

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR José Paulo Breda Destro
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 18.02.93

ORIENTADOR
Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini
Departamento de Engenharia de Fabricação
FEM/UNICAMP

Tese de Mestrado

"Resistência A Usinagem - Uma Contribuição
A Caracterização dos Materiais"

Autor: José Paulo Breda Destro

Orientador: Profr. Dr. Nivaldo Lemos Cupini

Aprovado por:

06/93

Profr. Dr. Nivaldo Lemos Cupini Presidente

Profr. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Profr. Dr. Ivan Gilberto S. Falleiros

Campinas, 18 de fevereiro de 1993

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

A Deus,

Fonte de infinita Sabedoria,
que ilumine com a energia do
seu Santo Espírito:

minha fraqueza,
ignorância e
insensatez.

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

Ao Profr. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, meu orientador.

Aos Professores do DEF/Unicamp.

Aos funcionários do DEF/Unicamp e colegas da Pós-Graduação.

À FINEP- Financiadora de Estudos e Projeto pelo apoio em infra-estrutura de pesquisa.

À Brasimet SA pela cessão de porta-ferramenta para dinamômetro.

À Villares SA pela doação de material.

Ao CNPq-RhAE pela bolsa.

Às pessoas, que direta ou indiretamente colaboraram com a execução deste trabalho de mestrado.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de propor uma nova propriedade intrínseca dos materiais: Resistência à Usinagem. Tal propriedade foi idealizada para substituir a propriedade tecnológica usinabilidade, exclusivamente no que tange à caracterização dos materiais durante o seu desenvolvimento e controle de qualidade durante sua produção. Para a medida da Resistência à usinagem foi definido o índice RU, que traduz a resistência do material à usinagem em termos da força ativa necessária para usiná-lo e da taxa de desgaste sofrido pela ferramenta após um dado volume de cavaco removido. Foram realizadas medidas das propriedades para aços ABNT-1212, -12L14, INOX 303. Os resultados destas medidas mostraram-se coerentes quando comparados com índices universais de usinabilidade.

ABSTRACT

The aim of this work is the conception of a new material property: Strength to Machining, which is only inherent to it. This property was conceived to replace the technological property of machinability, only regarding to material characterization during its research, development and quality control within its production. The index RU was defined in order to allow and express its measurement .It means the machining strength in relation to the active force, required to machine it, and to the wear rate endured by the tool - after the remotion of a fixed chip amount. Measurements of the property were performed for the following steels: ABNT-1212, -12L14 and INOX 303. Experimental results showed to be quite fair to universal machinability indexes from literature.

LISTA DE TABELAS E DIAGRAMAS

Página

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas básicas	20
Tabela 4.2 - Propriedades térmicas básicas	21
Tabela 4.3 - Propriedades elétricas básicas	22

Capítulo 5

Diagrama 5.1 - Problemas quanto à utilização do conceito usinabilidade e inter-relações	27
--	----

Capítulo 6

Diagrama 6.1 - Planejamento do experimento	40
Tabela 6.1 - Propriedades mecânicas e composição química dos materiais ensaiados	36
Tabela 6.2 - Número e dimensões dos corpos-de- -prova utilizados	37
Tabela 6.3 - Condições de usinagem recomendadas e utilizadas em caráter preliminar	40

Tabela 6.4 - Resultados do ensaio preliminar I	40
Tabela 6.5 - Condições de usinagem adotadas no trabalho	45
Tabela 6.6 - Resultados do ensaio preliminar II	48

Capítulo 7

Tabela 7.0 - Medida da densidade dos materiais utilizados	53
Tabela 7.1 - Descrição dos testes executados	55
Tabela 7.2 - Indicação para localização de me- didas e resultados experimentais	54
Tabela 7.3.I.1(a) - Medidas experimentais, Material: ABNT 1212, diâmetro 57 mm	56
Tabela 7.3.I.2(a) - Medidas experimentais, Material: ABNT 12L14, diâmetro 57 mm	57
Tabela 7.3.I.3(a) - Medidas experimentais, Material: INOX 303, diâmetro 57 mm	58
Tabela 7.3.II(a) - Medidas experimentais, Diâmetro 32 mm	59
Tabela 7.3.III(a) - Medidas experimentais, Diâmetro 25 mm	60
Tabela 7.3.I.1(b) - Resultados, Diâmetro 57 mm Material: ABNT 1212	61
Tabela 7.3.I.2(b) - Resultados, Diâmetro 57 mm Material: ABNT 12L14	62

Tabela 7.3.I.3(b) - Resultados, Diâmetro 57 mm	
Material: INOX 303	63
Tabela 7.3.II.1(b)- Resultados, Diâmetro 32 mm	
Material: ABNT 1212	64
Tabela 7.3.II.2(b)- Resultados, Diâmetro 32 mm	
Material: ABNT 12L14	65
Tabela 7.3.II.3(b)- Resultados, Diâmetro 32 mm	
Material: INOX 303	66
Tabela 7.3.III(b) - Resultados, Diâmetro 25 mm	67
Tabela 7.4 - Médias e desvios dos resultados obtidos	69
Tabela 7.5 - Valor t^{**} calculados para	
diâmetros 57mm e 32mm	70
Tabela 7.6 - Valor t^* calculados para	
diâmetros 32mm e 25mm	71
Tabela 7.7 - Valor t^* calculados para	
diâmetros 57mm e 25mm	72

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS UTILIZADAS

α	- nível de significância estatística de teste de hipóteses
a_p	- profundidade de usinagem [mm]
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
B	- indicativo simplificado do índice REU-B []
C	- capacidade térmica [J/kg.s]
cdp	- corpo-de-prova
d, D	- diâmetro [mm]
$d_{i,f}$	- diâmetro inicial, final [mm]
d_m	- diâmetro médio [mm]
Δm	- massa removida [g]
Δm_c	- massa removida de cavaco [g]
Δm_T	- massa removida da ferramenta [g]
E	- equivalente mecânico do calor; módulo de elasticidade [MPa]
ϵ	- deformação []; constante dielétrica [F/m]
F	- força [N]
F_a	- força de avanço [N]
F_c	- força de corte [N]
F_t	- força ativa [N]
f	- avanço [mm/volta]
ϕ	- diâmetro [mm]
HB	- dureza Brinell
H_0	- hipótese nula
H_a	- complementar da hipótese nula
IC	- intervalo de confiança

- K - constante dielétrica relativa []
- k - condutividade térmica [J/kg.°C]
- L - comprimento do corpo-de-prova [mm]
- L_a - comprimento de avanço [mm]
- L_i - comprimento do corpo-de-prova para o i-ésimo teste [mm]
- m - massa [g]
- μ_i - média populacional da grandeza i
- N - rotação [rpm]
- Nr - número de elementos
- n_i - número de elementos da i-ésima amostra estatística
- Π - polarização [C/m²]
- P&D - pesquisa e desenvolvimento
- Q - quantidade de calor produzida no processo de usinagem [J]
- Q_a - quantidade de calor produzida pelo atrito peça-ferramenta e cavaco-ferramenta [J]
- Q_c - quantidade de calor dissipada pelo cavaco [J]
- Q_f - quantidade de calor dissipada pela ferramenta [J]
- Q_{ma} - quantidade de calor dissipada para o meio-ambiente [J]
- Q_p - quantidade de calor dissipada pela peça [J]
- Q_z - quantidade de calor produzida pela deformação de cisalhamento do cavaco [J]
- ρ - resistividade elétrica [Ω /m] ou densidade do material usado [kg/m³]
- RU - resistência à usinagem: [REU; REU-A; REU-B]

- REU - produto: $(REU-A) \times (REU-B)$
- REU-A- índice de RU associado a F_1 [N]
- REU-B- índice de RU associado à agressividade do material []
- s - desvio-padrão
- s_i - desvio-padrão da i-ésima amostra estatística
- s_{1-2} - estimador estatístico relativo ao teste de hipóteses
- σ - tensão [kgf/cm²] ou condutividade elétrica []
- σ_e - limite de escoamento [kgf/cm²]
- σ_r - limite de escoamento [kgf/cm²]
- t - tempo [min]
- $t_{\alpha/2, (n-1)}$ - valor da distribuição t de "Student" para teste bilateral com (n-1) graus de liberdade
- $t_{\alpha/2, (n_2+n_1-1)}$ - valor da distribuição t de "Student" para teste bilateral com (n₂+n₁-1) graus de liberdade
- t^* - Valor calculado para verificação do teste de hipóteses entre média de medidas e medida
- t^{**} - Valor calculado para verificação do teste de hipóteses entre médias de medidas
- t_c - tempo de corte [min]
- τ_e - tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento da zona de formação do cavaco do material [kgf/cm²]
- t_{vida} - tempo de vida da ferramenta [min]
- V - volume de cavaco removido [mm³]
- v_c - velocidade de corte [m/min] (ou também: V_c)
- $\bar{x}_i$ - valor médio da i-ésima amostra

I N D I C E

	Página
Dedicatória	1
Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract	4
Lista de Tabelas	5
Lista de Símbolos e Siglas	8
Índice	11

Capítulo 1

1. Introdução	1
---------------	---

Capítulo 2

2. Revisão em usinagem	4
2.1- Forças envolvidas no processo de usinagem	4
2.2- Desgaste da ferramenta envolvido no processo de usinagem	5

Capítulo 3

3. Usinabilidade	9
3.1- Generalidades	9
3.2- Fatores e critérios	11
3.2.1- Fatores	11
3.2.1.1- Material da Peça	11
3.2.1.2- Condições de Usinagem	12
3.2.1.3- Ferramentas	12
3.2.2- Critérios	12
3.2.2.1- Básicos	13
3.2.2.2- Específicos	13
3.3- Aplicação	14
3.3.1- Planejamento de processos	14
3.3.2- Controle e recepção de materiais	14
3.3.3- Seleção de materiais	15
3.3.4- P&D de novos materiais	15
3.4- Testes de Usinabilidade	15
3.5- Estado-da-arte da usinagem e usinabilidade	16

Capítulo 4

4. Propriedade dos Materiais	18
4.1- Introdução	18
4.2- Propriedades intrínsecas dos materiais	18
4.3- Propriedades tecnológicas dos materiais	19

Capítulo 5

5. Resistência à usinagem - Proposta da nova propriedade	25
5.1- Generalidades	25
5.2- Objetivos e Hipóteses	30
5.3- Definição da nova propriedade de	
resistência à usinagem	30
5.3.1- Definição de RU	31
5.3.2- Definição de REU-A	31
5.3.3- Definição de REU-B	32
5.4- Metodologia de determinação	33
5.4.1- Índice REU-A	34
5.4.2- Índice REU-B	34

Capitulo 6

6. Material, Equipamentos e Procedimento experimental	35
6.1- Material	35
6.1.1- Barras trefiladas	35
6.1.2- Corpos de prova	35
6.1.3- Porta-ferramenta	36
6.1.4- Ferramentas	37
6.1.5- Solução de limpeza	37
6.1.6- Pinça	37
6.2- Equipamentos	38
6.2.1- Torno	38

	Página
7.1.1- Resultados preliminares	74
7.1.2- Fórmula para cálculo dos índices de esistência	74
7.1.3 Resultados	76
7.2- Discussão dos resultados	68
7.2.1- Análise da influência do diâmetro	68
7.2.1.1- Diâmetros 57mm e 32 mm	70
7.2.1.2- Diâmetros 32mm e 25 mm	71
7.2.1.3- Diâmetros 57mm e 25 mm	72
7.2.2- Representatividade	73
7.2.3- Extensão	75
Capítulo 8	
8. Conclusão	76
Capítulo 9	
9. Sugestões para trabalhos futuros	78
BIBLIOGRAFIA	79

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A "indústria do futuro" ou a do presente em alguns países do 1.º Mundo, tem trabalhado pela conquista da qualidade e minimização de custos de fabricação, visando à excelência no âmbito de seu mercado.

À medida em que os custos de usinagem apresentam-se crescentes e preponderantes, indústrias têm optado por materiais de corte fácil, como, por exemplo: aços ressulfurados, refosfatados e aditivados com chumbo.

Porém, a falta de padronização de testes de caracterização desses materiais, quanto à facilidade/dificuldade que oferecem ao serem usinados, tem dificultado o trabalho de engenheiros e pesquisadores, tanto nas empresas que produzem esses materiais, bem como, naquelas que se valem dos mesmos para manufaturar seus produtos. Pois, carecem de parâmetros para guiar

P&D (pesquisa e desenvolvimento) de novos materiais e, seleção e controle, respectivamente.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma nova propriedade dos materiais: resistência à usinagem.

O CAPÍTULO 2 consiste na revisão de alguns tópicos da usinagem relevantes para a compreensão do trabalho

No CAPÍTULO 3 é feita uma revisão sobre usinabilidade e são apresentadas as suas vantagens e desvantagens para aplicação do conceito.

No CAPÍTULO 4 é feita uma análise das Propriedades dos Materiais, buscando-se neste ponto as premissas para sugerir uma nova propriedade.

A discussão preliminar até elaboração da propriedade de resistência à usinagem (RUD) está contida no CAPÍTULO 5. Como também, a sua definição e metodologia de determinação.

A metodologia experimental adotada neste trabalho consistiu na otimização de recursos de pesquisa disponíveis na infra-estrutura do Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia de Fabricação. Foram verificados, basicamente, três materiais: SAE 1212, SAE 12L14 e Villares V303-aço resulfurado e refosfatado, aço com adição de 0.7% de Pb e aço inox resulfurado, respectivamente. A descrição do procedimento experimental utilizado e detalhes encontram-se no CAPÍTULO 6.

Os resultados obtidos são apresentados, tratados estatisticamente e analisados no CAPITULO 7.

Conclusões à respeito da representatividade, extensão e viabilidade da propriedade proposta, encontram-se no CAPITULO 8.

Sugestões para trabalhos futuros estão indicadas no CAPITULO 9.

A nomenclatura utilizada neste trabalho segue normas ABNT [1],[2] - no que se refere a movimentos, grandezas e geometrias envolvidas em usinagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO EM USINAGEM

2.1- Forças envolvidas no processo de usinagem

A força de usinagem, segundo Ferraresi [3] e Cupini [4], corresponde àquela agindo em direção e sentido sobre a ferramenta durante a remoção de cavaco.

É responsável pelo recalque do material, sua deformação e remoção quer em lamelas justapostas dispostas em forma contínua (cavaco contínuo) ou em forma descontínua (cavaco de cisalhamento), quer em forma de fragmentos (cavaco de ruptura), arrancados da peça usinada. Explicações técnicas e científicas a este respeito encontram-se em Ferraresi [5], Freire [6], Micheletti [7], Shaw [8] e Trent [9].

A natureza desta força advém, basicamente da pressão normal do material recalcado e removido contra as superfícies da

ferramenta e do atrito, conforme trabalhos de Merchant [10] e Black [11].

É decomposta em Força de corte, de avanço e de profundidade conforme seu produto escalar nas direções de corte, avanço e ortogonal ao plano auxiliar de trabalho, respectivamente.

Estas três componentes podem ser medidas através de dinamometria. Detalhes encontram-se em Ferraresi [5].

A força de corte e a força de avanço no torneamento têm como resultante a força ativa de corte, pois esta resume todos os esforços que ocorrem na direção de corte e de avanço.

Estas forças estão associadas à energia mecânica necessária para remoção do cavaco, que deve ser fornecida pela máquina-ferramenta.

Da análise e observação destes fatos depreende-se que:

Materiais que necessitam de forças ativas diferentes oferecem, também, "diferentes" graus de resistência à usinagem.

ESTA FOI A PRIMEIRA IDEIA BÁSICA DESTE TRABALHO.

2.2 - Desgaste da ferramenta envolvida na usinagem

Praticamente a totalidade de energia mecânica usada no processo de usinagem é dissipada como energia térmica, conforme Ferraresi [5], Micheletti [7], Shaw [8] e Trent[9].

Na medida do equivalente-térmico do calor (1799),

Thomson imergiu ferramenta, peça e cavaco em determinada quantidade de água. Observou aumento de temperatura proporcional à energia introduzida no sistema, pelo motor da máquina, conforme encontra-se em Trent [9].

Shaw [8] relata que Taylor e Quinney (1934, 1937), usando técnica calorimétrica sofisticada, conseguiram estimar energia residual (visto que uma parcela de energia associada à deformação plástica permanece no material deformado) de barras metálicas, quando sujeitas à torção. Por esta ocasião, verificou-se que a energia de deformação armazenada pelas barras diminuía com o aumento de energia de deformação envolvida.

Quando estes resultados são extrapolados a níveis de energia de deformação compatíveis com a formação de cavaco, estima-se que a energia não convertida em térmica é da ordem de 1 a 3% da energia de corte total .

Portanto, para uma primeira aproximação, toda a energia associada à formação de cavaco é convertida em energia térmica.

As principais fontes de calor durante a remoção do cavaco são, segundo Ferraresi [6]:

- (a) Deformação plástica do cavaco na região de cisalhamento;
- (b) Atrito peça-ferramenta;
- (c) Atrito cavaco-ferramenta.

O calor é dissipado pelo cavaco, peça, ferramenta, e

meio-ambiente. De modo que:

$$Q = Q_z + Q_a = Q_c + Q_p + Q_f + Q_{ma} \quad (2.1)$$

Q_z = quantidade de calor produzida pela deformação e cisalhamento do cavaco.

Q_a = quantidade de calor produzida pelo atrito entre peça-ferramenta e cavaco-ferramenta.

Q_c = quantidade de calor dissipada pelo cavaco.

Q_p = quantidade de calor dissipada pela peça.

Q_f = quantidade de calor dissipada pela ferramenta.

Q_{ma} = quantidade de calor dissipada para meio-ambiente.

Baseado nas considerações preliminares, e segundo Micheletti [7], Shaw [8] e Trent [9], pode-se determinar a quantidade de calor produzida na usinagem com precisão da ordem de 10% como:

$$Q = F_c \cdot v_c / E \quad [\text{kcal/min}] \quad (2.2)$$

F_c = força de corte [kgf];

v_c = velocidade de corte [m/min];

E = equivalente-mecânico do calor = 427 kgfm/kcal

Algumas constatações experimentais merecem ser destacadas, conforme destaques de Cupini [4] e Ferraresi [5]:

(a) Grande parte do calor é dissipado pelo cavaco, menor parte pela peça e ainda menor pela ferramenta.

(b) A quantidade de calor conduzida pela ferramenta é relativa-

mente pequena. Porém, como esta superfície de contato é reduzida, desenvolvem-se temperaturas bastante elevadas.

Estas favorecem transformação da estrutura do material da ferramenta, diminuem sua dureza e resistência, favorecendo o desgaste.

(c) A equação (2.2) indica que o calor gerado durante o processo de usinagem aumenta proporcionalmente com a velocidade e força de corte.

Consequentemente, a temperatura também cresce, acelerando o desgaste da ferramenta.

Então, aumenta o valor do coeficiente de atrito e consequentemente a força de corte, o que tende a intensificar o desgaste. Este processo segue-se até a perda de corte da ferramenta. Acresce-se a este fato que outros mecanismos de desgaste atuam durante o processo de usinagem. Estes estão ligados às características do material da peça. Podem ser citados a abrasão mecânica e a difusão metálica, entre outros mecanismos.

Portanto, a força de usinagem não é exclusivamente o parâmetro de resistência do material à usinagem. Está associada ao desgaste e diretamente ligada a ele. Devem ser tratados, entretanto, de modo independente, à semelhança de um sistema de duas variáveis com solução linearmente independentes entre si. Porém, devem apresentar, obviamente um significado básico que traduza os fatos do processo de corte.

Esta corresponde à SEGUNDA IDÉIA BÁSICA DESTE TRABALHO.

CAPÍTULO 3

USINABILIDADE

3.1- Generalidades

O dicionário Aurélio [12] não dispõe da palavra usinabilidade em seu léxico.

O dicionário Webster [13] define-a como: "qualidade ou estado de ser usinável"; usinável: "capaz de ou adequado de ser usinado".

É um consenso geral admiti-la como medida da facilidade ou dificuldade com que o material é usinado, conforme comitê da ASME [14], Cook [15], Mills [16], Micheletti [17] e comitê da ASTM [18].

Uma das definições apresentada pelo comitê da ASME [14] descreve com intuição e sensibilidade: "é semelhante a saborear vinhos - prontamente percebida, mas pouco efetivamente medida em termos quantitativos".

A definição mais formal técnica e cientificamente é, talvez, aquela de Ferraresi [5]: "usinabilidade é uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou percentagem) um conjunto de propriedades de usinagem de um metal em relação a outro tomado como padrão". As propriedades de usinagem do metal : "aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais: vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco".

A precária exatidão e subjetividade decorrentes da definição conceitual são comentadas pelos autores e autoridades da área: comitê ASME [14]- "é necessário defini-la de forma qualitativa e quantitativa mais precisas, ... infelizmente é o melhor que podemos fazer"; Cook [16]- "e tende a refletir não uma medida objetiva, mas o interesse imediato do usuário".

Talvez, a verificação mais contundente é feita por Micheletti [17]- "pode ser considerada um moderno "flogistus", ninguém sabe onde e como a usinabilidade realmente funciona. Pois a facilidade de usinar pode ser medida de modos diferentes, que frequentemente fornecem resultados contraditórios". Posteriormente, o autor afirma que "neste sentido pode ser considerada como:

. a capacidade do material produzir pequenas forças de corte;

- . grande volume de material removido por unidade de tempo;
- . pequeno desgaste na ferramenta;
- . boa superfície de acabamento;
- . precisão e características dimensionais constantes da peça;

Trabalho expressivo de um comitê da ASTM [18] sentencia: " o termo usinabilidade não apresenta definição exata, aceita universalmente e que satisfaça a um rigor tecnológico ".

A usinabilidade, portanto, não é uma propriedade intrínseca do material, conforme trabalho de Cupini e Vilella [19]. É função de fatores advindos do par peça-ferramenta (bem como da atmosfera que os envolve), conforme afirma Ferraresi [5]. É referenciada em um material padrão - a que é atribuído índice 1 ou 100% - de acordo com critério ou conjunto destes .

3.2- Fatores & critérios

3.2.1- Fatores

Os fatores, mencionados no item anterior, são função do par peça-ferramenta, conforme escrevem autoridades da ASME [14] e Cook [15]. Ou seja: peça a ser trabalhada, das condições de usinagem e da ferramenta , conforme Ferraresi [5]. A ASTM [18] agrupa sucintamente estes fatores:

3.2.1.1- Material da peça

- . Dureza;
- . Propriedades de resistência mecânica;

- . Composição química;
- . Microestrutura;
- . Grau de encruamento;
- . Endurecibilidade por deformação;
- . Forma e dimensão;
- . Rigidez;

3.2.1.2- Condições de usinagem

(a). Máquina

- . velocidade de corte;
- . grandezas de usinagem (avanço, prof. de usinagem etc);
- . fixação da ferramenta;
- . geometria do corte;
- . rigidez da máquina;

(b). Presença de fluido de corte;

3.2.1.3- Ferramenta

- . Material;
- . Geometria;

A análise de influência de cada um destes fatores encontra-se em Ferraresi [8].

3.2.2 - Critérios

Os critérios, conforme já foi mencionado, correspondem

às diretrizes, cuja avaliação consiste no objetivo de execução do teste.

Podem ser básicos ou específicos, segundo Ferraresi [6]:

3.2.2.1- Básicos, embasados em:

(a). Vida da ferramenta- métodos:

- . velocidade vao;
- . comprimento usinado;
- . faceamento de Brandsma;
- . aumento progressivo da velocidade de corte;
- . aumento discreto da velocidade de corte;
- . ensaio de sangramento com bedame;

(b). Força de usinagem- métodos:

- . pressão específica de corte;
- . tensão de cisalhamento;
- . força de avanço constante;

(c). Acabamento superficial;

(d). Produtividade;

3.2.2.2- Específicos, baseados em:

- . Análise dimensional;
- . Temperatura de corte;
- . Características do cavaco:
 - . -grau de recalque;
 - . -coeficiente volumétrico e forma do cavaco;
 - . -frequência e amplitude da força de usinagem;

3.3- Aplicação

Podem-se executar testes de usinabilidade visando-se objetivos do cotidiano da indústria metalúrgica - produtora de materiais, bem como da consumidora dos mesmos, via processos de usinagem.

Campo de aplicação faz-se desde a engenharia de fabricação (processos), engloba a de qualidade (controle/ recepção), projeto (seleção) e atinge a engenharia de materiais (P&D).

A saber:

3.3.1- Planejamento de processos

No sentido de minimização de custos de fabricação, à medida que são disponíveis informações mais precisas do comportamento do material durante o processo e, podem ser levantados dados específicos do lote.

3.3.2- Controle de recepção de materiais

Podem ser executados testes com máquinas da produção: tornos CN, por exemplo.

Pode-se caracterizar a "resistência à usinagem" durante o controle de recepção dos materiais de forma direta, dispensando testes indiretos indicativos desta propriedade, tais como dureza, composição química, etc.

3.3.3- Seleção de materiais

Frequentemente, esta atividade restringe-se às pro-

priedades de resistência mecânica e agressividade do meio. Entretanto, à medida que crescem as alternativas de materiais e os custos de fabricação fazem-se relevantes, informações atinentes à fabricabilidade do produto passam a ocupar posição decisiva na escolha.

3.3.4- P&D de materiais de corte fácil

Pode ser feita de forma mais direta e objetiva, pois o material é caracterizado em termos de sua facilidade/dificuldade de ser usinado.

Atualmente, ainda não existem normas brasileiras atinentes à usinabilidade.

Porém, à medida em que os custos de usinagem tornam-se relevantes no custo total do produto e existe uma pressão econômica real no sentido de P&D de novos materiais com fabricabilidade superior, a medição de quão fácil ou difícil um material é usinado, constitui-se em uma das poucas formas de se efetuar um prognóstico de seu comportamento em processo.

3.4- Testes de usinabilidade

O procedimento básico para concepção de testes de usinabilidade é estabelecer um critério (item 3.2), escolher um material padrão (aço B1112 - normas ISO [20], BS [21]; S300 e XC48 - norma AFNor [22]) e o ensaiar, atribuindo-lhe índice 100. Posteriormente ensaiam-se outros materiais, comparando-o com o padrão, conforme critério,

atribuindo-lhes um índice com relação àquele.

Todo e qualquer critério estabelecido, a premissa supra-mencionada é mister de ser cumprida.

Estes testes encontram-se apresentados na obra de Ferraresi [5] e sintetizados por Micheletti [17] e manual ASTM [18].

Não há sentido, talvez de sua reapresentação neste trabalho, porque o objetivo é arquitetar as bases e apresentar uma nova propriedade em consonância com o trabalho de Cupini e de Vilella [19], tentando suprir lacunas de falhas conceituais e oferecer à indústria uma ferramenta adequada na caracterização de um material quanto à sua usinagem.

3.5- Estado-da-arte da usinagem e usinabilidade

Têm sido incontestáveis as conquistas e desenvolvimentos na área de usinagem. Citam-se novos materiais para ferramentas [24] (metal duro recoberto [25], [26]; cerâmicos [27], [28], [29]; CBN [30], [31], [32]; PCD [33], [34]; etc), que tendem a viabilizar a usinagem de compostos ultra-duros [35], [36] - com excelente acabamento (chegando a possibilitar a eliminação de retíficas [37], [38]); tecnologia envolvida na usinagem de ultra-precisão [39] de ligas para múltiplo uso em mecânica de precisão; monitoramento do processo [40], quer por corrente/forças [41], [42], [43]; vibrações [44], emissão acústica [45] - implicando em redução de mão-de-obra [46] e otimização de processo - via

maximização do aproveitamento de recursos e minimização de falhas; entre outros.

Estes fatos ampliam sensivelmente o número de critérios e gama de ferramentas disponíveis. Aliados a fatores econômicos, relativizam totalmente os resultados dos testes de usinabilidade, inviabilizando-os.

Visto que os testes, na forma em que a usinabilidade está concebida, podem apresentar resultados contraditórios, cuja validade faz-se dentro de condições muito específicas e pouco representativas.

Deparam-se, portanto inúmeros obstáculos, quando o engenheiro ou pesquisador está interessado em determinar o comportamento do material, em termos da facilidade ou dificuldade de ser usinado.

Algumas empresas lançam mão de normalização própria, como se trata do caso citado na fábrica da Volvo - Suécia por Akerstrom [47]; outras valem-se de muitos poucos testes normalizados pela ASTM [18], ISO [20], BS [21], e AFNor [22] e a grande maioria não trata do assunto.

Esta questão será retomada no capítulo 5, no item de Argumentos à nova propriedade.

Neste trabalho, optou-se pela ferramenta intercambiável de metal duro, porque, constitui grande maioria dos casos da indústria atual.

CAPÍTULO 4

PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

4.1- Introdução

Datsko [48], Hayden [49], Patton [50] e van Vlack [51] sugerem em suas obras que os objetivos de se estabelecerem propriedades a um material são:

- (a) permitir a sua caracterização;
- (b) estabelecer, concomitantemente, parâmetros de comparação entre materiais diferentes.
- (c) permitir sua seleção e especificação para aplicações práticas.

4.2- Propriedades intrínsecas do material

Permite caracterizar materiais, classificando-os independentemente das condições a que serão submetidos.

Apresentam resultados válidos dentro de condições pré-estipuladas para sua determinação. Podem ser divididas em físicas, químicas e organolíticas, à medida em que se relacionam à fenômenos físicos, químicos ou a simples estimulação dos sentidos do homem, respectivamente.

Podem-se dividir as propriedades dos materiais, também, em mecânicas, elétricas e térmicas.

As principais propriedades mecânicas, térmicas e elétricas encontram-se nas tabelas 4-1, 4-2 e 4-3, respectivamente.

4.3 - Propriedades Tecnológicas do Material

Correspondem à capacidade dos materiais selecionados poderem se adaptar aos processos de fabricação. São decorrentes da interação entre propriedades intrínsecas do material (sobretudo mecânicas) e as características do processo. Através da leitura de manual ASM [52] e Bresciani [53] listam-se as principais e respectivas definições:

TABELA 4.1

Propriedade	Símbolo	Definição/Comentário
Módulo de elasticidade	E	Tensão/ Unidade de deformação (σ/ϵ)
Limites de resistência		
Limite de escoamento	σ_e	Resistência até início da deformação plástica
Limite de ruptura	σ_r	Resistência no instante de ruptura
Dutibilidade		Deformação plástica até a fratura
Alongamento		Redução percentual do comprimento inicial ($l_f - l_o / l_o$)
Estricção		Redução percentual da área inicial ($A_f - A_o / A_o$)
Dureza		Resistência à penetração
Tenacidade		Energia necessária para ruptura do material

TABELA 4.2

Propriedade	Símbolo	Definição/Comentário
Temperatura de fusão	θ_f	Temperatura de passagem ao estado líquido CNTP
Temperatura de vaporização	θ_v	Temperatura de passagem ao estado de vapor CNTP
Capacidade térmica	C	Calor por massa e por mudança de temperatura ($C = Q / m \cdot \Delta\theta$)
Condutibilidade térmica	k	Capacidade de conduzir calor
Difusividade térmica	α	Capacidade de difusão de calor

TABELA 4.3

Propriedade	Símbolo	Definição/comentário
Condutividade	σ	Fluxo de carga por unidade de diferença de potencial
Resistividade	ρ	Inverso da condutividade
Polarização	Π	Momento do dipolo por unidade de volume
Constante dielétrica relativa	K	Razão da constante dielétrica do meio por aquela relativa ao vácuo
Constante dielétrica	ϵ	Densidade de carga elétrica por unidade de intensidade de campo

(a) Capacidade de responder ao tratamento térmico → capacidade de sofrer modificações microestruturais em função da aplicação de ciclos de tempo temperaturas que alteram propriedades mecânicas.

(b) Conformabilidade plástica → capacidade do material poder ser deformado plasticamente, escoando pela matriz ou ferramenta de conformação, produzindo peças isentas de fissuras, dentro de tolerâncias dimensionais especificadas.

(c) Fundibilidade → capacidade de penetração do material em molde de fundição e produção de peça isenta de defeitos dentro de tolerâncias dimensionais especificadas.

(d) Soldabilidade → capacidade do material-base poder ser fundido na região da solda e produzir junção com propriedades mecânicas compatíveis com sua utilização.

(e) Usinabilidade → definida no capítulo 3.

As propriedades tecnológicas se prestam, principalmente, para aplicações em processos de fabricação. Entretanto, algumas delas, como exemplo principal a usinabilidade, têm sido utilizadas também para desenvolver e controlar a produção de um dado material que deverá cumprir a função de ser facilmente usinável.

Os problemas que advêm deste fato são inúmeros, pois as propriedades tecnológicas em geral (e em particular a usinabilidade) são extremamente sensíveis às nuances do próprio processo de fabricação. Desta forma, utilizá-la no desenvolvimento e controle da produção de um material implica na possibilidade de introdução de informações incorretas, dependentes das características dos processos de fabricação à que o material for submetido.

Desta forma, apresenta-se A TERCEIRA IDÉIA BÁSICA DESTA
TE TRABALHO:

Proposta de elaboração de uma propriedade intrínseca do material, para sua caracterização quanto ao seu desempenho em usinagem. Ou seja: conceituar propriedade capaz de o caracterizar quanto ao grau de resistência que este oferece ao ser usinado, em termos do esforço mecânico (medida da força ativa, conforme primeira idéia) e taxa de desgaste da ferramenta (medida de sua agressividade, conforme segunda idéia).

CAPÍTULO 5

RESISTÊNCIA À USINAGEM

PROPOSTA DE UMA NOVA PROPRIEDADE

5.1- Generalidades

A introdução do conceito de usinabilidade ocorreu em 1920, com o trabalho de Herbert, Rosenhaim e Sturney - conforme consta da obra de Datsko [49].

Nesta época, o material disponível para ferramenta era exclusivamente o aço-ferramenta .

Com o advento do aço-rápido, pouco foi alterado, pois seu mecanismo de falha é semelhante ao aço-ferramenta.

Novos materiais para ferramenta: metal duro e suas classes mais recentes (item 3-E), entretanto, levaram à revisão dos critérios de vida e elaboração de outros (item 3-B), objetivando novos aspectos: produtividade, acabamento superfíci-

al, etc. Estes encontraram espaço na definição pouco precisa de usinabilidade (item 3-1).

Este fato, aliado à normalização precária, tem implicado em número crescente de testes, cujos resultados são discutíveis, na medida que são vinculados a um material padrão. Além disso, como o levantamento dos índices de Usinabilidade são dependentes do sistema máquina/peça/ferramenta, e do padrão, os testes de usinabilidade têm sido utilizados para otimizar o processo, enquanto que os índices de Usinabilidade estão praticamente em desuso.

Isto implica em:

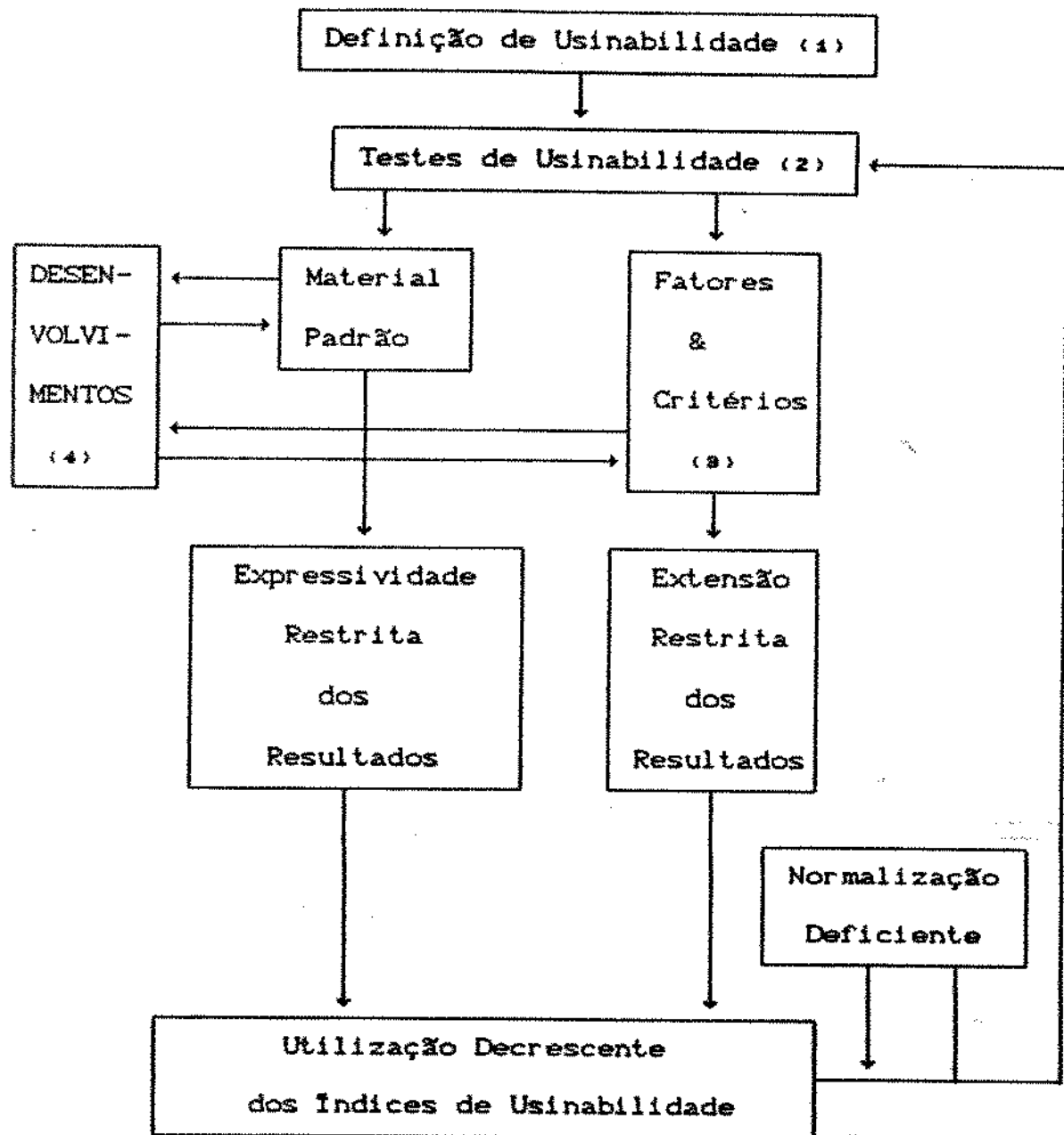
- (a) Extensão Restrita- resultados aplicam-se a condições bastante específicas do teste;
- (b) Expressividade Restrita- resultados são ponderados por um material padrão e ponderado por critério, objetivando fins diversos e nem sempre compatíveis entre si.

A sua aplicação, portanto, é dificultada no cotidiano da indústria; com tendência de se inviabilizar pela retro-alimentação das causas-efeito (diagrama 5.1).

À primeira vista, uma saída seria estabelecer um índice universal, independente de um material padrão, de fatores (ferramentas e condições de usinagem) e de critérios. Isto corresponderia a uma situação ideal, que tem sido trabalhada.

Merchant [64], em sua análise básica da mecânica do

DIAGRAMA 5.1



(1) item 3.1

(2) item 3.4

(3) item 3.2

(4) item 3.5

corte de materiais, estabeleceu correlação linear entre a tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento da zona de formação do cavaco (τ_s) e a tensão normal ao mesmo plano.

Desenvolveu, então, classificação dos materiais para processo de usinagem. Contudo, os resultados apresentavam-se inválidos para materiais dúcteis e contradiziam conceitos da teoria da plasticidade.

Chao e Trigger [55], Creveling [56] observaram experimentalmente que τ_s era constante para ampla faixa de condições de usinagem, exceto em baixas velocidades.

Kececioğlu [57] afirmou que τ_s não pode ser constante para toda a faixa de parâmetros de corte, pois é função da temperatura média do plano de cisalhamento. Porém, a dispersão de seus dados experimentais comprometiam a confiabilidade de seu trabalho.

Kobayashi e Thomsen [58] verificaram que τ_s era constante para aço SAE 1112, para ampla faixa de valores, diferentemente da tensão normal e taxa de deformação do cavaco. Para a liga de Al-2024T4 e -6061T6, τ_s também era constante dentro de uma faixa limitada de variáveis disponíveis. O autor propôs correlação entre τ_s e o valor obtido em teste estático.

Das e Tobias [59], embasados nesses resultados, propuseram um índice universal de usinabilidade, relacionando ângulos envolvidos na geometria de formação de cavaco.

Este índice era característico do material e independia das condições de corte. Porém, assumia r_s constante.

Ora, isso não está correto, porque há alteração de mecanismos de formação de cavaco, do ângulo de cisalhamento e, conseqüentemente, de r_s - com as variações das condições de corte, entre ampla gama de possibilidades (conforme comentário final de Kronenberg [59]).

Trabalhos mais recentes Nakayama [60], Ueda e Matsuo [61] justificam o comentário supra-mencionado.

A questão básica é que o processo de remoção de cavaco ocorre em condições não usuais a processos típicos de conformação. Extrapolam-se limites convencionais de testes padronizados de propriedades mecânicas.

Podem-se citar as seguintes condições: altas pressões normais, altas taxas de deformação, altas temperaturas, fenômenos superpostos e concentrados na superfície do material onde ocorre a remoção do cavaco, entre outros. Além do que, trata-se de um processo dinâmico.

Cupini e Vilella [19] lançaram as idéias básicas de uma propriedade intrínseca do material quanto à usinabilidade - relacionando a potência de corte e a quantidade de calor gerada pelo cavaco na unidade de tempo. A impossibilidade de determinação experimental da segunda grandeza com suficiente precisão, inviabilizou a medida da propriedade.

5.2- Objetivos e Hipóteses

O trabalho sugere a criação de uma propriedade de resistência à usinagem, objetivando identificar esta característica do material de forma intrínseca.

As três idéias básicas culminaram com a realização deste trabalho:

(i) Utilização da força ativa de usinagem como grau de resistência do material à usinagem.

(ii) Utilização da agressividade do material em termos do desgaste provocado na ferramenta para um dado volume de cavaco removido, como grau de resistência do material à usinagem.

(iii) Elaborar uma propriedade intrínseca do material, capaz de o caracterizar quanto ao seu desempenho durante a remoção do cavaco, em termos dos parâmetros estipulados em (i) e (ii).

5.3- DEFINIÇÃO DA PROPRIEDADE DE RESISTENCIA À USINAGEM

A propriedade de "resistência dos materiais à usinagem" é definida como sendo a resistência que o material oferece ao ser usinado.

Neste trabalho, a Resistência à Usinagem será expressa numericamente pelo índice RU, que pondera a resistência à usinagem oferecida pelo material em termos de uma composição da

força ativa de corte REU-A (caracterizando esforço mecânico necessário para usinar o material) com a taxa de desgaste da ferramenta REU-B (caracterizando a agressividade do material).

5.3.1- DEFINIÇÃO DE RU

(i) Expressão matemática

$$RU = \{ REU; REU-A; REU-B \} \quad (5.1)$$

$$REU = (REU-A) * (REU-B) \quad (5.2)$$

(ii) Unidades/Notação

$$[RU] = \{ [N.10^{-7}]; [N]; [10^{-7}] \} \quad (5.3)$$

5.3.2- DEFINIÇÃO DO REU-A

(i) Expressão Matemática

$$REU-A = F_t \quad [N] \quad (5.4)$$

$$F_t = \left[F_a^2 + F_c^2 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

em que:

F_t = força ativa, F_a =força de avanço, F_c =força de corte

ii. Unidades: [N]

5.3.3- DEFINIÇÃO DO REU-B

(i). Expressão matemática

$$\text{REU-B} = \frac{\Delta_{mT}}{\Delta_{mC}} \quad (5.6)$$

em que:

Δ_{mT} = massa removida da ferramenta

Δ_{mC} = massa de cavaco removida

$$\Delta_{mC} = \left[a_p \cdot f \cdot v \right] \cdot t_c \cdot \rho \quad (5.7)$$

a_p = profundidade de usinagem

f = avanço

v = velocidade de corte

t_c = tempo de corte

ρ = densidade do material usinado

(ii). Unidades:

$$[\Delta_{mC}] = \left\{ \left[\text{mm} \right] \cdot \left[\frac{\text{mm}}{\text{volta}} \right] \cdot \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \right\} \cdot \left[\text{min} \right] \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{m. m. m}} \right] \rightarrow$$

$$[\Delta_{mC}] = [10^{-3} \text{ g}]$$

$$[\Delta_{mT}] = [\text{g}]$$

Portanto, REU-B não apresenta unidades, mas relação entre massas.

O fato do desgaste ser de flanco ou cratera, bem como sua localização, não é representativo neste trabalho. Porque, aqui, é medida imparcial - desvinculada do acabamento de superfície usinada ou da vida da ferramenta.

O desgaste, representado pelo índice REU-B, é expressão da agressividade do material.

Houve, também, um esforço na pesquisa de um número que englobasse ambos os efeitos e facilitasse a manipulação comparativa pela indústria produtora de materiais para usinagem.

Mas, os efeitos são independentes e optou-se pelo produto: $REU = (REU-A) * (REU-B) \quad [N]$.

FISICAMENTE, SIGNIFICA FORÇA ATIVA DE RESISTENCIA DO MATERIAL A USINAGEM, PONDERADA PELA SUA ABRASIVIDADE.

5.4- METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO

Aqui constam as diretrizes para elaboração de um teste, no caso de dificuldades ou inviabilidade de execução daquele já apresentado neste trabalho.

São premissas básicas, que devem ser respeitadas para que o teste tenha validade.

5.4.1 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE REU-A

O índice REU-A, exclusivo da força, deve ser determinado sem desgaste da aresta de corte.

Por isso, tratando-se de ferramentas de metal duro sem cobertura, a velocidade do corte deve estar na faixa de 50 a 100 m/min - respeitando, portanto, os limites da formação de aresta postiça e desgaste.

As forças de corte e avanço devem ser medidas ao longo do comprimento útil de usinagem durante um passe, pois correspondem a valores médios.

5.4.2- DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE REU-B

Em oposição ao índice anterior, a determinação de REU-B, implica, necessariamente em desgaste da ferramenta em nível mensurável.

Portanto, devem ser usadas condições de corte forçadas em termos de avanço, profundidade de usinagem e velocidade de corte.

A velocidade de corte, entretanto, foi mantida constante, visando maior simplicidade do ensaio.

CAPITULO 6

MATERIAL, EQUIPAMENTOS

E

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1- Material

6.1.1- Barras trefiladas

Foram utilizados material de corte fácil ABNT-1212, -12L14, -INOX 303. As dimensões das barras trefiladas são:

- i. diâmetro: 2 1/2 polegadas;
- ii. comprimento: 6m (-1212) e 6x950mm (-12L14, -INOX 303)

As propriedades e composição química constam da Tabela 6.1.

6.1.2- Corpos-de-Prova (cdp)

Número e dimensões constam da Tabela 6.2.

TABELA 6.1

		Material (ABNT-)		
		-1212	-12L14	-tipo 303
COMPO-	C, max	0.13	0.15	0.15
SIÇÃO	Mn	0.60-0.90	0.85-1.15	---
	P	0.07-0.12	0.04-0.09	---
QUI-	S	0.10-0.15	0.25-0.35	0.15
MICA	Pb	---	0.15-0.35	---
	Cr	---	---	17.5
[%]	Ni	---	---	8.5
(2)		410	410	240
(3)		10	10	40
(4)		35	35	50
(5)		167	163	160
Índice de Usinabilidade[%]		100	160	70

- (1) Propriedades mecânicas
- (2) Limite de escoamento [MPa]
- (3) Alongamento [%]
- (4) Estricção [%]
- (5) Dureza [HB]

6.1.3- Porta-ferramenta

Nomenclatura ISO: CSBPR-12.

Nele estão embutidos os extensômetros que, juntamente com a parte eletrônica (amplifica sinal e apresenta medida via mostrador), correspondem ao conjunto dinamômetro.

TABELA 6.2

Material (ABNT-)	Número de Corpos de Prova		
	(1)	(2)	(3)
-1212	28	28	25
-12L14	28	28	25
-tipo 303	28	28	25
comprimento (#) [mm]	150	145	140
diâmetro [mm]	57	32	23

(#) Comprimento útil de usinagem

6.1.4- Ferramenta

Insertos intercambiáveis nomenclatura ISO SPUN
12.03.08 - S6, material classe P40.

6.1.5- Solução de limpeza

Trata-se de uma solução de acetona PA, éter sulfúrico e benzeno; com 80%, 15%, 5% em volume, respectivamente.

Pois os insertos devem ser isentos de óleos, gorduras, poeiras e partículas que aderem à superfície. Porque isto pode comprometer a medição de massa.

6.1.6- Pinça

É utilizada para manuseio do inserto. Deve apresentar comprimento de 20cm, que permite trabalho na câmara da balança analítica. É suficiente para fixar o inserto, quando aberta (cerca de 15mm).

6.2- Equipamentos

6.2.1- Torno

Torno CNC com potência e rotação máximas de 30HP e 3000rpm, respectivamente.

É necessário dispor de comando para velocidade constante de corte, via correção da rotação ao longo de passes durante o torneamento cilíndrico.

6.2.2- Balança

Balança analítica de quatro casas decimais.

Deve permitir medições da ordem de 6g - massa média do inserto utilizado.

6.2.3- Secador

Secador a ar quente.

Deve facilitar a evaporação da solução de limpeza após aplicação entre sucessivas operações de remoção de óleos, gordura, partículas e poeira do inserto, antes das medições.

6.2.4- Tanque

Tanque de vibração ultra-sônico.

A frequência deve ser suficiente para remoção de óleos, gorduras, partículas e poeira do inserto, antes das medições e depois da execução de testes no torno.

6.3- Procedimento experimental

6.3.1- Dimensionamento Preliminar do Experimento

6.3.1.1- Requisitos

O teste para a determinação da resistência à usinagem dos materiais, deve prover as seguintes condições:

- i) Medir força ativa de usinagem, sem desgaste da ferramenta;
- ii) Desgaste da ferramenta mensurável em massa, a velocidade constante;
- iii) Executar testes em barras de diâmetro 30 mm.

6.3.1.2- Ensaio Preliminar I

Escolheu-se corpo-de-prova com dimensões:

(a) Diâmetro 58 mm

(b) Comprimento 105 mm; comprimento útil de usinagem:
90 mm.

A tabela 6.3 indica condições de ensaio, para torneamento cilíndrico com ferramenta SPUN 12-03-04 P10.

TABELA 6.3

	PARAMETROS DE USINAGEM		
	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Prof. de Usinagem [mm]
(1)	150	0.2	1
(2)	100	0.3	1
(3)	250	0.3	2

(1) Recomendados para a classe S-6, conforme catálogo [64], [65].

(2) Adotados para satisfazer (1).

(3) Adotados para satisfazer (11).

TABELA 6.4

Material [ABNT]	Corpo-de- -prova Nr.	Medidas Experimentais	
		Força de Corte [kgf]	Massa do Inserto [g] (1)
-1020	1	45-40	4.8326
	2	44-40	4.8310
-1212	3	34-30	4.8305
	4	35-31	4.8302

(1) Massa inicial: 4.8335 g .

Levando-se em conta dados referentes à vida da ferramenta, decidiu-se:

- (a) Medir força durante o percurso de avanço de 20 mm ($\approx$ 22% do percurso útil);
- (b) Tornear até diâmetro de 27 mm (mínima condição para velocidade de corte a 250 m/min). Portanto, 14 passes mais 78% do percurso inicial.

Após a análise dos resultados (Tabela 6.4), concluiu-se:

- (a) Comprimento de avanço de 20 mm não se apresentou suficiente para leitura da força.
- (b) Houve problemas com valores de diferença de massa quanto à dispersão e ordem de grandeza do desgaste para aços de corte fácil.

Então:

- (a) O comprimento de avanço para leitura da força é, pelo menos, um passe. Anota-se a leitura média em regime, desprezando-se máximos e mínimos indicados pelo instrumento.
- (b1) Deve-se elaborar uma solução para remoção de partículas, óleos e gorduras antes das medições da massa. E, após a limpeza, o inserto deve ser manuseado com pinça.
- (b2) Deve-se aumentar o comprimento de avanço para haver desgaste mensurável do ABNT 1212 e ABNT 12L14.

6.3.1.3- Cálculos

6.3.1.3.1- Condições de Usinagem

(a) Velocidade de corte (teste REU-B)

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{1000} \quad (6.1)$$

V_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro (mm)

N = rotação (rpm)

Visto que $N_{\max} = 3000$ rpm (item 6.B-1), para executar teste em diâmetro até 30 mm, deve-se manter velocidade constante até 27 mm e, portanto:

$$V_c = \frac{\pi \cdot 27 \cdot 3000}{1000} \approx 250 \text{ m/min}$$

Adota-se, portanto, 250 m/min.

(b) Avanço e profundidade de usinagem

+ adotam-se valores do item anterior.

6.3.1.3.2- Dimensões do cdp

(a) Diâmetro: mantém-se 57 mm.

(b) Comprimento

$$t_c = \frac{\pi \cdot d_m \cdot L_a}{1000 \cdot f \cdot v} \quad (6.2)$$

$$d_m = (d_i + d_f)/2 = (57+27)/2 = 42$$

$$L_a = [(d_f - d_i)/2].L = 10.L$$

$$f = 0.3 \text{ mm/volta}$$

$$v_c = 250 \text{ m/min}$$

$$t_c = \frac{\pi.42.10.L}{1000.0.3.250}$$

$$\text{Adota-se } t_c = 0.65 (t_{vida}) = 0.65.4 = 2.60 \text{ min} \quad [64]$$

Então:

$$L \approx 150 \text{ mm}$$

6.3.1.3.3- Estimativa do número de cdp

Da análise das equações (5.1) e (5.2), a fonte principal de erros/incertezas é a segunda. Adota-se a distribuição t de "Student", devido ao pequeno número de pontos e assumindo distribuição do tipo "Gauss" [66], [67] e [68].

Adota-se IC de 90% e o desvio: $s \approx \Delta_{REU-B}$, calculado analiticamente com base nos valores de incerteza dos instrumentos utilizados [69].

Então:

$$REU-B = \frac{\Delta_{mT}}{\rho.V} \quad (6.3)$$

Δ_{mT} = variação de massa da ferramenta

ρ = densidade do material usinado

V = volume de cavaco removido

Seja $B = REU-B$, então:

$$d(B) = \left\{ \frac{\partial B}{\partial m} \cdot d_m + \frac{\partial B}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial B}{\partial V} \cdot dV \right\} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial B}{\partial m} = \frac{1}{\rho \cdot V} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \rho} = \frac{m}{\rho^2 \cdot V} \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial B}{\partial V} = \frac{m}{\rho \cdot V^2} \quad (6.7)$$

Dados:

$$m \approx (5 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$\rho \approx (8 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot (59^2 \cdot 27^2) \cdot 150 = (3.2 \pm 0.1) \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Substituindo os valores nas equações 6-5, 6-6, 6-7 e, posteriormente, em (6.4):

$$REU-B = (1.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-7} \rightarrow \Delta REU-B = 0.3 \rightarrow s \approx 0.3$$

Calculando o número de amostras:

Número de Amostras	$t_{0.95} [70]$	$N = \left(\frac{t_{0.95} \cdot s}{0.10} \right)^2$
10	1.80	29
29	1.70	28
26	1.71	27
27	1.71	27

Adotam-se 28 cdp.

6.3.2- Verificação do Cálculo

Foi executada através de um ensaio preliminar, nas condições da Tabela 6.5.

TABELA 6.5

Condições de Usinagem				
Ferramenta SPUN 12 0304-S8				
TESTE	Vel. corte [m/min]	Avanço [mm/volta]	Profundida- de de Usinag. [mm]	Número de passes
REU-A	100	0.30	0.5	Apenas 1
REU-B	250	0.30	1.0	Demais
Material: AÇO ABNT 1212				

TABELA 6.6

cdp Nr	Medidas Experimentais			Índices de RU	
	Força corte [kgf]	Força avanço [kgf]	Variação massa ferramenta [10^{-4} g]	REU-A [N]	REU-B [10^{-7}]
1	71	40	3	795	1.25
2	74	40	3	824	1.25
3	69	40	4	785	1.67
4	65	42	3	755	1.25
5	69	39	3	775	1.25
6	67	40	3	765	1.25
7	67	44	4	785	1.67
8	-	-	4	-	1.67
9	71	43	4	814	1.67
10	70	42	4	804	1.67
11	68	41	4	775	1.67
12	61	41	3	716	1.25
13	72	43	3	824	1.25
14	70	43	4	804	1.67
15	68	41	3	775	1.25
16	69	40	4	785	1.67
17	73	43	4	834	1.67

TABELA 6.6 -CONTINUAÇÃO

cdp Nr	Medidas Experimentais			Índices de RU	
	Força corte [kgf]	Força avanço [kgf]	Variação massa ferramenta [.10 ⁻⁴ g]	REU-A [N]	REU-B [.10 ⁻⁷]
18	68	42	4	785	1.67
19	69	44	3	804	1.25
20	69	42	-	795	-
21	72	39	4	804	1.67
22	64	40	4	736	1.67
23	67	43	4	785	1.67
24	70	42	4	804	1.67
25	70	42	4	804	1.67
26	60	37	4	687	1.67
27	70	45	4	814	1.67
28	68	42	3	785	1.25

Analisando os resultados (Tabela 6.6):

- (a) Variação da força ativa é relativamente alta;
- (b) A massa de ferramenta removida na usinagem do ABNT 12L14 não deve se apresentar em nível mensurável, visto que para o aço ABNT 1212, foi da ordem de $(3 \text{ a } 4) \cdot 10^{-4} \text{ g}$.

Então, decidiu-se:

- (a) Adotar geometria positiva, pois é usual para corte de materiais dúteis como o aço.
- (b) Mudar material da ferramenta para classe menos resistente ao desgaste (justificado, também, pela decisão anterior). Mudar de P10 para P40.

6.3.3- Dimensionamento do Experimento

6.3.3.1- Ferramenta de corte

Adotou-se, então, ferramenta de metal duro: SPUN 12 03 08, material P40, utilizando porta-ferramenta de geometria positiva.

E para verificar a influência do diâmetro do cdp, adotou-se o planejamento de experimentos do diagrama 6.1.

6.3.3.2- Cálculo das condições de usinagem

(a) Velocidade de corte (teste REU-B)

Utilizando equação (6.1), para manter velocidade constante até 22 mm.

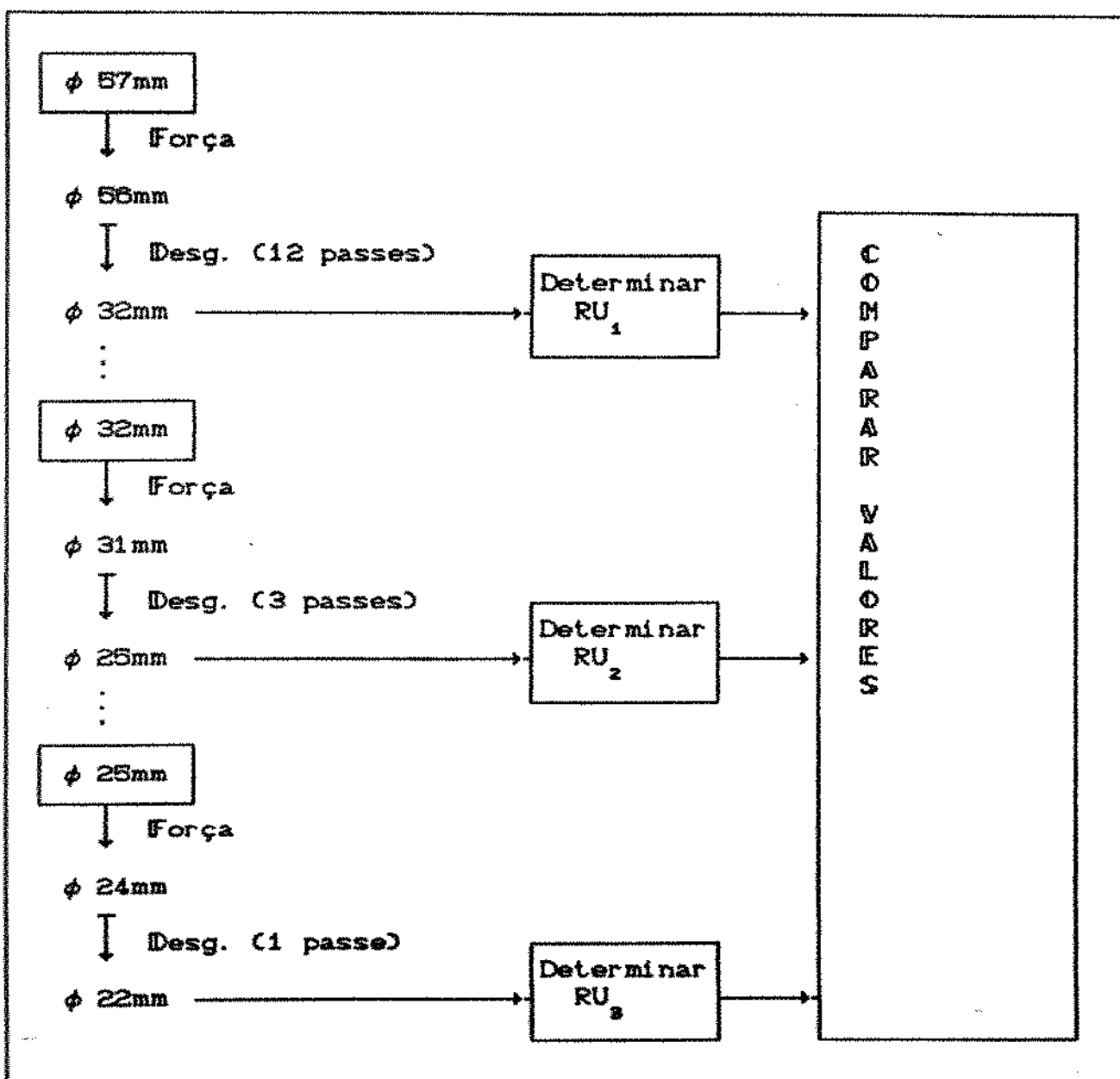
$$V_c = \frac{\pi \cdot 22 \cdot 3000}{1000} \approx 200 \text{ m/min}$$

Adotar 200 m/min.

(b) Avanço e profundidade de usinagem

Constam da Tabela 6.5 .

DIAGRAMA 6.1



6.3.3.3- Dimensionamento dos c.d.p.

(a) Diâmetros (diagrama 6.1)

(b) Comprimento

O tempo de corte deve ser semelhante nos três testes.

para validar a verificação da hipótese de influência do diâmetro.

Varia-se, então, o número de cdp para compensar o tempo. Adotam-se:

$$L_1 = 162 \text{ mm (1 cdp/teste)}$$

$$L_2 = 145.5 \text{ mm (7 cdp/teste)}$$

$$L_3 = 143 \text{ mm (26 cdp/teste)}$$

Verificando os tempos de corte (equação 6.2) do teste para cada diâmetro:

$$t_1 = 1. \left\{ \frac{\pi \cdot \left[\frac{58+32}{2} \right] \cdot 162 \cdot (12)}{1000 \cdot 0.3 \cdot 200} \right\} = 4.48 \text{ min}$$

$$t_2 = 7. \left\{ \frac{\pi \cdot \left[\frac{31+25}{2} \right] \cdot 145.5 \cdot (3)}{1000 \cdot 0.3 \cdot 200} \right\} = 4.48 \text{ min}$$

$$t_3 = 26. \left\{ \frac{\pi \cdot \left[\frac{24+22}{2} \right] \cdot 143 \cdot (1)}{1000 \cdot 0.3 \cdot 200} \right\} = 4.48 \text{ min}$$

Portanto, os tempos apresentam-se compatíveis.

Os testes devem ser conduzidos, conforme indicação de cada material e equipamento, descritos nos itens 6-1 e 6-2.

6.4- Fórmula para cálculo de índices de resistência

6.4.1- Cálculo de REU-A

O dinamômetro fornece leituras da força de corte e de avanço em kgf. Então:

$$REU-A = 9.81 \cdot \left(F_c^2 \text{ [kgf]} + F_a^2 \text{ [kgf]} \right)^{1/2} \quad [N] \quad (6.8)$$

6.4.2- Cálculo de REU-B

Da expressão (5.3), temos que:

$$a_p = 1 \text{ mm}$$

$$f = 0.3 \text{ mm/volta}$$

$$v_c = 200 \text{ m/min}$$

$$t_c = 4.48 \text{ min}$$

Ou seja:

$$\begin{aligned} \Delta_{mc} &= \left\{ 1 \cdot 0.3 \cdot 200 \right\} \cdot 4.48 \cdot \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m. m. m}} \right] 10^{-9} \cdot [g] = \\ &= 0.2688 \left\{ \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m. m. m}} \right] \right\} [g] \end{aligned}$$

Então:

$$REU-B = \frac{\Delta_{mT} [g]}{0.2688 \left\{ \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m. m. m}} \right] \right\} [g]} \rightarrow$$

$$REU-B = 3.7202 \cdot \left\{ \frac{\Delta_{mT} [g]}{\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m. m. m}} \right]} \right\} \quad (6.9)$$

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1- Apresentação dos resultados obtidos

7.1.1- Resultados preliminares

A medição de densidade dos materiais, feitas em 5 amostras de cada material, apresenta os valores médios indicados na TABELA 7.0.

7.1.2- Fórmula para cálculo dos índices de resistência

(a) Cálculo de REU-A - através da expressão (6.8)

(b) Cálculo de REU-B

i. ABNT-1212; $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$

Substituindo ρ na expressão (6.9):

$$\text{REU-B} = 4.8315 \cdot 10^{-8} \left\{ \Delta_{\text{mt}} [10^{-4} \text{ g}] \right\} \quad (7.1)$$

TABELA 7.0

MATERIAL	m [g]	L [mm]	ϕ [mm]	$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L$ [mm ³]	ρ [kg/m ³]
INOX	14.74	5.28	21.70	1953	7550
1212	15.62	5.20	22.28	2027	7700
12L14	15.35	5.14	22.16	1982	7750

Obs.: [g/mm³] = 10⁶ [kg/m³]

ii. ABNT-12L14; $\rho = 7750 \text{ kg/m}^3$

Substituindo ρ na expressão (6.9):

$$\text{REU-B} = 4.8003 \cdot 10^{-8} \left\{ \Delta_{mT} [10^{-4} \text{ g}] \right\} \quad (7.2)$$

iii. ABNT-INOX 303; $\rho = 7550 \text{ kg/m}^3$

$$\text{REU-B} = 4.9275 \cdot 10^{-8} \left\{ \Delta_{mT} [10^{-4} \text{ g}] \right\} \quad (7.3)$$

7.1.3- Resultados

Foram verificados 246 corpos-de-prova, totalizando 99 medições de resistência à usinagem.

A tabela 7.1 descreve os testes executados.

A tabela 7.2 indica as tabelas em que se encontram:

(a) Valores das medições experimentais diretas: força [kgf] de corte e de avanço e massa [g] da ferramenta.

(b) Valores dos resultados da medição da força ativa [N]; massa removida da ferramenta [$\times 10^4$ g] e medição de resistência à usinagem $\{ [N \cdot 10^{-7}] ; [N] ; [\cdot 10^{-7}] \}$

TABELA 7.1

Material ABNT	Diâmetro inicial do cdp [mm]	Número de cdp	Número de medidas de Resist. à Usinagem	Teste Nr.
-1212	57	28	28	I.1
	32	28	4	II.1
	25	26	1	III.1
-12L14	57	28	28	I.2
	32	28	4	II.2
	25	26	1	III.2
INOX 303	57	28	28	I.3
	32	28	4	II.3
	25	26	1	III.3

TABELA 7.2

		Valores (a,b) contidos na TABELA 7.3-_____	
Teste		(a)Medidas Experimentais	(b)Resultados - Medida
Nr.		Força [kgf] e Massa da ferram. [g]	de Resist. à Usinagem ([N.10 ⁻⁷];[.10 ⁻⁷];[N])
I-	-.1	-I.1(a)	-I.1(b)
	-.2	-I.2(a)	-I.2(b)
	-.3	-I.3(a)	-I.3(b)
II-	-.1	-II(a)	-II.1(b)
	-.2		-II.2(b)
	-.3		-II.3(b)
III	-.1	-III(a)	-III(b)
	-.2		
	-.3		

TABELA 7.3.1.1(a)

MEDIDAS EXPERIMENTAIS				
Material ABNT 1212				
Ferramen- ta Nr.	Corpo de Prova Nr.	Medidas experimentais		
		Força (kgf)		Massa da ferra- menta [g]
		Corte	Avanço	
1 6.1044	1	16	4	6.1037
	2	16	4	6.1030
	3	16	4	6.1023
	4	16	4	6.1016
2 6.1144	5	15	4	6.1138
	6	15	4	6.1132
	7	16	4	6.1125
	8	15	4	6.1119
3 6.0979	9	16	4	6.0972
	10	16	4	6.0965
	11	16	4	6.0958
	12	16	4	6.0951
4 6.1025	13	17	4	6.1019
	14	15	4	6.1013
	15	17	4	6.1006
	16	15	4	6.1000
5 6.1094	17	16	3	6.1007
	18	16	3	6.1000
	19	16	4	6.1073
	20	16	4	6.1066
6 6.0994	21	16	3	6.0987
	22	16	4	6.0980
	23	16	4	6.0973
	24	15	4	6.0967
7 6.1040	25	15	4	6.1033
	26	15	5	6.1027
	27	16	4	6.1020
	28	16	4	6.1013

TABELA 7.3.1.2(a)

MEDIDAS EXPERIMENTAIS				
Material ABNT 12L14				
Ferramen- ta Nr.	Corpo de Prova Nr.	Medidas experimentais		
		Força [kgf]		Massa da ferra- menta [g]
		Corte	Avanço	
1 6.0971	1	12	2	6.0960
	2	11	2	6.0965
	3	12	2	6.0962
	4	13	3	6.0958
2 6.0957	5	13	3	6.0953
	6	12	1	6.0950
	7	11	2	6.0947
	8	12	2	6.0944
3 6.0938	9	12	2	6.0935
	10	12	2	6.0932
	11	12	2	6.0929
	12	13	3	6.0925
4 6.1002	13	13	2	6.0998
	14	13	2	6.0994
	15	13	2	6.0990
	16	14	2	6.0986
5 6.1028	17	13	3	6.1024
	18	13	2	6.1020
	19	12	2	6.1017
	20	13	2	6.1013
6 6.1054	21	12	2	6.1051
	22	12	2	6.1048
	23	12	2	6.1045
	24	13	3	6.1041
7 6.1006	25	12	2	6.1003
	26	12	2	6.1000
	27	13	3	6.0996
	28	13	3	6.0992

TABELA 7.3.1.3(a)

MEDIDAS EXPERIMENTAIS				
Material INOX 303				
Ferramen- ta Nr.	Aresta Nr. (1)	Medidas experimentais		
Massa cil [g]		Força [kgf]		Massa da ferra- menta [g]
		Corte	Avanço	
1 6.0964	1	29	11	6.0944
	2	29	10	6.0924
	3	28	10	6.0905
	4	29	10	6.0886
2 6.0922	5	31	10	6.0901
	6	31	11	6.0880
	7	29	10	6.0860
	8	31	11	6.0939
3 6.1066	9	29	10	6.1046
	10	31	11	6.1025
	11	29	10	6.1005
	12	31	10	6.0984
4 6.1036	13	29	10	6.1036
	14	30	11	6.1016
	15	29	10	6.0995
	16	28	10	6.0975
5 6.1079	17	29	10	6.1059
	18	30	10	6.1039
	19	30	10	6.1019
	20	30	10	6.0999
6 6.1062	21	30	10	6.1042
	22	31	11	6.1021
	23	29	10	6.1001
	24	29	10	6.0981
7 6.1063	25	29	10	6.1043
	26	29	10	6.1023
	27	30	11	6.1002
	28	29	10	6.0982

TABELA 7.3.II(a)

MEDIDAS EXPERIMENTAIS										
MATERIAL										
Ferra- men- ta Nr.	- INOX 303				- 1212				- 12L14	
	Força [kgf]		Massa ferramen- ta [g]	Avanço	Força [kgf]		Massa ferramen- ta [g]	Avanço	Força [kgf]	
	Corte	Massa inje- cial [g]			Corte	Massa inje- cial [g]			Corte	Massa inje- cial [g]
1	34	10	6.0839	19	5	6.0832	15	2	6.0829	
6.0858										
2	35	11	6.1083	20	6	6.1076	16	2	6.1072	
6.1104										
3	35	10	6.1020	19	5	6.1013	16	2	6.1009	
6.1040										
4	36	11	6.0835	20	6	6.0828	17	3	6.0824	
6.0855										

TABELA 7.3.III(a)

MEDIDAS EXPERIMENTAIS									
MATERIAL-									
- INOX 303				- 1212				- 12L14	
Força [kgf]		Massa ferromen- tal[g]		Força [kgf]		Massa ferromen- tal[g]		Força [kgf]	
Corte	Avanco			Corte	Avanco			Corte	Avanco
30	13	6.0829 6.0810		20	6	6.1067 6.1060		16	5

TABELA 7.3.1.1(b)

RESULTADOS			
Material ABNT 1212			
(1)	Força Ativa [kgf]	Massa removida da ferramenta [$\times 10^{-3}$ g]	Medida de Resistência à Usinagem ($[\times 10^{-2}$ N]; [N]; [$\times 10^{-2}$],)
1	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
2	15.5	6	[444; 152; 2.9]
	15.5	6	[444; 152; 2.9]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	15.5	6	[444; 152; 2.9]
3	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
4	17.5	6	[499; 172; 2.9]
	15.5	6	[444; 152; 2.9]
	17.5	7	[585; 172; 3.4]
	15.5	6	[444; 152; 2.9]
5	16.3	7	[544; 160; 3.4]
	16.3	7	[544; 160; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
6	16.3	7	[544; 160; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.42]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	15.5	6	[444; 152; 2.9]
7	15.5	7	[517; 152; 3.4]
	15.8	6	[450; 155; 2.9]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
	16.5	7	[551; 162; 3.4]
VALOR MÉDIO: [522; 160; 3.3]			
DESVIO PADRÃO: [47; 0.2; 6]			

TABELA 7.3.1.2(b)

RESULTADOS			
Material ABNT 12L14			
(1)	Força Ativa [kgf]	Massa removida da ferramenta [$\times 10^{-4}$ g]	Medida de Resistência À Usinagem ($[\times 10^{-7}$ N); [N]; [$\times 10^{-7}$])
1	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	11.2	3	[154; 110; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	13.3	4	[247; 130; 1.9]
2	13.3	4	[247; 130; 1.9]
	12.0	3	[165; 110; 1.4]
	11.2	3	[154; 110; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
3	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	13.3	4	[247; 130; 1.9]
4	13.2	4	[245; 129; 1.9]
	13.2	4	[245; 129; 1.9]
	13.2	4	[245; 129; 1.9]
	14.1	4	[262; 130; 1.9]
5	13.3	4	[247; 130; 1.9]
	13.2	4	[245; 129; 1.9]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	13.2	4	[245; 129; 1.9]
6	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	13.3	4	[247; 130; 1.9]
7	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	12.2	3	[168; 120; 1.4]
	13.3	4	[247; 130; 1.9]
	13.3	4	[247; 130; 1.9]
VALOR MÉDIO: [204; 124; 1.6] DESVIO PADRÃO: [22; 7; 0.3]			

TABELA 7.3.1.3(b)

RESULTADOS			
Material ABNT INOX 303			
(1)	Força Ativa [kgf]	Massa removida da ferramenta [$\times 10^{-4}$ g]	Medida de Resistência À Usinagem ([$\times 10^{-7}$ N]; [N]; [$\times 10^{-7}$])
1	31.0	20	[3011; 304; 9.9]
	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
	29.7	19	[2739; 291; 9.4]
	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
2	32.6	21	[3294; 320; 10.3]
	32.9	21	[3324; 323; 10.3]
	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
	32.9	21	[3324; 323; 10.3]
3	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
	32.9	21	[3324; 323; 10.3]
	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
	32.6	21	[3294; 320; 10.3]
4	30.7	20	[2982; 291; 9.9]
	32.0	21	[3234; 314; 10.3]
	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
	29.7	20	[2881; 291; 9.9]
5	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
	31.6	20	[3069; 310; 9.9]
	31.6	20	[3069; 310; 9.9]
	31.6	20	[3069; 310; 9.9]
6	31.6	20	[3069; 310; 9.9]
	32.9	21	[3324; 323; 10.3]
	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
7	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
	32	21	[3234; 314; 10.3]
	30.7	20	[2982; 301; 9.9]
VALOR MÉDIO: [3072; 307; 10.0]			
DESVIO PADRÃO: [157; 10; 0.2]			

TABELA 7.3.II.1(b)

RESULTADOS		
MATERIAL ABNT 1212		
Força Ativa [kgf]	Material removido da ferramenta [$\times 10^{-4}$g]	MEDIDA DA RESISTÊNCIA À USINAGEM ([$\times 10^{-2}$N], [N], [$\times 10^{-2}$])
20.9	7	[653, 192, 3.4]
19.6	6	[595, 205, 2.9]
20.9	7	[653, 192, 3.4]
19.6	6	[595, 205, 2.9]
VALOR MÉDIO: [624, 199, 3.2] DESVIO PADRÃO: [33, 0, 0.3]		

TABELA 7.3.II.2(b)

RESULTADOS		
MATERIAL ABNT 12L14		
Força Ativa [kgf]	Material removido da ferramenta [$\times 10^{-3}$ g]	MEDIDA DA RESISTÊNCIA À USINAGEM ([$\times 10^{-2}$ H], [H], [$\times 10^{-2}$])
15.1	3	[287; 148; 1.4]
16.1	4	[300; 158; 1.9]
16.1	4	[300; 158; 1.9]
17.3	4	[322; 170; 1.9]
VALOR MÉDIO: [282; 159; 1.8] DESVIO PADRÃO: [51; 9; 0.3]		

TABELA 7.3.II.3(b)

RESULTADOS		
MATERIAL ABNT INOX 303		
Força Ativa [kgf]	Material removido da ferramenta [$\times 10^{-4}$ g]	MEDIDA DA RESISTÊNCIA À USINAGEM ([$\times 10^{-2}$ N]; [N]; [$\times 10^{-2}$])
35.4	19	[3262; 347; 9.4]
36.7	21	[3708; 360; 10.3]
36.4	20	[3534; 357; 9.9]
37.6	20	[3652; 369; 9.9]
VALOR MÉDIO: [3539; 358; 9.9] DESVIO PADRÃO: [198; 9; 0.4]		

TABELA 7.3.III(b)

RESULTADOS		
Força Ativa [kgf]	Material removido da ferramenta [$\times 10^{-4}$g]	MEDIDA DA RESISTÊNCIA À USINAGEM ([$\times 10^{-2}$N], [$\times 10^{-2}$], [N])
MATERIAL ABNT 1212		
20.9	7	(697, 205, 3.4)
MATERIAL ABNT 12L14		
16.8	4	(313, 165, 1.9)
MATERIAL ABNT INOX 303		
35.4	19	(3262, 347, 9.4)

7.2- Discussão dos Resultados

7.2.1- Análise da influência do diâmetro

As médias e desvios-padrão dos índices REU-A, REU-B e REU encontram-se na Tabela 7.4, agrupados por ordem de diâmetro inicial de corpo-de-prova. Para o diâmetro de 25mm, trata-se de uma medida única e, portanto, não apresenta desvio padrão.

A inferência quanto à influência dos diâmetros é feita às luzes de bases estatísticas apresentadas nos textos por Spiegel [66], Milton e Tsokos [67], Bhattacharyya e Johnson [68] e Holman [69]. Os valores tabelados da distribuição T de Student são extraídos de tabelas de apêndices das obras anteriormente mencionadas ou de [70].

Para pequenas amostras, a indicação estatística de desigualdade, entre valor estatístico de medida (x) e média de população (μ) de n elementos com desvio s , existe se e somente se:

$$t^* > t_{\alpha/2, (n-1)} \quad \text{ou} \quad t^* < -t_{\alpha/2, (n-1)} \quad (7.4)$$

$$t^* = (x - \mu) / [s / (n)^{1/2}] \quad (7.5)$$

Para pequenas amostras, a indicação estatística de desigualdade entre médias de duas amostras 1 e 2 com números de elementos n_1 e n_2 , médias e desvios: $\bar{x}_1 \pm s_1$ e $\bar{x}_2 \pm s_2$, existe se e somente se:

TABELA 7.4

Material ABNT	Diâmetro Inicial do cdp [mm]	Média ± desvio padrão		
		REU-A [N]	REU-B [.10 ⁻⁷]	REU [N.10 ⁻⁷]
-1212	57	160±6	3.3±0.2	522±47
	32	199±8	3.1±0.3	624±33
	25	205	3.4	697
-12L14	57	124±7	1.6±0.2	204±42
	32	159±9	1.8±0.2	282±51
	25	165	1.9	313
INOX 303	57	307±10	10.0±0.2	3072±157
	32	358±9	9.9±0.4	3539±198
	25	321	9.9	3176

$$t^{**} > t_{\alpha/2, (n_1 + n_2 - 2)} \quad \text{ou} \quad t^{**} < -t_{\alpha/2, (n_1 + n_2 - 2)} \quad (7.6)$$

$$t^{**} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_{1-2}} \quad (7.7)$$

$$s_{1-2} = \left(\frac{(s_1)^2}{n_1} + \frac{(s_2)^2}{n_2} \right)^{1/2} \quad (7.8)$$

7.2.1.1 - Diâmetros 57mm e 32mm

Para nível de confiança de 90%, $n_1 = 28$ cdp e $n_2 = 4$:

$$t_{30; 0.05} = 1.697$$

Os valores de t^{**} , calculados por (7.8) encontram-se na tabela 7.5. Verifica-se a condição (7.6) e para confiança de 90%, apenas as médias das medidas de REU-B podem ser aceitas como estatisticamente semelhantes para aços ABNT - 1212 e INOX 303. Sendo as demais, estatisticamente desiguais.

TABELA 7.5

Material [ABNT-]	t^{**} (diâmetros 57mm e 32 mm)		
	REU-A [N]	REU-B [$\cdot 10^{-7}$]	REU [$\cdot 10^{-7}$]
-1212	9.38	1.29	5.44
-12L14	7.46	1.87	2.92
INOX 303	10.4	0.40	4.52

7.2.1.2- Diâmetros 32mm e 25mm

Para nível de confiança de 90%, $n = 4$ cdp:

$$-t_{\alpha/2, (n-1)} = 0.425 .$$

Calcula-se t^* por (7.5). Os valores de t^* encontram-se na Tabela 7.6. Verificando a condição (7.4), as medidas para diâmetro 25mm podem ser assumidas como estatisticamente semelhantes das médias das medidas para diâmetro 32mm, com confiança de 90%, para quase a totalidade das medições. Com exceção das medições de REU-A para aço INOX 303 e de REU para aços ABNT-1212 e INOX 303.

TABELA 7.6

Material [ABNT-]	t^* (diâmetros 32mm e 25 mm)		
	REU-A [N]	REU-B [10^{-7}]	REU [10^{-7}]
-1212	0.375	0.25	1.11
-12L14	0.335	0.25	0.305
INOX 303	-2.05	0	- 0.915

7.2.1.3- Diâmetros 57mm e 25mm

Para nível de confiança de 90%, $n = 28$ cdp:

$$-t_{\alpha/2, (n-1)} = 0.187 .$$

Calcula-se t^* por (7.5). Os valores de t^* encontram-se na Tabela 7.7. Verificando a condição (7.4), as medidas para diâmetro 25mm podem ser assumidas como estatisticamente diferentes das médias das medidas para diâmetro 57mm, com confiança de 90%, para quase a totalidade das medições. Com exceção da medição de REU-B para aços ABNT-1212 e INOX 303 e de REU para INOX 303.

TABELA 7.7

Material [ABNT-]	t^* (diâmetros 57mm e 25 mm)		
	REU-A [N]	REU-B [10^{-7}]	REU [10^{-7}]
-1212	1.417	0.095	0.703
-12L14	1.107	0.284	0.491
INOX 303	0.265	-0.095	0.125

A alteração das relações geométricas ferramenta-peça justifica a observação experimental da influência do diâmetro na medição da resistência à usinagem. Percebe-se que as diferenças são tanto mais significativas, à medida em que maiores são as diferenças entre diâmetros. E, também, mais sensíveis no índice REU-A, expressão da força ativa de usinagem.

Da análise e justificativa física, depreende-se que a influência do diâmetro é significativa para o teste de medida de resistência à usinagem.

Portanto, o diâmetro do corpo-de-prova deve ser padronizado para o teste.

7.2.2- Representatividade

(a) A variação percentual das medidas de REU verificadas para aços 12L14 e INOX 303 com relação ao aço 1212 fornece valores da ordem de 157% e 83% .

Estes valores, assumindo material ABNT 1212 como padrão, são bastante semelhantes aos índices de usinabilidade de 165% e 85%, fornecidos pela ASME [14].

(b) Por outro lado, a medida de resistência à usinagem com a sua decomposição em índices fornece uma riqueza de informações superior a um índice de Usinabilidade, vinculado a um material padrão.

Porque, além da avaliação da facilidade/dificuldade quanto à remoção do cavaco, o material é caracterizado por infor-

mações objetivas das causas: quantidade de esforço mecânico e abrasividade, bem como a variação destas percentualmente na composição da medida.

(c) A representatividade do teste fica vinculada a um diâmetro, como se pôde depreender do item anterior, devido à alteração das relações geométricas da ferramenta-peça com a variação do diâmetro.

Isto implica na fixação do diâmetro como variável do teste para efetiva validade do mesmo.

(d) Observou-se que, durante as medidas, o índice REU-B geralmente acompanhou o valor do índice REU-A, quando esta análise é feita para um mesmo diâmetro (Tabelas 7.3.I).

Porém, o índice REU-B não se altera com o aumento da força ativa para diâmetros diferentes em se trabalhando com o mesmo material (Tabela 7.4).

Isto indica uma prova experimental da independência dos dois índices, assumidos para definir, neste trabalho, o comportamento do material quanto à sua resistência à usinagem.

(e) Tentou-se unificar os índices REU-A e REU-B, através de seu produto.

Nada impede a escolha de outras relações algébricas, desde que sejam pertinentes à idéia de resistência à usinagem.

A idéia básica que guiou a decisão foi o significado físico: a correção do esforço pelo desgaste da ferramenta.

Além do que, os itens (a) e (b) supra-citados

contribuem na justificativa.

7.2.3- Extensão

A extensão da validade da medida da resistência à usinagem, proposta neste trabalho, faz-se dentro das condições especificadas do teste e padronizadas para um diâmetro.

Depende da ferramenta utilizada, permitindo, a priori, escolha sem distinção, desde que viabilize a determinação mássica do desgaste para a gama de materiais a serem ensaiados.

Em contraposição à usinabilidade, a propriedade de resistência à usinagem apresenta-se desvinculada de um material padrão. Trata-se, portanto, de um índice intrínseco do material e, absoluto, dentro das condições do teste.

A utilização de ferramenta de metal duro e condições de usinagem do cotidiano da indústria permitem, através da análise e decomposição em índices REU-A e REU-B, extrapolações menos subjetivas fora das condições do teste.

Apesar da extensão dos resultados da medida não se fazer para toda a gama de materiais, pode-se, através de mais de uma ferramenta, abranger amplas faixas.

Para materiais cuja propriedade intrínseca de resistência à usinagem sejam diferentes, testes de usinabilidade deverão ser realizados para cada aplicação específica caracterizada pelas circunstâncias do processo de fabricação a ser aplicado, como espera-se de uma propriedade tecnológica.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO

O presente trabalho, pautado nos embasamentos que o idealizaram, permite sugerir a introdução de uma nova propriedade dos materiais, que representa a resistência que estes oferecem ao serem usinados. A medida da propriedade está fundamentada no esforço necessário para usinar o material, ponderado pela sua agressividade, os quais representam os principais fatores de influência no referido processo.

Os valores experimentais da medida de resistência à usinagem indicam compatibilidade com índices de usinabilidade (item 7.2.2 (a)), sendo porém extremamente mais simples e de alto grau de repetibilidade que aqueles. Existe, além disso, um acréscimo de informações com a sua utilização através, da separação de esforços de usinagem e abrasividade (item 7.2.2 (b)). Isto pode ser intensivamente utilizado pelas indústrias que produzem

materiais de corte fácil, para sua caracterização..

O diâmetro inicial do cdp deve ser fixado, conforme foi constatado pela análise de sua influência (item 7.2.1).

A constatação experimental da independência dos índices REU-A e REU-B (item 7.2.2(c)) é intrigante e reforça a questão da interação peça-ferramenta durante a usinagem.

A medida da propriedade proposta foi realizada através de uma operação de torneamento, por decisão pautada na sua universalidade. Esta medida tem a finalidade de quantificar a resistência à usinagem para condições pré-fixadas do ensaio padronizado para sua determinação, à semelhança do que ocorre com os ensaios para determinação de outras propriedades: dureza, limite de escoamento, etc.

CAPÍTULO 9

SUGESTÕES

PARA

TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

1. Elaboração de um teste para medida simultânea da taxa de variação da força e do desgaste relativa ao volume de cavaco removido.
2. Tentar técnicas alternativas para determinação mais precisa da taxa de desgaste.
3. Verificar o efeito de RU medido em ensaios, que apresentem variações da velocidade de corte em faixas que impliquem na atuação de diferentes mecanismos de desgaste.
4. Realizar trabalho que defina a padronização completa dos ensaios de caracterização da propriedade de resistência à usinagem. Tal padronização abrange: formato do corpo-de-prova, faixas de RU para ensaios com diferentes materiais de ferramentas.

BIBLIOGRAFIA

[1] ABNT NBR 6162

[2] ABNT NBR 6163

[3] Ferraresi, D- "Características de Usinagem dos Metais"-
ABNT-PI1986, ABM, 1984.

[4] Cupini, NL et alii- "Curso de Tecnologia da Usinagem" -
Publicação DEF/FEM/Unicamp, 1990.

[5] Ferraresi, D- "Fundamentos da Usinagem dos Metais"- Edgard
Blücher, 1977.

[6] Freire, JM- "Torno Mecânico" - LTC, 1984.

[7] Micheletti, JF- "Tecnologia Meccanica" - Utet, 2 Edizione.

[8] Shaw, MC- "Metal Cutting Principles"- Oxford Series, 1984.

- [9] Trent, EM- "Metal Cutting"- Butterworths, 1977.
- [10] Merchant, ME- "Mechanics of the Metal Cutting Process"-
Journal of Applied Physics, vol.16, pp.267-275, 1945.
- [11] Black, JT- "Flow Stress Model in Metal Cutting"- Journal of
Engineering for Industry, vol.101, pp.403-415, Nov 1979.
- [12] Ferreira, ABH- "Novo Dicionário da Língua Portuguesa"-Edito-
ra Nova Fronteira, 1984.
- [13] NN; "Webster's 7th New Collegiate Dictionary" - G&C Merriam
Company, 1985.
- [14] NN; "Tool and Manufacturing Engineering Handbook"- ASME,
1976.
- [15] Cook, NH- "Manufacturing Analysis"- Addison Wesley, 1966.
- [16] Mills, B; Redford, AH- "Machinability of Engineering
Materials - Applied Science Publishers Ltd, 1983.
- [17] Micheletti, GF- "Work on Machinability" - CIRP, vol. 17/1,
pp.84-89, 1970.

- [18] NN; "Tool Engineering Handbook"- ASTME, 1985.
- [19] Cupini, NL; Vilella, RC - "Contribuição A Propriedade de Resistência A Usinagem no Processo de Torneamento". Anais do 7.º CBECIMAT- UFSC, 1986.
- [20] ISO 3685 (Apêndice)- 1977.
- [21] BS 5623 (Apêndice)- 1979.
- [22] AFNor NF 03/654, 1981.
- [23] Gonzales, GS- "Aspectos Metalúrgicos da Usinabilidade do Aço SAE 12L14 submetido a crescentes níveis de deformação a frio"- Tese de Mestrado- DEF/FEM/Unicamp, 1992.
- [24] Boehs, L et alii- "Materiais para Ferramentas: as novas Gerações e Aplicações"- Anais do 9.º COBEM- SC, 1987.
- [25] Wick, C- "Coatings Improve Tool Life and Increase Productivity"- Mfg. Engineering, pp. 26-31, Dec. 1986.
- [26] Dearnley, PA- "Rake and Flank Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Cemented Carbides"- ASME Transactions, vol.105, pp. 68-82, 1983.

- [27] Jack, D. "Advanced Ceramics as Metal Cutting Tool Material"-
Chemistry and Industry, pp.646-650, Oct. 1986.
- [28] N.N. -"Neue Perspektiven mit Schneidkeramik von Sandvik Cor-
omant"- Fertigungstechnik, no. 9-10, pp. 445-449, 1983.
- [29] Bogges, J- "Machning with Ceramic Tools"- American Machnist,
pp. 78-80, Jan. 1984.
- [30] Heath, PJ. "Ultrahard Tool Materials" - ASME Transactions,
pp.106-117, vol.107, 1987.
- [31] Dietrich, R. "Polykristalline Diamant und CBN Werkzeug"-
Werkstatt u. Betrieb, vol. 116, pp. 95-108, 1985.
- [32] N.N., "Catálogo DIFER para Ferramentas CBN e
Diamante", 1987.
- [33] Heimbrand, E. "Machining Composite Metals with PCD"- Ind.
Diamond Review, vol.4, pp. 187-190, 1985.
- [34] Larson, WC- "Diamond Tool Wear"- Relatório Interno,
Universidade de Birmingham, 1990.

- [35] Koenig, W et alli- "Machining of New Materials"- CIRP, vol. 39/2, pp. 34-40, 1990.
- [36] Leskovar, P et alli- "The Metallurgical Aspects of Machning"- CIRP, vol. 35/2, pp. 45-56, 1986.
- [37] Collier, G -"CBN é quatro vezes mais rápido que retificação", Máquinas e Metais, vol.278, pp. 54-59, Março 1989.
- [38] Jablonowsky, J.- "Superfícies Endurecidas- Um minuto para A-cabamento", Máquinas e Metais, vol.278, pp.50-53, Março 1989.
- [39] Drescher, JD et all- " Machning forces In Diamond Turning of Plated Copper and Unplated Substrats"- Universidade de Carolina do Norte, Relatório Interno, 1990.
- [40] Toenscoff, HK et all- "Developments and Trends in Monitoring and Control of Machine Processes" - CIRP, vol. 37/2, pp. 611-622, 1988.
- [41] Koren, Y et alli- "Monitoring Tool Wear through Force Measurement" - 15. NAMRC, pp. 463-484, May 1987.

- [42] Majima, T- "Monitoramento do Processo de Corte com Sensores"- Máquinas e Metais, pp. 24-33, Jan 1989.

- [43] Iwata, K-"Sensing Technologies for improving the machine tool function"- Proceedings of 3rd Int. Mach. Tool Engineer Conference, JMTBA, Tokio, pp. 87-109, 1989.

- [44] Hayashi, SR et alli- "Tool Break Detection by Monitoring Ultrasonic Vibrations, CIRP, vol. 37/1, pp. 45-49, 1988.

- [45] Sougnet, P et alli- "Tool Monitoring with Acoustic Emission- Industrial Results and Future Prospects", CIRP, vol. 36/1, pp. 57-60, 1987.

- [46] Tlustý, J et ali- "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining"- CIRP, vol. 32/2, pp. 563-572, 1983.

- [47] Akerstrom, G et alli- "A Survey of Precipitation hardened Perlitic steels in forged automotive components with special emphasis on machinability" - Material & Design, vol. 12, pp. 33-39, Feb. 1991.

- [48] Datsko, J-"Materials Properties and Manufacturing Processes"- John Willey & Sons, 1967.

- [49] Hayden, HW et alli- "The Structure and Property of Materials"- John Willey & Sons, vol.3, 1965.
- [50] Patton, WJ- "Materials in Industry"- Prentice Hall, 1968.
- [51] Vlack, van LH- "Material Science for Engineers"- Addison Wesley, 1970.
- [52] Metals Handbook, ASM, vol. 3, 1980.
- [53] Bresciani F,E - "Seleção e Especificação dos Materiais"- Editora da Unicamp, 1986.
- [54] Merchant, ME -"Mechanics of the Metal Cutting Process"- Journal of Applied Physics, vol. 16, pp.267-324, 1945.
- [55] Chao, BT e Trigger, KJ- "Thermophysical Aspects of Metal Cutting" -ASME Transactions, vol. 74, pp.1039-1054, 1952.
- [56] Creveling, JH et alli- "Some Studies of Angle Relationships in Metal Cutting". -ASME Transactions, vol. 79, pp. 127-138, 1957.

- [57] Kececiloglu, D- "Shear Zone Temperature in Metal Cutting and Its Effects on Shear Flow Stress"-ASME Transactions, vol. 80, pp. 541-546, 1958.
- [58] Kobayashi, S e Thomsen, EG- "Some Observations on the Shearing Process in Metal Cutting"- ASME Transactions, vol. 81, pp. 251-261, 1959.
- [59] Das, MK e Tobias, SA- "The Basis of a Universal Machinability Index"- Proceedings 5.th Int. MTDR Conference, pp. 183-198, 1965.
- [60] Nakayama, K et alli- "Some Empirical Equations for Three Components of Resultant Cutting Force"- CIRP, vol. 32/1, pp. 33- 35, 1983.
- [61] Ueda, N; Matsuo, T- "An investigation of Some Shear Angle Theories"- CIRP, vol. 35/1, pp.27- 30, 1986.
- [62] De Fillipi, A; Ippolito, R- " Analysis of the correlation among Cutting Force Variation (vs. Time) - Chip Formation Parameters - Machinability" -CIRP, vol.21/1, pp.29- 30, 1972.
- [63] NN; "Particle Attrition, State-of-the Art Review"- Transtech

England, 1987.

- [64] NN, "Turning Tools and Inserts", - Sandvik Coromant - C-1000; 3-ENG, 1990.
- [65] NN, "Ferramentas para tornear" - Sandvik Coromant - C-1000; 2-POR/BRA, 1987.
- [66] Spiegel, MR - "Estatística" - Schaum McGraw-Hill, 1984.
- [67] Milton, JS; Tsokos, JO - "Statistical Methods in the Biological and Health Sciences" - McGraw-Hill, 1983.
- [68] Bhattacharyya, GK; Johnson, RA - "Statistical Concepts and Methods"- John Willey & Sons, 1977.
- [69] Holman, JP - "Experimental Methods"- McGraw-Hill International, 1983.
- [70] Owen, DB - "Handbook of Statistical Tables"- Addison Wesley, 1962.