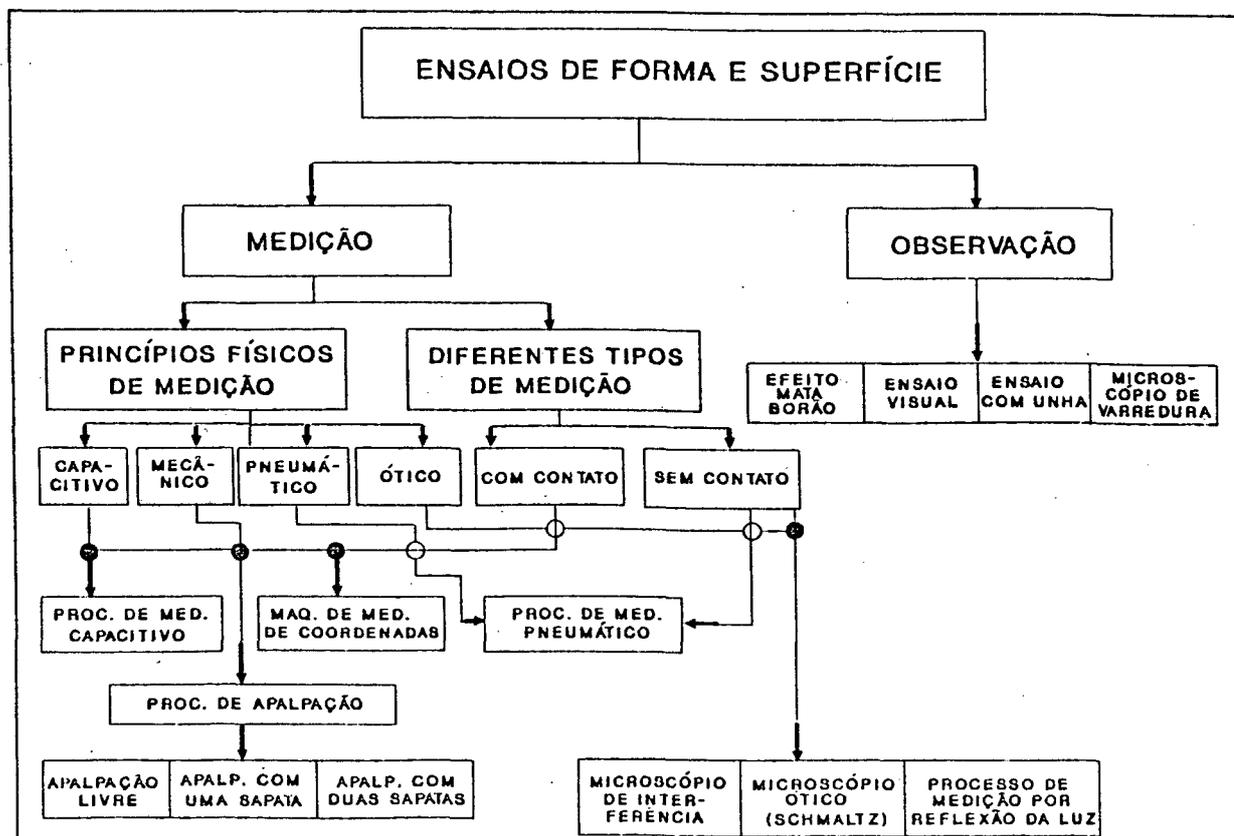


Figura 6-1: Ensaios de forma e de superfície

## 6.1 Informações dos parâmetros da superfície técnica

Os parâmetros da superfície técnica deixam-se dividir em dois grupos: qualitativo e quantitativo. O único fator de avaliação qualitativo da superfície técnica, o qual está presente nas normas internacionais, é a textura da superfície. A textura da superfície é examinada a olho nu e compreende a classificação das características da superfície, no que diz respeito à ordenação de suas ranhuras ou sulcos /102,103/.

A textura da superfície ou o carácter da superfície é subclassificado em superfícies com sulcos e sem sulcos. As superfícies que são fabricadas pelos processos de usinagem, são superfícies com sulcos e estas serão aqui consideradas. A subdivisão das superfícies com sulcos está apresenrada na tabela I dos anexos e as designações segundo a norma DIN 4761 e a internacional DIN/ISO 1302 estão justapostas.

Na DIN 4761 as diferentes texturas das superfícies têm uma divisão mais fina, figura 6-2.

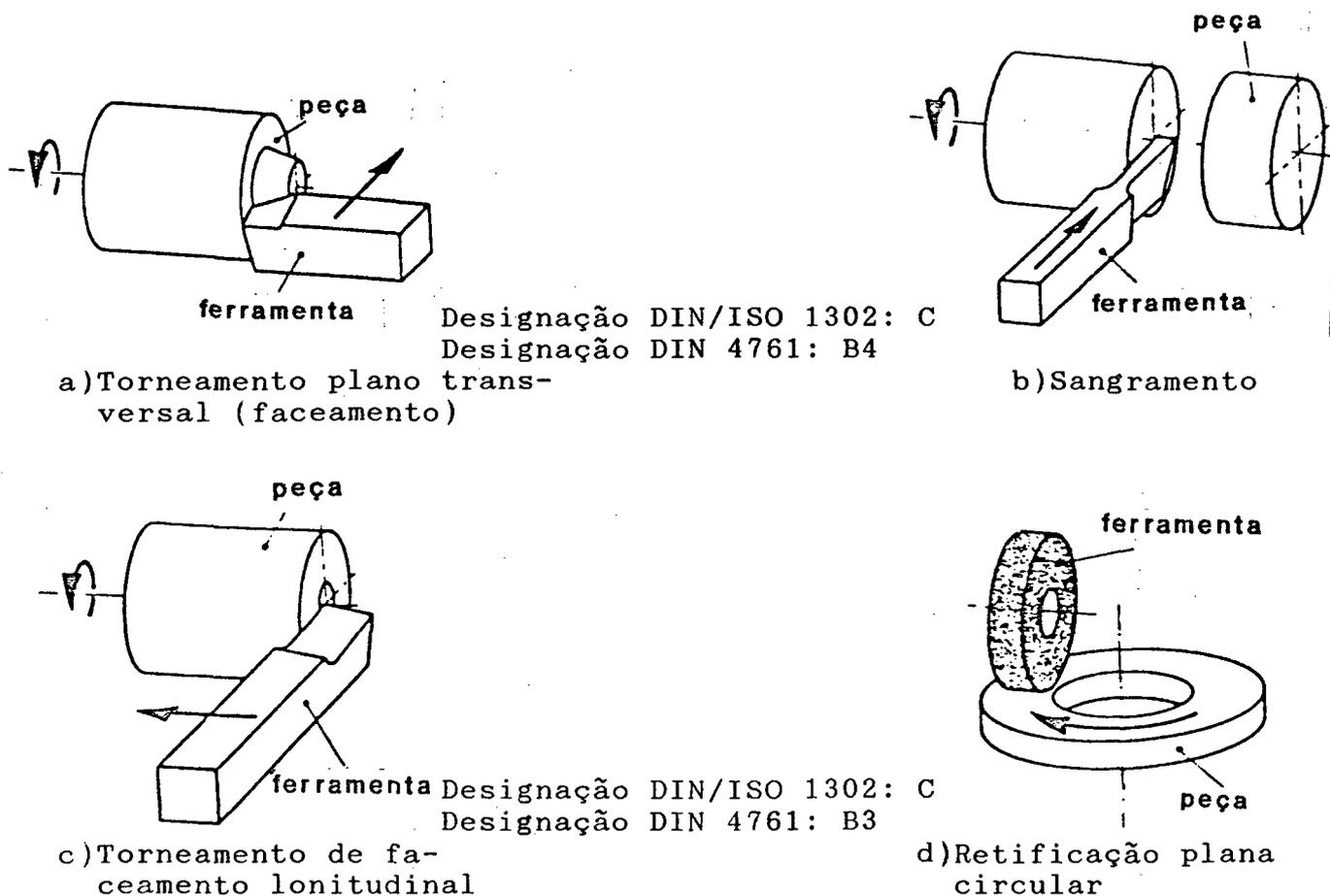


Figura 6-2: Exemplo de superfícies com sulcos em forma de círculo e em forma espiral.

Neste trabalho é proposto que a letra "D" seja adicionalmente introduzida para designar a textura da superfície com sulcos desigualmente distanciados. Assim é que, por exemplo, o processo de serrar fornece uma textura do tipo B1D (superfícies com sulcos retos, paralelos com distância entre sulcos desiguais). Este tipo de textura de superfície pode também apresentar-se nos processos de torneamento longitudinal, aplainamento e retificação com avanços manuais.

Aqui também são propostas as letras "R" e "P" para sulcos de forma circulares radiais e paralelos. Seguindo-se esta proposição, as superfícies em forma de sulcos circulares têm a sub-divisão "B3R" (por exemplo, para retificação de topo ou fresamento de topo com movimento de avanço circular e o eixo da ferramenta inclinado em relação à superfície a ser usinada) e "B3P" (para fresamento de topo com movimentos de avanço em linha reta e eixo da ferramenta inclinado em relação a superfície a ser usinada). Da mesma forma as superfícies com sulcos que se cortam e têm a designação geral B2, passam a ter as seguintes designações: "B2D" superfície com sulcos que se cortam e têm distância entre sulcos desiguais, como no brunimento; "B2P" para os sulcos circulares paralelos que se cortam, como no fresamento de topo ou retificação de topo com o eixo da ferramenta perpendicular à superfície usinada e movimento de avanço em linha reta); e "B2R" para sulcos circulares radiais que se cortam que é o caso do fresamento ou retificação de topo, com o eixo da ferramenta perpendicular à superfície a ser usinada e movimento de avanço circular, figura 6-3.

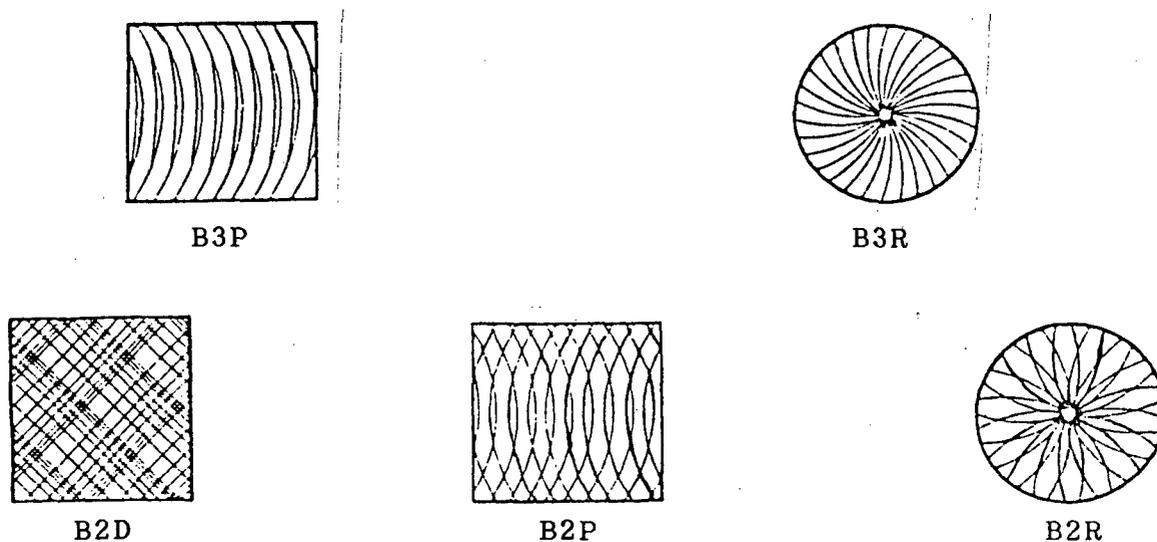


Figura 6-3: Proposta de designação de algumas texturas para uma melhor diferenciação entre as mesmas.

Cada processo de fabricação produz um tipo de textura que nem sempre é exclusivamente característico para este processo de fabricação. Os sulcos em linha reta que se cruzam irregularmente podem ser produzidos, por exemplo, através dos processos de fabricação de limagem, brunimento e polimento.

A textura da superfície é uma ferramenta grosseira para a caracterização das superfícies técnicas, pois:

1. para uma determinada textura pode haver mais que um processo de fabricação capaz de produzi-la;
2. para um processo de fabricação, sob condições de usinagem distintas, obtemos qualidades superficiais diferentes.

Os parâmetros quantitativos da superfície técnica são então essenciais para a observação do preenchimento de sua função.

Os diferentes parâmetros da superfície têm diferentes definições e em consequência disto valores numéricos diferentes. Não expressam exatamente o mesmo, mas freqüentemente informações semelhantes.

Os parâmetros quantitativos das superfícies técnicas, que se encontram com mais freqüência na literatura aqui citada, foram ordenados neste trabalho, segundo o seu tipo de afirmação em:

1. parâmetros verticais - são os parâmetros, que fazem afirmações sobre as amplitudes dos desvios geométricos, tabela II dos anexos;
2. parâmetros horizontais - são os parâmetros que fazem afirmações sobre os períodos dos desvios geométricos, tabela III dos anexos;
3. parâmetros para declives e ângulos - são os parâmetros que fazem afirmações sobre os declives e ângulos ao longo de um perfil, tabela IV dos anexos e
4. parâmetros para a forma do perfil - são os parâmetros que fazem afirmações sobre a forma/evolução do perfil, tabela V dos anexos.

A descrição da forma do perfil contém as informações sobre a evolução do perfil, sobre as reentrâncias e as elevações. Reentrâncias e elevações são parte da forma do perfil; eles foram neste trabalho, porém, levados em consideração separadamente para uma melhor observação do preenchimento da função.

Os diferentes parâmetros para os seis fatores de avaliação da superfície técnica estão apresentados na tabela 6-1.

Tabela 6-1: Parâmetros para os fatores de avaliação da superfície técnica.

FATORES DE AVALIAÇÃO					
1.Desvio geométrico	2.Tipo de perfil	3.Dependência da direção	4.Ângulos/ inclinações	5.Reentrâncias	6.Elevações
Zi	Distribuição dos desvios do perfil	Textura da superfície	Da	Rvk	Rpk
Rmax	Sk	Dependentes da direção: B1,B2,B3,B4, B5,B6,B7	Dq	Av/At	Curvatura (Cm)
Rz	Ku	Nao dependentes da direção: B8,B9,A1,A2, A3,A4	$\gamma$		Ap/At
Rt	np, tp, tpa		$\delta$		
Ry	Curva de Abbott		Nam		
Ra	$\theta_k$				
Rp	Rk, Rpk, Rvk				
Rq	Mr1, Mr2				
R3z	Quociente da forma do perfil:				
Rm	Kp, K, Kf, K', Kpr				
Rc	Funções de correlação				
Pt	$\beta(m,n)$				
Wt	Análise de Fourier				

## 6.2 Comparação dos parâmetros para os fatores de avaliação

Os parâmetros quantitativos que estão apresentados nas tabelas II, III, IV e V dos anexos e o parâmetro qualitativo "textura da superfície" são os 50 parâmetros da superfície que mais usualmente são utilizados para a observação da superfície técnica.

Os parâmetros verticais fornecem informações sobre a ordem de grandeza das ordenadas do perfil. Com exceção da profundidade máxima das ondulações  $W_t$ , a qual é obtida do perfil de ondulação e a profundidade do perfil  $P_t$ , a qual é obtida do perfil não filtrado, todos os outros parâmetros da tabela II, são definidos a partir do perfil de rugosidade.

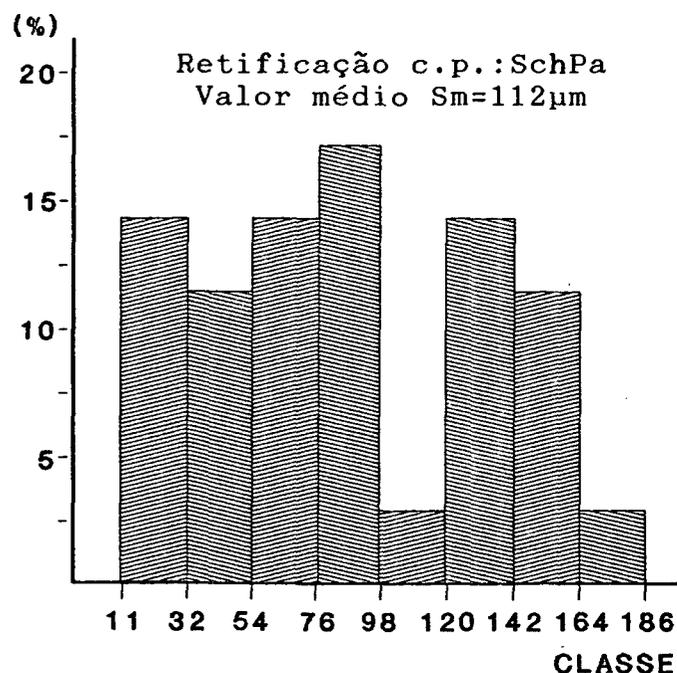
Os parâmetros desvio médio de rugosidade " $R_a$ ", profundidade de rugosidade " $R_t$ " e profundidade média de rugosidade " $R_z$ " (profundidade máxima de rugosidade " $R_{max}$ ") são os mais difundidos por causa da simplicidade dos equipamentos usados nas suas medições. Os parâmetros de rugosidade preferidos são o desvio médio aritmético de rugosidade " $R_a$ " e a profundidade média de rugosidade " $R_z$ ". Isto porque estes parâmetros são menos influenciados por perturbações externas aleatórias.

Segundo as normas ISO " $R_a$ " é o principal parâmetro de caracterização da rugosidade. " $R_a$ " é o principal parâmetro utilizado nas normas internacionais e em firmas de cooperação internacional /3/. Quando o comprimento de medição possível na peça é mais curto que o comprimento de medição normalizado para  $R_a$  e  $R_z$ , é recomendado, em vez de  $R_a$  e  $R_z$ , se indicar a profundidade do perfil " $P_t$ " que deve ser acompanhado do comprimento de medição " $L_m$ ". A definição da profundidade de rugosidade " $R_t$ " (tabela II dos anexos) é de tal maneira formulada que diferentes perfis de referência e condições de medição são utilizados /112/. Em vez de  $R_t$  deve-se no futuro serem utilizados  $R_z$  ou  $R_{max}$  ou  $P_t$  para os quais as condições de medição estão inequivocamente normalizadas /113/.

Os parâmetros de avaliação verticais não permitem nenhuma afirmação sobre a forma de evolução do perfil, por esta razão eles servem apenas para comparação de superfícies, as quais foram fabricadas com o mesmo processo.

Os parâmetros horizontais como a distância média das irregularidades do perfil " $S_m$ " ou a distância média do comprimento de onda " $A_w$ " dão indicações sobre uma parte dos períodos com as quais os desvios geométricos na evolução do perfil podem aparecer. Como valor linear médio, não se deduz nada a partir deles sobre a variação das distâncias que, para valores médios iguais, podem ser muito diferentes dentro do trecho de medição. Na figura 6-4 é mostrado que é possível, através da distribuição de frequências das "distâncias das irregularidades do perfil" ( $S_m$ ) se reconhecer a periodicidade de um perfil. Os corpos de prova torneado e retificado da figura 6-4 estão descritos na tabela 7-1 através dos respectivos processos de fabricação, das características das ferramentas e das condições de corte utilizadas.

DADO :		c:scpa0.dat
Classes [ $\mu\text{m}$ ]		Percentual [%]
11 - 32		14.29
33 - 54		11.43
55 - 76		14.29
77 - 98		17.14
99 - 120		2.86
121 - 142		14.29
143 - 164		11.43
165 - 186		2.86
187 - 208		0.00
209 - 230		0.00



DADO :		c:d2h0.dat
Classes [ $\mu\text{m}$ ]		Percentual [%]
10 - 30		0.00
31 - 51		0.00
52 - 72		0.00
73 - 93		0.00
94 - 114		100.00
115 - 135		0.00
136 - 156		0.00
157 - 177		0.00
178 - 198		0.00
199 - 219		0.00

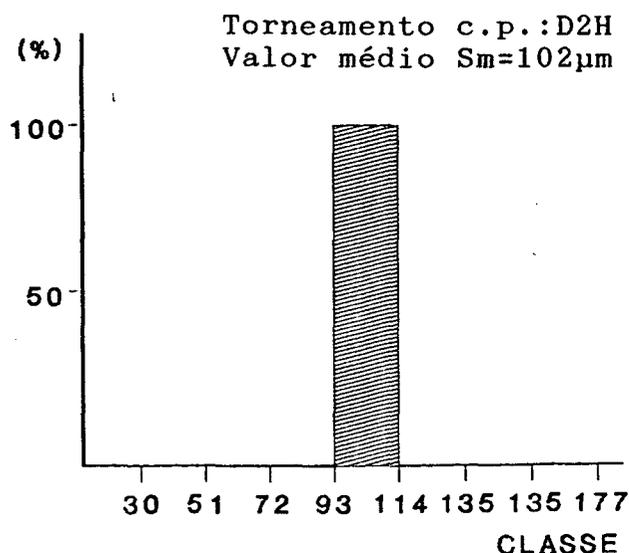


Figura 6-4: Distribuição de frequências das distâncias de irregularidades do perfil ( $S_m$ ).

Os parâmetros para declives e ângulos são: o valor médio aritmético da inclinação do perfil " $D_a$ "; o valor médio quadrático da inclinação do perfil " $D_q$ "; ângulo de pico " $\delta$ " e ângulo de abertura " $\delta$ ", tabela IV dos anexos.

O parâmetro valor médio aritmético da inclinação do perfil " $D_a$ " é uma boa aproximação do valor médio quadrático da inclinação do perfil " $D_q$ " (parâmetros ns° 21 e 22, dos anexos). Porém estes dois parâmetros sozinhos não contêm nenhuma informação significativa, quando calculados através de todo o perfil ( $i=1$  até  $i=5760$ ), onde  $i$  é o número de pontos medidos). Se " $D_a$ " ou o ângulo de inclinação  $\beta_i = \arctan(dy_i/dx_i)$  for calculado na região definida através de " $R_k$ " (altura da rugosidade central, parâmetros 30 e 31 da tabela V dos anexos), ele descreve a inclinação positiva ou negativa de um perfil nesta região, figura 6-5.

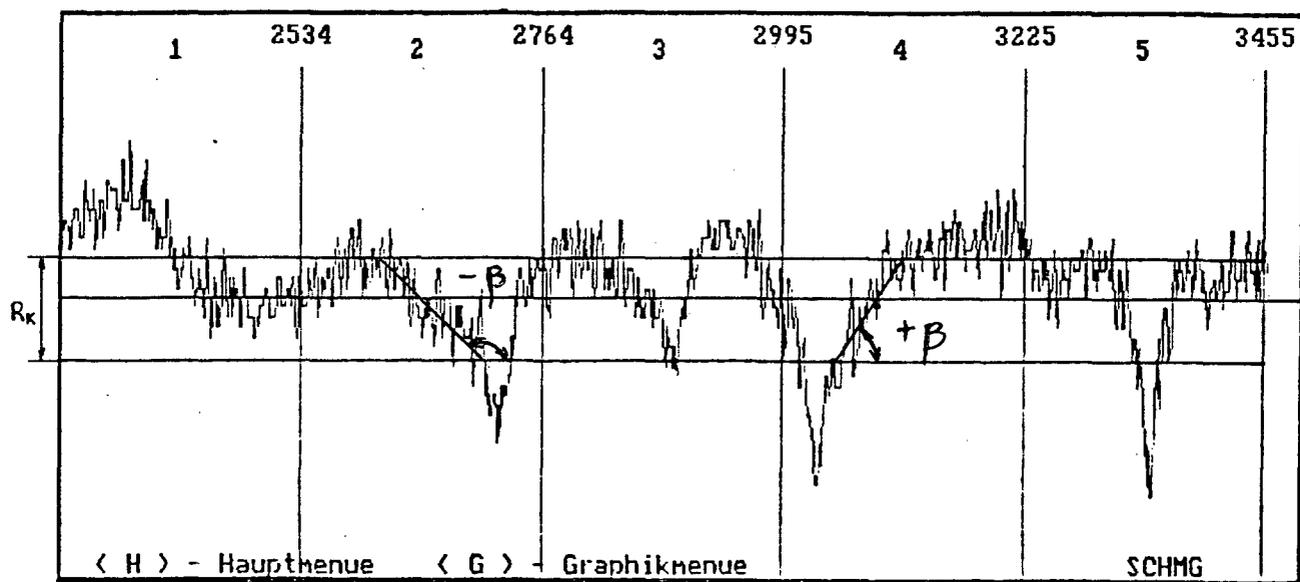


Figura 6-5 Região  $R_k$  (região central da rugosidade).

Segundo Bodschwinn /91/ a dimensão do ângulo de declive (figura 4-9 e 6-5) - com frequência designado de inclinação dos flancos - abaixo das elevações de suporte do perfil, na esperada zona de contacto, pode ser de especial significado. Este ângulo propicia a formação da cunha de lubrificante e melhora a capacidade de suportar carga da superfície deslizante.

O ângulo de inclinação  $\beta$  do perfil da figura 6-5 tem na região de rugosidade central um valor médio de  $-10,9^\circ$  e  $11,5^\circ$  respectiva-

mente para subidas e descidas. Como estes valores são muito próximos um do outro, a influência da inclinação dos flancos sobre a formação da cunha de lubrificante deve ser a mesma para os dois sentidos de deslocamento, isto significa que, neste caso, o sentido em que a SDL trabalha sob carga é indiferente.

Os ângulos de picos e de vales, definidos junto aos pontos de máximos e de mínimos do perfil, permitem afirmações sobre a mudança da inclinação /127/.

Os parâmetros para a forma do perfil (tabela V dos anexos), como por exemplo a distribuição das amplitudes, coeficiente de simetria da curva de distribuição de amplitudes " $S_k$ ", curtose " $K_u$ " (figuras 6-6 e 6-8) e função de correlação (figuras 7-9 a 7-16) permitem avaliar o tipo do perfil. Os valores numéricos medidos destes parâmetros são fornecidos e discutidos no capítulo 7.

Parâmetros verticais combinados com o parâmetro da profundidade máxima de rugosidade " $R_t$ " como por exemplo a profundidade de alisamento " $R_p$ ", geram parâmetros como a taxa de vazão " $R_p/R_t$ " e que fornecem informações sobre o tipo do perfil, mas são muito influenciados por perturbações da evolução do perfil. Estes parâmetros sozinhos não fornecem nenhuma indicação sobre declives, curvaturas e periodicidade do perfil .

Os declives e as curvaturas dos picos no perfil de rugosidade, são essenciais para as propriedades funcionais de uma SDL, porque eles influenciam as micro cunhas na formação do filme lubrificante. Estes parâmetros, que não estão normalizados, são obtidos com um polinômio do 2º grau, segundo o método dos mínimos quadrados para cada cinco pontos vizinhos /28/.

Através de uma análise mais aprofundada realizada neste trabalho foi possível se deduzir a fórmula para se calcular " $C_m$ " (valor médio da curvatura, ver tabela V) e  $N_{am}$  (valor médio da inclinação absoluta).

$$N_{am} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |b_i| \quad (6.1)$$

$$b_i = \sum y_i * (x_i - x_p) / 10 * \Delta x^2 \quad (6.2)$$

onde:

- $x_p$  - é a coordenada  $x$  do ponto médio onde a inclinação é calculada;
- $x_i$  - é o local dos pontos das abcissas; ( o valor de  $x$  corresponde a um número inteiro múltiplo da distância de digitalização) e
- $\Delta x$  - é a distância de digitalização.

### 6.2.1 Desvio do perfil, distribuição das amplitudes e a função Beta.

A descrição dos desvios verticais de um perfil de superfície com relação a uma dada linha de referência pode ser feita através da distribuição das amplitudes. A distribuição das amplitudes descreve a frequência relativa de uma determinada amplitude em função da dimensão das amplitudes.

A distribuição das amplitudes do perfil (parâmetro n° 25, tabela V) é conhecida na estatística como "função de probabilidade  $f(x)$ ", "função de distribuição de probabilidade" ou ainda "histograma". A distribuição das amplitudes  $f(x)$  é pois uma função estatística, a qual descreve claramente o perfil da superfície. Mas para a observação da função de uma superfície (por exemplo uma SDL) parâmetros isolados são mais vantajosos que uma função estatística. Por esta razão deve-se procurar os parâmetros que descrevem claramente uma dada distribuição de amplitudes.

Uma maneira de se descrever a distribuição de amplitudes é através dos parâmetros da estatística como o valor médio  $\mu_1$  ( $\mu_1$  = primeiro momento central), e do desvio médio quadrático ( $\sigma = R_q = \text{RMS}$  "Roat Mean Square" =  $\sqrt{\mu_2}$  raiz quadrada do segundo momento central), assim também como através da combinação de momentos centrais como  $S_k$  (coeficiente de simetria da curva de distribuição de amplitudes) ou  $K_u$  (curtose), os quais reproduzem a forma das funções de distribuição até um determinado grau.

$$\mu_n = \left( \sum_{i=1}^N y_i^n \right) / N \quad \text{Momento Central} \quad (6.3)$$

$$S_k = \mu_3 / (\mu_2)^{3/2} \quad \text{Coef. de Simetria} \quad (6.4)$$

$$K_u = (\mu_4 / \mu_2^2) - 3 \quad \text{Curtose} \quad (6.5)$$

A determinação destes parâmetros é feita em relação a uma linha de referência. Esta linha de referência é fixada tal que o valor médio das amplitudes é igual a zero.

O valor da rugosidade média quadrática ( $R_q$ ) torna-se maior quanto maiores forem as amplitudes.  $R_q$  é também uma medida estatística para as dimensões médias dos desvios que se apresentam no perfil da superfície em relação a linha de referência.

O parâmetro  $S_k$  apresenta um valor negativo para as superfícies que têm uma boa capacidade de suportar carga, que é o caso das superfícies platafórmicas, e um valor positivo para superfícies com muitos picos de rugosidade dirigidos para cima (figura 6-6).

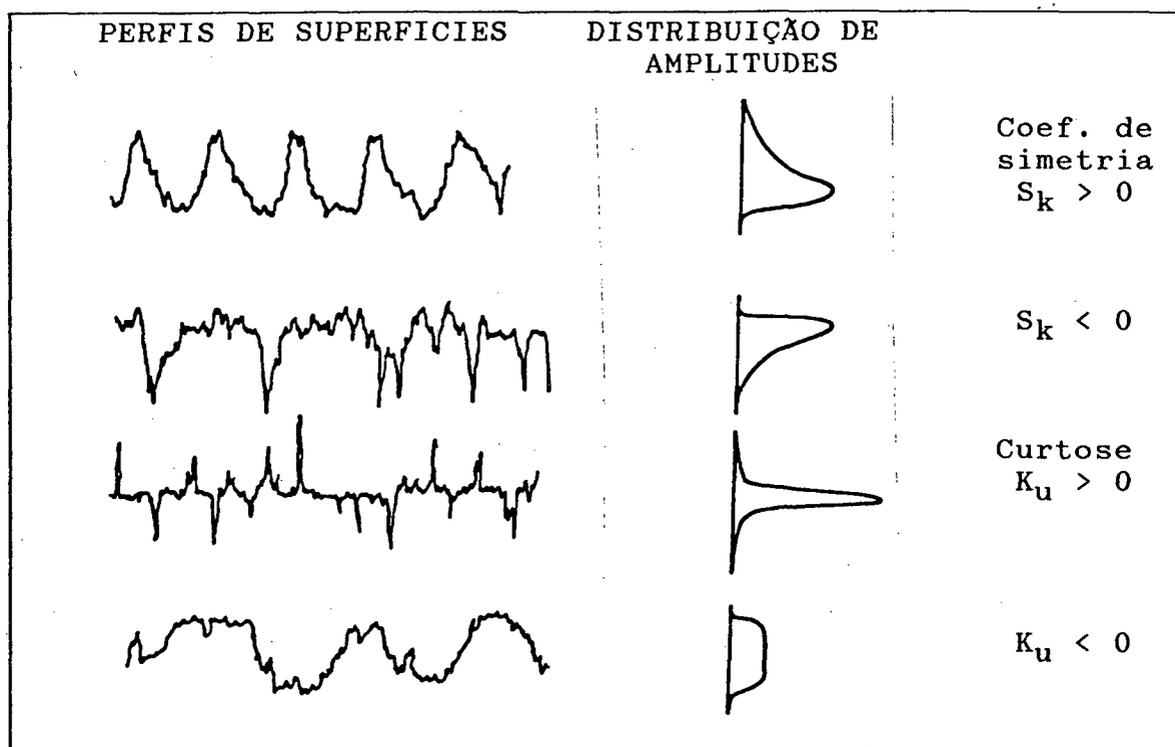


Figura 6-6: Diferentes perfis de superfícies em função dos parâmetros  $S_k$  e  $K_u$  /56/.

Quando em um perfil o número de ordenadas negativas é igual ao número de ordenadas positivas, o valor de  $S_k$  é igual a zero. Se o perfil apresentar um número de ordenadas negativas menor que o número de ordenadas positivas,  $S_k$  será negativo, o que corresponde a um valor médio das ordenadas negativas maior que o valor médio das ordenadas positivas e o perfil é platafórmico. Um valor positivo para  $S_k$  é obtido em perfis onde o número de ordenadas negativas é maior que o número de ordenadas positivas, o que corresponde a um

valor médio das ordenadas negativas menor que o valor médio das ordenadas positivas e o perfil tem picos de rugosidade dirigidos para cima /34/.

O parâmetro  $K_u$  assume um valor positivo para superfícies com muitos picos de rugosidade e um valor negativo para superfícies abauladas (figura 6-6). Uma curva distribuição normal apresenta  $K_u$  igual a zero, uma curva de distribuição mais delgada, comparada com uma distribuição normal, apresenta  $K_u$  maior que zero e uma mais abaulada apresenta  $K_u$  menor que zero.

Uma desvantagem destes parâmetros é porém que eles são muito sensíveis às perturbações, que para o parâmetro  $Sk$  são elevadas a uma potência de três e para o parâmetro  $Ku$  a uma potência de quatro.

Uma melhor possibilidade para descrição da distribuição das amplitudes através de parâmetros é a função Beta (ver definição na tabela V, parâmetro número 48). Os parâmetros  $m$  e  $n$  da função beta não são, nas propoções de  $Sk$  e  $Ku$ , influenciados por perturbações. Uma outra vantagem destes parâmetros é que com eles a distribuição das amplitudes pode ser reconstruída. Uma distribuição normal é caracterizada através de  $m = n = 4$ . Superfícies que suportam bem cargas (superfícies platafórmicas) têm um valor de  $m$  grande e um valor de  $n$  pequeno. Da medição de diferentes tipos de SDL como mancais e camos de eixos de vira-brequim e guias foi constatado que uma superfície adequada para a função SDL é obtida com valores de " $m$ " iguais ou maiores que 6 e " $n$ " iguais ou menores que 3.

$$m = ( \bar{y} ( \bar{y} - \bar{y}^2 - \sigma^2 ) ) / \sigma^2 \quad (6.6)$$

$$n = ( ( 1 - \bar{y} ) ( \bar{y} - \bar{y}^2 - \sigma^2 ) ) / \sigma^2 \quad (6.7)$$

### 6.2.2 Parâmetros para observação da periodicidade de uma superfície

A periodicidade de um perfil pode ser constatada tanto através de uma função de correlação como também através da análise de Fourier.

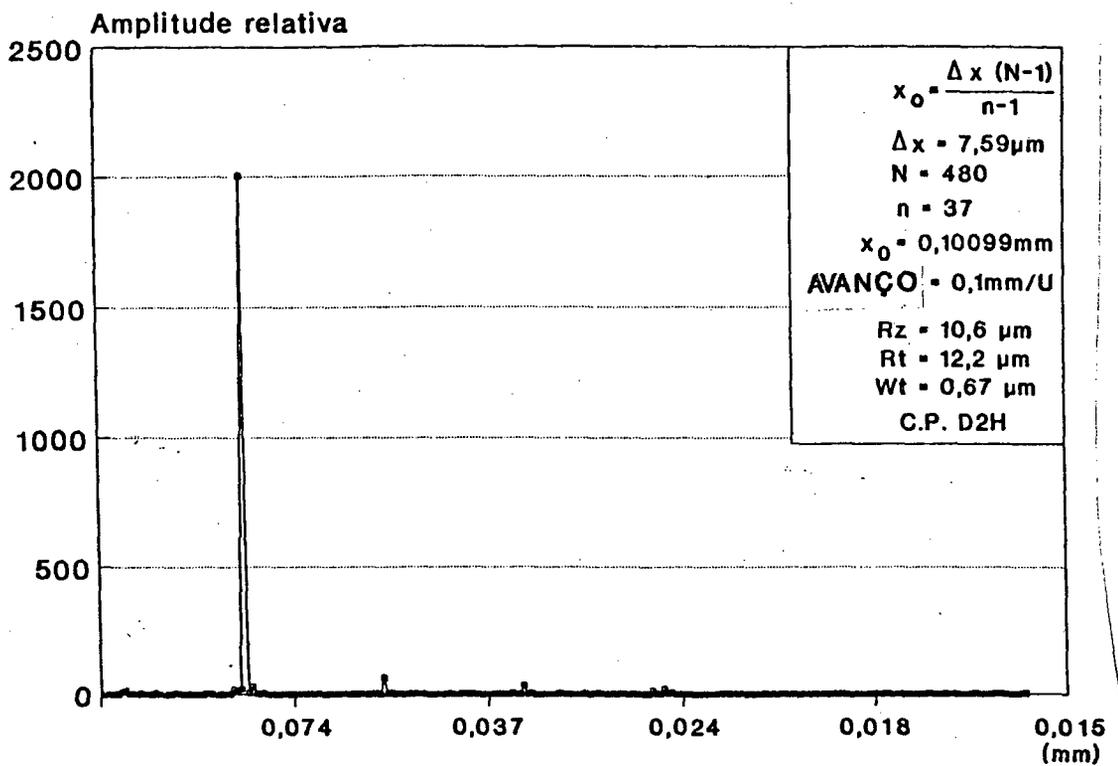
Da função de auto-correlação do perfil de uma superfície constata-se se esta superfície é periódica ou não e até que ponto o percentual de periodicidade codetermina o tipo deste perfil. Para uma evolução periódica do perfil a auto-correlação do mesmo é também periódica. Com a função de correlação transversa a dependência da direção em diferentes tipos de superfícies usinadas é quantitativamente constatada (capítulo 7, figura 7-17).

A figura 6.7 mostra o espectro de Fourier (parâmetro n° 49, tabela V dos anexos) de um corpo de prova torneado e outro retificado. O espectro de Fourier do corpo de prova torneado mostra que este corpo de prova tem uma superfície periódica. O avanço com o qual este corpo de prova foi torneado deixa-se reconhecer através da frequência do sinal básico. A amplitude do sinal de base ( $A_0$ ) é para este corpo de prova igual a 2,00 mm. Com  $A_0$  foi possível se recalculiar o valor de  $R_z$  com uma aproximação de 5  $\mu\text{m}$ . Para 480 pontos com uma distância de  $\Delta x = 7,59 \mu\text{m}$  o valor de  $R_z$  é a raiz quadrada de  $(2A_0 / 77,87)$ . Neste caso do torneamento pode-se desprezar os outros componentes da série de Fourier.

$$R_z \approx ((2 A_0) / 77,87)^{1/2} = 10,14 \quad (6.8)$$

O espectro do corpo de prova retificado mostra, que este tem uma superfície aleatória. Para o corpo de prova retificado o cálculo de  $R_z$  através do espectro de Fourier só seria possível se fossem levados em consideração um número suficientemente elevado de termos da série de Fourier.

### C.P. TORNEADO



### C.P. RETIFICADO

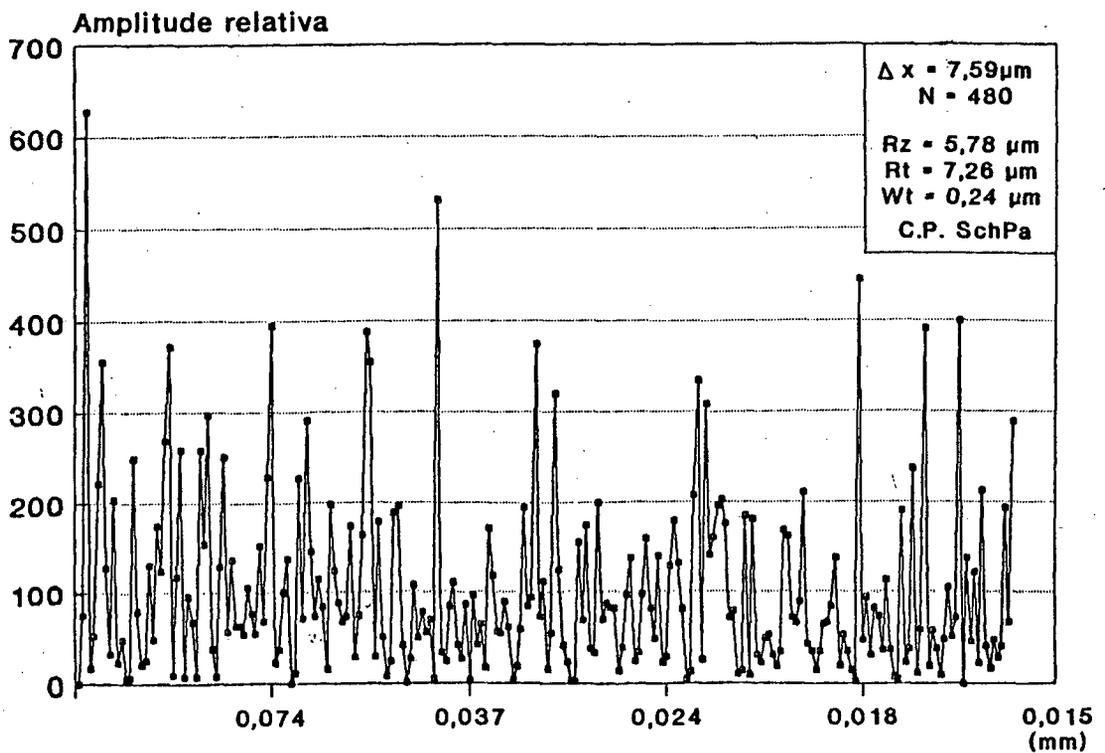


Figura 6-7 : Espectro de Fourier para corpos de prova torneados e retificados.

### 6.2.3 Desvios do perfil, curva de Abbott e um novo parâmetro para a apreciação quantitativa das superfícies platafórmicas

A curva do perfil suportante ou a curva de Abbott é na estatística conhecida como a função de distribuição acumulada  $F(x)$  /25,137,138/. Esta função contém a mesma informação, sobre os desvios do perfil de uma superfície, que a distribuição de amplitudes  $f(x)$ , pois a função de distribuição de probabilidade é a derivada da função de distribuição acumulada  $F(x)$ . A figura 6-8 mostra para diferentes perfis teóricos as curvas do comprimento suportante correspondente.

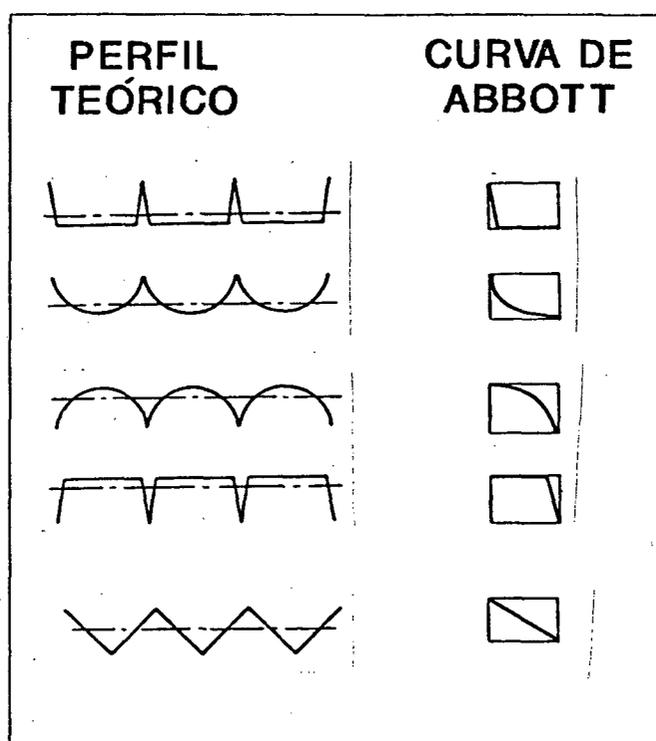


Figura 6-8: Curva dos comprimentos de suporte para perfis teóricos.

Da aproximação da curva do comprimento suportante através de três retas (parâmetro n° 30, tabela V dos anexos) resultam os parâmetros  $R_{pk}$  (altura reduzida dos picos,  $R_k$  (altura da rugosidade central) e  $R_{vk}$  (altura reduzida dos vales). Os parâmetros  $R_{vk}$  e  $R_{pk}$  são parâmetros para os fatores de avaliação: 5.reentrâncias e 6.elevações. O parâmetro  $R_k$  é um parâmetro para os patamares (para os plateaux). Duas superfícies podem ter valores de  $R_k$  iguais, mas apesar disto diferentes patamares /115/. Isto acontece, quando as superfícies têm diferentes valores de  $(M_{r2} - M_{r1})$ . Por esta razão

surge a necessidade de um novo parâmetro através do qual se possa ter uma avaliação mais clara dos patamares de sustentação.

Um novo parâmetro para a apreciação dos patamares é o "ângulo de inclinação central"  $\theta_k$ , definido aqui neste trabalho como (figura 6-9):

$$\theta_k = \text{arc tan} [(R_k/R_s)/(M_{r2}-M_{r1})] \quad (6.10)$$

onde  $R_s$  é:

$$R_s = R_{pk} + R_k + R_{vk} \quad (6.11)$$

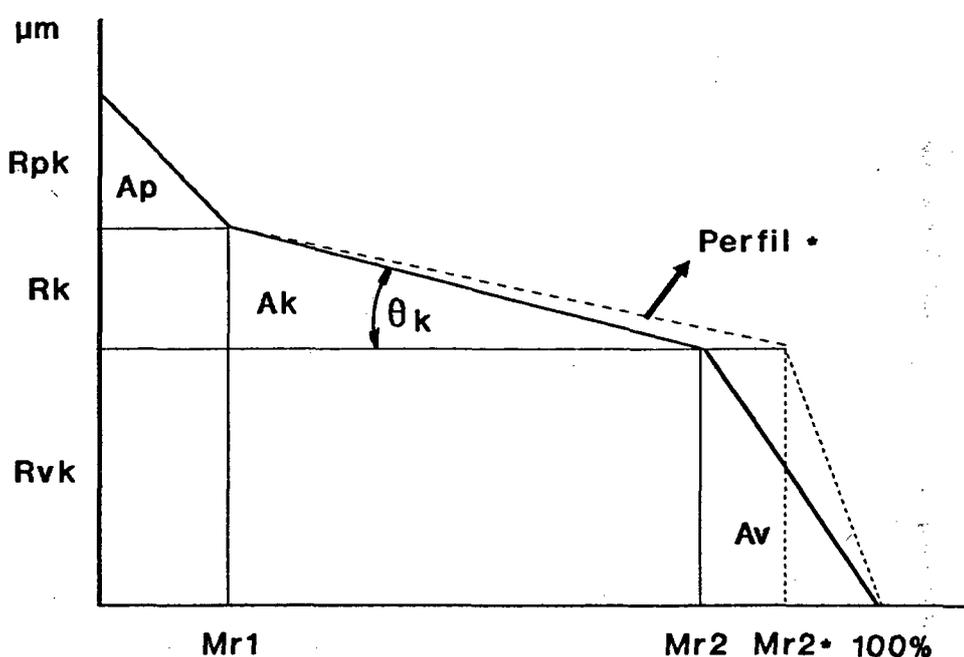


Figura 6-9: Novo parâmetro  $\theta_k$  para a apreciação dos patamares.

Os resultados numéricos da medição do ângulo  $\theta_k$  para os corpos de prova aqui examinados estão apresentados na figura 7-24 (capítulo 7). A vantagem deste parâmetro é que se pode comparar quantitativamente diferentes superfícies quanto aos seus patamares, sem que as curvas do comprimento suportante estejam presentes.

### 6.3 O teste de Kolmogorov-Smirnov e o tamanho da amostra para a medição de superfícies

Para que uma medição atinja um resultado representativo, é necessário que seja realizado um determinado número de medições. O tamanho de amostra para tal, só pode ser calculado quando é conhecida a distribuição dos parâmetros a serem medidos.

É conhecido que a maioria das distribuições das freqüências que surgem naturalmente correspondem a uma distribuição normal (distribuição de Gauß). Na prática existe no entanto um grande número de exemplos que mostram que esta condição nem sempre acontece. Por esta razão a matemática estatística desenvolveu diferentes métodos pelos quais se decide se os valores medidos têm uma distribuição normal ou não. Os três métodos mais usados são:

- um processo gráfico, no qual os valores medidos são registrados em um papel de probabilidade e
- dois processos numéricos:
  - o teste do qui-quadrado e
  - o teste de Kolmogorov-Smirnov

O método gráfico é um processo limitado além de subjetivo e permite apenas uma decisão sem precisão. Portanto é mais confiável se usar como critério de decisão um dos dois processos numéricos. A escolha pelo teste de Kolmogorov-Smirnov se deveu às suas vantagens em relação ao teste do qui-quadrado:

- ele pode ser utilizado também nos pequenos tamanhos de amostras, onde uma divisão em classes dos valores medidos, para a utilização do teste do qui-quadrado, não é significativa e
- pode-se mostrar que a probabilidade de se recusar uma hipótese para o teste de Kolmogorov-Smirnov é em geral maior do que para o teste qui-quadrado, isto para iguais probabilidades de erro.

Devido ao grande número de valores medidos, o teste de Kolmogorov-Smirnov foi realizado com ajuda de uma programa de computador /117/.

Nos experimentos foram realizadas medições em corpos de prova torneados retificados, fresados e aplainados. As medições foram efetuadas na direção perpendicular à direção dos sulcos de usinagem. O número de medições para cada um dos parâmetros ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$  e  $R_t$ ) foi de 150. O teste de Kolmogorov-Smirnov mostrou que nenhum dos parâmetros medidos tem uma distribuição normal ou aproximadamente normal.

Em conseqüência disto não é possível se obter o tamanho de amostra representativo, com a ajuda da equação (6.12), pois ela é válida apenas para as distribuições normais.

$$n = ((z_{a/2} \cdot S)/e)^2 \quad (6.12)$$

onde:

$n$  = tamanho da amostra

$z_{a/2} = 1,96$  para  $a = 95\%$ , " $z_{a/2}$ " é extraído da tabela da distribuição normal para uma confiabilidade " $a$ "

$S$  = desvio padrão e

$e$  = probabilidade de erro ( $e = 5\%$ , para  $a = 95\%$ )

Com a função Beta, as distribuições de freqüência foram descritas matematicamente através de poucos parâmetros e a equação para o cálculo do tamanho de amostra foi deduzida. A função Beta é definida no intervalo  $[0,1]$ . Por isto a função de distribuição tem que ser transformada para este intervalo. Para tal foi feita a seguinte normalização:

$$y_i \text{ transf.} = (y_i - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \quad (6.13)$$

A figura 6-10 mostra a conexão entre as probabilidades de ocorrência das variáveis  $Y$  e  $Z$ . A probabilidade da variável aleatória  $Z$  assumir valores maiores que  $z_1$  ou menores que  $z_2$  é exatamente igual a  $1-a$ .

$$P(z_1 < Z < z_2) = 1 - a \quad (6.14)$$

$Z$  é a função de amostragem definida por:

$$Z = (\bar{y} - \mu) / (S/\sqrt{n}) \quad (6.15)$$

onde:

$\mu$  = a esperança da população (valor médio para  $n$  muito grande)

$S$  = desvio padrão

De (6.14) e (6.15) obtemos:

$$P(z_1 < ((\bar{y} - \mu) / (S/\sqrt{n})) < z_2) = 1 - a \quad (6.16)$$

O tamanho da amostra " $n$ " é calculado para um desvio  $d = |y - \mu|$  através da resolução da desigualdade (6.16):

$$z_1 < d\sqrt{n}/S < z_2 \quad (6.17)$$

$$\boxed{n > z_1^2 S^2 / d^2} \quad (6.18)$$

Distribuição Beta  
m=8      n=4

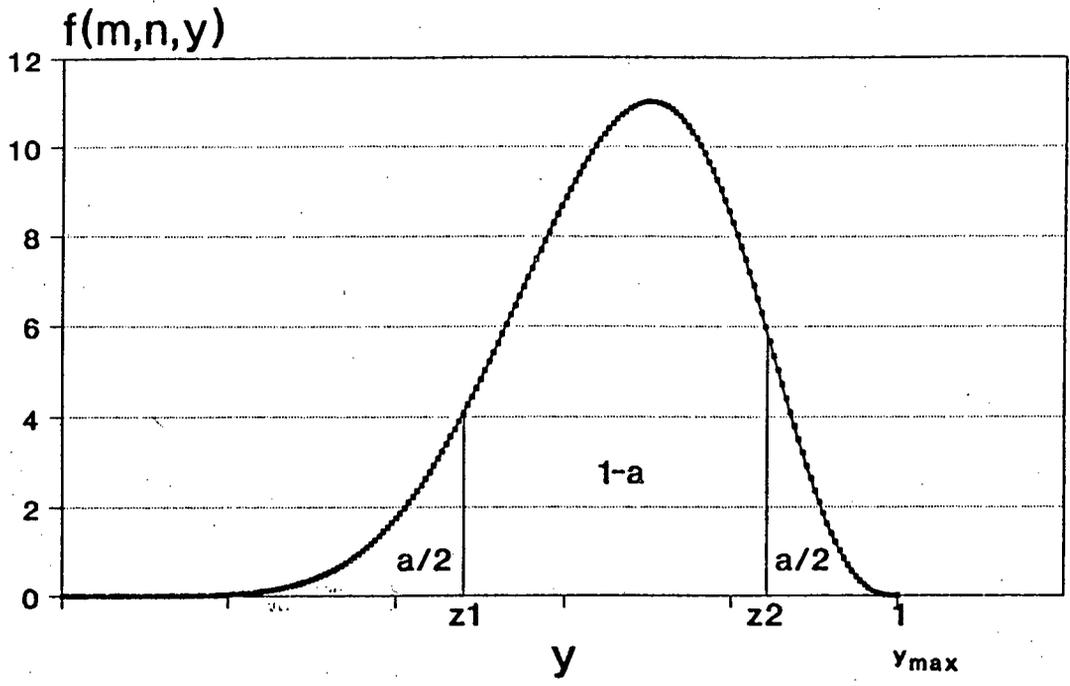


Figura 6-10: Probabilidade  $z_1$  e  $z_2$  da distribuição Beta.

## 7. CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARA APRECIÇÃO DE SUPERFÍCIES TÉCNICAS

### 7.1 Realização dos experimentos

A medição de parâmetros para descrição de superfícies técnicas foi realizada em corpos de prova retificados, fresados, aplainados, polidos, limados e torneados. Os corpos de prova com superfícies planas tinham um comprimento de 50 mm, uma largura de 25 mm e uma altura de 10 mm. Os corpos de prova cilíndricos (torneado e retificado) tinham um diâmetro de 78 mm e um comprimento de 200 mm. Como a influência das propriedades tecnológicas não foram aqui examinadas, todos os corpos de prova foram fabricados com o mesmo material (aço inox DIN N° 1.4 305, equivalente ao SAE 303 ou Vilarés V-303). A tabela 7-1 mostra em resumo cada corpo de prova com seu respectivo processo de fabricação, geometria da ferramenta e a condição de corte utilizadas.

Todos os corpos de prova foram apalpados com um comprimento de 5,6 mm ou seja um comprimento efetivo de medida de 4,0 mm. Para tal foi utilizado um micro sensor ótico acoplado com o rugosímetro da marca Perthen tipo S6P. O micro sensor ótico apalpa a superfície sem contacto mecânico entre ambos. A trajetória retilínea do sensor é a linha de referência para o sistema de apalpação. A ponta ótica (apalpador virtual) é formada através de focos óticos de laser. A alavanca de medição, que pode girar em sua fixação por mancal, oscila automaticamente durante o movimento de avanço, tal que o foco está sempre precisamente situado sobre a superfície /19/. A oscilação da alavanca de medição é transformada, através de um transdutor indutivo, em um sinal elétrico. Este sinal é digitalizado no rugosímetro e armazenado em uma memória de perfil. A partir desta memória podem ser transferidos para disquetes os 5760 valores das medidas digitalizadas de modo a tornar possível outras avaliações. A distância de digitalização ( $\Delta x$ ) foi de 0,69  $\mu\text{m}$ . O cálculo dos diferentes parâmetros, que foram classificados e apresentados no capítulo 6, assim como a avaliação dos resultados das medições que serão apresentadas neste capítulo, serão realizados com auxílio de um micro-computador. Com ajuda dos resultados das medições, que serão aqui apresentados, serão escolhidos os parâmetros para os seis fatores de avaliação que descrevem a microgeometria de uma SDL.

Tabela 7-1: Dados de fabricação dos corpos de prova.

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	FERRAMENTA	CONDIÇÕES DE CORTE
APLAINAMENTO	$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 90^\circ$ $\gamma = 35^\circ$ $r_\xi = 1 \text{ mm}$ METAL DURO	$f = 0,2 \text{ mm}$ $ap = 0,5 \text{ mm}$ 63 CURSO DUPLO POR MINUTO
FRESAMENTO DE TOPO	$\alpha = 6-8^\circ$ $\gamma = 20-22^\circ$ MATERIAL DA FERRAMENTA: AÇO HSSE	RPM DA FRESA: $n = 160 \text{ min}^{-1}$ VELOCIDADE DA MESA: $vf = 0,16 \text{ m/min}$ AVANÇO POR DENTE: $fz = 0,2 \text{ mm}$ $ap = 0,2 \text{ mm}$
RETIFICAÇÃO	EK 60-5 LIGANTE V51 300 X 20 X 76 LUBRIFICANTE: Apollo	PROF.DE CORTE: $ae = 0,006 \text{ mm}$ ROTAÇÕES DO REBOLO: $n = 1800 \text{ RPM}$ VELOCIDADE DA MESA: $vt = 15 \text{ m/min}$
LAPIDAÇÃO	MAT.DA FERRAMENTA CSI $7\mu\text{m}$ FLUIDO DE CORTE ÁGUA + GL3	
LIMAMENTO	PICADO: 3	
TORNEAMENTO (COM PASTILHA DE ALISAMENTO) (DENOMINAÇÃO: D1H)	$\alpha = 8^\circ$ $\gamma = 12^\circ$ $\beta = 71^\circ$ $\lambda = 0^\circ$ $r = 1 \text{ mm}$ $\chi = 90^\circ$ $\varepsilon = 90^\circ$ P40 ISO 6	$f = 0,1 \text{ mm/U}$ $ap = 0,5 \text{ mm}$ $n = 560 \text{ min}^{-1}$ $vc = 137 \text{ m/min}$
TORNEAMENTO (LONGITUNINAL) (DENOMINAÇÃO: D2H)	$\alpha = 8^\circ$ $\beta = 84^\circ$ $\gamma = 12^\circ$ $\lambda = 0^\circ$ $r_\xi = 0,4 \text{ mm}$ METAL DURO Komet PI-R-P25	$s = 0,1 \text{ mm}$ $ap = 0,5 \text{ mm}$ $n = 560 \text{ min}^{-1}$ $vc = 137 \text{ m/min}$
RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA (DENOMINAÇÃO: SchPa)	EK 70B L5VQ DIÂMETRO = 360mm  LARGURA DO REBOLO $b = 20 \text{ mm}$	$D = 78 \text{ mm}$ ROTAÇÃO DA PEÇA: $nw = 60 \text{ RPM}$ VELOCIDADE DE AVANÇO: $vf = 1000 \text{ mm/min}$ AVANÇO POR ROTAÇÃO DA PEÇA: $f = 16,66 \text{ mm/Rotação}$ PROF.DE CORTE = 0,005 mm

## 7.2 Avaliação das medições dos experimentos

A avaliação dos resultados das medições foi realizada com auxílio de um micro computador. Nas figuras de 7-1 a 7-24 são mostrados os diferentes parâmetros das superfícies dos oito diferentes processos de fabricação (veja tabela 7-1).

O coeficiente de simetria ( $S_k$ ) da curva da "função de distribuição de probabilidade" de ocorrência das amplitudes de um perfil mostra que os corpos de prova examinados, com exceção do D2H (torneamento longitudinal), têm mais valores de ordenadas positivas do que negativas e ao mesmo tempo que o valor médio das ordenadas positivas é menor que o das negativas. Os corpos de prova fresados e aplainados mostram um valor para  $S_k$  próximo de zero; isto caracteriza uma simetria das ordenadas em relação a linha média. Os corpos de prova limado e torneado com alisamento (c.p. D1H) têm o maior valor negativo para  $S_k$ , isto significa que eles têm as superfícies mais platafórmicas, para os corpos de prova planos e cilíndricos respectivamente.

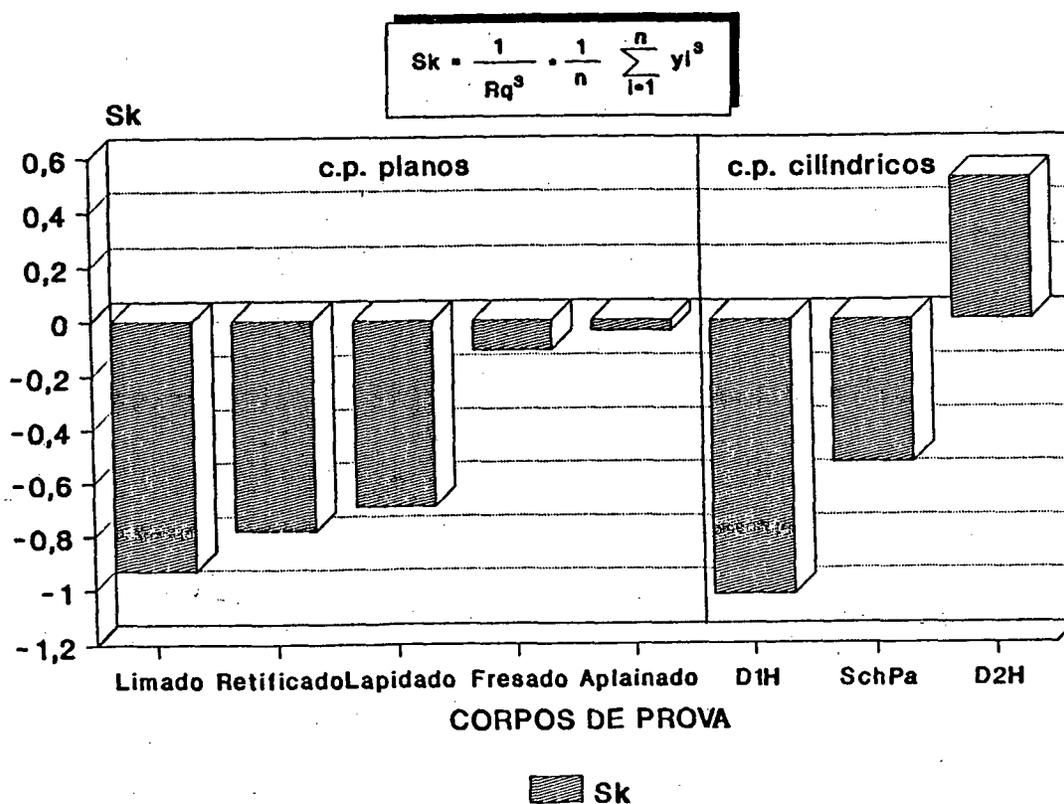


Figura 7-1: Coeficiente de simetria ( $S_k$ ) da curva da função de distribuição das amplitudes do perfil.

O parâmetro curtose ( $K_u$ ) mostra na figura 7-2, para os corpos de prova aplainado, fresado e torneado (D2H), que a distribuição das amplitudes do perfil em torno do valor médio é um pouco mais plana (para estes c.p.  $K_u < 0$ ) que uma distribuição normal na qual  $K_u$  é igual a zero. Os outros corpos de prova têm uma distribuição de amplitudes mais delgada que uma distribuição normal ( $K_u > 0$ , figura 6.6).

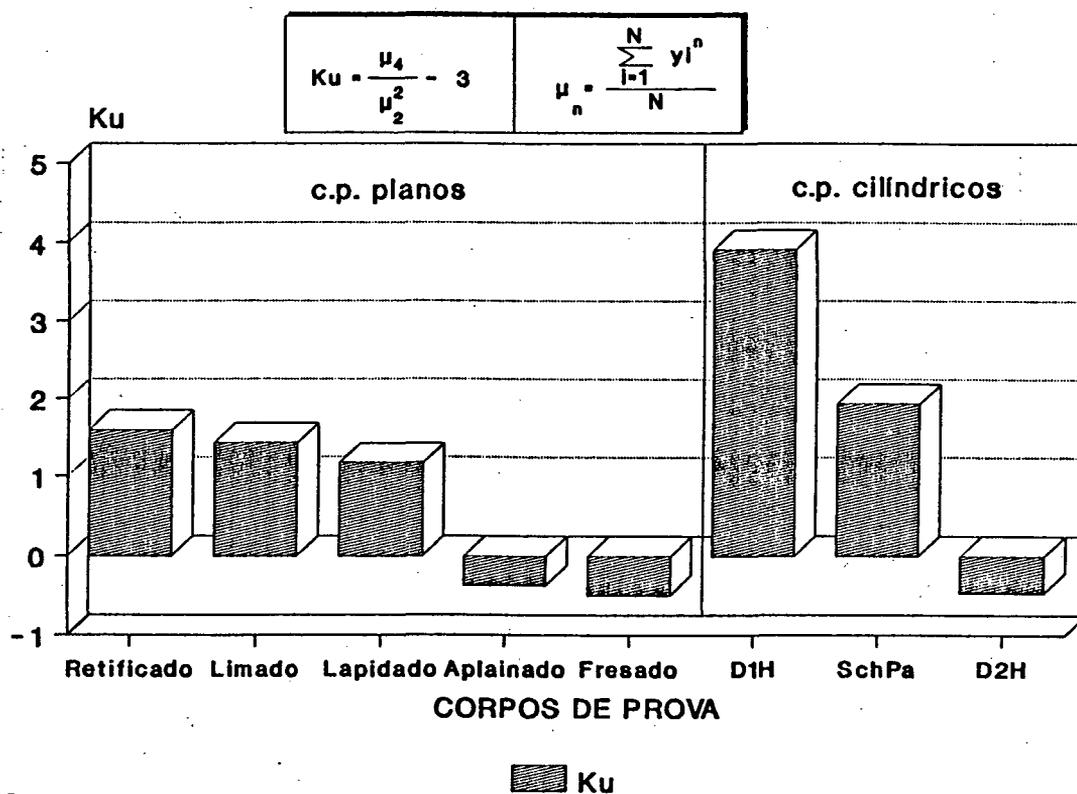


Figura 7-2: Curtose ( $K_u$ ).

Os parâmetros  $m$  e  $n$  da função Beta mostram na figura 7-3, da mesma forma que o parâmetro curtose  $K_u$ , que os corpos de prova retificado, limado e lapidado apresentam uma distribuição das amplitudes mais delgada que a distribuição de uma função normal ( $m$  e  $n$  são maiores que 4, para a distribuição normal têm-se  $m=n=4$ ). Para os corpos de prova aplainado, fresado e torneado (D2H) a distribuição das amplitudes é um pouco mais achatada ( $m$  e  $n$  são

menores que 4) que a de uma distribuição normal. Uma superfície que tem uma boa capacidade de suportar carga é caracterizada através de  $m > n$ . Apenas para o corpo de prova torneado (D2H) tem-se  $n > m$ . Isto também foi mostrado pelo coeficiente de simetria  $S_k$ , pois apenas para o corpo de prova D2H  $S_k$  é positivo, como mostra a figura 7-1. Para os corpos de prova aplainado e fresado, a diferença  $m-n$  aproxima-se de -zero e o valor de  $m$  e  $n$  é aproximadamente 4. O coeficiente de simetria  $S_k$  é para estes dois corpos de prova aproximadamente zero, veja figura 7-1. O corpo de prova torneado D1H tem o maior valor negativo do coeficiente de simetria  $S_k$  (figura 7-1) e a maior diferença entre os parâmetros  $m$  e  $n$  da função Beta ( $m-n$ ) como mostra a figura 7-4. Os parâmetros  $m$  e  $n$  da função Beta contêm pois as mesmas informações que o coeficiente de simetria  $S_k$  e o curtose  $K_u$ , porém fornecem adicionalmente uma aproximação da curva de distribuição.

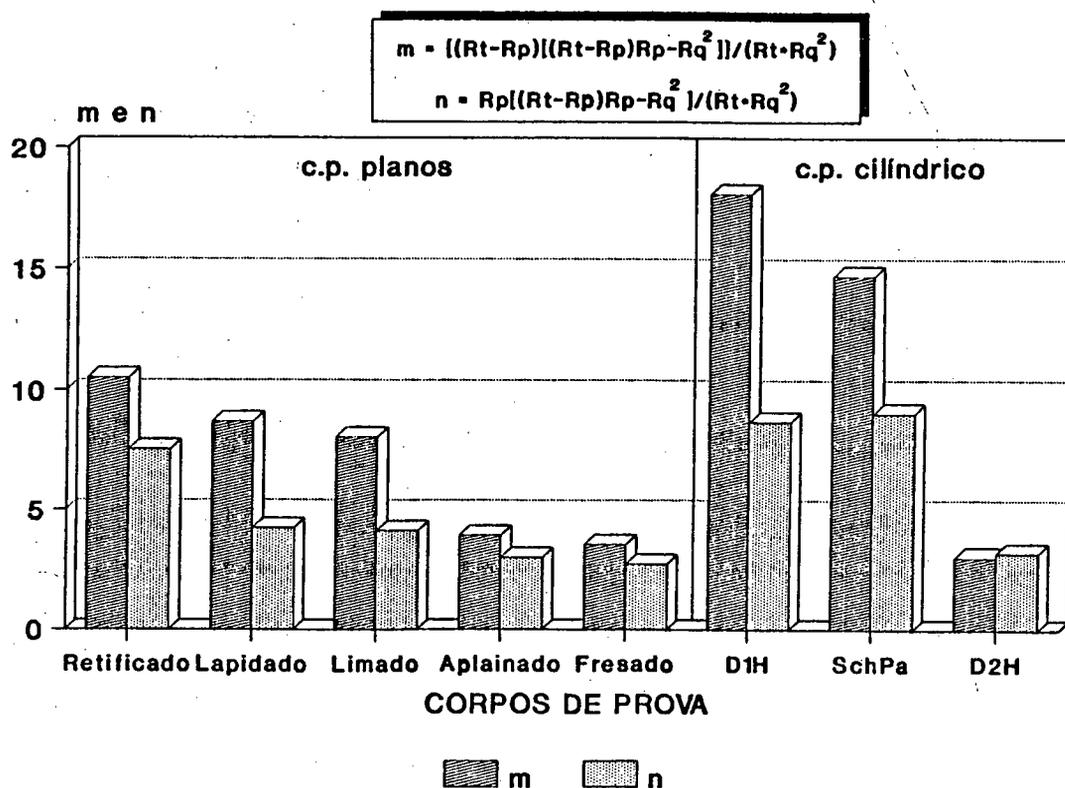


Figura 7-3: Parâmetros  $m$  e  $n$  da função Beta.

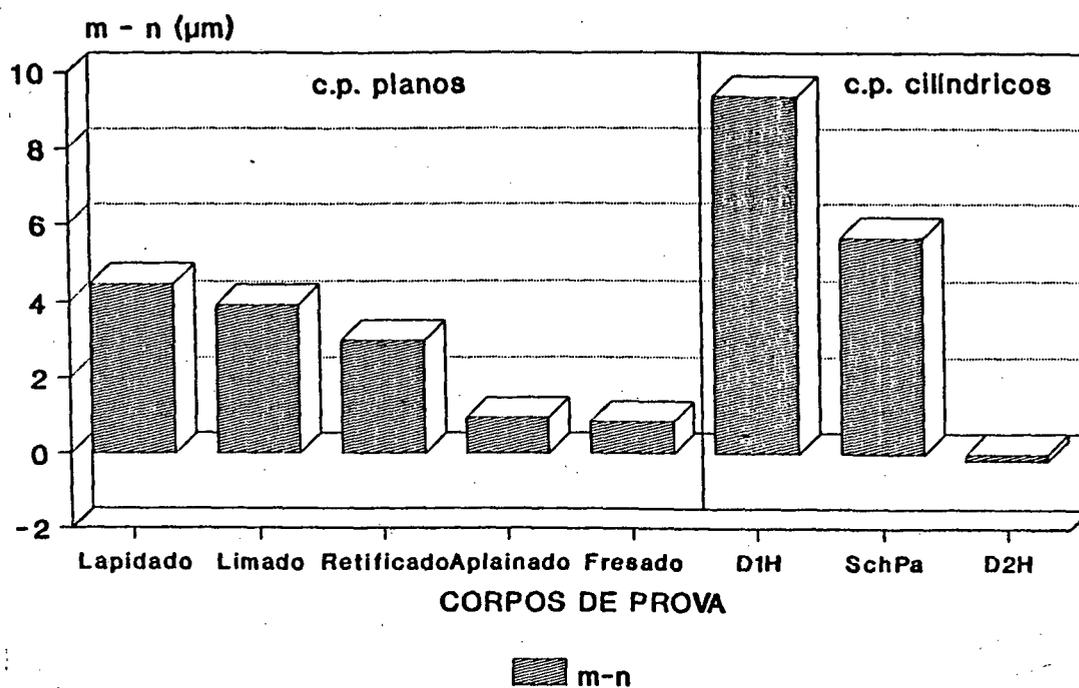


Figura 7-4: Diferença dos parâmetros  $m$  e  $n$ .

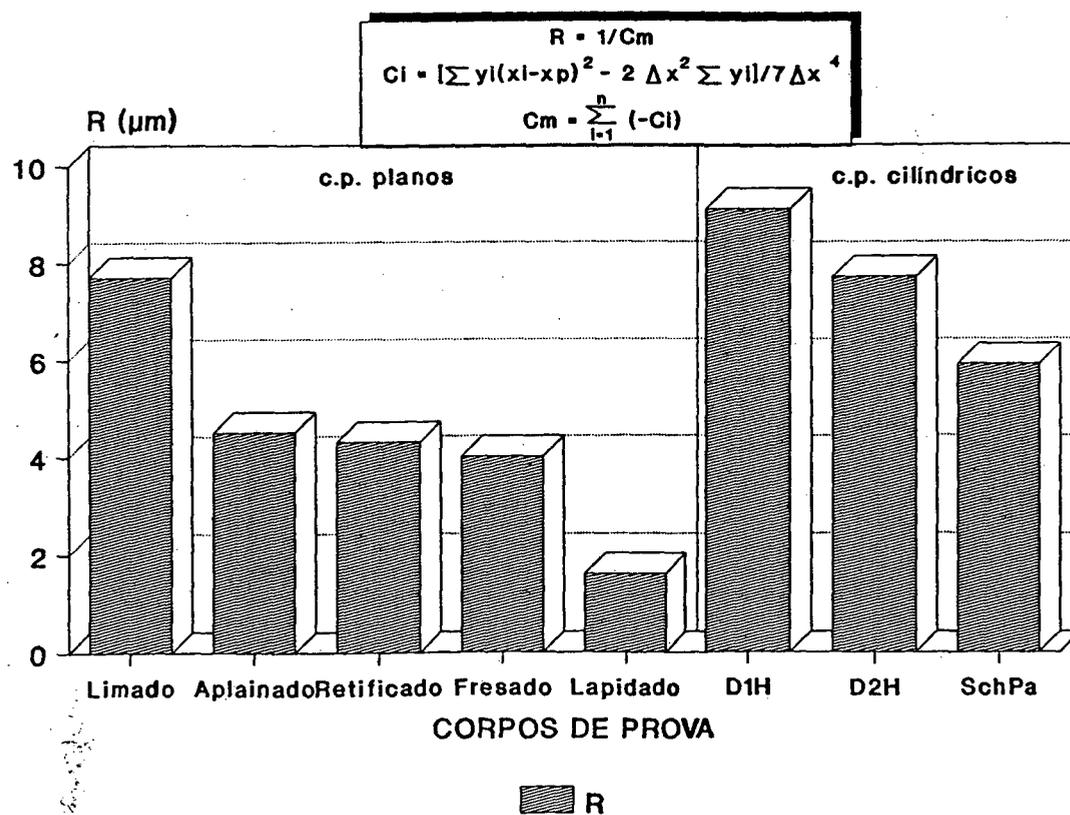


Figura 7-5: Raio ( $R$ ) de curvatura média.

O raio da curvatura média ( $R$ ) está apresentado na figura 7-5. Este raio está entre 1,6  $\mu\text{m}$  para o corpo de prova lapidado e 9,1  $\mu\text{m}$  para o torneado (D1H). A relação entre os desvios padrões para os raios de curvaturas médias teve o maior valor para o torneamento (D2H).

O valor absoluto médio da inclinação ( $N_{am}$ ) tem para o corpo de prova limado o menor valor entre os corpos de prova planos e para corpo de prova torneado (D1H) entre os cilíndricos, como mostra a figura 7-6. Aqui a relação entre os desvios padrões e o valor absoluto médio da inclinação  $N_{am}$  ficou abaixo de 9%.

A inclinação  $D_a$  do perfil mostra a mesma tendência crescente que o valor médio absoluto da inclinação  $N_{am}$ : 1. limagem; 2. retificação; 3. fresamento; 4. aplainamento (figura 7-6 e 7-7). Mas devido a suas definições diferentes, estes dois parâmetros ( $N_{am}$  e  $D_a$ ) mostram diferentes valores. Será dada preferência ao parâmetro  $N_{am}$  para a medição da inclinação dos flancos das elevações das superfícies, porque este parâmetro diferencia os corpos de prova mais intensamente através de seus valores discretos.

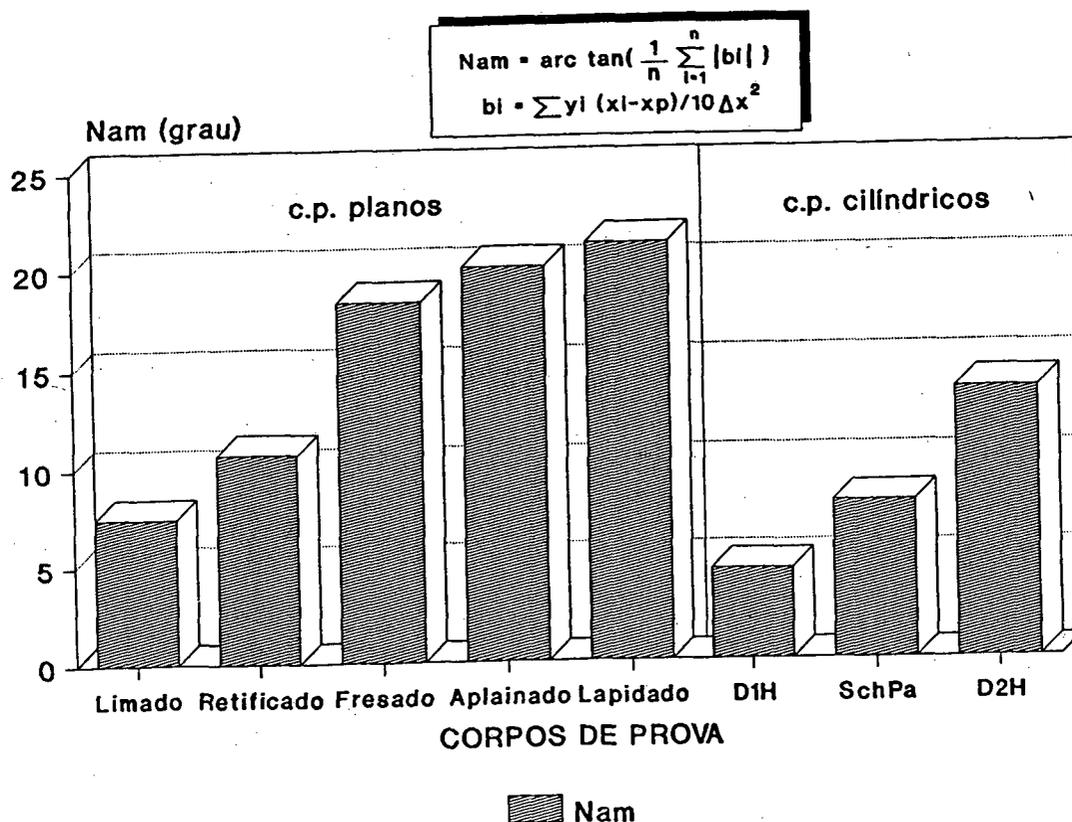


Figura 7-6: Valor absoluto médio da inclinação  $N_{am}$ .

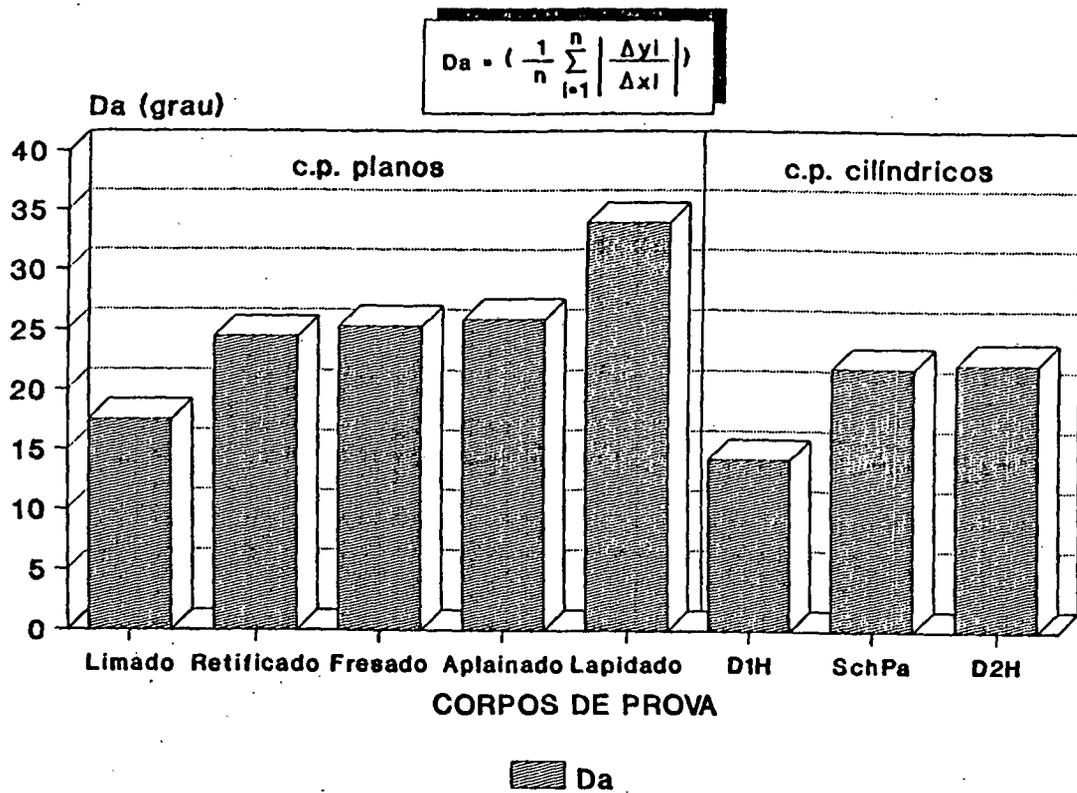


Figura 7-7: Inclinação  $D_a$  do perfil.

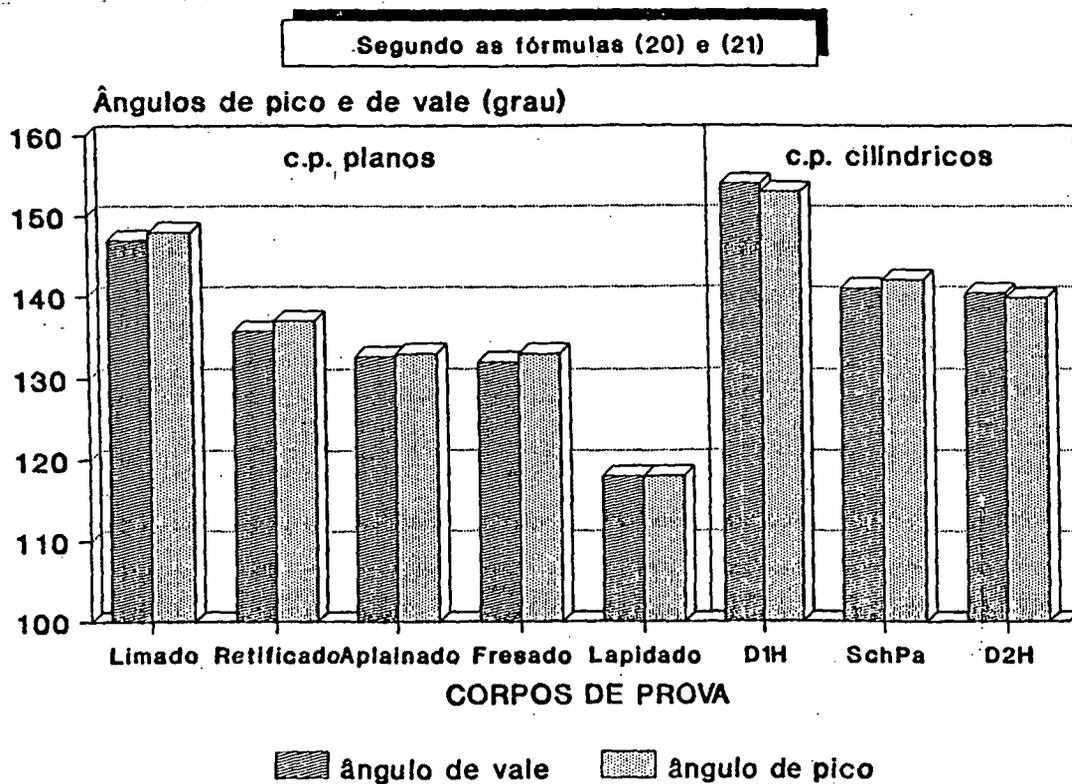


Figura 7-8: Ângulos de pico e de abertura dos vales.

Os ângulos de pico e de abertura dos vales ficaram entre  $118^\circ$  e  $154^\circ$ , como mostra a figura 7-8. O valor médio do ângulo de pico dos corpos de prova aplainado e fresado são iguais. O valor médio do ângulo de abertura para o corpo de prova fresado é um pouco menor que para o corpo de prova aplainado. Da comparação das figuras 7-6 e 7-8 resulta: quanto maior é o ângulo de pico, tanto menor é a inclinação.

Através da distribuição das distâncias das irregularidades do perfil ( $S_{mi}$ ) a periodicidade do corpo de prova torneado D2H foi constatada, com uma frequência média em torno do valor médio ( $S_m = 99 \mu\text{m}$ ) de 91,45%. O corpo de prova aplainado apresentou uma frequência máxima da irregularidade do perfil ( $S_m$ ) igual a 35%. Para o corpo de prova fresado a frequência máxima ficou em torno de 24%. Os outros corpos de prova não apresentaram nenhum sinal de frequência máxima em torno do valor médio de  $S_m$ . Isto também foi constatado através da função de correlação transversa. A obtenção da função de correlação transversa entre medições paralelas foi realizada com um deslocamento de 8 vezes "delta x". As figuras 7-9 até 7-16 mostram a função de correlação transversa dos corpos de prova examinados, para duas medições paralelas, distantes uma da outra de  $10 \mu\text{m}$ . A função de correlação transversa apresentou boa repetibilidade não só para uma distância de  $10 \mu\text{m}$  como também para as distâncias de  $100 \mu\text{m}$  e  $250 \mu\text{m}$ .

A função de correlação transversa do corpo de prova torneado D2H mostra, na figura 7-9, que este corpo de prova tem uma superfície muito periódica. Através do cálculo das distâncias entre dois picos vizinhos na curva da correlação transversa é possível se obter o avanço ( $f = S_m$ ) com que este corpo de prova foi fabricado. Entre dois picos há 18 passos de digitalização entre pontos e como a correlação foi realizada com um deslocamento de 8 vezes "delta x", o avanço ( $f = S_m$ ) é igual a 8 vezes "delta x" vezes 18. Onde "delta x" (a distância de digitalização) é igual a  $0,69 \mu\text{m}$ . Isto resulta  $f = S_m = 0,10 \text{ mm}$ . O alto valor da correlação "r" para o corpo de prova torneado mostra também que sua superfície tem uma grande dependência da direção.

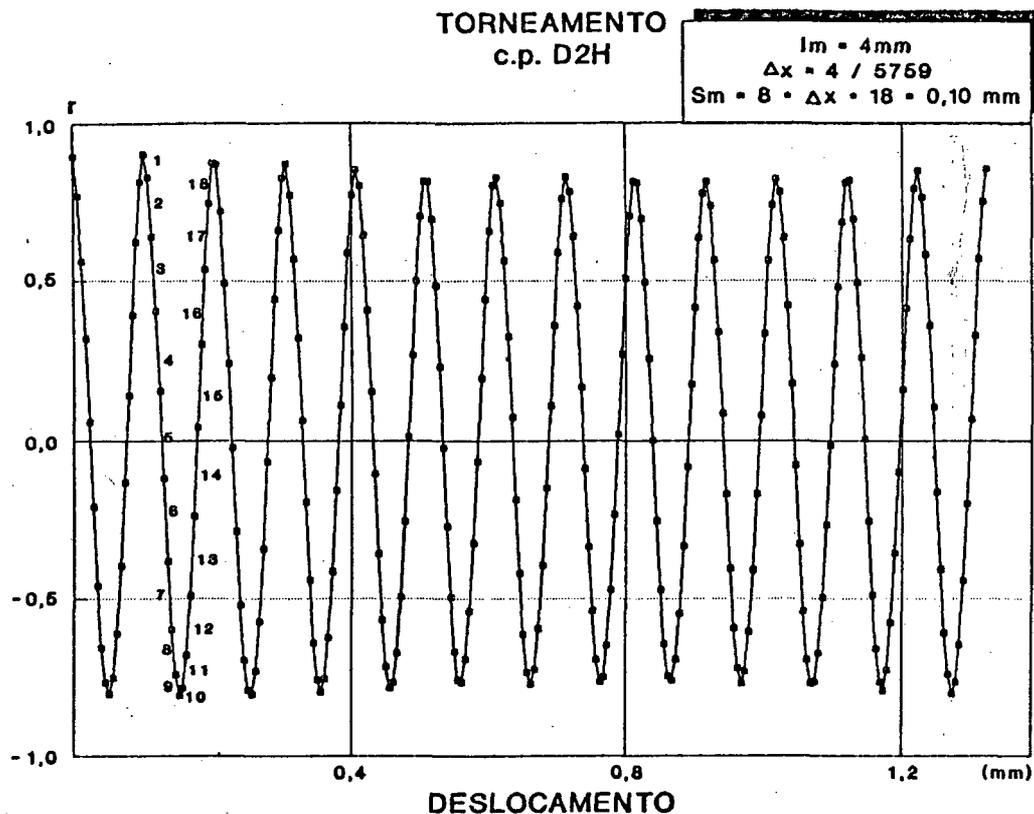


Figura 7-9: Função de correlação transversa para o corpo de prova torneado D2H.

A periodicidade do corpo de prova aplainado deixa-se reconhecer na figura 7-10. A função de correlação transversa diminui muito depressa no início; isto mostra que esta superfície tem uma dependência da direção menor quando comparado com o corpo de prova torneado D2H. O avanço ( $f = S_m$ ) do corpo de prova aplainado também pode ser calculado através da sua função de correlação transversa.

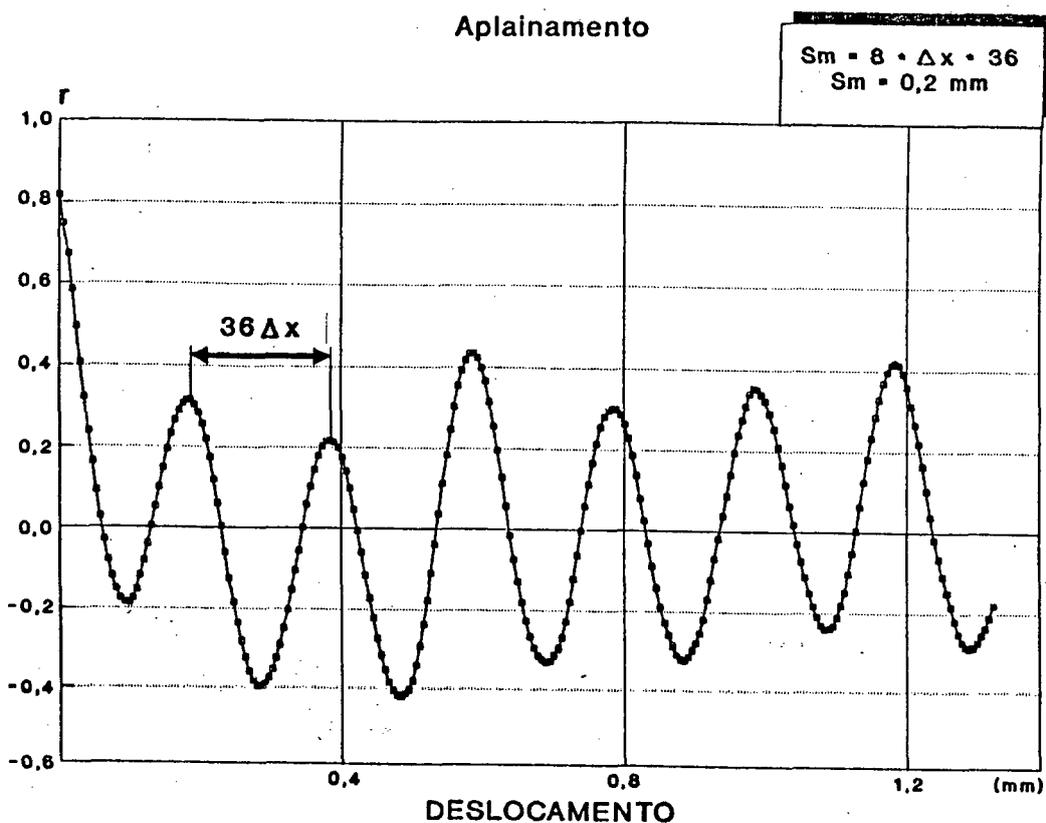


Figura 7-10: Função de correlação transversa para o c.p. aplainado.

Para o c.p. fresado o cálculo da distância das irregularidades do perfil ( $S_m$ ), como mostra a figura 7-11, através da função de correlação transversa recompõe nitidamente o avanço ( $f$ ) de fabricação deste c.p. como nos casos anteriores dos c.p. torneado e aplainado. Aqui a dependência da direção não é tão clara como para o c.p. torneado.

Uma periodicidade das superfícies dos outros corpos de prova não foi constatada através da função de correlação transversa, como pode ser constatado nas figuras 7-12 a 7-16. Os pequenos valores da correlação mostram que estes corpos de prova são independentes da direção.

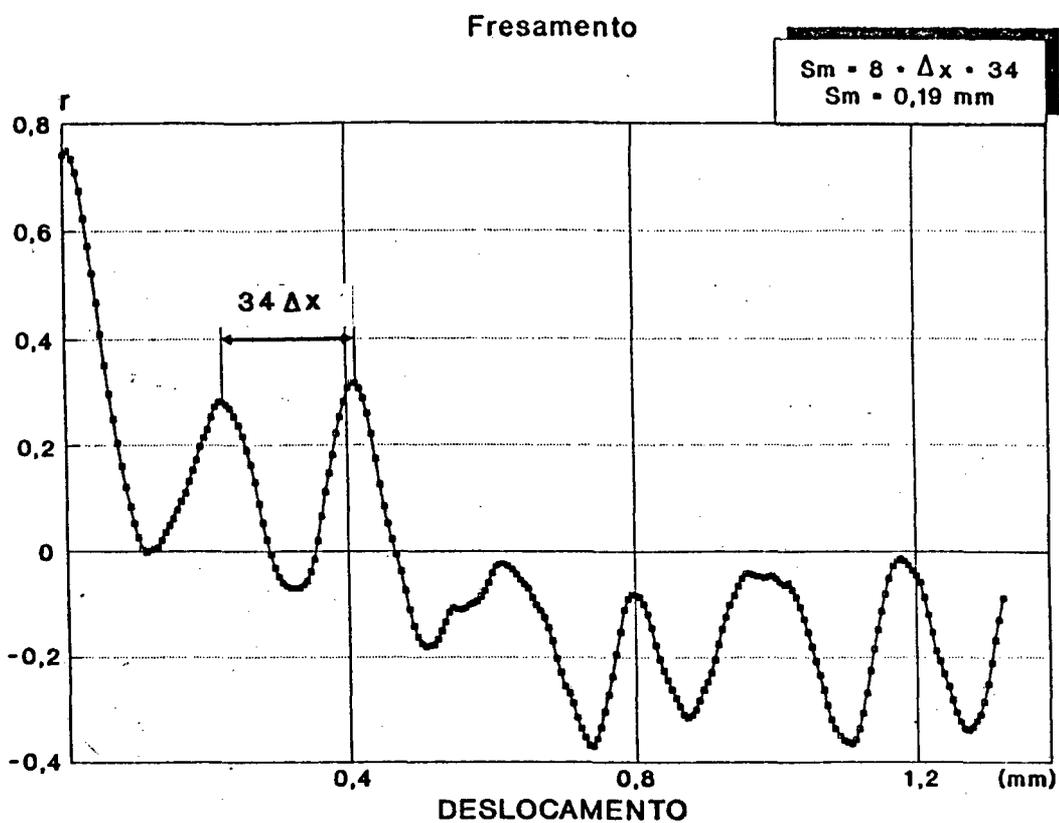


Figura 7-11: Função de correlação transversa para o c.p. fresado

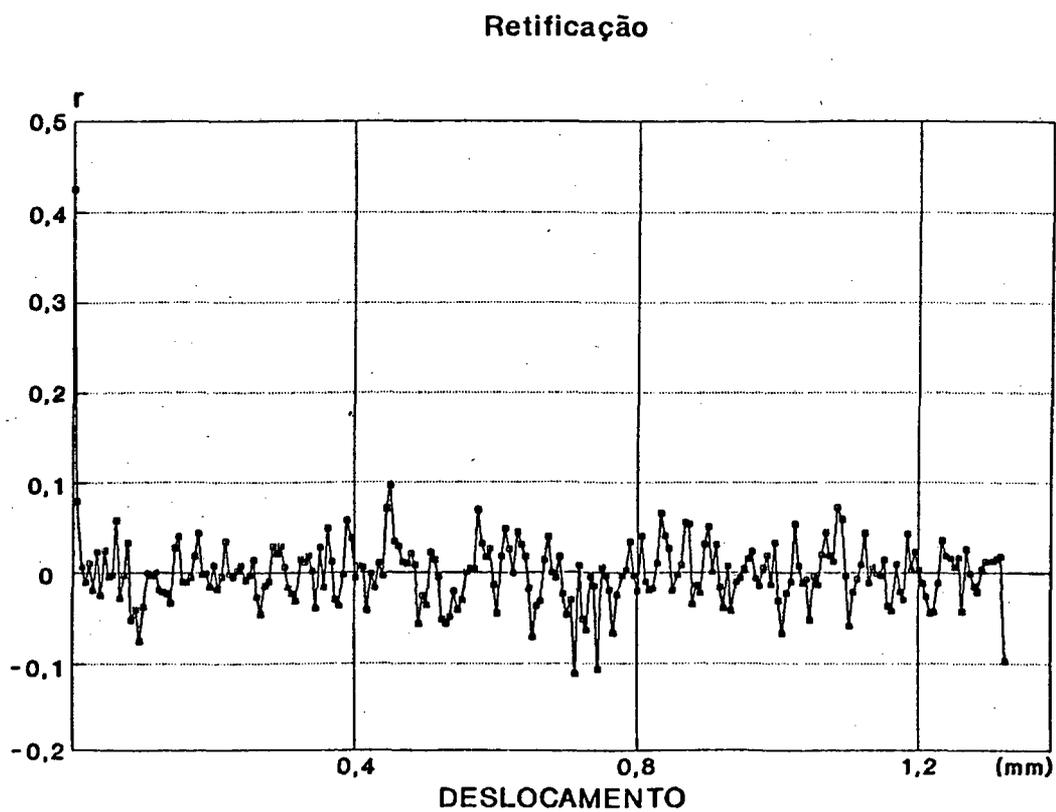


Figura 7-12: Função de correlação transversa para o c.p. retificado

## Lapidação

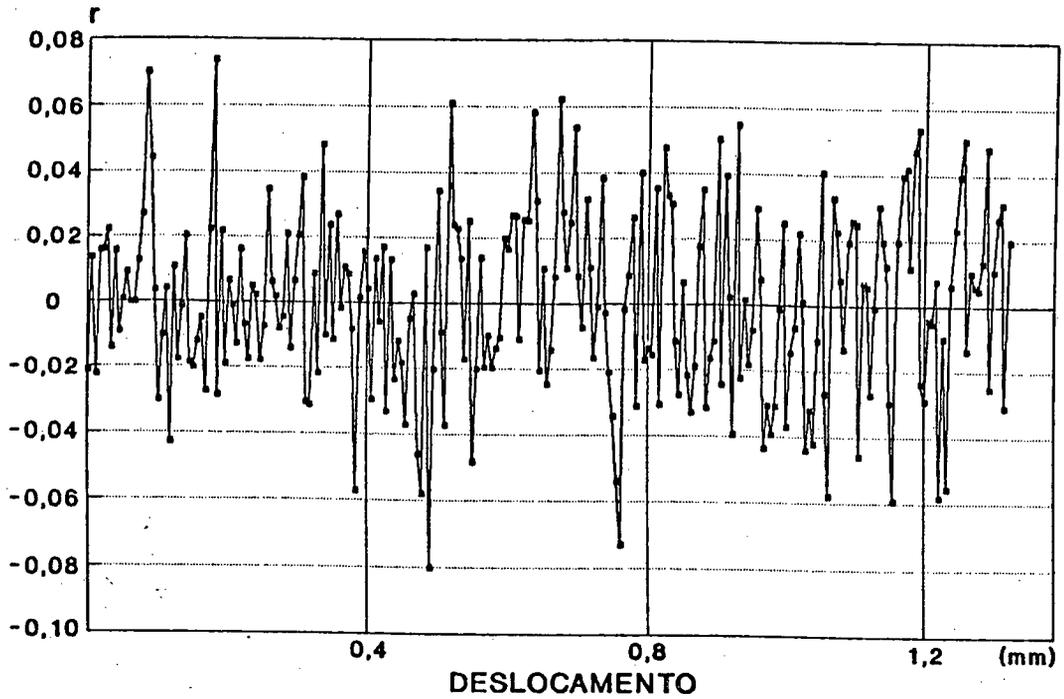


Figura 7-13: Função de correlação transversa para o c.p. lapidado.

## Limamento

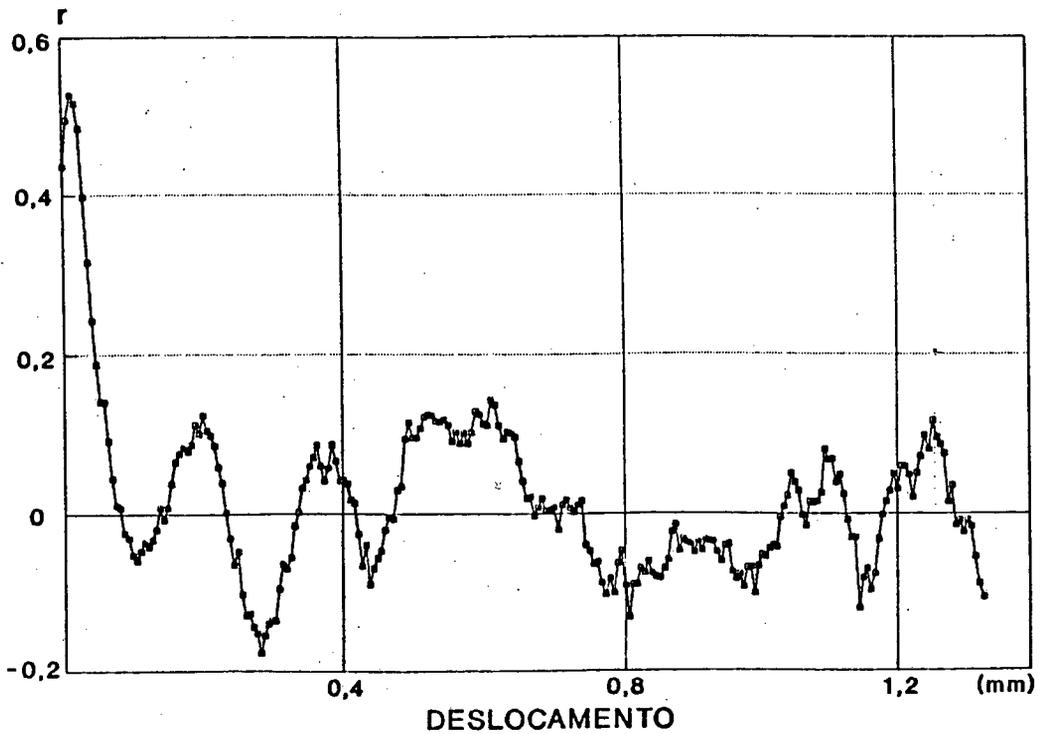


Figura 7-14: Função de correlação transversa para o c.p. limado.

Torneamento com alisamento  
c.p.: D1H

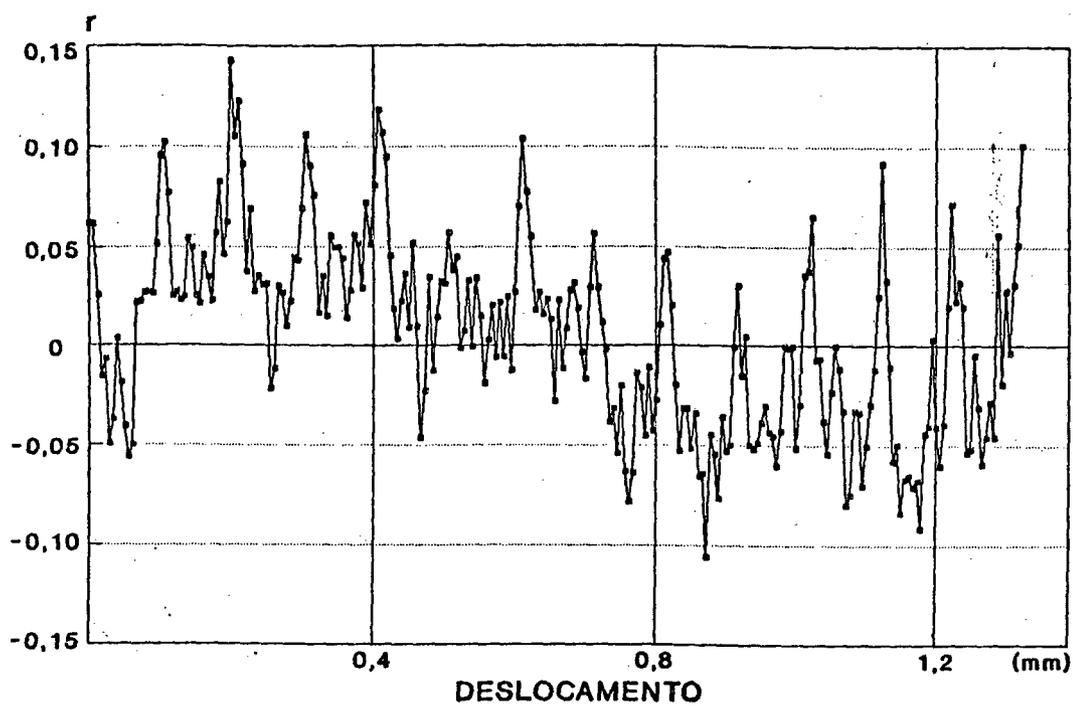


Figura 7-15: Função de correlação transversa para o c.p. torneado D1H.

Retificação  
c.p.: SchPa

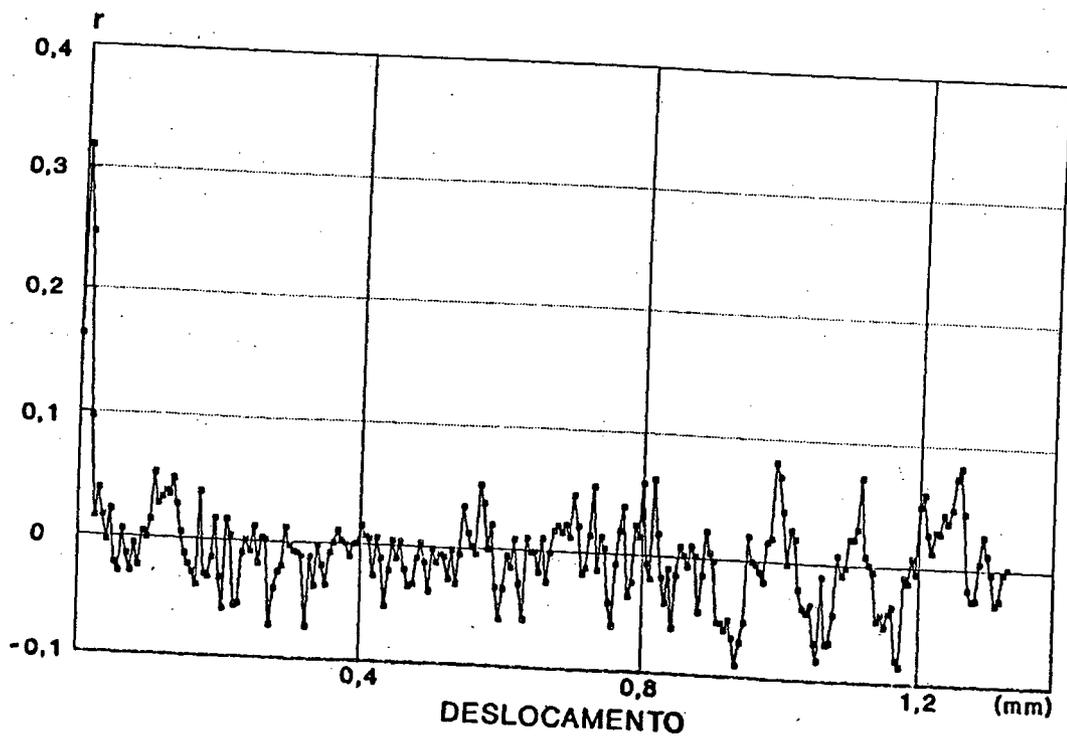


Figura 7-16: Função de correlação transversa para o c.p. retificado SchPa.

A análise de Fourier dos perfis dos corpos de prova examinados mostrou, da mesma forma que a função de correlação e a distribuição de freqüências das irregularidades do perfil ( $S_m$ ), que o corpo de prova D2H apresentou uma periodicidade muito clara (veja as figuras 6-4 e 6-7). A distribuição de freqüências das distâncias das irregularidades do perfil ( $S_{mi}$ ) é mais simples e matematicamente menos extensa em comparação com a função de correlação transversa e com a análise de Fourier.

A dependência da direção nos corpos de prova medidos, foi verificada com ajuda da função de correlação transversa (figura 7-17).

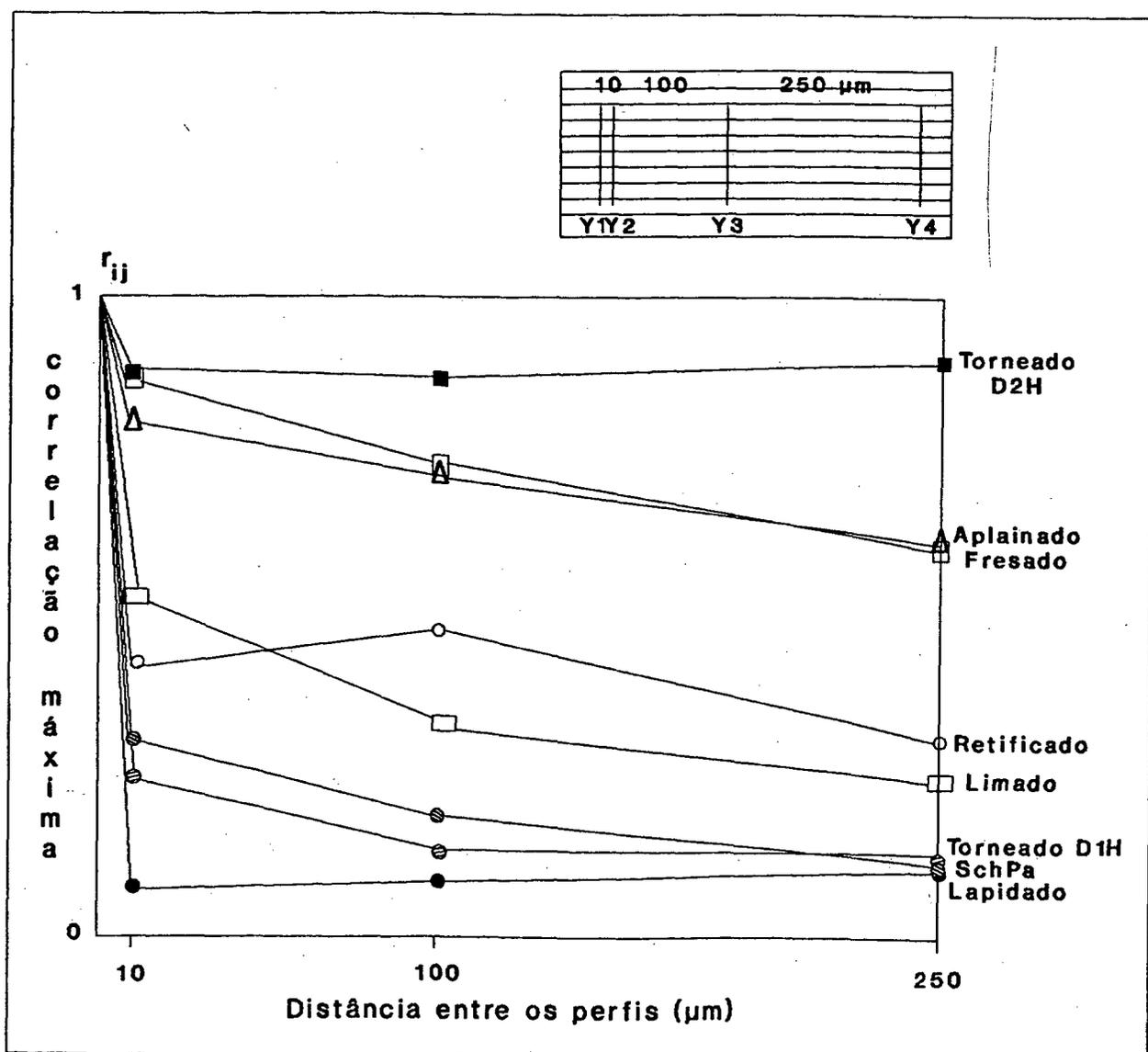


Figura 7-17: Dependência da direção.

As funções de correlação transversas foram calculadas entre quatro perfis das superfícies medidos paralelamente. As distâncias entre

os perfis (Y1, Y2, Y3 e Y4) foram escolhidas 10, 100 e 250  $\mu\text{m}$ . As funções de correlação transversa foram calculadas entre os perfis Y1 e Y2, Y1 e Y3, e entre Y1 e Y4. Os valores máximos destas correlações foram traçados, na figura 7-17, em função das distâncias entre os perfis. O corpo de prova torneado D2H mostra uma estampada dependência da direção.

O valor máximo da função de correlação transversa ( $r_{ij \text{ max}}$ ) para o c.p. torneado D2H cai cerca de 10%, depois de 250  $\mu\text{m}$ . Isto significa que os perfis paralelos medidos entre zero e 250  $\mu\text{m}$  são semelhantes na sua configuração. Os c.p. aplainados e fresados mostram depois de 250  $\mu\text{m}$  uma queda, do valor máximo da correlação  $r_{ij}$ , de 37% e 38% respectivamente. Os outros corpos de prova mostram de-pois de 250  $\mu\text{m}$  uma queda maior que 50% e já depois de 10  $\mu\text{m}$  uma forte queda em comparação com o c.p. torneado D2H, aplainado e fresado. Esta forte queda no início significa que estas superfícies são pouco dependentes da direção. O corpo de prova retificado apresentou a 100  $\mu\text{m}$  um valor mais alto que a 10  $\mu\text{m}$ , isto ocorre devido ao comportamento aleatório da superfície em questão.

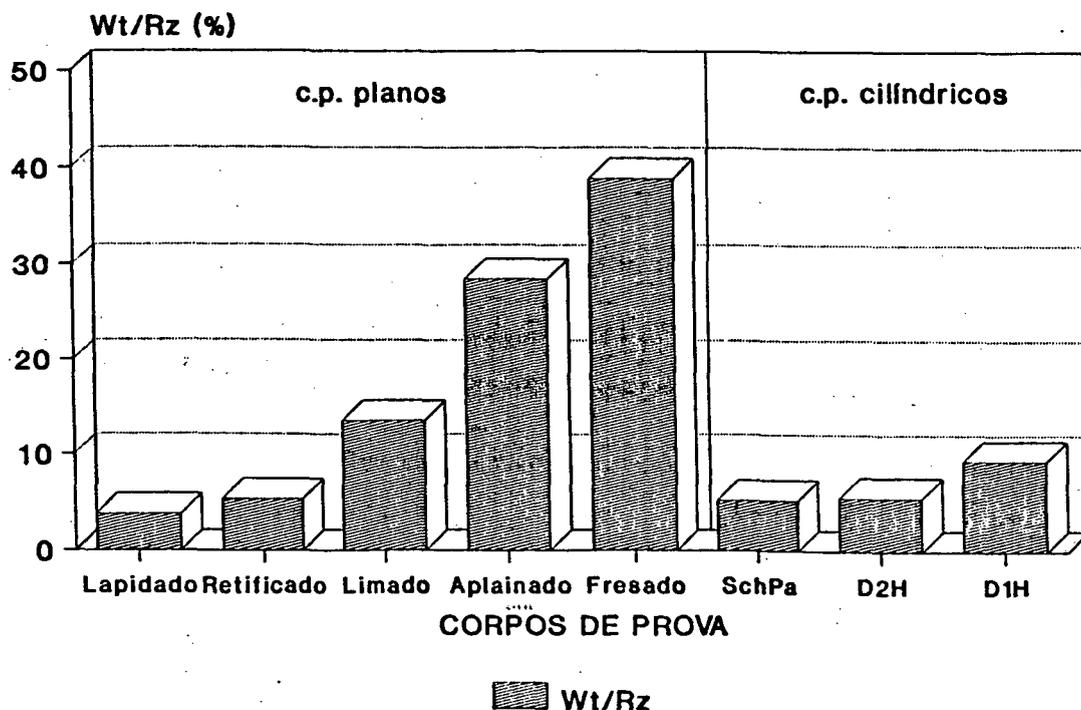


Figura 7-18: Relação  $W_t/R_z$  dos corpos de prova examinados.

A amplitude da rugosidade é normalmente maior que a amplitude de ondulação. A figura 7-18 mostra que a relação entre profundidade da ondulação  $W_t$  e profundidade média da rugosidade  $R_z$ , isto é  $W_t/R_z$ , ficou para todos os corpos de prova abaixo de 40%. A profundidade das ondas  $W_t$  assumiu pois valores sempre menores que a profundidade média das rugosidades.

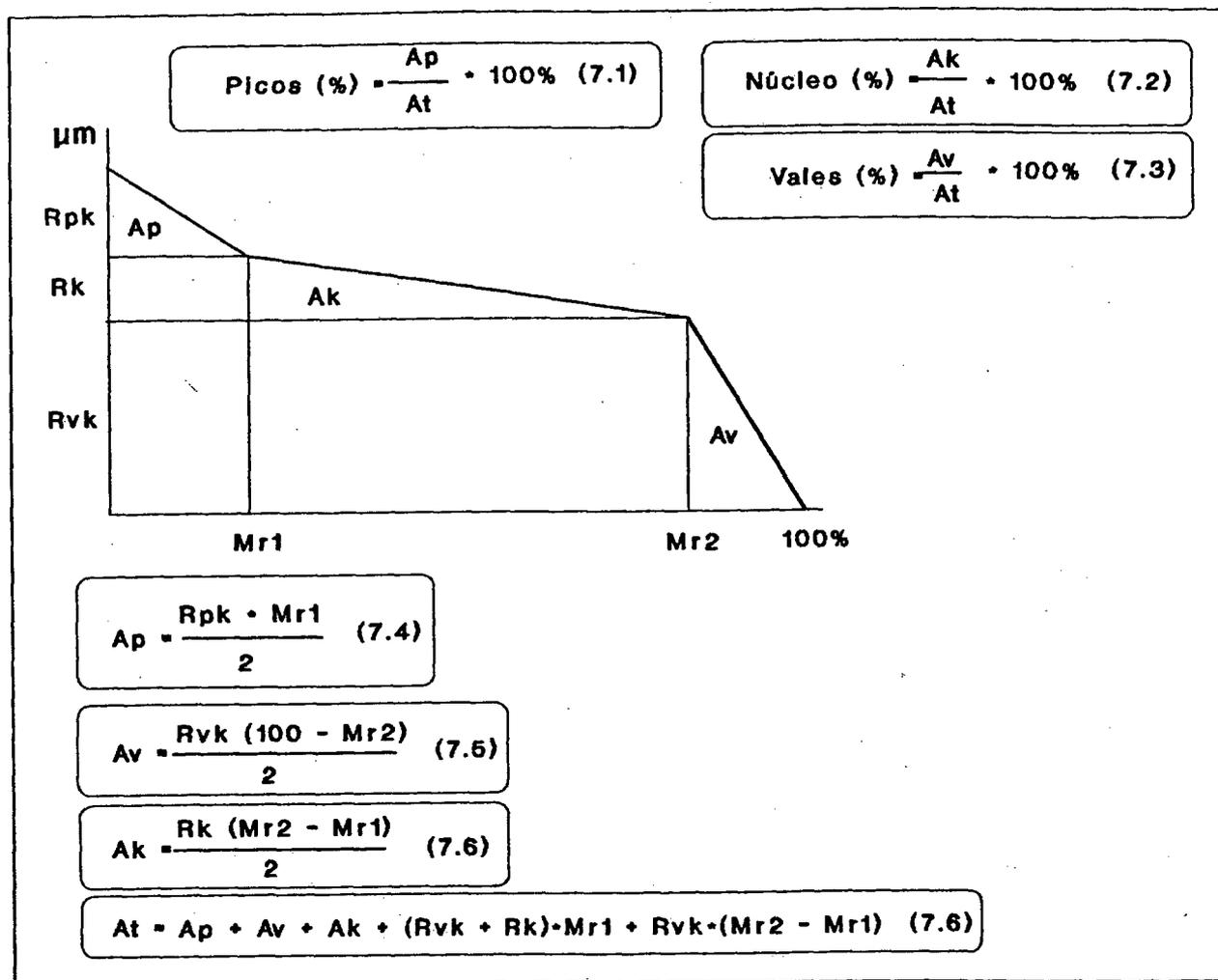


Figura 7-19: Percentual de picos, de vales e do núcleo.

A medição em perfil não filtrado é mais apropriada para averiguação das exigências microgeométricas e funcionais da superfície que a medição em perfil filtrado. A combinação de desvios verticais e horizontais de um perfil não filtrado (perfil-P) estão presentes na curva estatística de Abbott (macro-curva do perfil suportante). A aproximação desta curva por três retas divide o desvio de forma em três regiões: região de picos; região central e região de vales. Estas três regiões podem ser definidas através da relação de áreas da macro-curva do perfil suportante (figura 7-19). O percentual de picos, vales e núcleo calculados para os corpos de prova aqui examinados estão apresentados na figura 7-20.

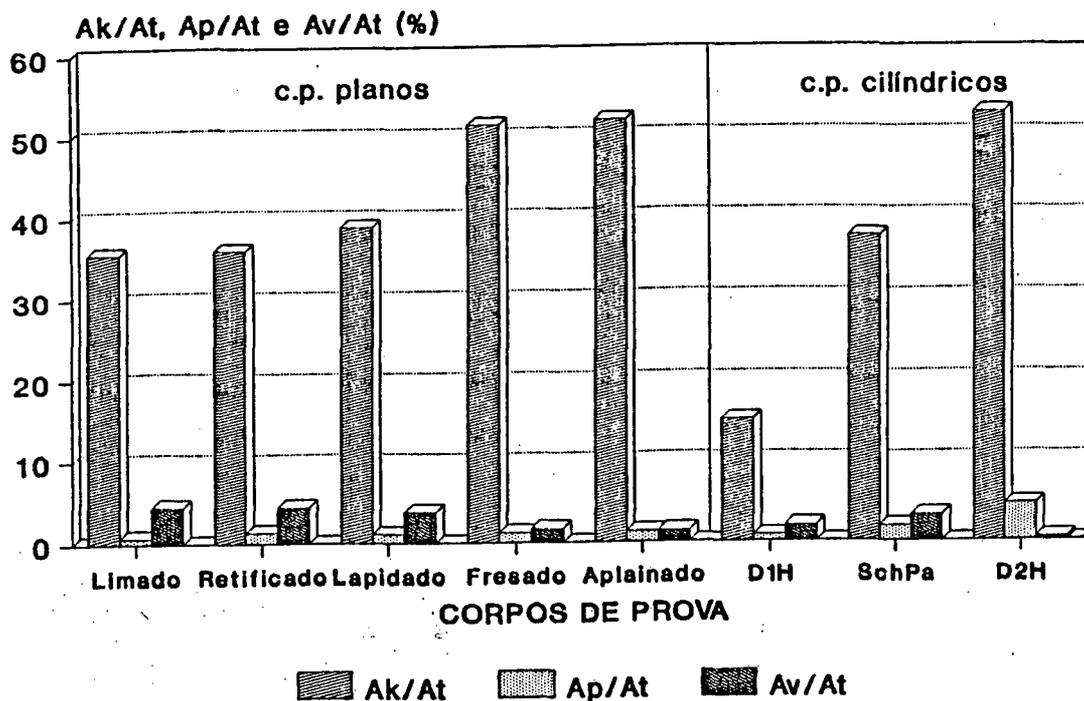


Figura 7-20: Valores calculados do percentual de picos, de vales e do núcleo.

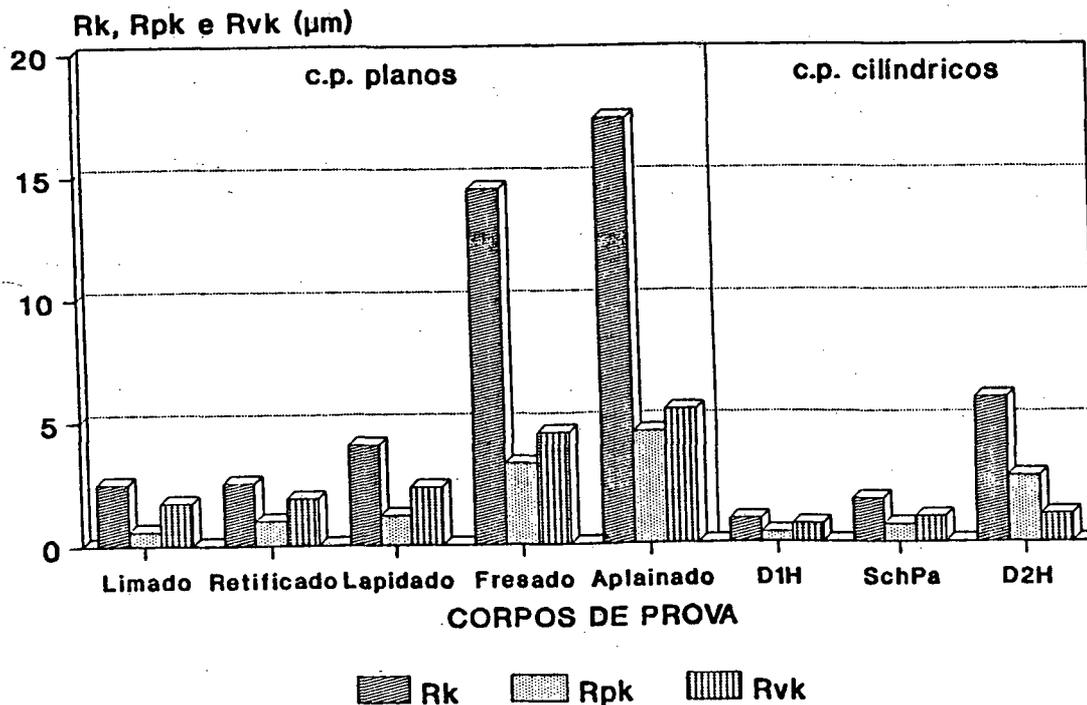


Figura 7-21: Parâmetros da macro-curva do perfil sustentador.

A figura 7-20 tem a mesma ordenação que a figura 7-21, onde a altura da rugosidade central  $R_k$ , a altura reduzida dos picos  $R_{pk}$  e a altura reduzida dos vales  $R_{vk}$  são apresentados, para perfis não filtrados. Estes três parâmetros representam aqui não mais três regiões da rugosidade, porém três regiões do perfil-P da superfície, que é composto de ondulação e rugosidade.

A vantagem dos parâmetros da figura 7-20 é que eles abrangem os desvios verticais e horizontais. Por esta razão eles são mais confiáveis que os parâmetros da figura 7-21. A apresentação do percentual de pico e vale ( $A_p/A_t$  e  $A_v/A_t$ ) na figura 7-22 elucida que o c.p. torneado D2H devido ao seu grande percentual de elevações e os c.p. fresados e aplainados devido aos seus pequenos percentuais de vales não são apropriados para uma SDL. Isto também está mostrado na figura 7-20 através do grande percentual de núcleo destes corpos de prova.

A figura 7-23 mostra a relação entre desvio padrão e os parâmetros altura da rugosidade central  $R_k$ , altura reduzida dos picos  $R_{pk}$  e altura reduzida dos vales  $R_{vk}$ . Esta relação para os c.p. aplainado e fresado tem um valor máximo de cerca de 20%, o que para medições de superfícies técnicas ainda é aceitável. Para as superfícies aplainadas, o valor da altura reduzida dos vales  $R_{vk}$  foi de  $5,42 \pm 1,69$  o que representa uma variação de 31,8%. Esta foi a maior variação ocorrida entre todos os parâmetros medidos.

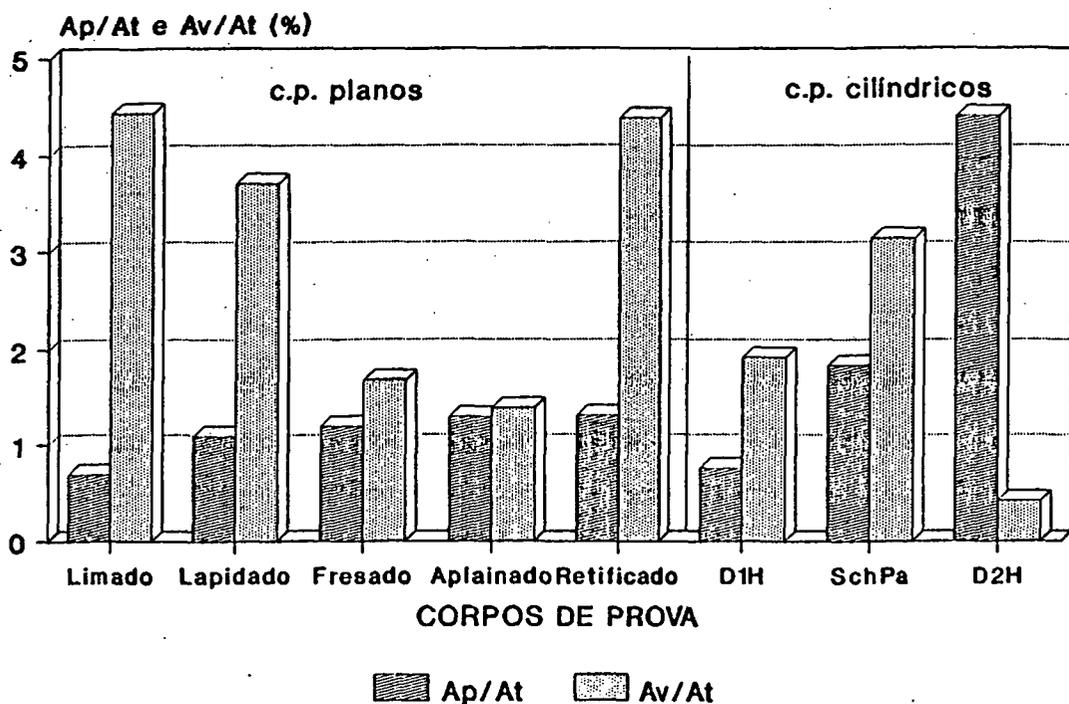


Figura 7-22: Valores calculados do percentual de picos e de vales.

DESVIO PADRÃO  
VALOR MÉDIO

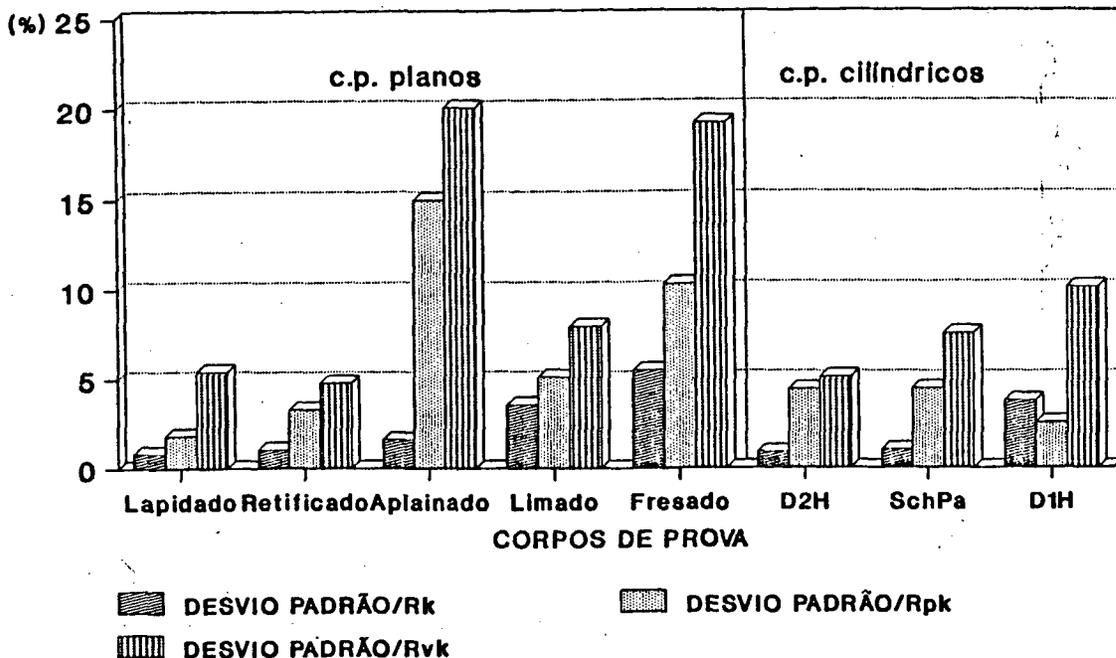


Figura 7-23: Relação entre desvio padrão e os parâmetros altura da rugosidade central  $R_k$ , altura reduzida dos picos  $R_{pk}$  e altura reduzida dos vales  $R_{vk}$ .

O ângulo  $\theta_k$ , como definido no capítulo 6 é um parâmetro que permite averiguar quantitativamente os patamares das superfícies. O resultado da medição deste parâmetro está apresentado na figura 7-24.

O parâmetro  $\theta_k$  não apresenta a mesma ordenação dos corpos de prova que o coeficiente de simetria  $S_k$ . Isto é explicado pelo fato de que:

- para  $\theta_k$  os picos e os vales não são levados em consideração;
- para  $\theta_k$  os desvios verticais e horizontais (amplitudes e frequências) são levados em conjunto em consideração e
- para a obtenção do coeficiente de simetria  $S_k$  as perturbações são elevadas a potência três.

Pelas três razões citadas acima o ângulo  $\theta_k$  é um parâmetro mais confiável que o coeficiente de simetria.

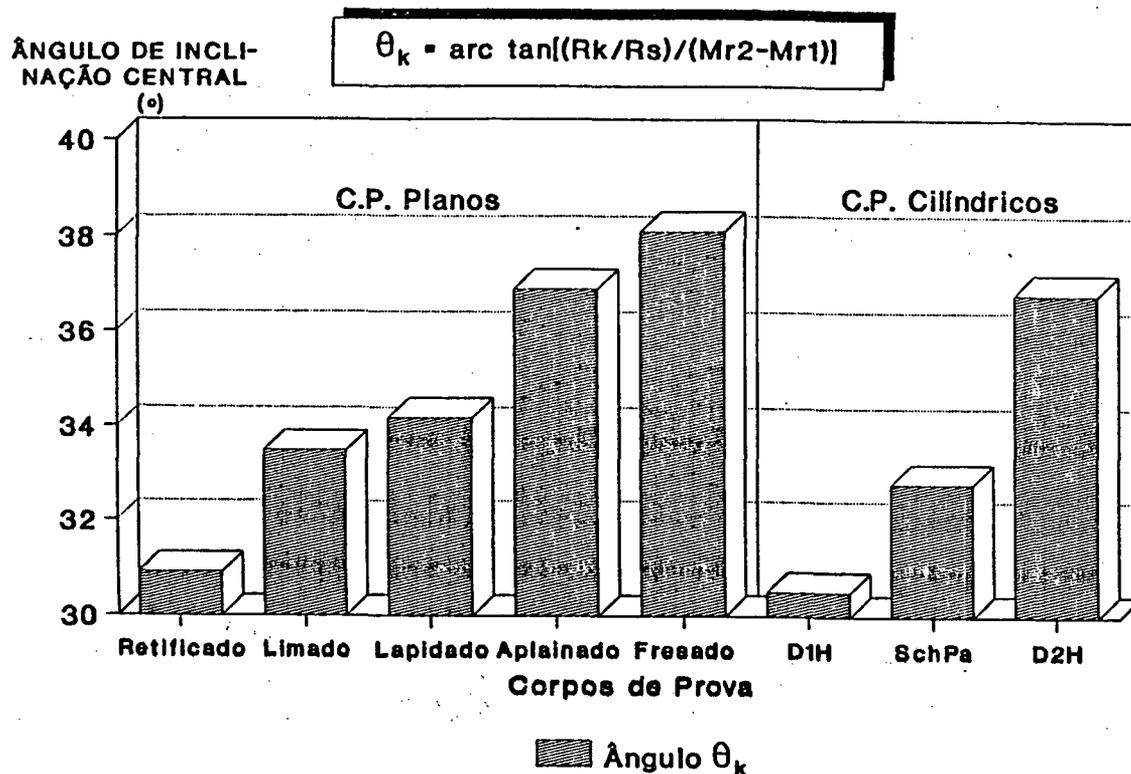


Figura 7-24: Ângulo de inclinação central  $\theta_k$ , um parâmetro para os patamares

### 7.3 Parâmetros para os fatores de avaliação que descrevem a micro-geometria de uma superfície

Os parâmetros para os fatores de avaliação que descrevem a micro-geometria de uma superfície (por exemplo a de uma SDL) foram aqui escolhidos em função dos resultados das medições e estão apresentados na figura 7-25.

Para os desvios geométricos foi escolhido o desvio médio aritmético  $R_a$ , porque ele é o menos influenciado por perturbações aleatórias do que os outros parâmetros capazes de medirem os desvios geométricos e que foram apresentados na tabela 6-1. Para avaliação dos desvios horizontais, a distância média das irregulari-

dades do perfil  $S_m$ , a análise de Fourier e a função de correlação transversa são bem apropriadas.

A SDL exige uma superfície platafórmica. O ângulo  $\alpha_k$  é um novo parâmetro para a apreciação quantitativa dos patamares. Este ângulo é menos influenciado por perturbações externas aleatórias do que o coeficiente de simetria  $S_k$  ou pela função Beta.

A dependência da direção pode ser constatada quantitativamente através da função de correlação transversa, mas uma informação qualitativa através da textura da superfície satisfaz.

A apreciação do ângulo de inclinação dos flancos das elevações de uma superfície, que para uma SDL segundo Bodschwinn /91/ deve estar entre  $1^\circ$  e  $3^\circ$ , pôde melhor ser obtido através do valor médio absoluto da inclinação  $N_{am}$ .

As reentrâncias e elevações foram aqui medidas a partir da relação de áreas da curva do perfil sustentador, através das equações (7.1) e (7.3). O percentual de picos ( $A_p/A_t$ ) e o percentual de vales ( $A_v/A_t$ ) são mais apropriados que os parâmetros altura reduzida de pico  $R_{pk}$  e profundidade reduzida de vale, para a apreciação das elevações e reentrâncias, pois diferentes superfícies podem ter o mesmo valor de  $R_{pk}$  ou  $R_{vk}$ .

Descrição da microgeometria de uma SDL através de:					
1.desvlo geométrico	2.tipo do perfil	3.dependência da direção	4. Ângulos	5.reentrância	6.elevação
Superfície ideal	superfície plataforma	superfície dependente da direção	pequeno ângulo de flanco	grande percentual de vales	pequeno percentual de picos arredondados
Parâmetros	Ra	Θ k	Nam	Av/At	Ap/At

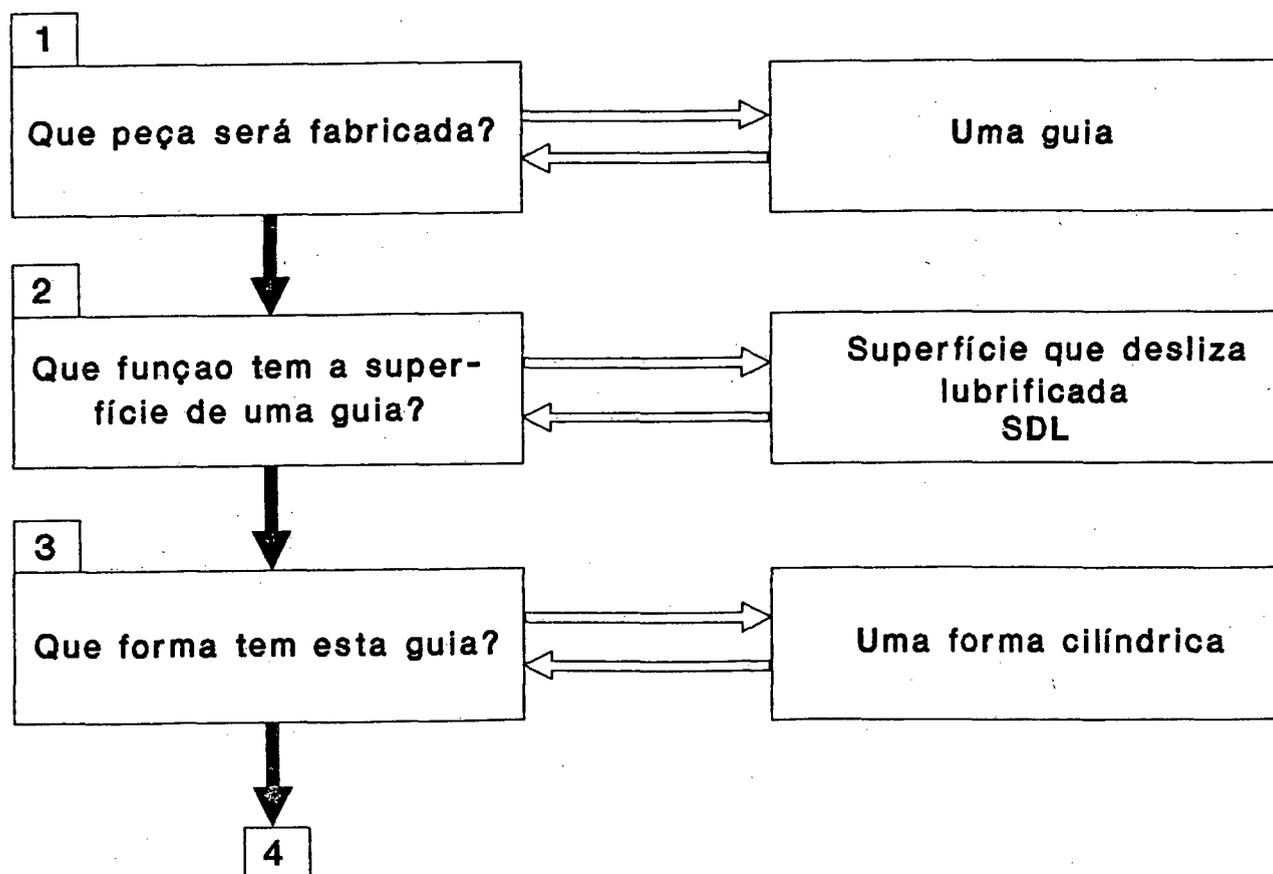
Figura 7-25: Parâmetros escolhidos para avaliação da microgeometria de uma superfície.

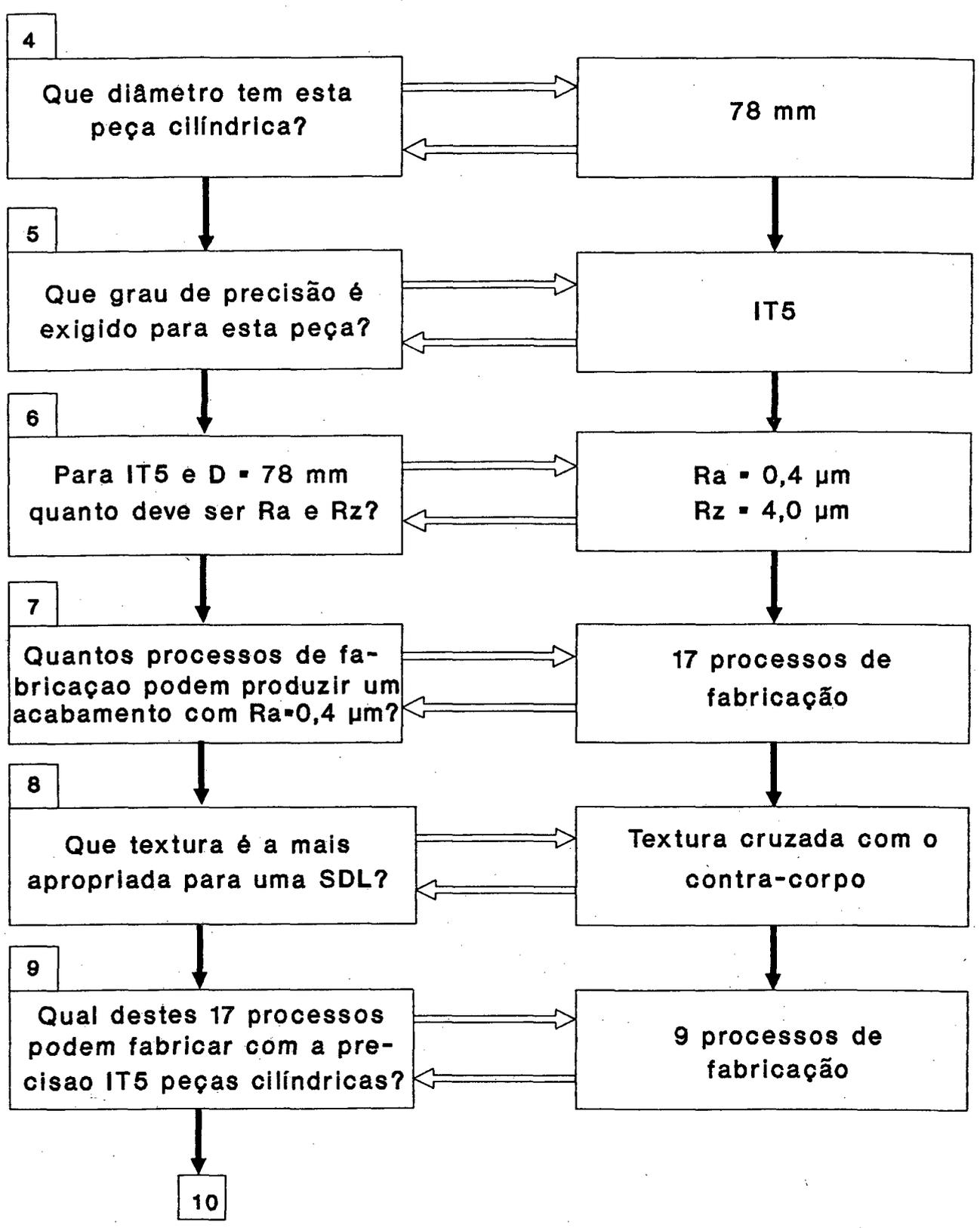
## 8. SISTEMÁTICA DA ESCOLHA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

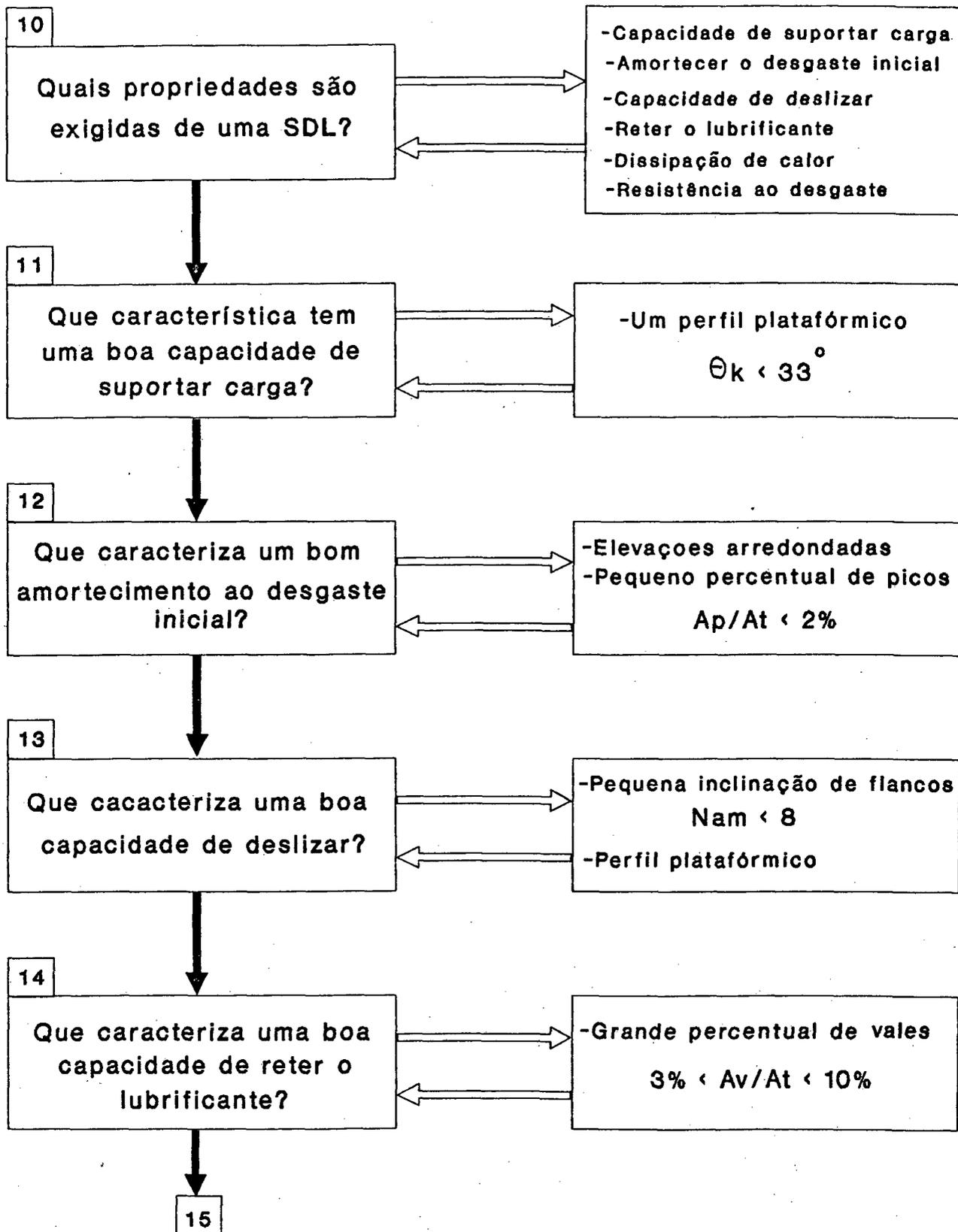
### 8.1 Fluxograma da sistematização

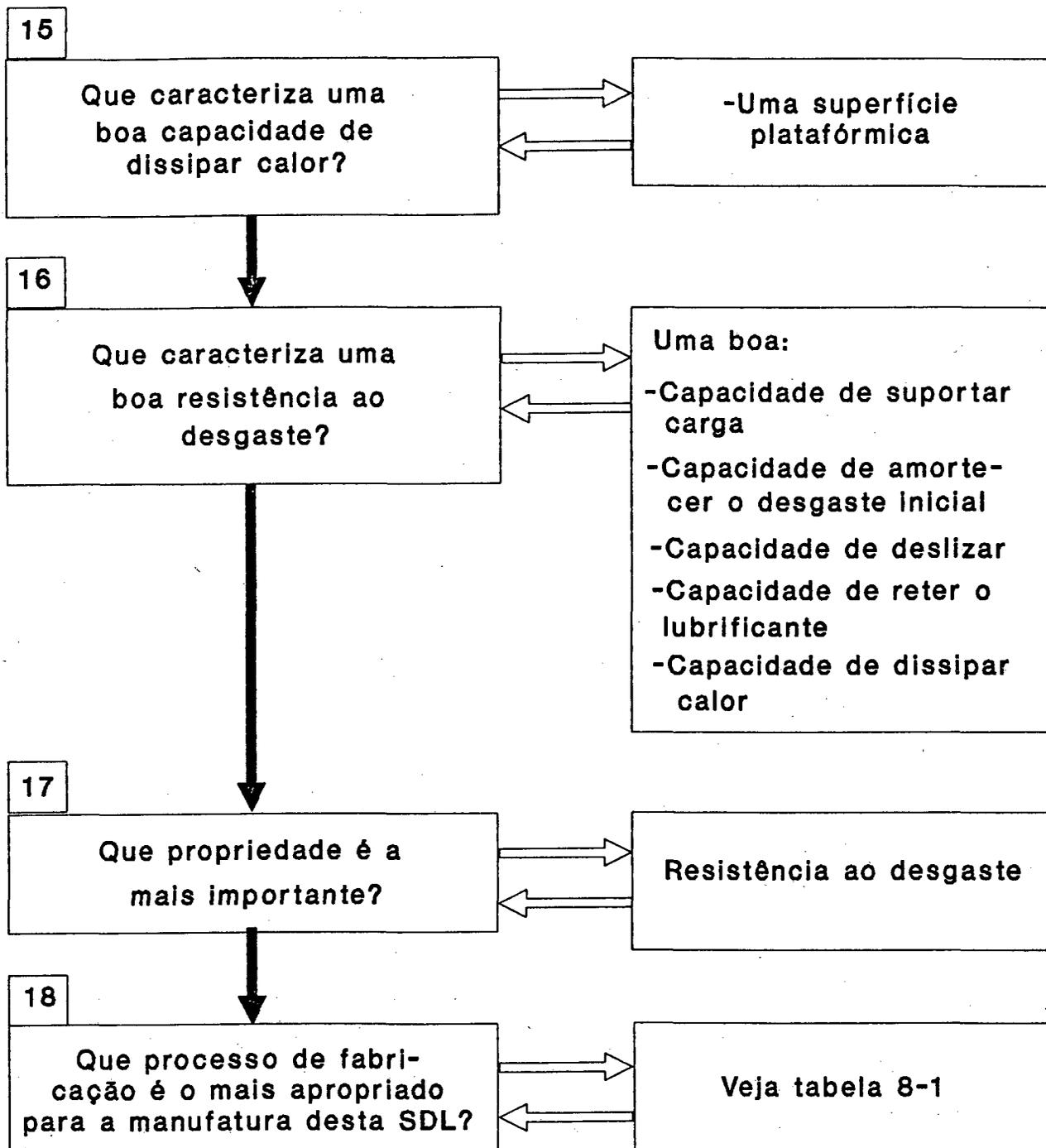
O esquema básico da sistematização da escolha do processo de fabricação para a manufatura de uma superfície técnica, a qual tem uma determinada função a preencher, foi apresentado na figura 3-1. Aqui este esquema básico está apresentado em detalhes na forma de um fluxograma. Este fluxograma foi desenvolvido na forma de perguntas, as quais podem ser feitas quando se quer fabricar uma determinada peça. O fluxograma é apresentado em seguida e explicado no próximo sub-capítulo.

#### FLUXOGRAMA DA SISTEMATIZAÇÃO









## 8.2 Exemplo de uma escolha

Com ajuda dos resultados das medidas, que foram apresentados no capítulo 7, e do fluxograma acima, é possível se escolher, como vamos aqui descrever, um processo de fabricação para a manufatura de uma SDL. Os processos de fabricação utilizados na usinagem das superfícies que foram medidas no capítulo 7, foram aqueles que se tinham à disposição. Estes processos não são ideais para a fabricação de uma SDL, como constataremos aqui. Eles serão utilizados apenas para mostrar um procedimento de escolha do processo de fabricação.

Os limites quantitativos dos fatores de avaliação são necessários para tornar a escolha possível. Estes limites foram fixados medindo-se superfícies do tipo SDL novas e usadas, como mangote da contra-ponta de torno, mancais e cames de vira-brequeim e guias.

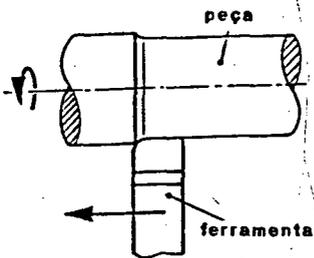
A primeira pergunta do fluxograma foi: o que se deseja fabricar? Aqui foi tomada como exemplo uma guia. Uma guia tem a função de uma SDL. Se se desejar fabricar um outro tipo de peça cuja função de sua superfície não seja conhecida, é recomendado para responder a segunda pergunta do fluxograma as literaturas /1/ e /3/.

A forma da peça a ser fabricada é uma informação muito importante para a escolha do processo de fabricação. Uma guia pode ser plana ou cilíndrica; aqui tomamos como exemplo uma de forma cilíndrica. Com isto eliminam-se todos os processos de fabricação, os quais produzem peças de superfícies planas.

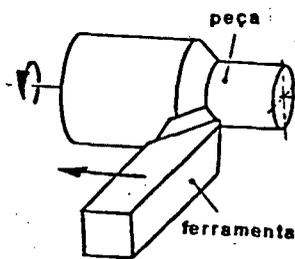
A conexão entre grau de precisão (medida de tolerância) e rugosidade deve ser indicada, segundo Noppen /3/, da seguinte maneira: a profundidade média da rugosidade  $R_z$  deve corresponder aproximadamente a metade da tolerância básica.

Valores aproximados para  $R_a$  e  $R_z$  como função da medida nominal e do grau de tolerância foram propostos por Osanna, Noppen e pela VDI 3219 /3,120,121/. Na prática superfícies do tipo SDL são fabricadas com uma tolerância entre IT6 e IT4. Para superfícies deslizantes  $R_t$  fica entre 0,4 e 11  $\mu\text{m}$ , sendo que na maioria das aplicações encontrou-se valores de rugosidade  $R_t$  entre 2,0 e 4,0  $\mu\text{m}$  /94/.

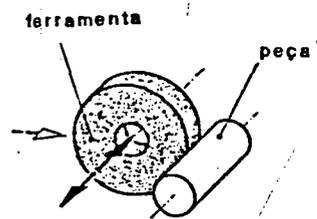
Para um diâmetro de 78 mm e um grau de precisão IT5, o desvio médio aritmético da rugosidade  $R_a$  é, segundo Osanna, aproximadamente  $0,4 \mu\text{m}$  e a profundidade média da rugosidade  $R_z$  aproximadamente  $4,0 \mu\text{m}$  /120/. Um desvio médio aritmético  $R_a$  igual a  $0,4 \mu\text{m}$  pode ser fabricado segundo a DIN 4766 através de 17 diferentes processos de fabricação /122/. Destes 17 processos de fabricação só 9 (veja figura 8-1) podem fabricar peças cilíndricas com o determinado grau de precisão.



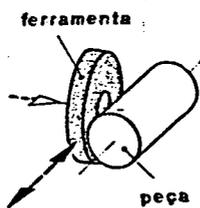
Torneamento com alisamento



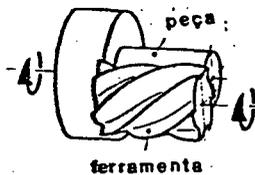
Torneamento longitudinal



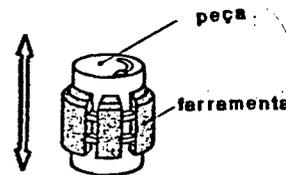
Retificação cilíndrica



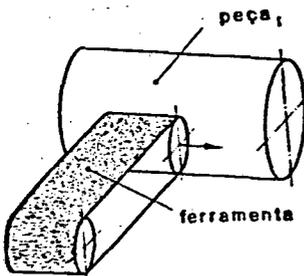
Retificação cilíndrica de topo



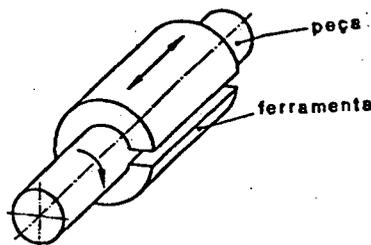
Fresamento cilíndrico



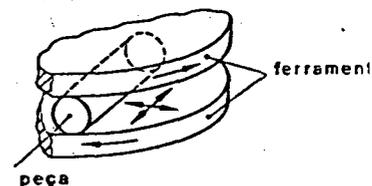
Brunimento cilíndrico



Retificação com lixa



Lapidação cilíndrica circular



Lapidação cilíndrica lateral

Figura 8-1: Peças cilíndricas, fabricadas por usinagem com desvio médio aritmético de rugosidade  $R_a$  cerca de  $0,4 \mu\text{m}$ .

Dos 9 processos de fabricação apresentados na figura 8-1, os três primeiros foram examinados neste trabalho, porque eles eram os únicos que se tinha a disposição.

A escolha de um processo de fabricação deve ser realizada, daqui por diante, segundo a observação das propriedades exigidas a uma SDL. As propriedades exigidas a uma SDL (resistência ao desgaste, capacidade de delizar, amortecimento ao desgaste inicial, capacidade de suportar carga, capacidade de reter o lubrificante e capacidade de dissipar calor) foram apresentados e esclarecidos no capítulo 4.

Uma boa capacidade de suportar carga é caracterizada através de um perfil platafórmico. O ângulo de inclinação central  $\theta_k$  mostra, na figura 7-24, que o processo de fabricação torneamento com pastilha de alisamento (corpo de prova D1H) produz uma superfície, que é a mais platafórmica entre as examinadas. O cálculo deste ângulo mostra para as SDL novas um valor em torno de  $33^\circ$  e para as SDL usadas um valor em torno de  $25^\circ$ . Quanto menor é o ângulo de inclinação central  $\theta_k$ , tanto mais se pronuncia o caracter platafórmico da superfície.

Um bom amortecimento do desgaste inicial exige um arredondamento dos cantos das elevações, os quais podem ser levados em consideração através do raio de curvatura média. A figura 7-5 mostra, que o maior raio médio é o do c.p. D1H. Um pequeno percentual de picos ( $A_p/A_t$ ) é também propício para a SDL.  $A_p/A_t$  entre 0,05% e 2% foi encontrado para as SDL aqui medidas. O c.p. D1H com  $A_p/A_t < 1\%$  mostra o menor percentual de picos, figura 7-22. Quanto maior a curvatura média e quanto menor é o percentual de picos  $A_p/A_t$ , tanto melhor é o amortecimento do desgaste inicial /91/.

Uma boa capacidade de deslizar tem que ter além de um perfil platafórmico também uma pequena inclinação dos flancos das elevações (sub-capítulo 4.2.3). O corpo de prova torneado D1H apresentou a menor inclinação de encosta dos perfis examinados, a qual pode ser avaliada através do parâmetro valor absoluto médio da inclinação  $N_{am}$ . Para uma SDL é proposta aqui uma faixa de  $N_{am} < 8^\circ$ .

A propriedade geométrica exigida para uma boa capacidade de reter o lubrificante é uma grande área de reentrância. Para os corpos de prova cilíndricos, a figura 7-22 mostra que o maior percen-

tual de reentrância é apresentado pelo c.p. retificado (referência SchPa). Porém este corpo de prova SchPa tem uma grande área de picos em comparação com o c.p. torneado DIH, o que não é favorável ao amortecimento do desgaste inicial e em consequência disto à resistência ao desgaste (através do processos de acabamento de brunimento é possível se reduzir a área de picos). Uma faixa entre 3 e 10% para o percentual de reentrância  $(A_v/A_t)100\%$  foi medida para SDL novas e usadas.

A elevação da temperatura decorrente do atrito diminui, sob condições tribológicas iguais (mesmo carregamento, mesma velocidade de deslizamento, mesmo lubrificante), com o aumento da região de micro-contacto /101/. O aumento da região de micro contacto propicia uma menor geração de calor e uma melhor dissipação de calor. Quanto mais platafórmica é a superfície, tanto maior é a área de contacto (veja figuras 6-8, 6-9 e 7-24).

Uma boa resistência ao desgaste resulta de uma boa capacidade de suportar carga, de amortecer o desgaste inicial, de deslizar, de reter o lubrificante e de uma boa abdução térmica. Por esta razão, a resistência ao desgaste é a mais importante propriedade de uma SDL. No capítulo 4 foi mostrado como a propriedade resistência ao desgaste está ligada com as outras propriedades.

A tabela 8-1 mostra a avaliação dos processos de fabricação em relação ao preenchimento das propriedades exigidas. O melhor preenchimento da exigência é avaliado com 1 ponto.

O c.p. torneado DIH preenche da melhor forma as exigências para as propriedades: capacidade de suportar carga, amortecimento do desgaste inicial, deslizamento e dissipação de calor. A única propriedade, a qual não é melhor preenchida pelo c.p. DIH, é a capacidade de reter o lubrificante. Esta propriedade (retenção do lubrificante) pode no entanto ser melhorada se se utilizar um outro tipo de material para a peça, por exemplo, o ferro fundido, pois como foi visto no capítulo 5, as propriedades do material da peça têm grande influência sobre os processos de deformação e separação na usinagem, sendo responsáveis pelos vales e picos que aparecem na superfície com o processo de formação do cavaco. Através de um processo de fabricação prévio, como o recartilhamento, é possível se aumentar o percentual de reentrância.

Tabela 8-1: Escolha do processo de fabricação.

PROPRIEDADES EXIGIDAS	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO							
	Tornear D1H	Retificar SchPa	Tornear D2H	Limar	Retificar	Lapidar	Fresar	Apilinar
Cap. suportar carga $25^\circ < \Theta_k > 33^\circ$	30,5° (1)	32,8° (2)	36,8° (3)	33,5° (2)	30,9° (1)	34,2° (3)	38,1° (5)	36,9° (4)
Amort. desgaste inicial R = 1/Cm	9,09 μm (1)	5,88 μm (3)	7,69 μm (2)	7,69 μm (1)	4,35 μm (3)	1,59 μm (5)	4,0 μm (4)	4,54 μm (2)
Ap/At < 1%	0,75% (1)	1,84% (2)	4,41% (3)	0,69% (1)	1,30% (6)	1,09% (2)	1,19% (3)	1,29% (4)
Cap. de deslizar $3^\circ < \text{Nam} < 8^\circ$	4,58° (1)	8,02° (2)	13,76° (3)	7,46° (1)	10,71° (2)	21,20° (5)	19,33° (3)	20,06° (4)
Cap. de reter lubrificante $3\% < \text{Av/At} < 10\%$	1,92% (2)	3,14% (1)	0,42% (3)	4,44% (1)	4,39% (2)	3,71% (3)	1,68% (4)	1,38% (6)
Cap. de dissipar calor $25^\circ < \Theta_k < 33^\circ$	30,5° (1)	32,8° (2)	36,8° (3)	33,5° (2)	30,9° (1)	34,2° (3)	38,1° (5)	36,9° (4)
TOTAL	7	12	17	8	14	21	24	23
CLASSIFICAÇÃO	I	II	III	I	II	III	V	IV

O processo de fabricação de torneamento com pastilhas de alisamento (c.p. D1H) é o mais apropriado, entre os processos de fabricação aqui analisados, para a fabricação de uma guia cilíndrica.

Para uma guia de superfície plana, pode-se utilizar os resultados de medição dos corpos de prova planos aqui examinados e repetindo-se a sistemática de escolha temos que o processo de fabricação de limagem, entre os processos de fabricação aqui levados em consideração, preenche melhor as propriedades exigidas, como mostra a tabela 8-1. Apesar do processo de limar com precisão ser aplicado na construção de ferramentas e dispositivos e ter um grande significado na mecânica fina /131/, não se está aqui afirmando que ele seja o ideal para a fabricação de uma SDL, mas que entre os processos de fabricação examinados ele preencheu melhor as propriedades exigidas.

Na prática, para a fabricação de uma guia cilíndrica é empregada uma sequência de processos de fabricação além de tratamento térmico. Só no último processo, a superfície da guia atinge as propriedades exigidas. Que sequência de processos de fabricação deve ser adotada?; que características intermediárias a superfície deve possuir para atingir os melhores resultados no processo subsequente?; ou ainda, é possível se desenvolver um novo processo de fabricação com o qual as exigências funcionais sejam mais rapidamente e eficientemente preenchidas?; são perguntas ficam aqui como sugestões para futuros trabalhos e que podem ser agora concretamente pesquisadas e respondidas, uma vez que a interligação entre função, exigências ao preenchimento da função e processos de fabricação, foi neste trabalho esclarecida através dos fatores de avaliação.

## 9. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Uma SDL foi aqui tomada como exemplo e analisada considerando-se a eficiência ao preenchimento de sua função. Da avaliação das propriedades exigidas (resistência ao desgaste, amortecimento do desgaste inicial, deslizamento, retenção do lubrificante, capacidade de suportar carga e dissipação de calor) a uma SDL resultaram as seguintes exigências micro-geométricas:

- 1- um "pequeno" desvio geométrico, o qual foi aqui definido através do desvio médio aritmético da rugosidade  $R_a$ ;
- 2- principalmente uma superfície platafórmica;
- 3- uma superfície dependente da direção, com direção de sulcos cruzados em relação a direção dos sulcos da contra-superfície, para melhor retenção do lubrificante;
- 4- um pequeno ângulo de encosta;
- 5- uma grande área de reentrância para retenção do lubrificante e
- 6- uma pequena área de picos com elevações de cantos arredondados.

A superfície mais adequada para uma SDL foi qualitativamente descrita segundo suas exigências através de seis fatores de avaliação (1. desvio geométrico, 2. tipo de perfil, 3. dependência da direção, 4. ângulos, 5. reentrâncias e 6. elevações).

O complexo de influências dos processos de fabricação, sobre estes seis fatores de avaliação, foi teoricamente analisado, com base nos resultados experimentais de ensaios de usinagem encontrados na literatura. O resultado desta análise possibilita uma melhor aproximação da superfície real com a superfície ideal.

Os parâmetros de qualificação da superfície foram ordenados e comparados, segundo suas capacidades de fornecer informações. Um novo parâmetro para superfícies foi deduzido a partir da curva de Abbott. De mão deste parâmetro, superfícies podem ser quantitativamente comparadas em relação a planicidade, sem que a curva de Abbott tenha que estar presente. Este novo parâmetro é também bem apropriado para o caso em que a profundidade central de rugosidade  $R_k$  seja igual para dois perfis.

As regiões de reentrâncias e de elevações da superfície foram verificadas através da relação de área (percentual de vales ( $A_v/A_t$ ) e percentual de picos ( $A_p/A_t$ )) da curva de Abbott. As in-

clinações de flancos e o arredondamento das elevações foram avaliados através do valor médio de curvatura  $C_m$  e do valor absoluto da inclinação  $N_{am}$ . A dependência da direção foi verificada quantitativamente através da função de correlação transversa e qualitativamente através da textura da superfície.

A escolha dos parâmetros mais adequados para cada um dos seis fatores de avaliação foi realizada com base nos resultados das medições efetuadas em corpos de prova torneados, fresados, limados, lapidados, retificados e aplainados.

Para a fixação de um tamanho de amostra foi constatado que nenhum dos parâmetros medidos possui uma distribuição normal ou aproximadamente normal. A expressão matemática que calcula o tamanho de amostra foi deduzida a partir da distribuição normal e só serve para este tipo de distribuição; por esta razão, não pode ser usada. A função Beta permite descrever matematicamente uma distribuição de frequências qualquer, através de poucos parâmetros. As propriedades da distribuição Beta permitiu deduzir uma expressão matemática modificada correspondente para o cálculo do tamanho da amostra, que variou entre 4 e 20 para os diversos corpos de prova.

Através da limitação quantitativa dos parâmetros, que quantificam os fatores de avaliação, foi possível se escolher o melhor processo de fabricação para uma SDL ideal, comparando-se estes limites com os valores medidos destes parâmetros em diferentes corpos de prova usinados.

O método aqui desenvolvido para avaliação e escolha da superfície técnica segundo sua função e fabricação, foi apresentado como exemplo para uma SDL. A descrição da superfície técnica através dos seis fatores de avaliação aqui escolhidos pode ser utilizada para qualquer tipo de função. O método pode ser empregado para outras funções das superfícies.

A expansão deste método para uma função qualquer da superfície exige um trabalho conjunto com a indústria. Desta forma, é possível se estabelecer para as diferentes funções da superfície, a limitação dos seis fatores de avaliação e o acoplamento das propriedades micro-geométricas e tecnológicas; além de se poder utilizar dados de fabricação sob condições mais abrangentes.

O desenvolvimento de um programa de computador, o qual torne possível esta avaliação e escolha, é exigido sob estas condições mais abrangentes e será no futuro uma importante ajuda para a indústria.

## 10. Bibliografia

- /1/ N.N. DIN 4764, Oberflächen an Teilen für Maschinenbau und Feinwerktechnik, Beuth Verlag, Berlin, Jun. 1982
- /2/ Halbig, H. Grenzen beim Bestimmen mikrogeometrischer Abweichungen der Oberflächen fester Körper mit Fühlschnittmessverfahren und das digitale, funktionsgerechte Auswerten senkrechter Profilschnitte, Diss. TH Hannover 1969
- /3/ Noppen, G.  
Sigalla, J.  
u.a. Technische Oberfläche, Beuth Verlag, Berlin, 1985
- /4/ Schmaltz, G. Technische Oberflächenkunde, Berlin, Springer, 1936.
- /5/ Schmidt, W. Funktion und Beschaffenheit der technischen Oberfläche, Metall 11.JG., Heft 6, Jun. 1957, Pag.473-480
- /6/ Czichos, H. Funktionale Aufgaben technischer Oberflächen, VDI-Berichte No.449, 1982, Pag.13-21
- /7/ Dohmen, H.G. Einführung in den Themenkreis, Technische Mitteilung, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez. 1980, Pag.881-883
- /8/ Field, M. Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke « Surface Integrity », Fertigung 5, 1972, Pag.145-156
- /9/ N.N. VDI/VDE 2601, Anforderungen an die Oberflächengestalt zur Sicherung der Funktionstauglichkeit spanend hergestellter Flächen, VDI-Verlag, Düsseldorf Agosto, 1977
- /10/ Degner, W. Die Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit für die Beurteilung der Oberflächengüte des Werkstückes, Feingerätetechnik, 17.Jg., Heft 11, 1968, Pag.514-521
- /11/ Wolff, H. Analyse des Istprofils hinsichtlich der Verteilung der Riefen- oder Rillenamplitude zur Erkennung der einzelnen Bestandteile des Istprofils am Profilschnitt, VDI-Berichte No. 133, 1969, Pag.9-18
- /12/ Bodschinna, H. Stand und Probleme der Oberflächenmeßtechnik, VDI-Z 121, No.23/24, Dez.(I/II) 1979, Pag.1210-1216

- /13/ Hübner, R. Messen von Oberflächen, Schweizer Maschinenmarkt, 9403 Goldach, No. 30, 1983, Pag.17-19
- /14/ N.N. DIN 8580, Fertigungsverfahren, Entwurf, Beuth Verlag, Berlin, Jul. 1985
- /15/ N.N. DIN 4760, Gestaltabweichungen, Beuth Verlag, Berlin, Jun. 1982
- /16/ Flores, G. Qualitätsbegriffe des Honens, Werkstatt und Betrieb 115 (1982) 11, Pag. 751-756
- /17/ Waleton, W.  
Staufert, G. Moderne Methoden der Oberflächenforschung, Technische Rundschau, No.10, Bern, 3.Mar. 1981, Pag.5-7
- /18/ Puttkammer, H.v. Neue Tendenzen und Stand der Rauheitsmessung mit elektrischen Tastschnittgeräten, Vorträge des Surtec-Kongresses 1981, C1, VDI-Verlag, Pag.87-105
- /19/ Puttkammer, H.v. Tendenzen der Rauheitsmessung an Blechen und Profilen, Bänder Bleche Rohre 3, 19, 83, Pag.57-60
- /20/ Whitehouse, D.J. Typology of Manufactured Surfaces, Annals of the CIRP, Vol XVIV, 1971, Pag.471-431
- /21/ Golüke, H.  
Pfeifer, T. Oberflächenmeßtechnik, Technische Mitteilung, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez., 1980, Pag.908-913
- /22/ Thomas, T.R. Characterization of surface roughness, Precision Engineering 3, 1981, Pag.97-104
- /23/ Ahlers, R.J. Die optische Rauheitsmessung in der Qualitätstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1986
- /24/ Dreyhaupt, W. Über den Gebrauchswert von Oberflächen, Prüfung und Kennzeichnung, Das Industrieblatt, Stuttgart, Abr. 1959, Pag.124-127
- /25/ Peklenik, J. Neuere statistische Verfahren zur topographischen Erfassung von Oberflächen, I.Teil, wt-Z. ind. Fertig. 59, No.11, 1969, Pag.580-589
- /26/ Peklenik, J. Neue statistische Verfahren zur topographischen Erfassung von Oberflächen. II.Teil, wt-Z. ind. Fertig. 59, No.12, 1969, Pag.633-637
- /27/ Paulmann, R. Funktionsbezogene Beschreibung feinbearbeiteter Oberflächen, Industrie-Anzeiger 90, 1987, Pag.48-49

- /28/ Weck, M.  
Rinker, V. Tribologisch funktionsgerechte Beschreibung der Oberflächenstrukturen von Gleitführungen, Teil I, Fachberichte für Metallbearbeitung, Vol.63, No.1/2, 1986, Pag.30-35
- /29/ Weck, M.  
Rinker, V. Tribologisch funktionsgerechte Beschreibung der Oberflächenstrukturen von Gleitführungen, Teil II, Fachberichte für Metallbearbeitung, Vol. 63, No.3/4, 1986, Pag.120-125
- /30/ Bengtsson, A.  
Ronnberg, A. Wide range three-dimensional roughness measuring system, Precision Engineering, Vol.6, No.3, Jul. 1984, Pag.141-147
- /31/ Edmonds, M.J.  
Snaith, B.  
Probert, S.D. A practical means of quantitatively describing the topographies of machined surfaces, Trans.Inst.M.C., Vol.2, No.3, Jul.-Set. 1980, Pag.157-163
- /32/ Heldt, E. Theoretische Betrachtungen an technischen Oberflächen, Wiss.Z.d.Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 11, Heft 5, 1969, Pag.571-585
- /33/ Whitehouse, D.J. Assessment of Surface Typology Analysis Techniques in Turning, Annals of CIRP, Vol.232, 1974, Pag.265-282
- /34/ Staufert, G.  
Matthias, E. Kennwerte der Oberflächenrauigkeit und ihre Aussagekraft hinsichtlich der Charakterisierung bestimmter Oberflächentypen, Annals of CIRP, Vol.25/1/1977, Pag.345-350
- /35/ Osman, M.  
Sankar, T. Two-Dimensional Characterization of Machined Surface, Proceedings, Third North American Metal Working Research Conference, Mai. 1975, p.885
- /36/ Kubo, M. Statistical Analysis of Surface Roughness Wave-Forms, Annal of CIRP, Vol.14, 1967, Pag.279-288
- /37/ Fromson, R.E.  
Brecker, J.N. A Universal Surface Texture Measuring System, Southeastern Conference and Tool Show, Orlando, Fla, Dez.6.8.1976, Paper IQ 76-597
- /38/ Santochi, M.  
Tantussi, G. Surface parametrical microgeometry and functional models: a new approach, Precision Engineering, Vol.6, No.4, Out. 1984
- /39/ Lamb, A.D. Some aspects of the character of the machined surface, Metals and Materials, Mar. 1987, Pag.138-142

- /40/ Brinksmeir, E. Improvements in X-Ray Stress Analysis, Advances in Surface treatments 2. Technology, applications, effects, Elmsford, NJ, 1986, Pag.109-115
- /41/ Kloos, K.H. Fertigungsverfahren, Oberflächeneigenschaften und Bauteilfestigkeit, VDI-Berichte, No.214, 1974, Pag.85-95
- /42/ Warnecke, G.  
Bach, P. Feindrehen mit Schneidkeramik, wt. Werkstattstechnik 78, 1988, Pag.504-508
- /43/ Dostal, F. Einfluß der technologischen Bedingungen auf die funktionellen Eigenschaften der bearbeiteten Oberfläche des Werkstückes, Feingerätetechnik 15, Heft5, 1966, Pag. 227-234
- /44/ Kienzle, O.  
Mietzner, K. Atlas ungeformter metallischer Oberflächen, Spring Verlag, Berlin, 1967
- /45/ Pesante, H. Determination of surface roughness typology by means of amplitude density curves, CIRP-Annalen XII, Heft 2, Pag.61-68
- /46/ Weingraber, H. Der gegenwärtige Stand der Oberflächenprüfung und -messung aus dem Blickwinkel der Praxis und Forschung, Werkst. techn. No.54, Heft 11, 1964, Pag.541-548
- /47/ Halbig, H. Funktionsgerechtes Bewerten der Oberflächenrauheit in Zukunft wirtschaftlicher möglich?, TZf. prakt. Metallbearb., 67.Jg., Heft 10, 1973
- /48/ Tumfart, S. Die Beschreibung der Rauigkeit technischer Oberflächen mittels Wahrscheinlichkeitsdichte- und Korrelationsfunktion, Feinwerktechnik Et Messtechnik 85 (1977)7, Pag.308-312
- /49/ Beck, C.  
Schneider,W. Möglichkeit zur Gewinnung der Autokorrelationsfunktionen von technischen Oberflächen, Feingerätetechnik, 21.Jg., Heft 2, 1972, Pag.64-68
- /50/ Gutsch, R.  
Lipmann, D. Fourier-Analyse zur Trennung von Welligkeit und Rauheit an Oberflächenprofilen, Feingerätetechnik, 26.Jg., Heft 2, 1977
- /51/ Izmailov, V.V.  
Kouruva, M.S. Correlation between surface topography and profile statistical parameters, Wear 59, 1980, Pag.409-421
- /52/ Thomas,T.R.  
Charlton, G. Variation of roughness parameters on some typical manufactured surfaces, Precision Engineering, Bd. 3, H. 2, Guildford, 1981

- /53/ Rittmann, K. Zur Problematik der Rauheitsmessung an technischen Oberflächen, Industrie-Anzeiger, 93.Jg., No.48, v.8.6.1971, Pag.1126-1129
- /54/ Peklenik, J.  
Kubo, M. A Basic Study of a Three-Dimensional Assessment of the Surface Generated in a Manufacturing Process. Annals of the CIRP 1968, Pag.257-265
- /55/ Kubo, M.  
Peklenik, J. An Analysis of Microgeometrical Isotropy for Random Surface Structures, Annals of the CIRP 1968
- /56/ Whitehouse, D.J. Beta Functions for Surface Typologie?, Annals of the CIRP, Vol.27/I/1978, Pag. 491-497
- /57/ Whitehouse, D.J. Surface - A Link Between Manufacture and Function, Proc Instn Mech Engrs, Vol.192 1978, Pag. 179-188
- /58/ Whitehouse, D.J. Die Erzeugung zweidimensionaler Zufallsflächen auf dem Computer, VI. Oberflächenkolloquium, p.31, 30.1. bis 1.2.1984 Karl-Marx-Stadt
- /59/ Hillmann, W. Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Rauheitsmessung, Technisches Messen 47, Heft 6, 1980, Pag.209-218
- /60/ Kiethe, H. Repräsentative Vermessung von walzengefrästen Probenoberflächen, Zw F70, Heft 5, 1975, Pag. 233-238
- /61/ Staufert, G. Die genaue parametrische Beschreibung von Profilschreiben technischer Oberflächen in Hinsicht auf die Funktionsfähigkeit des Werkstückes, Diss. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1980
- /62/ Saljé, E.  
Paulmann, R. Vergleich der Feinbearbeitungsverfahren Schleifen, Honen und Läppen, 5. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, 8-10 April 1987, Pag. 18-19
- /63/ Adams, J.R. Oberflächenmessverfahren, VI. Oberflächenkolloquium, p.35, 30.1. bis 1.2. 1984, Karl-Marx-Stadt
- /64/ Scherr, R. Untersuchung zur Beurteilung und Messung technischer Oberflächen mit Hilfe des Tastschnittverfahrens, Diss., Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Universität Kaiserslautern, 1986

- /65/ Eckolt, K.  
Hillmann, W.  
u.a. Untersuchungen technischer Oberflächen  
mit dem Raster-Elektronenmikroskop, PTB-  
Bericht, Braunschweig, Jul. 1978
- /66/ Bodschinna, H. Auswirkungen der Tastspitzengeometrie  
auf die industrielle Rauheitsmessung,  
Technisches Messen, Heft 1, 1980, Pag.  
21-28
- /67/ Mintrop, H.  
Bodschinna, H. Untersuchung bezüglich der geometrischen  
Form und der Spitzenabmessungen mit  
Hilfe elektronenrastermikroskopischer  
Aufnahmen von Tastdiamanten für die Rau-  
heitsmessung an technischen Oberflächen,  
Messen + Prüfen / Automatik, November  
1973, Pag.717-721
- /68/ Brodmann, R.  
Paisdzior, H. Rauheit und Welligkeit fein bearbeiteter  
Oberflächen optisch messen, Werkstatt  
und Betrieb 119 (1986) 10, Pag.849-852
- /69/ Sachs, G. Das Prüfen technischer Oberflächen,  
Blech. Rohre. Profile 29 (1982) 5, Pag.  
215-218
- /70/ Ahlers, R.J. Berührungslose Rauheitsmessung - Der  
optische Rauheitsmesser, VI Oberflächen-  
kolloquium, p 42, 30.1. bis 1.2.1984,  
Karl-Marx-Stadt.
- /71/ Ahlers, R.J. Optisches Verfahren zur Rauheitsmessung  
metallischer Oberflächen, Sensor'83,  
Transducer-Technik: Entwicklung und An-  
wendung, Schweizer Mustermesse, Basel,  
17.-19.5.1983, Konferenzunterlage, Bd.1  
-6
- /72/ Brodmann, R. Sensor Streulicht, Industrie Anzeiger  
extra "Oberflächentechnik", 1987, Pag.  
54-59
- /73/ Paulmann, R. Vergleichende Untersuchungen zur mecha-  
nischen und optischen Rauheitsmessung,  
Industrie Anzeiger 99, 1986, Pag.34-35
- /74/ Thurn, G.  
Gast, Th. Rauheitsmessung mittels Lichtstreuung,  
Technisches Messen, 52.Jg., Heft 2, 1985,  
Pag.74-78
- /75/ Grabe, M.  
Cordes, H. Messung der Neigungsstreuung an rauhen  
Oberflächen, Technisches Messen, 53.Jg.,  
Heft 1, 1986, Pag.40-42
- /76/ Shetty, D.  
Imbert, C. Computer Identification of Machined  
Surfaces, Journal of Testing and Evalua-  
tion, by the American Society for Test-  
ing and Materials, 1984, Pag.375-379

- /77/ Inasaki, I. In-process measurement of surface roughness during cylindrical grinding process, Precision Engineering, Vol 7, No.2 Abr. 1985, Pag.73-76
- /78/ Kohno, T.  
Ozawat, N.  
u.a. Practical non-contact surface measuring instrument with one nanometer resolution, Precision Engineering, Vol.7, No.4 Out. 1985, Pag.231-232
- /79/ Pfeifer, T.  
Schüller, H.  
Elzer, J. Fertigungsintegrierte Oberflächenmessung Industrie Anzeiger 45, 1987, Pag.14-17
- /80/ Nassirpour, F.  
Wu, S.M. Statistical Evaluation of Surface Finish and its Relationship to Cutting Parameters in Turning, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 17, Pag. 197-208
- /81/ König, W.  
Böttler, E. Oberflächenbeeinflussung durch spanende Fertigungsverfahren, Technische Mitteilung, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez. 1980, Pag.883-892
- /82/ Dannenmann, E. Oberflächen- und Randzonenbeeinflussung durch Umformen und Schneiden, Technische Mitteilungen, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez. 1980, Pag. 893-901
- /83/ Jutzler, W.I. Abtragende Bearbeitungsverfahren, Technische Mitteilungen, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez. 1980, Pag.902-908
- /84/ Schleich, H. Flachs Schleifen mit hohen Leistungen unter Vermeidung thermischer Randzonen-schädigung, Technische Mitteilung, 73.Jg., Heft 11/12, Nov./Dez. 1980, Pag.913-920
- /85/ Bálint. L. Richtige Auslegung der Oberflächengüte und ihre Bedeutung für die Standardisierung, Feingerätetechnik, 15.Jg., Heft 5, 1966, Pag.247-251
- /86/ Olsen, K.V. Die Oberflächenrauheit als eine Funktion der Schnittbedingungen beim Drehen von Stahl, Feingerätetechnik, 15.Jg., Heft 5 1966, Pag.222-227
- /87/ Brendel, H. Der Beitrag der Tribotechnik zur Durchsetzung der Schlüsseltechnologien, Schmierungstechnik, Berlin 19 (1988) 5, Pag. 137-139
- /88/ Stout, K,J,  
King, T.G.  
Whitehouse, D.J. Analytical Techniques in Surface Topography and their Application to a Running-in Experiment, Wear 43, 1977, Pag. 99-115

- /89/ Bartz, W.J.                   Entwicklungstendenzen der Tribologie, Schmierungstechnik, Berlin 19 (1988) 5, Pag. 139-142
- /90/ Dostál, F.                    Einfluß der technologischen Bedingungen auf die funktionellen Eigenschaften der bearbeiteten Oberfläche des Werkstückes, Feingerätetechnik, 15.Jg., Heft 5, 1966, Pag.227-234
- /91/ Bunk, W.  
Haag, H.  
u.a.                               Tribologie  
Reibung . Verschleiß . Schmierung  
Band 1/11, Springer Verlag, Berlin 1981/  
1986
- /92/ Weck, M.  
Rinker, U.                       Verschleiß von Gleitführungen, Industrie Anzeiger, No.41, v.23, 106.Jg., 5.1984, Pag. 48-51
- /93/ Brendel, H.  
Ehrlich, M.                      Untersuchung zur Änderung der Oberflächenrauheit beim Gleitvorgang, Schmierungstechnik, 9 (1978) 2, Pag. 49-53
- /94/ Strohmaier, D.                Zuordnung zwischen Fuktion und zulässigen Werten für Rauheitsmaße, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart, Arbeit No. 101 647, 25.5.76, 34 Seiten
- /95/ Dreyhaupt, W.                Die Funktion der Oberfläche als Grundvoraussetzung für die Art der Oberflächenprüfung, VDI-Bericht No. 133, 1969, Pag. 5-8
- /96/ Polzer, G.  
Meißner, F.                      Grundlagen zu Reibung und Verschleiß, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1982
- /97/ Czichos, H.  
u.a.                               Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, Expert Verlag, 1982
- /98/ Zum Gahr, K.H.                Reibung und Verschleiß, Deutsch Gesellschaft für Metallkunde E.V., Oberursel, 1983
- /99/ Kragelski, I.W.                Reibung und Verschleiß, Carl Hanser Verlag, München 1971
- /100/ Wuttke, W.                   Tribophysik, Carl Hanser Verlag, München, 1987
- /101/ Habig, K.-H.                 Verschleiß und Härte von Werkstoffen, Carl Hanser Verlag, München, 1980
- /102/ N.N.                         DIN/ISO 1302, Angaben der Oberflächenbeschaffenheit in Zeichnungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1980

- /103/ N.N. DIN 4761 Oberflächencharakter, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1978
- /104/ Bodschwinn, H. Funktionsgerechte Rauheitsbeschreibung, Technische Rundschau 26/88, Pag.36-40.
- /105/ König, W. Fertigungsverfahren, Band 1, VDI Verlag, Düsseldorf, 1984
- /106/ Pauksch, E.  
Preger, K.T. Zerspantechnik, Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1985
- /107/ König, W. Fertigungsverfahren, Schleifen, Honen, Läppen, Band 2, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1980
- /108/ Vieregge, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe, 2.Auflage, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1970
- /109/ Saljé, E. Elemente der spanenden Werkzeugmaschinen, Carl Hanser Verlag, München, 1968
- /110/ N.N. DIN 4766, Teil 2, Herstellverfahren der Rauheit von Oberflächen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mar.1981.
- /111/ Charchut, W.  
Tschätsch, H. Werkzeugmaschinen, Carl Hanser Verlag, München 1984
- /112/ N.N. DIN 4762 Blatt1, Erfassung der Gestaltabweichungen 2. bis 5. Ordnung an Oberflächenschnitten, Beuth Verlag, Ago. 1960
- /113/ N.N. DIN, Messung der Profiltiefe Pt von Oberflächen, Beuth Verlag, Berlin, Abr. 1977
- /114/ Meiser, S. Entwicklung eines Computer-Programms zur Ermittlung von Oberflächenparameter, Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Prof.Dr.-Ing. G. Warnecke, Studienarbeit No. 221, 1989
- /115/ Dedeker, A. Oberflächengüte für eine Funktionserfüllung, Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Prof.Dr.-Ing. G. Warnecke, Studienarbeit No. 249, 1989.
- /116/ Beckmann, G.  
Kleis, I. Abtragverschleiß von Metallen, Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1983.
- /117/ Schäfer, F. Ermittlung des repräsentativen Stichprobenumfangs bei Rauheitsmessungen, Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Prof.Dr.-Ing. G. Warnecke, Studienarbeit No. 164, 1988

- /118/ Walpole, R.E.  
Myers, R.H. Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1978
- /119/ N.N. Bedienungsanleitung No. 3752061, Optischer Focodyn, Feinprüf GmbH, Göttingen 1987.
- /120/ Osanna, P.H. Surface Roughness and Size Tolerance, Wear, 57(1979), Pag.227-236.
- /121/ N.N. VDI-Richtlinien 3219, Oberflächenrauheit und Maßtoleranz in der spanenden Fertigung, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, Jun. 1965.
- /122/ N.N. DIN 4768 Blatt 1, Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen Ra, Rz, Rmax, mit elektrischen Tastschnittgeräten, Beuth Verlag, Berlin, Agosto 1974
- /123/ N.N. Entwurf DIN 4762 Teil 1, Oberflächenrauheit, Beuth Verlag, Out. 1986.
- /124/ N.N. Werknorm DB N31 007, 1983
- /125/ Müller, P.H. Lexikon der Stochastik Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik, Akademie Verlag, Berlin 1975.
- /126/ N.N. Entwurf DIN 4776, Kenngrößen Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 zur Beschreibung des Materialanteils in Rauheitsprofil, Beuth Verlag, Berlin, Nov. 1985
- /127/ Halbig, H. Maschinen-Werkzeuge-Fertigungsverfahren, Metall 25.Jg., Heft 8, Pag.896-905, Agosto 1971
- /128/ Müller, E.A.W. Handbuch der zerstörungsfreien Materialprüfung, R. Oldenbourg Verlag, Mannheim-Käfertal, 1970
- /129/ Stemmer, C.E. Ferramentas de corte, Editora da UFSC, Florianópolis 1989
- /130/ Ferraresi, D. Fundamentos da usinagem de metais, Editora Edgard Blücher Ltda. 1977.
- /131/ Spur, G. Handbuch der Fertigungstechnik, Band 3 Carl Hanser Verlag, München 1980.
- /132/ N.N. ABNT NBR 6405, Rugosidade das superfícies Dez.1980
- /133/ Weingaertner, W.L. et.al. Desenvolvimentos Tecnológicos na Fabricação no Laboratório de Máquinas Ferramentas e de Fabricação de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, Seminário International de Tecnologias Modernas de Produccion, Universidade Tecnica Federico Santa Maria, Valparaíso, Chile, Agosto de 1991, Pag.231-246.

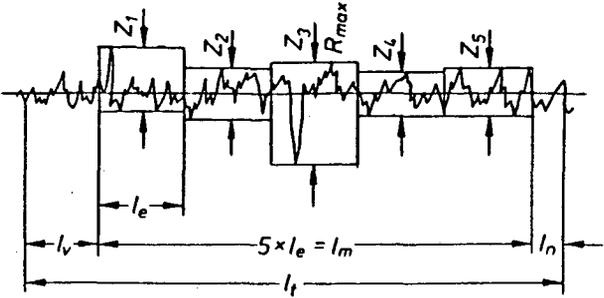
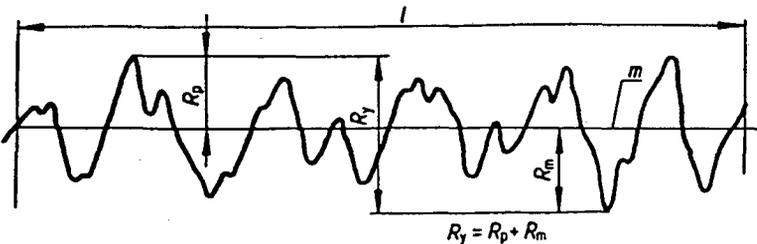
- /134/ Wyant, J.C.  
Creath, K. Advances in Interferometric Optical Profiling, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, No 1/2 pag 5-10, 1992.
- /135/ Mansfield, D. Surface Characterisation via Optical Diffraction, Int. J. Tools Manufact., Vol 32 No. 1/2, pag. 11-17, 1992.
- /136/ Sullivan, P.  
Poroshin, V.  
Hooke, C. Application of a Three-Dimensional Surface Analysis System to the Prediction of Asperity Interaction in Metallic Contacts Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.32, No. 1/2, Pag. 157-169, 1992.
- /137/ Böhm, H.-J. Parameters for Evaluating the Wearing Behaviour of Surface, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 32, No. 1/2, Pag. 109-113 1992.
- /138/ Clark, J.R.  
Grant, M.B. The Effect of Surface Finish on Component Performance, Int. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, No. 1/2, Pag. 57-66, 1992.
- /139/ Bondrean, B.D.  
Raja, J. Analysis of Lay Characteristics of Three-Dimensional Surface Maps. Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 32, No. 1/2, Pag. 171-177, 1992.

## ANEXOS

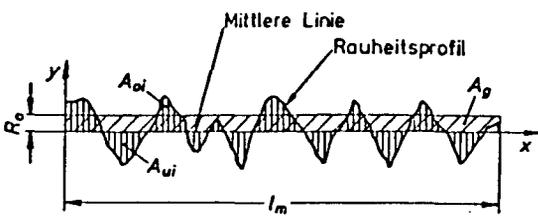
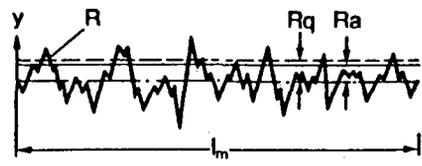
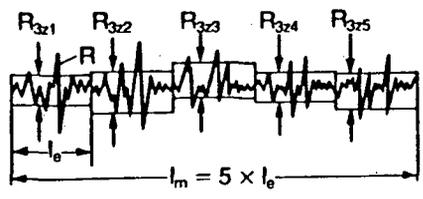
Tabela I: Tipos de superfícies de sulcos ordenados e desordenados

Dados segundo a DIN 4761			
Denominação	Esclarecimento gráfico	Símbolo	Símbolo segundo a DIN ISO 1302
<b>Tipos de superfícies de sulcos ordenados</b>			
sulcos retos paralelos		B1	= ou ⊥
sulcos retos que se cruzam	X	B2	X
sulcos em forma de círculos	○	B3	C
sulcos espirais	⊙	B4	C
sulcos curvos correntes	∞	B5	M
sulcos curvos em forma de círculo	⊙	B6	R
sulcos curvos espirais	⊙	B7	R ou M
<b>Tipos de superfícies de sulcos desordenados</b>			
sulcos retos que se cruzam desordenadamente	✕	B8	M
sulcos curvos que se cruzam	⊗	B9	M

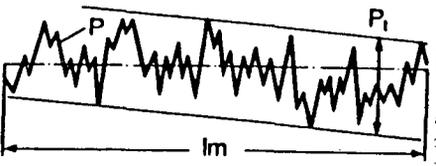
Tabela II: Apresentação dos parâmetros verticais.

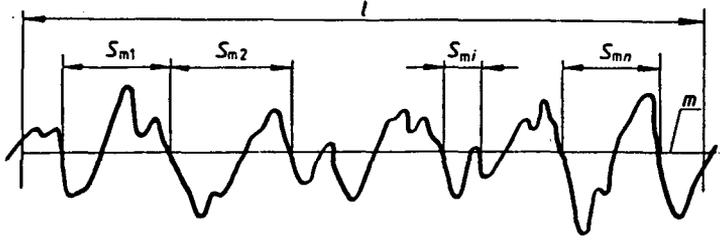
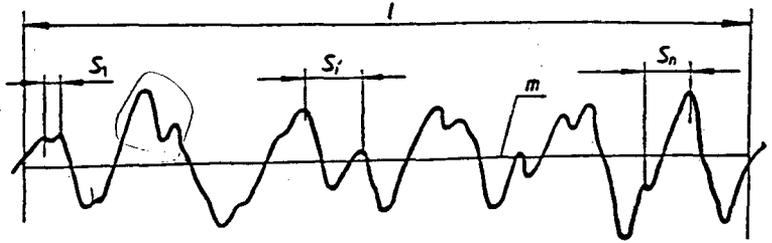
Deno- minação	Símbolo	Descrição
01. Profundi- dade iso- lada de rugosida- de  (Einzeln- rauh- tiefe)	$Z_i$	<p>Distância entre duas paralelas à linha média, as quais tocam os pontos máximo e mínimo dentro dos trechos isolados de medição /122/.</p> 
02. Pro- fundidade máxima de rugosida- de	$R_{max}$	<p>A maior das profundidades isoladas de rugosidade <math>Z_i</math>, por exemplo <math>Z_3</math> na figura acima /122/. (Maximal Rauhtiefe)</p>
03. Pro- fundidade média de rugosida- de	$R_z$	<p>Média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade <math>Z_i</math> dos cinco trechos contíguos de medição /09/. (Gemittelte Rauhtiefe)</p> $R_z = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) / 5 \quad (01)$
04. Pro- fundidade de rugo- sidade  (Rauhtie- fe)	$R_t$	<p>Distância do perfil de base ao perfil de referên- cia /112/. Segundo a norma VDI/VDE 2601 <math>R_t</math> foi no passado usado com os seguintes significados/9/:</p> $R_t = R_z \quad (02)$ $R_t = W_t + R_z \quad (03)$ $R_t = R_{max} \quad (04)$ $R_t = P_t \approx W_t + R_{max} \quad (05)$ <p><math>R_t</math> deverá por esta razão não mais ser usado. O pa- râmetro <math>R_t</math>, o qual foi utilizado neste trabalho, é a distância vertical entre o ponto mais elevado e o mais profundo do perfil de rugosidade dentro do trecho de medição. Segundo esta difinição, <math>R_t</math> tem o mesmo significado que a altura máxima do perfil <math>R_y</math></p>
05. Altura máxima do perfil  (Maximale Profilhö- he)	$R_y$	<p>Distância entre a linha dos cumes do perfil (linha superior de tangência) e a linha dos vales (linha inferior de tangência) dentro do trecho de medição /123/.</p> 

(Continuação da tabela II)

<p>06. Desvio médio aritmético de rugosidade</p> <p>(Mittentrauhwert)</p>	<p><math>R_a</math></p>	<p>É a média aritmética dos valores absolutos das distâncias "y" da linha média ao perfil de rugosidade dentro do trecho de medição. Isto tem o mesmo significado da altura do retângulo cujo comprimento é igual ao comprimento total de medição <math>L_m</math> e cuja área é igual a soma entre as áreas limitadas pela linha média e o perfil de rugosidade /122/.</p> <div style="text-align: right;"> <math>\Sigma A_{ot} = \Sigma A_{ui} \quad (06)</math>  <math>A_g = \Sigma A_{ot} + \Sigma A_{ui} \quad (07)</math> </div> 
<p>07. Profundidade de alisamento</p> <p>(Glattungstiefe)</p>	<p><math>R_p</math></p>	<p>Distância do ponto mais alto do perfil de rugosidade à linha média depois de filtrados os desvios de forma e grande parte das ondulações. A influência de perturbações é mais ou menos amortecida segundo o tipo de construção do rugosímetro /9/. Segundo a norma alemã DIN 4762 /123/ <math>R_p</math> é denominado "altura máxima da elevação do perfil" ("Maximale Höhe der Profilerhöhung")</p>
<p>08. Desvio médio quadrático da rugosidade</p> <p>(Quadratischer Mittentrauhwert)</p>	<p><math>R_q</math></p>	<p>Raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil de rugosidade em relação à linha média no trecho de medição <math>L_m</math> /123,132/.</p> <div style="text-align: right;"> <math>R_q = \sqrt{\frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} y^2 dx} \quad (08)</math> </div>  <p>Este parâmetro é também conhecido sob a sigla RMS (Root Mean Square). O valor de <math>R_q</math> é no máximo 25% maior que o valor de <math>R_a</math>. Nos países de língua inglesa não é mais recomendada a sua utilização /123/</p>
<p>09. Profundidade de rugosidade de base</p> <p>(Grundrauh-tiefe)</p>	<p><math>R_{3z}</math></p>	<p>Valor médio da 3ª maior altura de cada um dos cinco trechos justapostos de medição <math>L_e</math> /124/</p>  <div style="text-align: right;"> <math>R_{3z} = \frac{1}{5} (R_{3z1} + R_{3z2} + \dots + R_{3z5}) \quad (09)</math> </div>

(Continuação da tabela II)

10. Profundidade máxima de vale	$R_m$	Distância do ponto mais profundo do perfil à linha de regressão no trecho de medição /123/ (Maximale Taltiefe).
11. Altura média das irregularidades do perfil	$R_c$	<p>Soma dos valores médios absolutos das alturas dos cumes e das profundidades dos vales do perfil/123/</p> $R_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_{pi}  + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n  y_{vj}  \quad (10)$ <p>"n" é o N° de cumes e vales no trecho de medição. (Mittlere Höhe der Profil unregelmäßigkeit)</p>
12. Profundidade do perfil  (Profil-tiefe)	$P_t$	<p>Distância entre duas linhas paralelas de limitação, as quais encerram da menor maneira possível o perfil P, no trecho de medição <math>L_m</math> /113/. As linhas de limite têm a forma do perfil geométrico ideal (retas, círculos ou outra forma de perfil).</p> 
13. Profundidade das ondas	$W_t$	Altura do perfil de ondulação, no trecho de medição $L_{mw}$ , depois de se filtrar a rugosidade /9/. (Wellentiefe)

Denomi- nação	Símbolo	Descrição
<p>14. Distância média das irregularidades do perfil</p> <p>Mittlerer Abstand der Profil unregelmäßigkeit</p>	<p><math>S_m</math></p>	<p>É a média das "distâncias das irregularidades do perfil <math>S_{mi}</math>" no trecho de medição <math>L_m</math>. A "distância das irregularidades do perfil <math>S_{mi}</math>" é o comprimento de uma parte da linha média, o qual contém uma elevação e uma reentrância do perfil/123/.</p> $S_m = (1/n) * \sum_{i=1}^n \quad (11)$ <p>Onde: n é o número das irregularidades do perfil no trecho de medição.</p> 
<p>15. Distância média dos picos locais do perfil</p> <p>Mittlerer Abstand der örtlichen Profilsitzen</p>	<p>S</p>	<p>Valor médio das distâncias dos picos locais <math>S_i</math> do perfil no trecho de medição /123/. A distância dos picos locais do perfil <math>S_i</math> é o comprimento de uma parte da linha média entre ambos os pontos mais altos das elevações locais vizinhas.</p> $S = (\sum_{i=1}^n S_i) / n \quad (12)$ 
<p>16. Comprimento esticado do perfil</p>	<p><math>L_o</math></p>	<p>É o comprimento, que resultaria se no trecho de medição o perfil encontrado fosse esticado em linha reta /123/.</p> <p>(Gestreckte Länge des Profils)</p>
<p>17. Relação de comprimentos do perfil</p>	<p><math>L_r</math></p>	<p>Relação do comprimento esticado do perfil (<math>L_o</math>) para o comprimento de medição <math>L_m</math> /123/.</p> $L_r = L_o / L_m \quad (13)$ <p>(Profil-Längenverhältnis)</p>

(Continuação da tabela III)

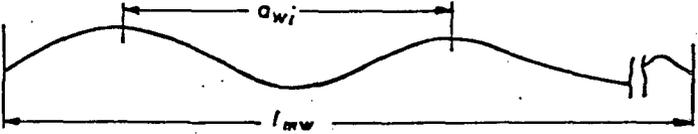
18. Comprimento médio quadrático de onda (Mittlere quadratische Wellenlänge)	$L_q$	<p><math>2\pi</math> vezes a relação entre o valor médio quadrático <math>R_q</math> e o valor médio quadrático da inclinação do perfil <math>D_q</math> /123/.</p> $L_q = 2 (R_q/D_q) \quad (14)$ <p><math>L_q</math> é uma medida para a distância dos picos e dos vales locais do perfil, sob consideração das suas próprias amplitudes e comprimentos de onda.</p>
19. Comprimento médio de onda da rugosidade (Mittlere Wellenlänge der Rauheit)	$L_a$	<p><math>2\pi</math> vezes a relação entre o desvio médio aritmético <math>R_a</math> e o valor médio aritmético da inclinação do perfil /123/.</p> $L_a = 2 (R_a/D_a) \quad (15)$ <p>O comprimento médio de onda <math>L_a</math> é uma boa aproximação do comprimento médio quadrático de onda <math>L_q</math>.</p>
20. Distância média de onda (Mittlere Wellen-Abstand)	$A_w$	<p>Distância média aritmética da onda <math>a_{wi}</math> no trecho de medição de ondulação /9/.</p> 

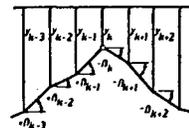
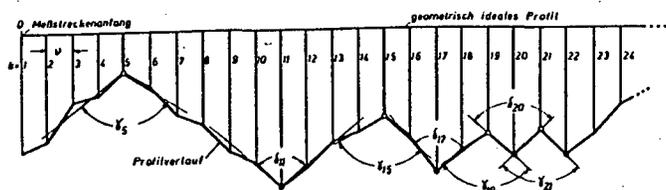
Tabela IV: Apresentação dos parâmetros para declives e ângulos

Denominação	Símbolo	Descrição
21. Valor médio aritmético do declive do perfil  (Arithmetischer Mittelwert der Profilneigung)	$D_a$	<p>Valor médio aritmético dos valores absolutos do quociente diferencial das ordenadas do perfil no trecho de medição /123/.</p> $D_a = \frac{1}{l} \int_0^l \left  \frac{dy}{dx} \right  dx \quad (16)$ <p>onde <math>dy/dx</math> é o declive imediato do perfil em cada ponto das ordenadas. Ou aproximadamente:</p> $D_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right  \quad (17)$ <p><math>\Delta x_i</math> é a dist. de digitalização <math>\Delta y_i</math> é o dif. de amplitude</p>
22. Valor médio quadrático do declive do perfil	$D_q$	<p>Valor médio quadrático do quociente diferencial das ordenadas do perfil no trecho de medição /123/</p> $D_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx} \quad (18)$ <p>ou aproximadamente:</p> $D_q \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2} \quad (19)$ <p>(Quadratischer Mittelwert der Profilneigung)</p>
23. Ângulo de pico  (Spitzenwinkel)	$\gamma$	<p>O ângulo de pico é o ângulo suplementar entre o ângulo de declive positivo e negativo relativos aos máximos do perfil /2/. Quando aparece um máximo relativo em uma ordenada <math>y_k</math> então são dados pesos aos três declives positivos das ordenadas em questão <math>y_{k-1}</math>, <math>y_{k-2}</math>, <math>y_{k-3}</math> e aos três declives negativos das ordenadas <math>y_k</math>, <math>y_{k+1}</math> e <math>y_{k+2}</math> e finalmente a partir deles calculado o ângulo de pico. Os pesos dos declives positivos e negativos efetuam-se com os fatores 3, 2 e 1. Sendo que o fator 3 é o peso do declive imediatamente vizinho ao ponto máximo e o fator 1 o peso do declive mais distante.</p> $\gamma = 180^\circ - \arctan \left[ \frac{(3 \tan \beta_{k-1} + 2 \tan \beta_{k-2} + \tan \beta_{k-3})}{6} \right] - \arctan \left\{ \frac{[3 \tan(-\beta_k) + 2 \tan(-\beta_{k+1}) + \tan(-\beta_{k+2})]}{6} \right\} \quad (20)$
24. Ângulo de vale  (Öffnungswinkel)	$\delta$	<p>O cálculo do ângulo de vale relativo aos pontos mínimos do perfil, sucedeu-se segundo definição análoga ao ângulo de pico. Aqui também foram dados pesos aos declives dos flancos do perfil nas aproximações dos pontos mínimos, para que uma região maior seja levada em consideração ao longo da inclinação /2/.</p>

(Continuação da tabela IV)

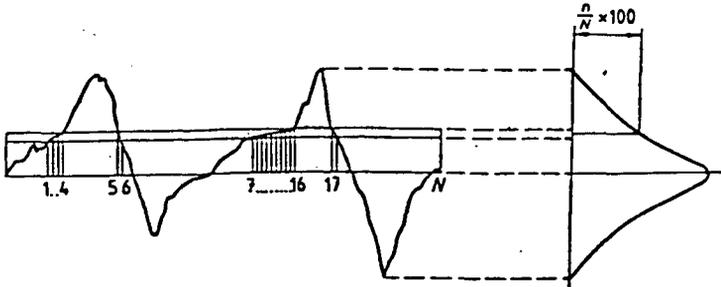
$$\delta = 180^\circ - \text{arc tan} [3 \tan (-\beta_{k-1}) + 2 \tan (-\beta_{k-2}) + \tan (-\beta_{k-3})] / 6 - \text{arc tan} (3 \tan \beta_k + 2 \tan \beta_{k+1} + \tan \beta_{k+2}) / 6 \quad (21)$$

$$\text{onde } \beta_i = \text{arc tan} (\Delta y_i / \Delta x_i). \quad (22)$$

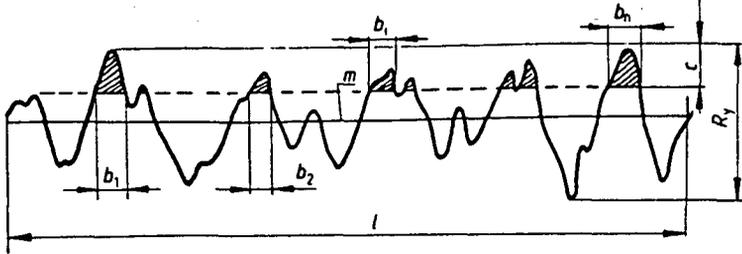
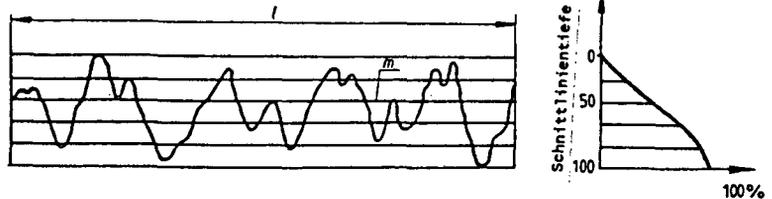
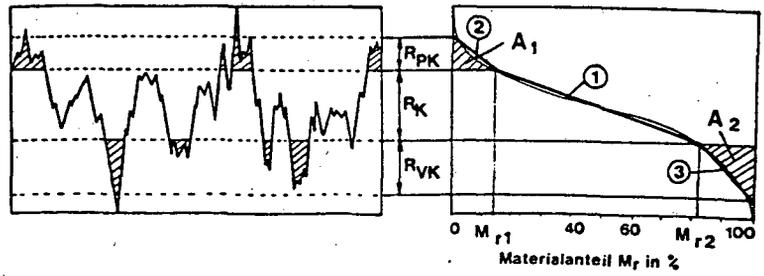


1	2	3	3	2	1
Faktoren der Gewichtung					

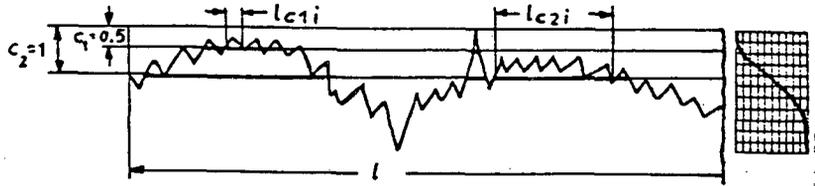
Tabela V: Apresentação dos parâmetros para avaliação da forma do perfil

Denominação	Símbolo	Descrição
25. Distribuição dos desvios do perfil  (Verteilungsdichte der Profilabweichungen)		<p>A distribuição é obtida da seguinte maneira: dentro do trecho de referência são traçadas duas linhas paralelas à linha média e o número de ordenadas contidas na região entre as duas paralelas é contado. A função é normalizada no que se expressa o número de ordenadas em cada região como um percentual do número total das ordenadas dentro do trecho de medição /123/.</p> 
26. Coeficiente de simetria  (Schiefe)	$S_k$	<p>Uma medida para a simetria da distribuição das ordenadas /123/. Este parâmetro é expresso através da seguinte fórmula:</p> $s_k = \frac{1}{R_d^3} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^3 \quad (23)$ <p>Um valor negativo para <math>S_k</math> caracteriza um perfil platafórmico.</p>
27. Curtose  (Kurtosis Exzeß)	$K_u$	<p>Curtose de uma variável <math>y</math> é definida através de:</p> $K_u = (\mu_4 / \mu_2^{**2}) - 3 \quad (24)$ <p>onde <math>\mu_2</math> é o segundo momento central e <math>\mu_4</math> é o quarto momento central /125/.</p> <p><math>K_u = 0</math>, se as ordenadas têm uma distribuição normal;  <math>K_u &gt; 0</math>, se a distribuição das ordenadas do perfil é mais delgada que uma distribuição normal;  <math>K_u &lt; 0</math>, se a distribuição das ordenadas do perfil é mais achatada que uma distribuição normal.</p>
28. Comprimento de suporte do perfil	$n_p$	<p>Soma dos comprimentos de corte das elevações, os quais são determinados por uma paralela à linha média que corta o perfil a uma profundidade "C" pré-determinada /123/.</p> $n_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n \quad (25)$

(Continuação da tabela V)

<p>(Tragende Länge des Profils)</p>		
<p>29. Percentual de suporte do perfil</p>	<p><math>t_p</math></p>	<p>Relação entre os comprimentos de suporte "<math>n_p</math>" e o comprimento de medida "<math>L_m</math>" /123/.</p> $t_p = (n_p/L_m) * 100\% \quad (26)$ <p>(Profil Traganteil)</p>
<p>30. Curva de suporte do perfil (curva de Abbott)  (Profil Tragkurve (Abbott-Kurve))</p>		<p>Apresentação gráfica da relação entre o percentual de suporte do perfil (<math>t_p</math>) e a profundidade da linha de corte (C). A curva de suporte do perfil é em um ponto qualquer a soma da distribuição das amplitudes até este ponto /123/.</p>  <p>A aproximação da curva de suporte do perfil através de 3 retas divide a profundidade do perfil da rugosidade em três regiões /126/:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- região de picos</li> <li>- região central</li> <li>- região de vales</li> </ul> <p>Estas regiões são separadamente descritas através de parâmetros isolados correspondentes: <math>R_{pk}, R_k, R_{vk}</math></p> 
<p>31. Profundidade da rugosidade central</p>	<p><math>R_k</math></p>	<p>Profundidade da rugosidade com exceção dos picos e dos vales /126/. (Kernrauhentiefe).</p>

(Continuação da tabela V)

32. Altura reduzida dos picos	$R_{pk}$	<p><math>R_{pk}</math> caracteriza a parte dos picos do perfil que se sobressai do núcleo /126/.</p> <p>(Reduzierte Spitzenhöhe)</p>
33. Profundidade reduzida de vales	$R_{vk}$	<p><math>R_{vk}</math> caracteriza a parte dos vales do perfil que penetra no material /126/.</p> <p>(Reduzierte Riefentiefe)</p>
34. Percentual de material (Materialanteil)	$M_{r1}$ und $M_{r2}$	<p>O percentual de material <math>M_{r1}</math> é determinado pela linha de corte, a qual limita o perfil do núcleo da rugosidade com o lado sem material. Veja fig.6-9. O percentual de material <math>M_{r2}</math> é determinado pela linha de corte, a qual limita o perfil do núcleo da rugosidade com o lado do material /126/.</p>
35. Percentual de suporte do macro perfil (Makroprofiltraganteil)	$t_{pa}$	<p>Relação da soma dos comprimentos de corte <math>L_{ci}</math> para o comprimento de medida <math>L_m</math>, quando o perfil não filtrado é cortado a uma distância "C" do ponto mais alto do perfil, através de uma linha cuja forma e direção deve ser fixada /9/.</p> <p>A curva do percentual de suporte do macro perfil, é a curva de <math>t_{pa}</math> em função da distância C.</p> 
36. Coeficiente de vazio	$K_p$	$K_p = R_p / R_t \quad /127/ \quad (27)$ <p>(Leergrad)</p>
37. Coeficiente de enchimento	$K$	$K = 1 - K_p \quad /127/ \quad (28)$ <p>(Völligkeitsgrad)</p>
38. Fator de forma	$K_f$	<p>(Formfaktor)</p> $K_f = R_a / R_p \quad /127/ \quad (29)$
39. Coeficiente de dispersão	$K'$	$K' = R_q / R_t \quad /127/ \quad (30)$ <p>(Streuungskoeffizient)</p>
40. Quociente da forma do perfil		$R_t / R_p \quad /128/ \quad (31)$ <p>(Profilformquotient)</p>
41. Quociente da forma do perfil		$R_t / R_a \quad /128/ \quad (32)$

(Continuação da tabela V)

42. Quociente da forma do perfil		$R_p / R_a$	/128/	(33)
43. Quociente da forma do perfil		$R_t * R_a / R_p^{**2}$	/128/	(34)
44. Quociente da forma do perfil		$R_t * R_p / R_a^{**2}$	/128/	(35)
45. Kennwerte- -Profil	$K_{pr}$	$K_{pr} = (R_t * R_a^{**4}) / R_p^{**5}$	/91/	(36)
46. Curvatura  (Krümmung)	$C_m$	$C_i = ( \sum y_i (x_i - x_p)^2 - 2 \Delta x^2 \sum y_i ) / 7 \Delta x^4$		(37)
		$C_m = \sum_{i=1}^n (-C_i)$	/28,33,114/	(38)
47. Função de correlação  (Korrelationsfunktion)	$R_{ii}$ $R_{jj}$ $R_{ij}$	<p>A função de auto-correlação <math>R_{ii}(\lambda)</math> ou <math>R_{jj}(\lambda)</math> de dois perfis da superfície <math>y_i(x)</math> e <math>y_j(x)</math> são definidos da seguinte forma /25,26,58/:</p> $R_{ii}(\lambda) = \left( \sum_{i=1}^{N-\lambda} (y_i - \bar{y}_i)^2 \right) / (N - \lambda) \quad (39)$ $R_{jj}(\lambda) = \left( \sum_{i=1}^{N-\lambda} (y_j - \bar{y}_j)^2 \right) / (N - \lambda) \quad (40)$ <p>A função de correlação transversa <math>R_{ij}(\lambda)</math> de <math>y_i(x)</math> e <math>y_j(x)</math> é definida como:</p> $R_{ij}(\lambda) = \left( \sum_{i=1}^{N-\lambda} (y_i - \bar{y}_i)(y_{j+\lambda} - \bar{y}_j) \right) / (N - \lambda) \quad (41)$ <p>onde:  <math>N</math> é o número de ordenadas;  <math>\bar{y}_i</math> e <math>\bar{y}_j</math> são os valores médios de <math>y_i(x)</math> e <math>y_j(x)</math> respectivamente e  <math>\lambda</math> é o parâmetro de deslocamento.  As funções de correlação transversa normalizadas são calculadas da seguinte forma:</p> $r_{ii}(\lambda) = (R_{ii}(\lambda)) / \sigma_i^2 \quad (42)$ $r_{jj}(\lambda) = (R_{jj}(\lambda)) / \sigma_j^2 \quad (43)$ $r_{ij}(\lambda) = (R_{ij}(\lambda)) / (\sigma_i \cdot \sigma_j) \quad (44)$		

(Continuação da tabela V)

<p>48. Função Beta</p> <p>(Beta- Funktion)</p>	$\beta(m,n)$	$\beta(m,n) = \int_0^1 y^{m-1} (1-y)^{n-1} dy \quad /56,28,61/ \quad (45)$ <p>Função de probabilidade da função Beta:</p> $f_{\beta}(m,n,y) = \frac{1}{\beta(m,n)} y^{m-1} (1-y)^{n-1} \quad (46)$ $\beta(m,n) = \frac{\Gamma(m) \Gamma(n)}{\Gamma(m+n)} \quad (47)$ $\Gamma(x+1) = x \Gamma(x) \quad (48)$ $m = (R_t - R_p) [(R_t - R_p)R_p - R_q^2] / (R_t \cdot R_q^2) \quad (49)$ $n = R_p [(R_t - R_p)R_p - R_q^2] / (R_t \cdot R_q^2) \quad (50)$ <p>Através da função Beta é possível se descrever com poucos parâmetros a distribuição das amplitudes, ou seja, das ordenadas.</p>
<p>49. Análise de Fourier</p> <p>(Fourier Analyse)</p>		<p>A análise de Fourier de um perfil resulta em sua totalidade de amplitudes e correspondentes frequências de oscilações harmônicas, as quais somadas conforme fases correspondentes são idênticas ao perfil. O espectro de Fourier do perfil da superfície <math>y(x)</math> é obtido através da transformação de Fourier</p> $F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) e^{-j\omega x} dx \quad (51)$ <p>O comprimento de onda ( ) vale para a frequência da circunferência <math>\omega = 2 / \lambda</math>, tal que a transformação de Fourier deixa-se expressar como função do comprimento de onda :</p> $F(\lambda) = F(j\frac{2\pi}{\lambda}) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) e^{-j2\pi x/\lambda} dx \quad (52)$ <p>A série de Fourier da função <math>y(x)</math> pode ser calculada da seguinte forma:</p> $y(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega_0 x + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\omega_0 x \quad (53)$ <p>onde:</p> $A_0 = (1/x_0) \int_0^{x_0} y(x) dx = \bar{y}(x) \quad (54)$ $A_n = (2/x_0) \int_0^{x_0} y(x) \cos(n\omega_0 x) dx \quad (55)$ $B_n = (2/x_0) \int_0^{x_0} y(x) \sin(n\omega_0 x) dx \quad (56)$

(Continuação da tabela V)

		Para o torneamento, por exemplo: $x_o = f$ (avanço) $f_o = 1/x_o = 1/f$ $w_o = 2\pi/f$
--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------