

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Resistência dos Materiais à Usinagem
Conceito, Medida e Aplicações
da Nova Propriedade

Autor: José Paulo Breda Destro
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

12/95

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR José Paulo Breda Destro
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 20/12/95

ORIENTADOR

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

3476r

Destro, Jose Paulo Breda

dos materiais e usinagem
Resistencia a usinagem / Jose Paulo Breda Destro. -- Campi-
nas, SP : Is.n.1, 1995.

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. Facul-
dade de Engenharia Mecanica.

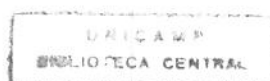
I. Metais - Usinabilidade. 2. Usinagem. 3. Materiais -
Classificacao. 4. Materiais - Testes. I. ^{Coppini} ~~Coppini~~, Nivaldo
Lemos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecanica. III. Titulo.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Resistência dos Materiais à Usinagem
*Conceito, Medida e Aplicações
da Nova Propriedade*

Autor: José Paulo Breda Destro
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

12/95



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

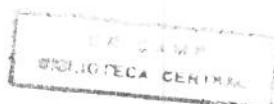
Resistência dos Materiais à Usinagem
Conceito, Medida e Aplicações
da Nova Propriedade

Autor: José Paulo Breda Destro
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

Curso: Engenharia Mecânica
Unidade: Faculdade de Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais & Processos de Fabricação

Trabalho apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 20 de dezembro de 1995
S.P. - Brasil

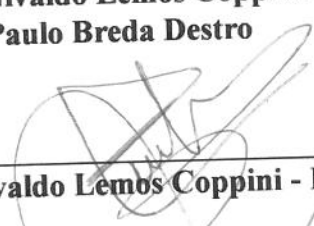


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

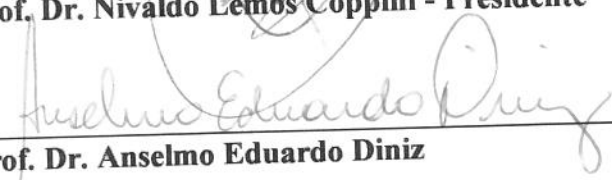
TESE DE DOUTORADO

Resistência dos Materiais à Usinagem
*Conceito, Medida e Aplicações
da Nova Propriedade*

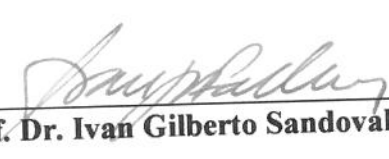
Orientador: **Nivaldo Lemos Coppini**
Autor: **José Paulo Breda Destro**



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini - Presidente



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros



Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira



Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan

Campinas, 14 de dezembro de 1995.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda das pessoas, às quais presto minha homenagem:

Ao Prof. Ronaldo de Castro Villela, pelo convite e apoio ao ingresso no Programa de Pós-Graduação.

Ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, pela orientação e amizade.

Ao CNPq-MCT.

Ao Prof. Adalberto Vieira de Mattos (UNITAU), pela cessão da máquina Traub TND 360 e apoio.

À Maria Stela Vasconcellos Pedretti, pelo apoio e confiança.

Ao amigo Fábio Salomão Rodrigues, pelo auxílio e excelência.

Aos Professores, Funcionários, Colegas e Alunos da UNICAMP e UNITAU.

A Aços Villares SA, Index do Brasil SA, Indústrias Nardini SA, Indústrias Romi SA, Nicola Rome Ind.&Com. Ltda. e Sandvik do Brasil SA.

A todos que ajudaram de forma direta e indireta na realização deste trabalho.

Em especial:

À minha família.

Ao meu irmão, MSc J. B. Destro Filho, pela dignidade e excelência.

Ao meu pai, João Baptista Destro, pelo exemplo, confiança e honra em merecer o dom de ser seu filho.

A minha mãe, pelas qualidades espirituais e intelectuais, comprovadas na construção do pai, da família, do lar e proporcionar a maravilhosa chance de ser seu filho.

A Deus.

Que o Espírito Santo de Deus assista minha ignorância e insensatez,
Concedendo-me sabedoria nas chances de trabalhar e de contribuir
na construção do Seu Reino, que começa aqui na Terra.

Que cada momento de esforços e incertezas
ao longo deste trabalho, convertam-se em pontes para construir sempre.

Resumo

Este trabalho propõe a introdução de uma nova propriedade : Resistência à Usinagem, que independe de um material-padrão, que deve ser exaustivamente ensaiado, e não está sujeita a critério qualquer, definido pelo usuário. Neste sentido, a princípio, apresenta-se a necessidade de caracterização do desempenho de materiais em usinagem, para guiar a pesquisa e desenvolvimento (P&D) de materiais de corte fácil (sobretudo) e verificação de sua qualidade, durante a produção e a recepção dos mesmos. Em seguida, discute-se a propriedade tecnológica relacionada: usinabilidade e, porque esta não se aplica à caracterização intrínseca de materiais. São detalhadas as hipóteses básicas e requisitos para a nova propriedade e, definidos o parâmetro de medição e metodologia. Descrevem-se e executam-se ensaios preliminares para verificação dos fatores de influência na medição e sensibilidade da medida, que culminam no desenvolvimento de uma proposta de norma para sua determinação, que envolve o *Teste de Calibração* e *Teste de Medição*. A referida propriedade é, então, quantificada pelo valor médio das forças médias de avanço (evolutivas com o desgaste da ferramenta), obtidas num ensaio, em que 8 corpos-de-prova do material a ser testado são submetidos a 4 condições diferentes de usinagem, totalizando 32 etapas, simulando um roteiro de fabricação de um lote de peças a ser usinado. Três materiais (aços ABNT 1212, 12L14 e 1045) foram, então, caracterizados em cinco máquinas diferentes (duas localizavam-se em laboratórios de universidades e três, em empresas de localidades distintas). As médias das medidas obtidas nos diferentes equipamentos não apresentaram diferenças significativas a 95% de intervalo bilateral de confiança. A relativa facilidade de realização do *Teste de Medição* e baixo custo, aliados à reprodutibilidade de 95%, recomendam sua utilização, quando a usinagem é fator determinante na composição de custos. Cumpre registrar que, apesar da Resistência à Usinagem diferir da propriedade tecnológica correlata, a proposta acolhe a aquela e, inclusive, recomenda o seu emprego exclusivamente na otimização do processo em si. E, não na caracterização do material, pois, esta deve ser independente das nuances do processo.

Palavras Chave

- Usinabilidade, Caracterização de Materiais, Propriedades, Resistência à Usinagem

Abstract

This work proposes and accomplishes a new property: Machining Strength. That depends neither on a standard material, that will be intensively tested, in the same way the material will be measured. Nor on further interest criterium defined by the testing user. Since it is determined in a padronized test to characterize the material intrinsic performance in relation to the material easiness or difficulty to chip remotion. Thus, in the beginning, it is settled the necessity of the material intrinsic characterization performance in chip removal processes in order to research and develop materials (mostly: free-cutting steels), as well as, the quality assurance during producing or checking by delivering. Basic premisses are established. Then, the measuring parameter and procedure are defined. Two preliminary experiments were carried out in order to check the influence factors upon the property determination and the testing procedure sensibility to characterize materials. Towards that, SAE 12L14 steel 20 mm diameter workpieces, that were submitted to different cold drawn rates and rolled, proved to show different machining performances at 95% reliability. Then, it was established the property quantification by medium value among the average feed force measurements (those are evolutive with wear, imposed upon the tool) within a padronized test, in which 8 (eighth) workpieces of the material to be tested are submitted to 4(four) different machining conditions. That totalizes a 32 step testing procedure, which simulates a complete machining task. Three materials (SAE-1212, -12L14 and -1045 steels) were experimented in five different machines (two ones could be found in laboratories at universities, others, at companies spread in three different points). There were no significant difference among the measurements, related to the different machines, at 95 % reliability according to inference tests among the measurements, provided by the machines. The relative easiness and relative low cost testing procedure, associated to a 95% reproductibility, recommend it to be used when material machining performance shall be specially considered in manufactured part cost. Machining Strength is different from machinability - the technological property connected. Nevertheless, the new property supports the technological one, that is recommended to describe and optimize the process itself. But not the material.

Key Words

- Machinability, Material Characterization, Properties, Strength to Machining

Sumário

Página

Capa.....	i
Folha de rosto.....	ii
Folha de Aprovação.....	iii
Agradecimentos.....	iv
Epígrafe.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Sumário.....	x
Lista de Desenhos, Figuras e Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	
 CAPÍTULO 1 - Introdução, Objetivos e Apresentação do Trabalho.....	1
1.1 - Introdução.....	1
1.2 - Objetivos Fundamentais.....	2
1.3 - Estrutura de Apresentação do Trabalho.....	3
 CAPÍTULO 2 - Generalidades.....	5
2.1- Introdução.....	5
2.2- Usinabilidade - Conceito.....	6
2.3- Usinabilidade - Histórico e Críticas.....	7
2.4- Campo de Aplicação.....	10
2.5- Estudo Dialético de Propostas de Propriedades.....	10
 CAPÍTULO 3 - Resistência à Usinagem - Proposta Conceitual.....	13
3.1 - Introdução.....	13
3.2- Requisitos e Hipóteses Básicas.....	14
3.2.1 - Caracterizar o Desempenho do Material em Usinagem.....	14
3.2.2 - Estabelecer Metodologia de Medição.....	15
3.2.3 - Campo de Aplicação.....	16
3.3 - Conceito e Definição da Nova Propriedade.....	16
 CAPÍTULO 4 - Desenvolvimento da Metodologia para Medição da Propriedade.....	17
4.1 - Introdução.....	17
4.2 - Definição do Parâmetro.....	17
4.3 - Metodologia de Medição.....	18
4.3.1 - Padronização Preliminar do Corpo-de-Prova.....	18
4.3.2 - Padronização da Ferramenta.....	19
4.3.3 - Padronização das Condições Operacionais.....	19
4.3.4 - Padronização dos Corpos-de-Prova.....	20
	vii

4.3.5 - Metodologia Propriamente Dita	22
4.4 - Ensaio Preliminar I (EP 1)	22
4.5 - Ensaio Preliminar II (EP 2)	26
4.6 - Cálculo Preliminar do Número Mínimo de Observações	27
CAPÍTULO 5 - Procedimento Experimental, Resultados e Discussões	28
5.1 - Material	28
5.1.1 - Barras Laminadas	28
5.2 - Equipamentos	29
5.3 - Descrição dos Experimentos	29
5.4 - Teste de Calibração	30
5.4.1 - Máquina I	30
5.4.2 - Máquina II	32
5.4.3 - Máquina III	33
5.4.4 - Máquina IV	35
5.4.5 - Máquina V	37
5.5 - Teste de Medição	39
5.6 - Redimensionamento da Amostragem Mínima	41
5.7 - Validade e Representatividade do Número de Coppini	41
5.7.1 - Validade	42
5.7.2 - Representatividade e Extensão	42
CAPÍTULO 6 - Conclusão	44
CAPÍTULO 7 - Sugestões para Trabalhos Futuros & Perspectivas	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXO A	
Desenhos Ilustrativos de Fixação do Porta-Ferramenta nas Máquinas	
Desenho A.1- Vista Principal de Conjunto da Fixação na Máquina II	A1
Desenho A.2- Vista de Detalhes do Desenho A.1	A2
Desenho A.3- Vista Parcial das Fixações na Máquina II	A3
Desenho A.4- Alternativas de Fixação na Máquina IV	A4
ANEXO B	
Resultados Completos da Medição da Força de Avanço	
Tabela B1.1A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação I com contra ponto)	B1
Tabela B1.2A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação II com contra ponto)	B2
Tabela B1.3A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação III com contra ponto)	B3
Tabela B1.1B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação I sem contra ponto)	B4
Tabela B1.2B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação II sem contra ponto)	B5
Tabela B1.3B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação III sem contra ponto)	B6
Tabela B2.1A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação I com contra ponto)	B7

Tabela B2.2A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação II com contra ponto)	B8
Tabela B2.3A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação III com contra ponto) ...	B9
Tabela B2.1B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação I sem contra ponto)	B10
Tabela B2.2B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação II sem contra ponto) ...	B11
Tabela B2.3B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação III sem contra ponto) ..	B12
Tabela B3.A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 35mm, Fixação I com contra ponto)	B13
Tabela B3.B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 35mm - Fixação I sem contra ponto)	B14
Tabela B4- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 25mm, Fixação I com contra ponto)	B15
Tabela B.5- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 1212 laminado a quente)	B16
Tabela B.6A- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 trefilado 25%)	B17
Tabela B.6B- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 trefilado 15%)	B18
Tabela B.6C- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 laminado a quente)	B19
Tabela B.7- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 1212.....	B20
Tabela B.8- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 12L14	B21
Tabela B.9- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 1045.....	B22
Tabela B.10- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 1212	B23
Tabela B.11- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 12L14	B24
Tabela B.12- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 1045	B25
Tabela B.13- Força Média de Avanço - Máquinas III, IV e V	B26

ANEXO C

Considerações sobre Estatística - Teoria da Inferência

C.1 - Estimação Pontual da Média Populacional	C1
C.2 - Amostragem Mínima para Estimação da Média	C2
C.3 - Estimação de Diferença entre Médias de Amostras	C2
C.4 - Amostragem Mínima para Diferença de Médias	C3

APÊNDICE

Resistência à Usinagem - Proposta de Norma Conceito e Metodologia de Determinação

1- Introdução	1
2- Definição do Parâmetro de Medição	2
3- Corpos-de-Prova	2
4- Ferramenta e Suporte	4
5- Teste de Calibração	4
5.1- Corpos-de-Prova	5
5.2- Ferramenta e Suporte	5
5.3- Condições Operacionais	5
5.4- Procedimento	5
6- Teste de Medição	6
6.1- Corpos-de-Prova	6
6.2- Ferramenta e Suporte	6
6.3- Condições Operacionais	7
6.4- Procedimento	7
7- Extensão de Escalas	8

Lista de Desenhos, Figura & Tabelas

Página

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1- Diâmetro [mm] da Barra, do Corpo-de-Prova e Classe de Diâmetro	18
Tabela 4.2- Dimensões do Corpo-de-Prova por Classe de Diâmetro.....	21
Tabela 4.3- Condições de Usinagem	22
Tabela 4.4- Indicação dos Resultados do EP 1	23
Tabela 4.5- Número de Coppini- EP 1	24
Tabela 4.6- Valores de to- Inferência sobre Montagens com e sem Contra-Ponto.....	24
Tabela 4.7- Valores de to- Inferência entre Fixações nos Diâmetros de 55 mm e 45 mm.....	25
Tabela 4.8- Valores de to- Inferência sobre Influência do Diâmetro na Fixação I.....	25
Tabela 4.9- Número de Coppini- EP 2	26
Tabela 4.10- Valores de to- Inferência sobre Diferenças entre Medições	26
Tabela 4.11- Número Mínimo de Observações.....	27

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1- Propriedades & Composição Química	28
Tabela 5.2- Número de Corpos-de-Prova.....	29
Tabela 5.3- Teste de Calibração - Máquina I	30
Tabela 5.4- Valores-Padrão para Calibração	31
Tabela 5.5- Número Mínimo de Amostras (N_{min})	31
Tabela 5.6- Teste de Calibração - Máquina II.....	31
Tabela 5.7- Valores de to- Inferência sobre Médias (tabelas 5.6 e 5.4)	32
Tabela 5.8- Teste de Calibração (continuação) - Máquina II.....	32
Tabela 5.9- Teste de Calibração (continuação) - Máquina II.....	32
Tabela 5.10- Valores de to- Inferência Médias (tabelas 5.9 e 5.4).....	33
Tabela 5.11- Teste de Calibração (continuação) - Máquina II.....	33
Tabela 5.12- Valores de to- Inferência sobre Médias (tabelas 5.11 e 5.4)	33
Tabela 5.13- Teste de Calibração - Máquina III	34
Tabela 5.14- Teste de Calibração (continuação) - Máquina III	34
Tabela 5.15- Valores de to- Inferência sobre Médias (tabelas 5.14 e 5.4)	34
Tabela 5.16- Teste de Calibração - Máquina IV	35
Tabela 5.17- Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV	35
Tabela 5.18- Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV	36
Tabela 5.19- Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV	36
Tabela 5.20- Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV	36

Tabela 5.21- Valores de to- Inferência sobre Médias (tabelas 5.20 e 5.4)	36
Tabela 5.22- Teste de Calibração - Máquina V	37
Tabela 5.23- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	37
Tabela 5.24- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	37
Tabela 5.25- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	38
Tabela 5.26- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	38
Tabela 5.27- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	38
Tabela 5.28- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	38
Tabela 5.29- Teste de Calibração (continuação) - Máquina V	39
Tabela 5.30- Número de Coppini por Material, Máquina e Diâmetro	39
Tabela 5.31- Valores de to- Inferência sobre Diâmetros	40
Tabela 5.32- Número de Coppini por Material e Máquina	40
Tabela 5.33- Valores de to- Inferência sobre Máquinas	40

ANEXO A

Anexo A

Desenhos Ilustrativos de Fixação do Porta-Ferramenta nas Máquinas

Desenho A.1- Vista Principal de Conjunto da Fixação na Máquina II	A1
Desenho A.2- Vista de Detalhes do Desenho A.1	A2
Desenho A.3- Vista Parcial das Fixações na Máquina II	A3
Desenho A.4- Alternativas de Fixação na Máquina IV	A4

ANEXO B

Resultados Completos da Medição da Força de Avanço

Tabela B1.1A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação I com contra ponto)	B1
Tabela B1.2A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação II com contra ponto)	B2
Tabela B1.3A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação III com contra ponto) ...	B3
Tabela B1.1B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação I sem contra ponto)	B4
Tabela B1.2B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação II sem contra ponto)	B5
Tabela B1.3B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 55mm, Fixação III sem contra ponto)	B6
Tabela B2.2A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação II com contra ponto)	B7
Tabela B2.3A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação III com contra ponto) ...	B8
Tabela B2.1B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação I sem contra ponto)	B9
Tabela B2.2B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação II sem contra ponto) ...	B10
Tabela B2.3B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 45mm, Fixação III sem contra ponto) ..	B11
Tabela B3.A- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 35mm, Fixação I com contra ponto)	B12
Tabela B3.B- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 35mm - Fixação I sem contra ponto)	B13
Tabela B4- EP 1-Força Média de Avanço (Dia. 25mm, Fixação I com contra ponto)	B14
Tabela B.5- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 1212 laminado a quente)	B15
Tabela B.6A- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 trefilado 25%)	B16
Tabela B.6B- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 trefilado 15%)	B17
Tabela B.6C- EP 2-Força Média de Avanço (Aço ABNT 12L14 laminado a quente)	B18
Tabela B.7- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 1212	B19
Tabela B.8- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 12L14	B20
Tabela B.9- Força Média de Avanço - Máquina I, Material: Aço ABNT 1045	B21
Tabela B.10- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 1212	B22

Tabela B.11- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 12L14	B23
Tabela B.12- Força Média de Avanço - Máquina II, Material: Aço ABNT 1045	B24
Tabela B.13- Força Média de Avanço - Máquinas III, IV, V	B25

APÊNDICE	
Figura 1- Corpo-de-Prova Padrão	C3
Tabela 1- Diâmetros [mm] da Barra, do Corpo-de-Prova e Classes de Diâmetro	C3
Tabela 2- Condições operacionais para <i>Teste de Calibração</i>	C4
Tabela 3- Valores-Padrão para <i>Teste de Calibração</i>	C5
Tabela 4- Dimensões do Corpo-de-Prova por Classe de Diâmetro.....	C6
Tabela 5- Condições Operacionais para <i>Teste de Medição</i>	C7

Nomenclatura

Latinas

- a = intervalo de confiança [%]
 a_p = profundidade de usinagem [mm]
 C = confiabilidade [%]
 $D(d)$ = erro tolerável [%]
 $D_{1,N} (d_{1,N})$ = diâmetro inicial, final [mm]
 $Dia.$ = diâmetro [mm]
 D_m, d_m = diâmetro médio [mm]
 f = avanço [mm/volta]
 f_c = frequência do cavaco [rad/s]
 f_i = avanço relacionado à série i [mm/volta]
 F_f = força de avanço [kgf]
 L_{cp} = comprimento do corpo-de-prova [mm]
 L_r = comprimento de avanço [mm]
 L_i = comprimento útil de usinagem do corpo-de-prova para a "i-ésima" série [mm]
 L_{tot} = comprimento total de usinagem [mm]
 L_u = comprimento útil de usinagem [mm]
 N = número de etapas no *Teste de Medição*, número de experimentos ou de observações
 N_{min} = número mínimo de experimentos ou observações
 P_i = Passe associado à fase i do Teste de Calibração
 $t_{a2, (N2+N1-1)}$ = valor t de Student para teste bilateral com $(N2+N1-1)$ graus de liberdade
 $t_{a2, (N-1)}$ = valor t da distribuição de Student para teste bilateral com $(N-1)$ graus de liberdade
 t_c = tempo de corte total do ensaio [min]
 t_o = valor calculado para verificação do teste de hipóteses
 T_s = tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento de formação do cavaco [kgf/cm²]
 vc - velocidade de corte [m/min]
 vc_i - velocidade de corte associada à série i [m/min]
 V_i = volume de cavaco removido por etapa i [mm³]
 V_{tot} = volume total de cavaco removido [cm³]
 $\bar{X}, \bar{Y}$ = média das pequenas amostras X e Y

Abreviações

CD = classe de diâmetro

CdP (cdp) = corpo-de-prova

CP = contra-ponto

E: ensaio

EP: ensaio preliminar

Fix i = fixação número "i"

NC - Número de Coppini

mat.: material

NP: número de passes

PE: Parte Experimental

Siglas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTS: "Block Tool System" relativo ao Suporte Intercambiável Sandvik

CBN: nitreto de boro cúbico (material de ferramenta)

HrB: dureza Brinell

HRC: dureza Rockwell C.

P&D&F&CQ: Pesquisa, Desenvolvimento, Fabricação e Controle da Qualidade

Capítulo 1

Introdução & Objetivos

1.1 Introdução

A luta por excelência em fabricação tem priorizado a qualidade e produtividade como itens necessários à sobrevivência de empresas e instituições num ambiente de competição global.

A redução de custos, além de eliminar mão-de-obra dispensável, transpõe as pranchetas da engenharia de projeto, atingindo a engenharia de processos na indústria mecânico-metalúrgica.

Transcendendo a otimização de processos, a atividade de Pesquisa, Desenvolvimento, Fabricação e Controle da Qualidade (P&D&F&CQ) de materiais para serem aplicados a um roteiro específico de fabricação vem ganhando espaço crescente no segmento mecânico. Especialmente nos casos em que o custo do processo envolvido faz-se preponderante no cômputo do valor agregado ao produto, uma vez que, em muitos casos, custos de usinagem suplantam a metade do valor agregado aos produtos (de Ardo, 1993). Neste sentido, a indústria tem optado por materiais de corte fácil nas aplicações em que não atuam predominantemente solicitações cíclicas e ou elevadas (Vaccari, 1986 e Wise & Milovic, 1988).

Materiais de corte fácil (Marquesi, 1993) correspondem, na sua parcela econômica mais expressiva, a aços - carbono, -liga e -inoxidável, especialmente tratados com aditivos como Enxofre e/ou Chumbo para facilitar a usinagem. Permitem velocidades de corte mais altas, avanços superiores e vida mais longa da ferramenta, significando custos menores ao processo (Wise & Milovic, 1988).

Citam-se as “famílias” AISI 11xx-re-sulfurados e 12xx-re-sulfurados e re-fosforados. A adição de Chumbo é designada pela letra L, por exemplo 11L37, 12L14. Outros aditivos podem ser empregados, como Cálcio, Selênio, Telúrio e Bismuto. Neste caso, o símbolo químico deve estar contido na designação, exemplo: 12Bi14. Caso também contenha Chumbo, o símbolo químico deve ser apostado ao final da designação, exemplo: 12L14Se.

As inclusões de MnS atuam como “facilitadores de trincas”, auxiliando a remoção de cavaco do material, no sentido de diminuir esforços de corte pela “fragilização” do material a ser usinado (Wise & Milovic, 1988).

Shaw&Cook(1961) apresentam curvas de vida para os aços re-sulfurados, usinados com ferramentas de aço-rápido, disponíveis na época. Idem, em relação com aços ao Chumbo, conforme encontra-se resumido em Shaw&Smith (1961), com importantes informações a respeito dos tipos de desgaste e aresta postiça de corte nestes materiais. Em Shaw&Usui (1961), são determinados valores de forças de corte, de avanço e de rugosidade superficial para diversos parâmetros de corte, bem como, um estudo da formação de cavaco nestes materiais.

Porém, a P&D&F&CQ destes materiais é bastante precária, devido à pequena reprodutibilidade do teste de usinabilidade (Naylor & Llewellyn, 1976; Tipnis&Christopher, 1986; Erikson,1992; de Ardo, 1993), propriedade tecnológica relacionada. Na maioria dos casos, não é superior a 40%, segundo os autores supramencionados. Este fato é devido às razões que são comentadas em capítulos posteriores.

A propriedade de Resistência à Usinagem vem de encontro ao interesse de pesquisadores e empresas envolvidos, num momento em que a substituição do Chumbo por outros aditivos menos poluentes à ecossfera faz-se necessária (López, 1993). Já existem restrições à sua utilização nos Estados Unidos da América, que devem ser intensificadas progressivamente e acatadas em nível global.

Além disso, a caracterização de materiais, quando o processo de usinagem é fator decisivo de sua especificação, carece de normas.

Não existe norma nacional disponível a respeito. As internacionais: ISO 3685 e BS 5623 não são conclusivas sobre caracterização de materiais. Pois, são específicas para se determinar a vida da ferramenta. Isto tem significado um bloqueio à P&D destes materiais. Exceção à norma francesa AFNOR, 1981.

Algumas empresas desenvolvem testes especiais e específicos, como é o caso da Volvo - Suécia. Mas, por terem sido desenvolvidos de forma interna àquelas empresas e visando aplicações específicas, estão distantes de ser largamente utilizados. Acabam significando mais barreiras, que se interpõem ao desenvolvimento de uma norma amplamente aceita.

Tal caracterização se faz mister para guiar P&D destes materiais, garantir a qualidade dos mesmos na sua produção dentro da indústria metalúrgica e, bem como, verificar a qualidade na recepção dos mesmos no âmbito da indústria metal-mecânica.

1.2 - Objetivos Fundamentais

Este trabalho objetiva:

- I. Apresentar a nova propriedade dos materiais: Resistência à Usinagem, que visa a caracterização intrínseca do desempenho do material em processos com remoção de cavaco;
- II. Definir parâmetro para medição da nova propriedade;
- III. Desenvolver metodologia para determinação do parâmetro, que seja confiável, relativamente simples e de baixo custo;
- IV. Verificar a sensibilidade da metodologia;
- V. Propor normalização à nova propriedade;
- VI. Executar a medição experimental em, pelo menos, dois materiais, seguindo procedimento especificado na proposta de norma;

VII. Verificar confiabilidade, através de medições em materiais idênticos, em, pelo menos, duas máquinas diferentes.

Salienta-se que este trabalho não enseja refutar usinabilidade como propriedade tecnológica ou, mesmo relegá-la a segundo plano. Esta deve continuar a ser utilizada na comparação entre processos de usinagem e sua otimização, como propriedade tecnológica.

Por outro lado, sim, propõe uma metodologia objetiva e relativamente simples para se medir a capacidade intrínseca do material a ser usinado.

1.3 - Estrutura de Apresentação do Trabalho

No **capítulo 2** encontram-se um resumo do estado-da-arte de usinagem, o conceito de usinabilidade, histórico e comentários desta propriedade tecnológica, críticas concernentes à sua definição, argumentos à elaboração de nova propriedade para se caracterizar materiais e uma resenha de tentativas de se elaborar uma propriedade dos materiais à usinagem, com comentários associados.

No **capítulo 3** são apresentados argumentos objetivos e, até subjetivos, quanto à existência da propriedade. Também, faz-se um comentário quanto à sua existência objetiva e detalham-se requisitos e as hipóteses básicas, que vão guiar a proposta de uma metodologia para sua quantificação numérica. Ao final do capítulo, é apresentada a a proposta do conceito relativo à nova propriedade dos materiais: Resistência à Usinagem

No **capítulo 4**, descrevem-se aspectos tecnicamente considerados na elaboração do parâmetro, que vai quantificar a propriedade e condições do teste para determinação do Número de Coppini, que expressa a quantificação da referida propriedade. Apresenta-se o ensaio preliminar I, em que parâmetros de influência são verificados. E, também, o ensaio preliminar II, que objetiva verificar a sensibilidade da metodologia proposta, ao caracterizar materiais de mesma composição química, submetidos a diferentes processos de conformação. Finaliza-se com o cálculo preliminar do número mínimo de observações.

Material, equipamentos e detalhes da parte experimental são descritos no **capítulo 5**. A norma, que consta do Apêndice, é utilizada para determinar o Número de Coppini de 3 (três) materiais, em 5(cinco) máquinas diferentes. A saber: aços ABNT 1212, 12L14, 1045; máquinas localizadas em 2 (dois) laboratórios em universidades: Unicamp e Unitaú e em 3 (três) empresas: Index, Nardini e Nicola Rome. Resultados experimentais são apresentados, analisados e discutidos neste capítulo, bem como a extensão e representatividade da medição da nova propriedade.

Conclusões e perspectivas, acerca do trabalho, estão contidas no **capítulo 6**.

Cerca de meia dúzia de sugestões para trabalhos futuros são apontadas no **capítulo 7**.

Na sequência, encontram-se **Referências Bibliográficas** e a **Bibliografia**. Esta mostrou-se imprescindível para abstração, concepção e execução das propostas contidas neste trabalho

Seguem-se:

I. Anexo A, que contém desenhos ilustrativos da fixação do porta-ferramenta nas máquinas;

II. Anexo B, que contém tabelas com registros das forças médias de avanço, necessárias para determinação do Número de Coppini.

III. Anexo C, que sumariza aspectos da Teoria de Inferência Estatística que foram exaustivamente considerados na análise de resultados experimentais e, bem como, na execução deste trabalho.

IV. Apêndice, que propõe o conceito/definição da nova propriedade e a normalização para sua metodologia de determinação, prevendo e descrevendo o *Teste de Calibração* e o *Teste de Medição*. E, também, alargam-se horizontes, estabelecendo premissas para desenvolvimento de escalas alternativas de medição, prevendo utilização de ferramentas de CBN e ou de diamante para grupo específico de materiais, que são acolhidos, subsidiariamente, no escopo da referida propriedade.

Capítulo 2

Generalidades

2.1- Introdução

As conquistas e desenvolvimento na área de usinagem convencional têm superado as expectativas nas últimas décadas.

Recentemente, a usinagem de ultra-precisão, utilizando diamante monocristalino tem se desenvolvido muito rapidamente. Especialmente, na de produção de espelhos para laser, discos magnéticos, tambores de copiadoras, entre outras partes-chave de máquinas avançadas e instrumentos óticos.

A precisão da ordem de nanômetros exige estabilidade da ferramenta a qualquer custo. A ponto de se utilizar técnica fuzzy para reconhecimento de padrões para monitoramento do processo, conforme trabalho de **Ko** (1994).

Alguns autores, como **Inamura et al.** (1994), desenvolveram métodos de transformação de um modelo atômico para o correspondente modelo contínuo para estudar distribuição de tensão e deformação na usinagem de ultra-precisão em escala nanométrica.

É impressionante nestes casos, a necessidade de se gerar superfícies de excelente precisão e qualidade. Além de modelamento usando técnicas relativamente recentes, pesquisadores utilizam microscópios atômicos para mapear superfícies na faixa de 0,01 μm a 10 μm na usinagem de ultra-precisão do cobre com ferramentas de diamante. É o caso de **Lucca e Seo** (1994).

Talvez, a causa básica destas conquistas seja o desenvolvimento, em escala econômica, de novos materiais para ferramentas. Citam-se o diamante policristalino e o nitreto cúbico de boro.

Jasinevicius (1993) faz um histórico e revisão em ferramentas de diamante monocristalino, no qual ressalta as propriedades do diamante e o projeto da ferramenta para viabilizar usinagem de superfícies óticas, que necessitam de um super-acabamento para propiciar alto grau de refletividade, entre outras questões.

As super-propriedades do nitreto de boro cúbico são bem comentadas em **Rai** (1993), a saber: excelente resistência mecânica em altas temperaturas, alta temperatura de fusão, baixo coeficiente de atrito, alta condutividade térmica, quimicamente inerte com relação a muitos elementos e dureza inferior apenas ao diamante. De modo que a utilização deste material permite velocidades de corte bem mais elevadas que aquelas usuais com o metal duro, que se funde a 1250°C, também a usinagem de materiais com dureza superior a 50 HRC.

Weingaertener (1994) avalia os parâmetros de maior influência sobre a rugosidade média final no torneamento de acabamento em aço temperado e revenido com ferramenta de nitreto de boro cúbico. Neste trabalho, o desempenho do CBN, no aspecto de precisão

dimensional e qualidade superficial, é compatível com a retificação. Prevê aplicação na fabricação de matrizes, rolos laminadores, indústria de rolamentos, indústria automotiva, etc.

Processos não convencionais de usinagem ganham espaço.

É o caso do processamento de materiais a laser. **Steen** (1994) analisa algumas áreas de futuro crescimento para o laser em termos de mercado e tecnologia, prevendo uma "revolução" com esta nova forma de energia. Tendo em vista, que controlando-se a densidade de energia e tempo de interação com a peça, é possível conformar, usinar, tratar termicamente com uma mesma fonte.

Também, é o caso da usinagem química. **Spiekman** (1995) conseguiu fabricar guias de onda curvos ultra-pequenos com alto confinamento modal. O raio de curvatura do espelho é da ordem de $30\mu\text{m}$, com perda de $0,2\text{dB}/90^\circ$.

Koenig (1993) descreve resultados experimentais da usinagem de cerâmica e, também, de material composto, utilizando processo assistido a laser. No caso, a fonte laser pré-aquece o material antes de ser usinado, tentando amolecê-lo, permitindo sensível redução da força de usinagem e obtenção de superfícies com excelente acabamento superficial.

Porém, a usinagem convencional encontra-se tecnológica e economicamente consolidada na atual conjuntura econômico-produtiva.

Zhang & Bagchi (1994) empregaram técnicas de elementos finitos para simular a formação de cavaco, utilizando um duplo-nó como elemento de ligação entre o cavaco e o material da peça ao longo de uma linha de separação pré-definida. A separação do cavaco se inicia quando a distância entre o nó inicial e a ponta da ferramenta é igual ou inferior a um valor dado. O modelo apresentou 20% de diferença máxima em relação a resultados experimentais da usinagem de bronze e cobre, resultado que pode ser tomado como positivo, considerando as hipóteses e aproximações feitas na análise.

Modelamento do campo de temperaturas na ferramenta e da dinâmica da usinagem têm sido matéria de publicações. Citam-se os trabalhos de **Elbestawi et al.** (1994) e **Radulescu & Kapoor** (1994).

No primeiro, é incluído amortecimento na ferramenta e mais detalhes acerca do modelamento de fenômenos dinâmicos podem ser encontrados em **Radulescu** (1993). No segundo, desenvolveu-se um modelo analítico, que pode ser aplicado para processos de usinagem contínuos ou interrompidos.

No campo de monitoramento em usinagem, a utilização da emissão acústica tem ganhado crescente espaço. Especialmente em processos de retificação, para determinação do fim-de-vida de rebolos de custo elevado. **Grabec e Kuljanic** (1994) registraram o uso de redes neurais em seu trabalho, que através de um sistema especialista e parâmetros do processo, conseguiram estimar "on line" a rugosidade da superfície gerada em retificação.

Porém, apesar desta gama de desenvolvimentos, pouco ou quase nada pode-se falar sobre a caracterização de materiais para serem submetidos a processos de remoção de cavaco.

2.2- Usinabilidade - Conceito

Analisa-se neste ponto o conceito usinabilidade.

A usinabilidade, como propriedade tecnológica presta-se para descrição, comparação e otimização do processo de usinagem. É referenciada num material-padrão - a que é atribuído índice 1 ou 100% - de acordo com critério ou conjunto destes.

Os critérios correspondem às diretrizes, cuja avaliação consiste no objetivo de execução do teste de usinabilidade. Podem ser básicos (vida da ferramenta, força de

usinagem, acabamento superficial, produtividade, etc.) ou específicos (análise dimensional, temperatura de corte, características do cavaco, etc.).

A usinabilidade, como propriedade tecnológica, é função de fatores advindos da interação do par peça-ferramenta e do ambiente que os envolve.

Os fatores encontram-se detalhados pela ASME (1985). Os principais são:

I. Material da peça (composição química, dureza, etc.);

II. Material da ferramenta (composição, propriedades, etc.);

III. Condições de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, geometria, fixação da ferramenta, presença de fluido, etc.).

2.3- Usinabilidade - Histórico e Críticas

Datsko (1967) e ASM (1980) descreveram o histórico da propriedade tecnológica usinabilidade, relacionando-o a conceitos teóricos e avanços na tecnologia de usinagem nas respectivas épocas. Sistematizam-se as idéias básicas, a seguir.

Na década de 20-30, o material disponível para ferramenta era exclusivamente o aço-ferramenta. Herbert, Rosenhain e Sturney (Datsko, 1967) introduziram o conceito embasados na teoria de Taylor sobre vida da ferramenta ("... Taylor speed-life relationship", sic). Posteriormente, Boston, em 1928, definiu usinabilidade como "a resistência do metal à ação de usinagem" (".. metal-structure resistance to a cutting tool action", sic). Cook & Davis, em 1939, definiram usinabilidade como "depende do teste empregado" ("... depends on employed test", sic).

Com o advento do aço-rápido, pouco foi alterado, pois seu mecanismo de falha é semelhante ao aço-ferramenta. Boulger, Shaw & Johnson a definiram como "propriedade do material relacionada à sua facilidade de remoção de cavaco" ("... a complex material property that control its machining facility", sic), em 1949. Kienzel satirizou a propriedade tecnológica em 1950, descrevendo-a como a "habilidade do material passar pelo chão-de-fábrica sem problemas" (ability to go through a machine shop without problems", sic).

Em 1951, Boston mudou seu ponto-de-vista, afirmando que "usinabilidade depende do desempenho da ferramenta assistida por fluido de corte" ("...machining response involves a cutting tool performance assisted by fluid", sic). Idem, Boulger, que, em 1958, discutiu efeitos do material-padrão afetando a usinabilidade ("... material effects on machining operation", sic). Em 1965, Brocon & Tao sentenciaram a inexistência de definição precisa para o conceito ("...has no precise definition", sic).

Percebe-se que novos materiais para ferramentas, principalmente, pode-se citar o metal duro, implicaram em novos mecanismos de falha e revisão dos critérios de vida, objetivando novos aspectos: produtividade, acabamento superficial, etc. E estes, conforme ASM (1977) - encontraram espaço na definição pouco precisa de usinabilidade".

Eyada (1994), asseverou que em 1968, Davis re-formulou, assim como Boston em 1951, nas suas afirmações e "associou a propriedade tecnológica como função de um critério adotado no teste" ("in terms of specific criteria", sic). Em 1973, Chrisholm, Mills & Redford: "está relacionada ao desgaste da ferramenta" ("wearproducibility", sic). Cook em 1975: "diferentes significados para diferentes situações" ("different meaning for different situation", sic). Tipnis em 1977, "não é uma propriedade do material" ("not a material property", sic).

Em 1980, Naylor a propõe como "interação do sistema máquina-ferramenta-peça" ("interaction", sic).

Eyada (1994) afirmou "...que não existe uma definição padrão para usinabilidade" ("... has no standard definition", sic); "...deve ser vista como uma interação" ("... should be viewed as an interaction", sic); "...depende de vários fatores de entrada" ("... depends on several input factors", sic); "...que podem ser indicados por um ou mais critérios" ("... can be indicated by several criteria", sic); "...é um sistema de entrada e saída" ("... is an input-output system", sic); "...trata-se de um problema multi dimensional" ("... is a multi-dimensional problem", sic); "...função da operação, ferramenta, condições de usinagem, etc" ("... function of the operation, of the cutting tool, of the cutting conditions, others", sic).

Percebe-se que, desde sua introdução conceitual na década de 20, a falta de clareza e carência de exatidão conceitual à propriedade tecnológica usinabilidade persistem até a atualidade.

Isto, aliado aos constantes avanços na área, implicou em consequências, diferentemente de temperabilidade, por exemplo, em que se desenvolveram ensaios Jominy, que são difundidos pela indústria metalúrgico-mecânica.

Transcrevem-se aqui alguns comentários e críticas de pesquisadores da área de processos de fabricação, com relação à usinabilidade.

I. Boulger (1950): "É como saborear vinhos - prontamente percebida, mas pouco efetivamente medida em termos quantitativos" ("the machinability of a metal is similar to the palatability of wine - easily appreciated but not readily measured in quantitative terms", sic);

II. Cook (1966) "É necessário definir usinabilidade de forma qualitativa e quantitativamente mais precisas... infelizmente é o melhor que podemos fazer" ("We would prefer to define "machinability" in a precise quantitative fashion that would be clear to everybody". "Unfortunately we can not do much better than Webster", sic);

III. Datsko (1967): "O termo usinabilidade não apresenta definição exata, aceita universalmente" ("There is no precise definition for machinability, that is broadly accepted", sic) "o conceito de usinabilidade é algo vago, que expressa a facilidade relativa de se usar o material" ("it is somewhat vague one that expresses the relative ease of machining a material", sic);

IV. Micheletti (1970): "Ninguém sabe onde e como a usinabilidade realmente funciona, pois a facilidade de usar pode ser medida de modos diferentes, que frequentemente fornecem resultados contraditórios" ("Nobody knows exactly where and how machinability works. This ease of working can be measured in different ways which often give contradictory results", sic); "de modo que não se consegue definir usinabilidade" ("so that a precise definition of machinability is impossible", sic);

V. SME (1976): "É a habilidade de uma dada peça passar pela sequência de máquinas - ferramenta de usinagem sem irritar os operadores." ("the ability of a given piece to go through the machine shop without irritating the machinist", sic);

VI. Cupini & Villela (1986): "Não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim do sistema máquina-ferramenta-peça", sic;

VII. Mills (1986): "A usinabilidade não tende a refletir uma medida objetiva, mas o interesse imediato do usuário" ("Unlike most material properties, there is no generally accepted parameter used for its measurement, and it evince the meaning attributed to term *machinability* tends to reflect the immediate interests of the user", sic);

VIII. Komanduri (1993): "A usinabilidade depende da reação dinâmica que ocorre entre o material da peça, a máquina-ferramenta, geometria da ferramenta, lubrificante utilizado, condições operacionais, etc. Em outras palavras, usinabilidade não é uma propriedade única do material, que pode ser claramente definida e medida. Embora não haja um significado claro, o técnico mecânico, responsável por um conjunto particular de operações, compreende que o produto mais usinável é aquele com maior potencial comercial. Existem muitos critérios diferentes de usinabilidade. Um mesmo material pode ter diferentes graus de usinabilidade, assim como as operações (em consequência os critérios) podem modificar" ("Machinability depends upon the dynamic reaction which occur among the workpiece material, the machine tool's geometry, the lubricant employed, operating conditions, and so forth. In other words, machinability is not a unique material property which can be clearly defined and measured. Although, there is no clear-cut meaning, the machining operator engaged in a particular set of operations understands that the most machinable product is the one with the greatest commercial potential. There are so many different criteria for machinability. The same material may have different degrees of machinability as the operations (and hence the criteria) change", sic);

IX. Weingaertner (1994): "A usinabilidade de um material sempre está relacionada com o processo de usinagem utilizado, com o material de corte empregado e com as condições de corte escolhidas, e pode ser muito diferente de caso a caso. Em geral, empregam-se quatro critérios para a análise de um material quanto à sua usinabilidade. Estes podem ser usados isoladamente ou em conjunto, são eles: vida das ferramentas, forças de usinagem, qualidade superficial e formas de cavacos. A vida das ferramentas em ligas de alumínio para usinagem é muito longa. Por isto, este critério geralmente não é empregado (...). "As ligas de alumínio situam-se entre os materiais metálicos de menores forças específicas (...). De maior importância nas ligas de alumínio para usinagem, são os critérios de qualidade superficial e forma de cavacos".

A precária exatidão e subjetividade decorrentes da definição conceitual, implicam que os índices, obtidos num teste de usinabilidade, sejam função de:

I. Parâmetros de corte empregados no teste (Boulger, 1950; Jawahir, 1988; Jawahir, 1992; Koenig, 1992);

II. Máquina-ferramenta utilizada (Micheletti, 1970; Koenig, 1992);

III. Material da ferramenta (Kiso & Takatsui & Taguchi, 1983; Skingle, 1986; Koenig, 1992; Jawahir, 1992; Fang & Jawahir, 1993; Koenig, 1993);

IV. Composição do material-padrão (Prohászka, 1983; Tipnis & Chistopher 1986);

V. Critério utilizado (Oxley, 1989; Weingaertner, 1994).

A extrapolação dos resultados para condições não específicas do teste faz-se pouco viável na grande maioria de situações. É inviável em parcela expressiva, conforme **Micheletti (1970)**, **ASTME (1976)**, **ASME (1985)**, **Tipnis (1986)** e **Lindgreen (1978)**.

É importante, neste ponto do trabalho, focalizar as limitações da usinabilidade como propriedade para se caracterizar o material, apesar de que, não é objetivo deste trabalho refutar a usinabilidade como propriedade tecnológica, mas sim, utilizá-la no seu devido lugar.

Propriedades tecnológicas prestam-se principalmente para aplicações em processos de fabricação e não para desenvolver e controlar a produção de um dado material que deverá cumprir função específica.

Trata-se de um procedimento incorreto a utilização da usinabilidade para se caracterizar a facilidade/dificuldade intrínseca do material em ser usinado. Entretanto, até propriedades indiretas têm sido erroneamente empregadas na caracterização de materiais à usinagem, como: dureza, tensão limite de escoamento, etc.

Os problemas que advêm deste fato são inúmeros. Porque, as propriedades tecnológicas em geral (e em particular a usinabilidade) são extremamente sensíveis às nuances do próprio processo de fabricação.

Desta forma, utilizá-las para a P&D&F&CQ de um material implica na possibilidade de introdução de informações incorretas, porque estas vão ser dependentes de critérios e ou máquinas utilizadas, diferenças de composição química a nível de normas e ou propriedades mecânicas do material selecionado como padrão, etc. Além disto, propriedades indiretas desconsideram aspectos específicos do processo em si, que envolve elevadas taxas de deformação, temperatura, etc. Os problemas advindos podem ser facilmente previsíveis.

2.4- Campo de Aplicação

Conforme já ficou claro em linhas anteriores e faz-se questão de se frisar mais uma vez, o campo de aplicação da nova propriedade de Resistência à Usinagem, a que se propõe este trabalho, faz-se em dois segmentos da indústria metal-mecânica, a saber:

I. Indústrias que produzem materiais de corte fácil e necessitam de normalização para guiar a P&D&F&CQ durante o desenvolvimento e produção dos mesmos;

II. Indústrias que processam esses materiais, submetendo-os a processos de remoção de cavaco para conferir-lhes a forma final e, portanto, necessitam verificar a qualidade do material recebido. E, também, compará-los entre os diversos produzidos por diferentes empresas.

2.5- Estudo Dialético de Propostas de Propriedades

Antes de se detalhar a propriedade proposta, que será tema do próximo capítulo, apresenta-se uma resenha de propostas semelhantes feitas por pesquisadores da área. O intuito é comentar as hipóteses e experimentos executados neste segmento.

Alguns pesquisadores detectaram em seus trabalhos algumas propriedades que se mantinham constantes durante experimentos com remoção de cavaco. Sugeriram um índice universal, cuja validade era independente das condições de usinagem e de natureza intrínseca ao material usinado.

Merchant (1945) estabeleceu correlação linear entre a tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento da zona de formação do cavaco (T_s) e a tensão normal ao mesmo plano. Contudo, os resultados apresentaram-se inválidos para materiais dúcteis e contradiziam conceitos da teoria da plasticidade. Merchant considerou o cavaco como um corpo independente e isolou-o. Fazendo diagrama de corpo livre, considerou que sobre ele atuassem apenas duas forças: uma no plano de cisalhamento de formação do cavaco e outra na face da ferramenta. Apesar deste procedimento ser comum num problema de estática, **Shaw & Cook & Smith** (1952) estabeleceram o conceito de ângulo efetivo de corte, comprovando descon siderações essenciais no modelo de **Merchant** (1945).

Chao & Trigger (1952) e, posteriormente, **Creveling** (1957) observaram em seus experimentos que T_s era constante para ampla faixa de condições de usinagem, exceto para baixas velocidades.

Keccecioglu (1958) concluiu a impossibilidade de T_s constante para toda a faixa de parâmetros de corte, porque esta é função da temperatura média do plano de cisalhamento e deve variar, pelo menos, de acordo com a velocidade de corte.

Kobayashi & Thomsen (1959) propuseram correlação entre T_s e o valor obtido em teste estático, baseando-se em experimentos com aço ABNT 1112 para ampla faixa de valores. O próprio Kobayashi, um ano após, assumiu a impossibilidade com novos experimentos (**Kobayashi**, 1960).

Roth (1975, 1977) propôs novos modelos para corte ortogonal prevendo variação em T_s , devido à variação no atrito na superfície de saída da ferramenta e, bem como, às pressões hidrostáticas variáveis no plano de cisalhamento.

Das & Tobias (1965) propuseram um índice universal de usinabilidade característico do material e independente das condições de corte. Porém, indiretamente assumiam T_s constante, relacionando ângulos envolvidos na geometria de formação de cavaco.

As variações das condições de corte e, conseqüentemente, do ângulo de cisalhamento, entre ampla gama de possibilidades, não sustentam esta hipótese.

A análise de resultados experimentais, obtidos em trabalhos mais recentes (**Oxley**, 1989; **Childs & Machidi** 1989; **Zorev** 1989; **Hiat & Strenkowsky** 1990; **Parthimus & Ehmann**, 1993), justifica o comentário supra-mencionado.

O processo de remoção de cavaco ocorre em condições não usuais a fenômenos "estáticos" de cisalhamento sob tensão uniaxial, ou até mesmo, àqueles típicos de conformação mecânica, pois, trata-se de um processo dinâmico, com frequência característica de formação de cavaco, e também, porque se podem verificar níveis elevados de pressão normal com altas taxas de deformação e gradientes de temperatura no local em que ocorre o fenômeno.

Komanduri (1993) destacou, ainda, em seu trabalho, como diferença básica, a condição de atrito entre a superfície da ferramenta e aquela do cavaco em formação. Afirmou que as condições não correspondem ao atrito estático envolvendo superfícies nascentes geradas na formação do cavaco, podendo ser quimicamente reativas na maioria dos casos. E, além disso, segundo o autor, há uma complexa interação entre o cisalhamento no plano de cisalhamento e o atrito na superfície de saída da ferramenta e, os esforços nestes planos não são uniformes e tão pouco "bem comportados".

Existe, na verdade uma superposição de fenômenos usuais aos processos estáticos" e ou típicos de conformação. Identificam-se vários mecanismos de desgaste na ferramenta, dependendo da faixa de parâmetros em que se está operando. A saber: abrasão, fragilização devido a micro-trincas, fadiga, difusão, micro-soldas, reações químicas (oxidação e afinidade material da peça-ferramenta), "attrition", etc.

Cupini e Vilella (1986), lançaram as idéias básicas de uma propriedade intrínseca do material, quanto à sua facilidade de remoção do cavaco. Definiram-na como o quociente entre a potência de corte e a quantidade de calor gerada pelo cavaco na unidade de tempo. Entretanto, não se conseguiu resolver a segunda grandeza com suficiente precisão, para se detectar sutilezas em diferentes desempenhos de materiais em usinagem. O empecilho tecnológico de determinação experimental do número adimensional inviabilizou, portanto, a proposta dos referidos autores.

Shaw (1993) descreveu o conceito de energia específica, definida como uma relação entre a força ativa e o produto entre profundidade de usinagem e espessura não deformada do cavaco ("Specific energy is a very useful concept for all material removal and deformation processes ... For cutting and grinding is the energy per unit volume of material removed ... The specific energy is $u = F_p / (b \cdot t)$, where F_p is the power component of force on the tool, b is the width of cut, and t is the undeformed chip thickness", sic). Sugeriu-a como propriedade, assim como a dureza ou limite de resistência, registrando que se trata de uma quantidade intensiva que caracteriza a resistência à usinagem oferecida pelo material ("Specific energy is an intensive quantity that characterizes the cutting resistance offered by a material, just as tensile stress and hardness characterize the strength and plastic deformation resistance of a material", sic). Afirmou que o conceito é essencialmente independente da velocidade de corte ("...in metal cutting the specific energy is essentially independent of the cutting speed V ", sic). Varia ligeiramente com o ângulo de folga, porém é influenciada inversamente pela espessura não deformada do cavaco a níveis significativos ("it varies slightly with rake angle, but varies inversely with undeformed chip thickness to an appreciable degree", sic). **Komanduri** (1993) reforçou algumas das assertivas de Shaw, através de considerações dinâmicas.

Destro (1993) propôs uma propriedade intrínseca do material para caracterizar seu desempenho em usinagem. Seguiram-se, na execução deste trabalho, premissas sugeridas por **Cupini e Vilella**, 1986. Foram definidos três índices para sua quantificação, a saber:

I. REU-A: relacionado à força ativa, medida sem desgaste da ferramenta;

II. REU-B: relacionado ao desgaste da ferramenta. É definido como uma relação entre a massa desgastada da mesma e aquela removida do material na forma de cavaco. Portanto, trata-se de um índice adimensional;

III. REU: Produto de REU-A por REU-B. Significa o esforço, corrigido pelo parâmetro de desgaste, para um determinado volume removido de cavaco.

A existência de três índices prejudicava a confiabilidade e simplicidade da quantificação numérica da propriedade. Além disso, a determinação analítica da massa removida da ferramenta aumentava o custo dos ensaios, à medida em que são necessárias 8 decimais do quilograma para sensibilidade relativamente pequena. Enxergou-se que poderiam ser resumidos em apenas um parâmetro, prevendo medição da força simultaneamente com desgaste, conforme consta da proposta de norma do conceito e da metodologia de medição da nova propriedade, contida no Apêndice.

Capítulo 3

Resistência à Usinagem - Proposta Conceitual

3.1- Introdução

Para que se estabeleça uma propriedade dos materiais, deve-se definir um parâmetro de medição e uma metodologia para determinação do mesmo, de modo a quantificar a propriedade.

Por exemplo, na medição da dureza. Dureza é, por definição, resistência à penetração. Para metais, resistência à deformação plástica. Neste caso, o parâmetro envolvido é a relação entre a força total aplicada no teste e a área (escala Brinell) ou largura de penetração (escala Rockwell). Em linhas gerais, a metodologia do teste consiste em forçar a penetração de uma esfera de aço, ou de um prisma ou cone de diamante no material, a que se propõe determinar a propriedade.

Existe uma padronização específica para determinação da dureza entre as diversas escalas existentes. Podem-se citar: Rockwell (com subclasses A a V), Brinell, Knoop e Vickers, entre outras.

A capacidade intrínseca do material resistir ao processo de usinagem é revelada naturalmente, toda vez que o mesmo é submetido à remoção de cavaco, através de ferramenta mono ou multi cortante. É de se esperar que materiais de composição química ou propriedades mecânicas (tensão limite de escoamento, dureza, etc) diferentes, apresentem diferentes graus de resistir ao processo de usinagem, independente das condições do teste.

Por exemplo, o ferro fundido é usualmente usinado com geometrias negativas e metal duro classe K, enquanto, os aços ao carbono em geral, com ferramentas positivas e metal duro classe P. Quanto à necessidade de lubrificantes ou refrigerantes, recomenda-se a utilização de fluidos, por exemplo, na usinagem de ligas de alumínio em aplicações na indústria automotiva.

Percebe-se que, podem ser padronizados diversos testes para se medir a facilidade/dificuldade de se usinar um material: diferentes geometrias, materiais de ferramenta, condições operacionais, etc - que podem favorecer ou não um determinado grupo. Entretanto, indubitavelmente, um material revela, naturalmente, capacidade intrínseca de resistir à remoção de cavaco. Esta propriedade independe do parâmetro escolhido ou da metodologia empregada.

Ora, pontos semelhantes poder-se-iam questionar entre diversas escalas de dureza. Haja vista que esta propriedade pode ser medida com penetradores de esferas de aço inoxidável, cones ou prismas de diamante, entre outros. Existem escalas recomendadas para polímeros, aços, compósitos, etc.

Enfim, a quantificação numérica da propriedade dependerá do teste, mas é inegável a sua existência. Pois, no âmbito da metodologia padronizada, no que tange à propriedade proposta,

materiais dissimilares revelam, naturalmente, diferentes capacidades intrínsecas de resistirem ao processo de usinagem.

3.2 - Requisitos e Hipóteses Básicas

Neste ponto, detalham-se os requisitos. Ao mesmo tempo, começam a ser apresentadas as assertivas básicas em que se fundamentam as contribuições deste trabalho, em termos da concepção e do desenvolvimento de uma propriedade intrínseca do material.

Toda e qualquer propriedade dos materiais deve satisfazer os requisitos estipulados por Davies, 1992. A saber:

- I. Permitir caracterização do material, através de parâmetro(s);
- II. Estabelecer metodologia de medição do(s) parâmetro(s) envolvido(s);
- III. Permitir a seleção e especificação do material para aplicações práticas.

Portanto, uma propriedade que permita caracterizar materiais, classificando-os independentemente das condições a que serão submetidos e com resultados válidos, dentro de condições pré-estabelecidas para sua determinação.

Os requisitos supra-mencionados traduzem-se nos itens, que são apresentados na sequência.

3.2.1 - Caracterizar o Desempenho do Material em Usinagem

Ou seja, prever a facilidade ou dificuldade com que se é removido cavaco do material, de forma o mais geral possível, permitindo-se a caracterização do mesmo, através da definição do(s) parâmetro(s) de medição.

Ora, qual o parâmetro capaz de caracterizar o desempenho do material em usinagem?

Lembrando-se da definição de usinagem: "remoção de cavaco, utilizando ferramenta mono ou multi-cortante". Neste processo, os esforços mecânicos são responsáveis 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). Estão associados a uma força, cuja natureza provém, basicamente, da pressão normal do material recalcado e removido contra a superfície da ferramenta e do atrito. A saber: força de usinagem, que pode ser decomposta em forças de corte, de avanço e de profundidade, conforme seu produto escalar nas direções de corte, de avanço e ortogonal ao plano auxiliar de trabalho, respectivamente. Sendo que as duas primeiras destacam-se, pois, resumem a energia mecânica, que deve ser suprida pelos servo-motores da máquina, necessária para remover cavaco. O módulo de ambas corresponde à força ativa.

A caracterização, portanto, mais objetiva e direta do desempenho dos materiais em usinagem é pela quantificação dos esforços mecânicos envolvidos numa determinada operação,

em que determinado volume de cavaco foi removido, focalizando as forças de corte e ou de avanço.

Cumprе mencionar que decidiu-se por esforços mecânicos e não a aspectos de calor e temperatura, envolvidos no processo de usinagem, porque questões de calor e temperatura associam-se, mais diretamente, a aspectos que se relacionam com o material da ferramenta e seus mecanismos de desgaste, àqueles relacionados com o desempenho intrínseco do material em usinagem. E, também a medição dessas grandezas termodinâmicas em usinagem exige complexidade experimental, que escapam do compromisso de simplicidade, custo relativamente pequeno e confiabilidade da nova propriedade, a que se propõe este trabalho. Argumentação semelhante pode ser tecida com relação a eventuais outras grandezas de medição.

3.2.2 - Estabelecer metodologia de medição

Retornando à usinagem, e com toda a gama de avanços tecnológicos da área em mente, é de se esperar dificuldades para se estabelecer um teste universal de caracterização. Pois, neste caso, assim como ocorre na determinação da dureza, não seriam permitidas outras escalas.

Entre a ampla gama de processos de usinagem, que vai do serramento à usinagem química ou a sofisticadas operações de brunimento e lapidação, adotou-se o torneamento cilíndrico como operação universal para se medir a propriedade.

Isso se justifica pela simplicidade e caráter generalista da operação de torneamento em usinagem.

Atualmente, um dos únicos testes de usinabilidade, que pode ser utilizado para se caracterizar a usinabilidade de um material, é aquele proposto pela **AFNOR** (1981). Esse adota ferramenta de material aço-ferramenta 52100 de geometria fragilizante, para se garantir curta duração do teste.

Porém, a tendência da indústria é utilização de metal duro com cobertura, que permite padrão de torneamento mais contínuo de aços em geral e vida superior às ferramentas de metal duro convencionais e também, o nitreto cúbico de boro e diamante para aplicações em materiais de dureza superior a 50 HRC ou super-abrasivos e na usinagem de ultra-precisão.

Este trabalho, sem necessidade que sejam usinadas "várias toneladas" de um mesmo material, adotou o metal duro com cobertura. Isto foi possível, optando-se por condições severas de teste e pelo cômputo do desgaste simultaneamente ao esforço mecânico, conforme encontra-se explicado posteriormente.

Além disto, aliado às condições severas, proveram-se condições de usinagem, prevendo diferentes mecanismos de desgaste. Neste sentido, optou-se por ativar faixas de "trens de parâmetros de corte". Ou seja, "uma carga de valores de velocidade de corte e avanço", capaz de estimular mecanismos de desgaste básicos, solicitando o material com relação à remoção de cavaco, a fim de medir sua Resistência à Usinagem.

Este procedimento é semelhante a uma carga de tração aplicada num corpo para determinar seu limite de resistência, que tenta cobrir, na medida do possível, toda a região de deformações elásticas e plásticas do material, até a sua ruptura.

A metodologia do teste contempla, também, a utilização de máquinas-ferramenta convencionais para sua execução, não necessitando de equipamentos especiais para medição da propriedade, de modo a se constituir numa metodologia simples e de custo relativamente baixo.

E, além disso, objetiva permitir medição da propriedade a nível de confiança de 90%, o que representa um grande acréscimo de confiança, haja vista que os testes de usinabilidade apresentam, em sua maioria, reprodutibilidade inferior a 40% em média, segundo Erikson (1992). Em alguns casos, conforme trabalho de de Ardo & Garcia & Erikson (1993) atingem 50%.

Este nível de confiança é pouco compatível com as necessidades de engenheiros e pesquisadores que trabalham na P&D&F&CQ de materiais de corte fácil. Por isto, tentou-se suprir esta faixa de confiança, entre resultados obtidos com máquinas de diferentes projeto, localização e utilização.

3.2.3 - Campo de Aplicação

Conforme apresentado no capítulo 2, a propriedade de Resistência à Usinagem se constitui numa contribuição à indústria metalúrgica que se dedica à P&D&F&CQ de materiais de corte fácil e à indústria mecânica em geral, que utiliza estes materiais e deve verificar seu desempenho em processo de remoção de cavaco.

3.3 - Conceito e Definição da Nova Propriedade

Resistência à Usinagem é uma propriedade, naturalmente revelada pelo material, caracterizando seu desempenho, em termos da sua inerente dificuldade/facilidade quanto à remoção de cavaco.

Trata-se, portanto, de uma propriedade intrínseca ao material.

É medida pelo Número de Coppini¹¹, que representa a quantificação numérica da mesma. As forças de corte e de avanço correspondem, a princípio, aos parâmetros eleitos para sua determinação, cuja metodologia é estabelecida, detalhadamente, no próximo capítulo.

¹¹ Um tributo ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini.

Capítulo 4

Desenvolvimento de Metodologia para Medição da Propriedade

4.1- Introdução

No capítulo anterior, apresentou-se a existência objetiva de uma propriedade de caracterização de materiais à usinagem, que é quantificada pelo Número de Coppini.

No entanto, devem ser detalhados parâmetro de medição e respectiva metodologia para sua determinação. Este é o tema básico deste capítulo.

Posteriormente, foram executados ensaios preliminares, objetivando-se que fossem verificados:

I. Fatores de influência na metodologia, que poderiam comprometer a reprodutibilidade das medições;

II. Sensibilidade da metodologia proposta.

Resultados e comentários desses ensaios, também, encontram-se neste capítulo.

4.2- Definição do Parâmetro

Conforme discussões do capítulo anterior, as forças de corte e de avanço foram adotadas, à primeira vista, como parâmetros na medição da propriedade. Essas efetuam trabalho de usinagem e devem ser supridas por módulos de potência da máquina-ferramenta.

A força de corte, apesar de seu módulo ser superior à força de avanço, não é medida na direção preferencial, em que atuam fenômenos que influem de forma mais efetiva à formação de cavaco. Além disso, a frequência sensivelmente mais elevada na direção de corte, tende a aumentar a dispersão dos valores obtidos e tornar a medida "transparente" a pequenas variações, "cortando" a sensibilidade da medição. A medição da força de corte, ou seu cômputo na forma de força ativa, não permite a caracterização de fenômenos de usinagem, conforme **Eyada** (1994) e **Sandvik** (1994).

Visando otimizar a confiabilidade do teste e tendo em mente os aspectos abordados no parágrafo anterior, decidiu-se adotar apenas um parâmetro: força de avanço.

Foi escolhido, portanto o valor médio das forças médias de avanço registradas em cada etapa, considerando a evolução do desgaste.

O cômputo do desgaste, indiretamente, pelo registro da evolução das forças médias de avanço, implicou na eliminação de mais uma variável (descrita no final do capítulo 2), a saber: a medição analítica da massa desgastada da ferramenta. Isto foi positivo na tentativa de minimização de parâmetros, a fim de maximizar a confiabilidade da metodologia.

O Número de Coppini (NC) é definido, então, pela equação (4.1), como sendo o valor

médio entre as forças médias de avanço (F_{fi}), associadas a cada etapa "i" num teste que prevê um número total (N) de 32 etapas.

$$NC = \sum_{i=1}^N F_{fi} / N \tag{4.1}$$

Uma etapa corresponde à usinagem de um corpo-de-prova (num total de 8) do material a ser testado. Os mesmos são submetidos a 4 situações com diferentes condições operacionais, resultando, portanto, nas 32 etapas supra-mencionadas.

4.3- Metodologia de Medição

Seguem-se alguns aspectos que tiveram de ser fisicamente e tecnicamente considerados no procedimento de determinação do Número de Coppini.

4.3.1- Padronização preliminar dos diâmetros dos corpos-de-prova

Tentou-se abranger a faixa comercial (métrica SI) de barras de aço e ligas. Por isso, estipulou-se um determinado diâmetro ao corpo-de-prova do material a ser testado, conforme diâmetro bruto da barra fornecida, e especificando-se, para cada um dos mesmos, uma respectiva Classe de Diâmetro. A tabela 4.1 indica esses elementos. Deve-se ressaltar um sobremetal mínimo de 1 mm, para garantir a limpeza da superfície dos corpos-de-prova, evitando que o teste seja feito no diâmetro correspondente àquele de fornecimento da barra, independente desta ter sido laminada, trefilada, etc.

Tabela 4.1- Diâmetro [mm] da Barra, do Corpo-de-Prova e Classe de Diâmetro

Diâmetro da barra [mm]	Diâmetro do corpo-de-prova [mm]	Classe de Diâmetro
até 27	20	K
de 27 até 32	25	KL
de 32 até 37	30	M
de 37 até 42	35	ML
de 42 até 47	40	N
de 47 até 52	45	NL
de 52 até 57	50	P
de 57 até 62	55	PL
de 62 até 67	60	Q
de 67 até 72	65	QL
de 72 até 77	70	R
de 77 até 82	75	RL
maior que 82	80	S

4.3.2- Padronização da Ferramenta

Conforme discussões do capítulo 3, o material da ferramenta adotado foi o metal duro com cobertura, pois, está associado à vida mais longa da ferramenta e padrão de torneamento

mais contínuo e também, porque as pastilhas sem cobertura começaram a perder um pouco de espaço na indústria mecânica, devido ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de deposição de cerâmicos, diminuindo o custo de produção das ferramentas com coberturas.

Foi escolhida geometria negativa, pois é capaz de impor mais deformação à formação de cavaco e portanto, proporcionar condições severas de usinagem, com níveis de desgaste compatíveis aos requisitos da caracterização intrínseca do material à usinagem.

As classes Sandvik básicas relativas a metal duro com cobertura são: GC 415, GC 425, GC 435 e GC 235.

As três primeiras são recomendadas para desbaste com taxas de avanço moderada. A última é adequada para operações que requerem tenacidade, velocidades até 200 m/min e condições desfavoráveis: avanços pesados e geometrias negativas. Além disto, a sua espessura de revestimento é de apenas 3 μm (em oposição a 8 μm na classe GC 435), permitindo sensibilidade ao desgaste, relativamente maior.

Adotou-se, portanto, a classe GC 235.

Quanto à forma da ferramenta, a triangular foi eleita, devido à sua robustez, em relação às losangulares e rigidez de fixação, em relação às quadradas, evitando, assim, vibrações espúrias em condições de elevados esforços de usinagem: geometria negativa sob condições severas.

Traduzindo os aspectos considerados em nomenclatura internacional, adotou-se a ferramenta (ISO) TNMG 16 04 04, classe GC 235 (Sandvik, 1994), devendo ser fixa em suporte (ISO) PTG NR 2532, BT 25 (Sandvik, 1992). Mais detalhes encontram-se na proposta de norma, no Apêndice.

Cumprir registrar que a padronização especificada segue a necessidade de se estabelecer uma proposta de norma. Caso, esta proposta venha a ser aceita pela ABNT, o instituto competente (INMETRO) deve fixá-la de forma conveniente e em acórdão com respectivo comitê responsável.

4.3.3- Padronização das Condições Operacionais

Para que fossem garantidas as condições severas de usinagem, foram adotados:

I. Velocidades de corte médias na faixa de 100 a 200 m/min;

II. Avanços superiores a 0,50 mm/volta.

Estes valores mostraram-se compatíveis com recomendações de catálogo (Sandvik, 1994) do fornecedor de ferramentas, haja vista, tratar-se de critérios de escolha das mesmas.

Fixando-se 3000 rpm como rotação limite e calculando-se a velocidade máxima para o menor diâmetro do corpo-de-prova (20 mm, associado à classe de diâmetro K), obteve-se o valor de 180 m/min.

Conforme discussão no capítulo 3, dever-se-ia tentar o estímulo de vários mecanismos de desgaste. Para tal, foi desenvolvido o conceito de "módulos de carregamento em usinagem". Estes significam, simplesmente, "cargas" constituídas por um par ordenado de valores de velocidade de corte e de avanço, a que o material deve ser submetido. Denominou-lhes "séries", por se tratar de um conjunto de condições operacionais.

Considerou-se, também, que uma operação de usinagem, na grande maioria dos casos, restringe-se a não mais que poucos passes, para que se minimize o sobremetal a ser removido.

Este fato conduziu a um compromisso entre estímulo de mecanismos de desgaste e pequeno número de passes. Foram arbitradas apenas 4 séries com as velocidades de 180 m/min, 160 m/min, 140 m/min e 120 m/min.

Lembrando-se da dependência linear de a_p com esforços mecânicos e contribuindo para simplificar o ensaio, sem comprometer sua consistência, estipulou-se a_p constante e igual a 1 mm para toda e qualquer etapa do teste.

Restava, então, estabelecer um critério para cálculo do avanço.

Concebeu-se o conjunto composto pela ferramenta-peça como um volume de controle. Percebeu-se que a contração deste volume correspondia ao fluxo mássico de saída do cavaco. Porque, apenas este, transportando calor e massa, cruzava as fronteiras do conjunto.

Da Termodinâmica Clássica, aplicando-se a Lei da Continuidade neste volume de controle, para que o fluxo mássico de cavaco ou vazão volumétrica de cavaco fosse constante: o produto ($a_p \times f \times v_c$) devia ser constante.

Adotou-se avanço de 0,5 mm/volta na série com a velocidade de 180 m/min. Portanto, o fluxo de cavaco removido foi de $f \times v = 0,5 \text{ mm/volta} \times 180 \text{ m/min} = 90 \text{ m.mm/volta.min}$ nesta primeira série.

Com a hipótese supracitada e os respectivos valores de velocidade de corte, calculou-se o valor dos avanços: 0,5625 mm/volta; 0,6429 mm/volta e 0,7500 mm/volta, respectivamente, para a segunda, terceira e quarta séries.

Cumprе mencionar, que paralelamente às recomendações do catálogo do fabricante da ferramenta, procurou-se estabelecer analogia com o trabalho de Destro (1993), em que as condições médias utilizadas na determinação dos índices eram: $V_c = 140 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ e $f = 0,2 \text{ mm/volta}$. Lembrando-se, entretanto, que se tratava de ferramenta de metal duro sem cobertura naquele caso e, portanto, para impor taxa de desgaste equivalente em ferramenta com cobertura, optou-se por valores mais elevados de avanço.

4.3.4- Padronização dos Corpos-de-Prova

Para cálculo das dimensões do corpo-de-prova, a princípio, foram empregados dados do trabalho de Destro (1993), a saber, volume total de cavaco removido na caracterização do material: 202 670 mm³. Aplicando-se a equação (4.2), calculou-se o comprimento total de usinagem (L_{tot}) de 1008 mm. Este comprimento correspondia àquele necessário para se remover o volume de cavaco especificado em 4 passes num corpo-de-prova de diâmetro inicial e final de 20 mm e 12 mm, respectivamente.

$$L_{tot} = 4 \times V_{tot} / [\pi \times (D_1^2 - D_N^2)] \quad (4.2)$$

Em que:

L_{tot} = comprimento total usinado;

V_{tot} = volume total de cavaco removido;

D_1 = diâmetro inicial do corpo-de-prova;

D_N = diâmetro final do corpo-de-prova.

Objetivando-se que não fossem usados corpos-de-prova de comprimento superior a 150 mm, que poderia causar dificuldades ao manuseio (uma vez que o teste contempla quatro séries de diferentes condições de usinagem) e, eventualmente, comprometer a validade da

medida e ou simplicidade da metodologia de ensaio, decidiu-se por oito corpos-de-prova por medição. E, então, o comprimento fundamental do corpo-de-prova na classe de diâmetro K seria de 126 mm.

Elaborou-se, para fim de cálculo das dimensões dos corpos-de-prova, a hipótese de volume de cavaco removido constante por etapa do ensaio. Isto era necessário, para permitir comparações entre as diversas classes de diâmetros para um mesmo material.

Neste caso, devido à variação do diâmetro durante os 4 passes, dever-se-ia projetar corpos com comprimentos escalonados.

Optou-se por aqueles com a extremidade escalonada, para se garantir o volume de cavaco removido constante em cada etapa. A razão da padronização em se utilizar corpos-de-prova com extremidade escalonada é o compromisso com sua fixação na máquina. Pois, são previstas 31 (trinta e uma) trocas de peça, necessárias para execução do *Teste de Medição*. Caso contrário, poder-se-ia decidir pelo escalonamento ao centro.

Voltando-se ao corpo-de-prova na classe K (diâmetro de 20 mm), adotou-se o comprimento de 126 mm para o diâmetro de 14 mm, de modo que o volume de cavaco removido nesta etapa seria de 5 146 mm³. Isto pode ser verificado, aplicando-se a equação (4.2) entre diâmetros de 14 mm e 12 mm, na dimensão de comprimento citada.

Faz-se interessante de observar que esta constante é bastante semelhante a 5 230 mm³, que pode ser obtida, discretizando-se o ensaio proposto por **Destro** (1993) em partições análogas à metodologia atual.

Assumindo-se a constante de 5 146 mm³ de volume de cavaco removido em cada etapa, pode-se calcular o comprimento que deve ser usinado por corpo, através da equação (4.3) e, conhecendo-se os diâmetros na etapa "i" e na sua posterior "i+1".

$$L_i = 4 \times V_i / [\pi \times (D_i^2 - D_{i+1}^2)] \quad (4.3)$$

Foram obtidos os valores da tabela 4.2, em que as dimensões, associadas a cada classe de diâmetro, correspondem ao comprimento (L_i), que deve ser usinado para determinado diâmetro inicial (D_i), associados à respectiva série i.

Deve-se lembrar que, neste caso, L corresponde ao comprimento útil de usinagem.

As dimensões L1, D1, L2, D2, L3, D3, L4 e D4 podem ser visualizadas no desenho do corpo-de-prova padrão (Figura 1, no Apêndice).

Tabela 4.2- Dimensões [mm] do Corpo-de-Prova por Classe de Diâmetro

Diâmetro Comprimento	Classe de Diâmetro												
	K	KL	M	ML	N	NL	P	PL	Q	QL	R	RL	S
D1	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
L1	86	68	56	48	42	37	33	30	28	26	24	22	21
D2	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78
L2	96	74	61	51	44	39	35	32	29	26	24	23	21
D3	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76
L3	109	82	66	55	47	41	36	33	30	27	25	23	22
D4	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74
L4	126	91	71	59	50	43	38	34	31	28	26	24	22

Percebe-se que as 13 classes de diâmetros atuam de forma semelhantes às classes de ajustes e tolerâncias em tecnologia mecânica. Porém, o problema é diferente, porque o

diâmetro previsto para cada classe, implica na correção do comprimento de usinagem, a fim de que o volume de cavaco removido seja constante em cada etapa, independente do diâmetro do corpo-de-prova.

E, ainda, lembrando-se que as condições de avanço foram calculadas conforme valor da velocidade de corte em cada série, a fim de que o fluxo de cavaco removido fosse mantido, também, constante.

4.3.5- Metodologia Propriamente Dita

A metodologia de determinação do Número de Coppini, portanto, contempla as condições de usinagem da tabela 4.3. Lembrando-se que a profundidade de usinagem é constante para todas e quaisquer etapas, com o valor de 1,0 mm.

Tabela 4.3 - Condições de Usinagem

Série Número	v_c [m/min]	f [mm/volta]
1	180	0,5000
2	160	0,5625
3	140	0,6429
4	120	0,7500

A metodologia, independente da classe de diâmetro escolhida (dado o diâmetro bruto da barra de material a ser testado), consiste na usinagem de 8 corpos-de-prova que são submetidos a 4 séries. A terminologia "séries", conforme definição anterior, corresponde a pares de avanços e velocidades de corte.

Na série 1, os oito corpos-de-prova devem ser usinados e a força de avanço média deve ser registrada para cada corpo, relacionada a cada uma das etapas do teste.

Posteriormente, os mesmos são submetidos à série 2, anotando-se, novamente, a força média de avanço para cada etapa. E, idem às série 3 e 4.

O Número de Coppini é calculado, como sendo o valor médio entre as forças médias de avanço, observadas em cada uma das 32 etapas do teste, conforme equação (4.1).

4.4- Ensaio Preliminar I (EP 1)

No EP-1, foi determinado o Número de Coppini do aço ABNT 1212, para várias fixações e diâmetros dos corpos-de-prova. O objetivo era verificar a influência destes elementos na medição da propriedade, com a composição do material fixada, apesar de que tivessem sido elaboradas hipóteses no desenvolvimento da metodologia que contribuíssem na minimização da influência do segundo fator, mencionado no início do parágrafo.

As fixações do porta-ferramenta à torre da Máquina Romi Cosmos 30, situada no Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, foram executadas, por dispositivo e são descritas, a seguir:

I. Fixação I (Fix. I): corresponde àquela com balanço mínimo;

II. Fixação II (Fix. II): corresponde àquela, em que o porta-ferramenta ficou 25 mm não totalmente apoiado no dispositivo de fixação à torre da máquina. Portanto, balanço de 25 mm do porta-ferramenta.

III. Fixação III (Fix. III): corresponde àquela, em que o dispositivo de fixação ficou cerca de 25 mm não totalmente preso à torre da ferramenta. Portanto, balanço de 25 mm do dispositivo.

Foram utilizados corpos-de-prova do material ABNT 1212. Foram preparados nos diâmetros de 55 mm, 45 mm e 35 mm e 25 mm, correspondentes às classes PL, NL, ML e KL, respectivamente. As dimensões relativas a estas classes constam da tabela 4.2 e encontram-se ilustradas na Figura 1 do Apêndice.

Executaram-se, então, os testes. Resultados completos das medições da força de avanço encontram-se nas tabelas do anexo B, indicadas pela tabela 4.4. O valor do Número de Coppini, calculado para cada ensaio, encontra-se na tabela 4.5.

Tabela 4.4- Indicação dos Resultados do EP 1

Diâmetro *	Fixação	Contra-Ponto	Tabela **
55	I	SIM	B1.1A
55	II	SIM	B1.2A
55	III	SIM	B1.3A
55	I	NÃO	B1.1B
55	II	NÃO	B1.2B
55	III	NÃO	B1.3B
45	I	SIM	B2.1A
45	II	SIM	B2.2A
45	III	SIM	B2.3A
45	I	NÃO	B2.1B
45	II	NÃO	B2.2B
45	III	NÃO	B2.3B
35	I	SIM	B3A
35	I	NÃO	B3B
25	I	SIM	B4

* [mm]; ** número da tabela relativo ao Anexo B

Tabela 4.5 - Número de Coppini [kgf] - EP 1

Dia [mm]	Fixação	Com Contra Ponto		Sem Contra Ponto	
		Média	Desvio	Média	Desvio
55	I	48,5	0,23	48,5	0,25
55	II	50,5	0,20	50,4	0,22
55	III	49,3	0,19	49,5	0,25
45	I	48,5	0,16	48,5	0,19
45	II	50,5	0,18	50,1	0,23
45	III	50,2	0,13	49,3	0,21
35	I	48,6	0,16	48,6	0,26
25	I	49,0	0,13	-	-

Para analisar a influência da montagem com ou sem contra-ponto, elaborou-se um teste de inferência estatística entre as amostras obtidas, dentro de determinada fixação com e sem contra-ponto, para os diâmetros de 55 mm e 45 mm. Calcularam-se valores de t_0 , utilizando dados experimentais da tabela 4.5, através das equações (4.4) e (4.5).

$$t_0 = \frac{\overline{X} - \overline{Y}}{Sp \cdot (1/N_1 + 1/N_2)^{1/2}} \tag{4.4}$$

$$Sp = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \tag{4.5}$$

Estas equações encontram-se detalhadas no Anexo C.
Obtiveram-se os valores da tabela 4.6, para as respectivas fixações com e sem contra-ponto.

Tabela 4.6 - Valores de t_0 - Inferência sobre Montagens com e sem Contra-Ponto

Diâmetro	Fix. I	Fix. II	Fix. III
55mm	0	0,662	1,29
45mm	0	2,77	7,65

Adotando-se um intervalo bilateral de confiança de 95%, $N_1 = 5$ observações, $N_2 = 3$ observações: $t_{6,0,025} = 2,447$. Verificou-se, neste caso, que existem diferenças significativas no diâmetro de 45 mm para fixação II com e sem contra-ponto e, idem, para fixação III.

Isto implica na padronização da existência ou não de contra-ponto para execução do teste de determinação do Número de Coppini. Por força das classes de diâmetro, cuja relação comprimento/diâmetro do corpo-de-prova é superior a três, adotou-se montagem com contra-ponto para determinação do Número de Coppini.

Executou-se, também, um teste de inferência estatística sobre a existência de diferenças significativas entre medições nos diâmetros de 55 mm e 45 mm, para as diversas fixações com contra-ponto. Adotou-se como referência a medição no diâmetro de 55 mm e utilizando as equações (4.4) e (4.5), detalhadas no anexo C, obtiveram-se os valores de t_0 , indicados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores de t_0 - Inferência entre Fixações nos Diâmetros de 55 mm e 45mm

Dia. [mm]	Fix. I	Fix. II	Fix. III
55	Referência	14,7	6,00
45	0	15,3	14,4

Para intervalo bilateral de confiança de 95%, $N_1 = N_2 = 5$ observações, obteve-se $t_{8,0,025} = 2,306$.

O teste indicou, portanto, que existe diferença significativa a 95% de confiança nas medições referentes aos diâmetros de 55 mm e de 45 mm entre a fixação I e as fixações II e III. Posto que todos os valores de t_0 obtidos são maiores que 2,306.

Portanto, a influência da fixação do porta-ferramenta à torre da máquina implicou em diferenças significativas entre as medições. De modo que, a importância de se garantir uma fixação adequada comprovou ser fundamental para estabilidade da quantificação numérica da propriedade.

A contribuição deste resultado, obtido nesse ensaio preliminar, culminou na necessidade de calibração da máquina-ferramenta, previamente, à execução das medições. Daí, o desenvolvimento e implementação do *Teste de Calibração*, que é apresentado na Proposta de Norma de Medição da Propriedade de Resistência à Usinagem, no Apêndice.

Executando-se um teste de inferência, restrito no campo da fixação I, obtiveram-se os valores de t_0 indicados na tabela 4.8, considerando toda a faixa de diâmetros ensaiada.

O diâmetro de 25 mm, portanto, impediu a afirmação: "o diâmetro não influi na medição". Pois, não permitiu, a nível de 95% de confiança, constatação estatística da inexistência de diferenças significativas entre as medidas para os diferentes diâmetros na fixação I. Visto que o valor de t_0 , obtido para este diâmetro, é maior que $t_{8,0,025} = 2,306$.

Tabela 4.8 - Valores de t_0 - Inferência sobre Influência do Diâmetro na Fixação I

Dia. [mm]	Fix. I
55	Referência
45	0
35	0,798
25	4,23

Portanto, assume-se que o teste foi inconclusivo a respeito da influência do diâmetro na determinação do Número de Coppini, necessitando-se de verificação ulterior. Além disso, ao se executar EP 1, tiveram que ser implementadas várias adaptações para se usar o corpo-de-prova de 25 mm, que eventualmente, comprometeram o conjunto de dados observados.

4.5 - Ensaio Preliminar 2 (EP 2)

O objetivo deste ensaio foi verificar a sensibilidade da metodologia de medição.

Neste sentido, tentou-se a caracterizar o desempenho em usinagem do aço ABNT 12L14, submetido a diferentes processos de conformação mecânica, partindo-se de amostras com mesma composição química. A seguir, a listagem com respectivos códigos dos materiais utilizados neste ensaio:

I. Aço ABNT 1212 - laminado a quente (mat. 01);

II. Aço ABNT 12L14 - trefilado 25% (mat. 21);

III. Aço ABNT 12L14 - trefilado 15% (mat. 22);

IV. Aço ABNT 12L14 - laminado a quente (mat. 23).

Utilizou-se a classe de diâmetro K (corpo-de-prova de 20 mm), visto que o diâmetro bruto das barras disponíveis encontrava-se na faixa de 23,7 mm a 25,7 mm.

Foram executadas três medições para cada material.

Resultados completos das medidas da força média de avanço encontram-se nas tabelas B5, B6-A, B6-B e B6-C no anexo B. Os valores do Número de Coppini para os respectivos materiais são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9- Número de Coppini [kgf] - EP 2

Material	Média	Desvio
Mat. 01	48,5	0,13
Mat. 21	44,0	0,12
Mat. 22	43,3	0,13
Mat. 23	42,4	0,13

Elaboraram-se testes de inferência sobre a existência de diferença significativa entre as medições mais próximas na tabela 4.9, tomadas duas a duas. Obtiveram-se os valores de t_0 , indicados na tabela 4.10, calculados pelas equações (4.4) e (4.5).

Para intervalo bilateral de confiança de 95% e $N_1 = N_2 = 3$ observações, o valor de $t_{0,025,4}$ é 2,776. Isto indica que existe diferença significativa entre as medições da tabela 4.9, tomadas duas a duas.

Tabela 4.10 - Valores de t_0 - Inferência sobre Diferenças entre Medições

Mat. 21	30,4
Mat. 22	20,3
Mat. 23	9,32

Comprovando, portanto, a sensibilidade da proposta de medição da propriedade. Pois, foi capaz de caracterizar comportamento intrínseco em usinagem de um material de mesma composição química, porém submetido a diferentes processos de conformação.

4.6 - Cálculo Preliminar do Número Mínimo de Observações

Dos resultados experimentais obtidos em EP 1 e EP 2, sumarizados nas tabelas 4.5 e 4.9, respectivamente, pode-se calcular $N_{\min}$ iterativamente. Utilizando-se a equação (4.6), devidamente detalhada no Anexo C.

$$N_{\min} = \frac{(t_{\alpha/2})^2}{d^2} (s_1^2 + s_2^2) \quad (4.6)$$

Valores de $N_{\min}$, calculados para diversas faixas de erro tolerável (D) e confiabilidade (C) encontram-se na tabela 4.11, a seguir.

Tabela 4.11 - Número Mínimo de Observações (N_{min})

D[%]	C[%]	N_{min}
20	90	1
	95	1
	99	1
10	90	1
	95	1
	99	2
5	90	1
	95	3
	99	5

Adotou-se, então, um e apenas um ensaio para determinação do Número de Coppini, considerando-se erro máximo na faixa de 10% em intervalo bilateral de confiança de 95%.

A priori, essa faixa de incerteza qualifica instrumentos de medição como grosseiro. Entretanto, no caso da Resistência à Usinagem, trata-se de um valor muito positivo, haja vista que, atualmente, a indústria emprega testes de usinabilidade para desenvolver materiais com reprodutibilidade inferior a 40% na maioria dos casos, conforme encontra-se registrado nos trabalhos de **Eriksson** (1992) e **de Ardo & Garcia** (1993).

O valor da amostragem mínima é re-calculado no capítulo 5, utilizando resultados obtidos de acordo com a proposta de normalização, contida no Apêndice.

Capítulo 5

Procedimento Experimental Apresentação e Discussão dos Resultados

5.1 - Material

5.1.1 - Barras Laminadas

Foram utilizados aços de corte fácil: ABNT 1212 e ABNT 12L14 e também, aço carbono ABNT 1045. Estes materiais foram fabricados em fornos elétricos.

As dimensões das barras eram:

I. Diâmetros: 25,4 mm e 67,6 mm;

II. Comprimento: 3.000 mm.

Composição química, dureza e índice de Usinabilidade (ASM, 1980) dos materiais, que foram ensaiados, constam da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades & Composição Química

Composição Química [%]	Material ABNT		
	1212	12L14	1045
Carbono	0,11	0,13	0,48
Manganês	0,80	0,90	0,80
Fósforo	0,10	0,06	0,02
Enxofre	0,13	0,30	0,02
Chumbo	-	0,25	-
Dureza [HBn]	60	50	140
Índice de Usinabilidade [%]	100	160	56

Foram ensaiados corpos-de-prova nos diâmetros de 20 mm e de 60 mm. Correspondem às classes de diâmetros K e P. Formas e dimensões dos corpos-de-prova podem ser verificados na Figura 1 e tabela 5 do Apêndice.

A tabela 5.2 fornece o número de corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 5.2 - Número de Corpos-de-Prova

Material ABNT	Número de corpos-de-prova	
	Diâmetro 20mm	Diâmetro 60mm
1212	201	80
12L14	104	80
1045	64	64

5.2 - Equipamentos

Foram utilizadas 5 máquinas, a saber:

I. Traub, modelo TND 360 (**Traubomatic**, 1990) - localização: Unitau/Laboratório de Processos de Fabricação, Taubaté. É simbolizada por Máquina I neste trabalho;

II. Romi, modelo Cosmos 30 (**Romi**, 1985)- localização: Unicamp/Laboratório de Automação e Usinagem, Campinas. É simbolizada por Máquina II neste trabalho;

III. Index, modelo GE65 (**Index**, 1989)- localização Index do Brasil S/A, Sorocaba. É simbolizada por Máquina III neste trabalho;

IV. Nardini, modelo GPR II (**Nardini**, 1991)- localização: Indústrias Nardini S/A, Americana. É simbolizada por Máquina IV neste trabalho;

V. Romi, modelo ECN 40/II - localização Nicola Rome Ind. & Com Ltda., Mococa. É simbolizada por Máquina V neste trabalho.

Os anos de fabricação das máquinas são 1990, 1983, 1989, 1995 e 1961, respectivamente. Todos estes equipamentos são tornos CNC. Porém, as Máquinas IV e V não permitiam variação contínua de velocidade, permitindo apenas valores discretos de rotações fixas disponíveis.

5.3 - Descrição dos Testes

A Máquina I foi escolhida como máquina-referência. Isto é justificado porque esta encontrava-se em laboratório, diferentemente das Máquinas III, IV e V. E, com relação à Máquina II, que, também se trata de uma máquina de laboratório, a Máquina I é de fabricação mais recente.

A princípio, foram executadas 9 (nove) ensaios de medição da força média de avanço na referida máquina, sob as condições do *Teste de Calibração*. O objetivo era obter dados, que viessem a se constituir um depósito de valores padrão, sobre os quais, poder-se-ia proceder a estabilização das demais máquinas. Ou seja, permitir a calibração dessas em relação à referência. Cumpre mencionar que estes valores são de natureza específica para constatação da propriedade de Resistência à Usinagem, a nível de elaboração da proposta de norma. Posteriormente, caso esta proposta seja aceita, um organismo competente (INMETRO) deve estabelecer os valores-padrão. Com os valores-padrão obtidos, iniciou-se a tentativa de se estabilizar as quatro máquinas. Para tanto, tentaram-se várias fixações e adequações, até que as medidas pudessem ser reproduzidas pelas máquinas com confiança da ordem de 95%. O procedimento executado é descrito detalhadamente para cada uma das máquinas na sequência.

Após a calibração, foram realizados 5 ensaios de medição do Número de Coppini para os materiais ABNT - 1212, -12L14 e -1045 nas Máquinas I e II, para os diâmetros de 20mm e de 60mm.

Nas máquinas localizadas em indústrias (Máquinas III, IV e V) decidiu-se fazer, no mínimo, dois ensaios de medições da propriedade para os materiais ABNT 1212 e 12L14, caso pudessem ser aferidas.

5.4- Teste de Calibração

5.4.1- Máquina I

Esta máquina localizava-se na Universidade de Taubaté (Unitau), campus de Engenharia Civil, Engenharia Mecânica, Física e Química, no Laboratório de Processos de Fabricação.

A data de fabricação é de 1990. O comando numérico é TX 8. Permite rotações até 3500 rpm a 40 CV de potência.

Foi adotada como máquina referência para execução do *Teste de Calibração*, conforme discutido no início.

O porta-ferramenta teve que ser fresado, para que fosse fixado na torre, através de parafusos, na posição de balanço mínimo da ferramenta. A fixação por parafusos garantiu único posicionamento de suporte na máquina.

Os resultados obtidos, seguindo-se o *Teste de Calibração* (contido no Apêndice), encontram-se na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados do Teste de Calibração - Máquina I

Cdp Número	Valores de Ff [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	42	60	42	60	43	61
2	42	61	43	61	43	61
3	43	60	43	60	43	61
4	42	60	42	60	42	61
5	42	60	42	61	43	61
6	43	61	43	61	43	62
7	42	60	42	60	43	61
8	42	60	42	60	43	61
9	42	60	42	60	43	61
Média	42,2	60,2	42,3	60,3	42,9	61,1
Desvio	0,15	0,15	0,17	0,17	0,11	0,11

Os valores-padrão ou de referência, que correspondem às médias dos valores obtidos na tabela 5.3, constam na tabela 5.4. Sobre estes valores, as demais máquinas devem comprovar estabilidade a 95% em intervalo bilateral de confiança. Lembrando-se que, os valores da tabela 5.4 foram obtidos de uma amostra, constituída por 9 observações.

Tabela 5.4 - Valores-Padrão para Calibração

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Média	42,2	60,2	42,3	60,3	42,9	61,1
Desvio	0,15	0,15	0,17	0,17	0,11	0,11

Verificou-se a amostragem mínima ($N_{\min}$) para confiança de 95%, com erro aceitável de 10%. Utilizando-se a equação (5.1), obtiveram-se os valores contidos na tabela 5.5 para cada passe respectivo.

$$N_{\min} = \left(\frac{s \cdot t_{a/2}}{d} \right)^2 \quad (5.1)$$

Esta equação encontra-se detalhada no Anexo C.

Tabela 5.5 - Número Mínimo de Amostras ($N_{\min}$) para Calibração

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
N	1	2	2	1	1	1

5.4.2- Máquina II

Esta máquina localizava-se na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), na Faculdade de Engenharia Mecânica, no Laboratório de Automação e Usinagem.

A data de fabricação é de 1983, comando numérico Mach 2.0, permite rotações de até 3000 rpm a 30 CV.

Adotando-se a Fixação I (Desenhos A.1, A.2 e A.3 no Anexo A), obtiveram-se os valores da tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Teste de Calibração - Máquina II

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	42	60	42	61	43	62
2	41	60	42	60	42	61
3	42	60	43	61	43	61
Média	41,7	60	42,3	60,7	42,7	61,3
Desvio	0,33	0	0,33	0,33	0,33	0,33

Calculando-se t_0 , através das equações (5.2) e (5.3), obtiveram-se os valores da tabela 5.7, ao se fazer inferência sobre a diferença entre a média desta amostra e aquela relativa aos valores-padrão (tabela 5.4), para os respectivos passes.

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{Sp.(1/N_1 + 1/N_2)^{1/2}} \quad (5.2)$$

$$Sp = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (5.3)$$

Estas equações encontram-se detalhadas no Anexo C.

Tabela 5.7 - Valores de t_0 - Inferência sobre Médias (tabelas 5.6 e 5.4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
t_0	2,59	2,25	0	2,83	1,69	1,69

Percebe-se, através da comparação entre os valores de t_0 da tabela 5.7 e $t_{0,025;10} = 2,228$, que a máquina não está estabilizada a 95% de confiança, devido a P1 e P2.

Executou-se uma nova série, adotando-se a Fixação II (Desenhos A.1, A.2 e A.3 no Anexo A). Obtiveram-se os valores da tabela 5.8, para cada passe, respectivamente.

Tabela 5.8 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina II

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
4	39	57	39	57	40	58
5	38	55	38	56	39	57
6	38	56	38	56	39	57

Percebeu-se, visualmente, a não estabilidade desta amostra com os valores-padrão (tabela 5.4).

Então, fez-se outra amostragem variando-se a fixação da ferramenta, buscando aferir a máquina. Tratou-se da Fixação III (Desenhos A.1, A.2 e A.3 no Anexo A). Os valores medidos encontram-se na tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina II

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
7	41	62	42	62	43	63
8	42	61	43	61	44	62
9	42	62	42	63	43	63
Média	41,7	61,7	42,7	62,0	43,3	62,7
Desvio	0,33	0,33	0,33	0,57	0,33	0,33

Estimou-se a inferência estatística sobre a igualdade entre médias desta amostra e as médias-padrão, utilizando-se as equações (5.2) e (5.3). Obtiveram-se valores da tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Valores de t_0 - Inferência sobre médias (tabelas 5.9 e 5.4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
t_0	3,76	11,3	2,83	12,0	3,38	13,5

Pelos valores de t_0 obtidos, todos superiores a $t_{0,025;10} = 2,228$, pode-se rejeitar a estabilidade da máquina a nível de significância de 95%.

Tentou-se, então, outra montagem, que correspondeu à Fixação IV (Desenhos A.1, A.2 e A.3 no Anexo A). Obtiveram-se os valores da tabela 5.11.

Calculou-se t_0 , por (5.2) e (5.3), sobre a inferência da existência de diferenças significativas entre as medidas-padrão e aquelas da tabela 5.11. Obteve-se a tabela 5.12, que comprova estabilidade da máquina, porque os valores de t_0 obtidos foram inferiores a $t_{0,025;11}=2,201$.

E, finalmente conseguiu-se aferir a Máquina II.

Cumpra comentar que esta fixação, corresponde à ideal, pois apresenta balanço mínimo (Desenhos A.1, A.2 e A.3 no Anexo A).

Observou-se que a aplicação do *Teste de Calibração* não se tratava de um procedimento trivial, pois, há necessidade de que sejam experimentadas várias fixações, até que se consiga a mais adequada, capaz de reproduzir os valores-padrão e qualificar a máquina para determinação do Número de Coppini.

Tabela 5.11 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina II

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
10	42	60	42	60	43	61
11	42	60	43	61	43	61
12	42	60	42	60	43	61
13	43	61	43	61	43	62
Média	42,3	60,3	42,5	60,5	42,8	61,3
Desvio	0,25	0,25	0,29	0,29	0,25	0,25

Tabela 5.12 - Valores de t_0 - Inferência sobre Médias (tabelas 5.11 e 5.4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
t_0	0,91	0,91	1,59	1,59	1,01	2,07

Entretanto, não se pode garantir a qualificação de toda e qualquer máquina, pois nem toda máquina presta-se para medição da propriedade de Resistência à Usinagem.

5.4.3 - Máquina III

Localizava-se na fábrica da empresa Index do Brasil SA em Sorocaba-SP. Era utilizada para a execução de testes e para usinagem de material abrasivo, principalmente.

A data de fabricação é de 1989. Comando Numérico: Index, permitindo rotações até 4000 rpm e potência de 20 CV. Comportava até 14 ferramentas. Como demais máquinas analisadas até agora, permitia variação contínua de velocidade.

Devido às dimensões do porta-ferramentas e ao fato desta máquina possuir torre traseira, a única alternativa para se fixar a ferramenta foi, a princípio, através de um dispositivo. Este dispositivo, de dimensões relativamente exageradas e com folgas, estava longe de ser a fixação mais adequada.

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 5.13, a seguir.

Tabela 5.13 - Teste de Calibração - Máquina III

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	45	65	45	65	46	66
2	46	66	46	66	47	67
3	45	65	45	66	45	66
4	45	65	45	65	46	66
5	45	65	45	65	46	66

Visualmente, percebeu-se que os valores afastavam-se do padrão. Indicando, portanto, que a máquina não estava estabilizada.

Posteriormente, utilizou-se um dispositivo mais simples, proporcionando uma fixação rígida e sem folgas. Obtiveram-se os valores da tabela 5.14.

Aplicando-se o teste sobre diferença entre médias dos valores-padrão (tabela 5.4) e os valores da amostra (tabela 5.14), utilizando-se as equações (5.2) e (5.3), obtiveram-se os dados contidos na tabela 5.15.

Tabela 5.14 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina III

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
6	42	60	42	60	43	61
7	42	60	42	60	42	61
8	43	61	43	61	43	62
9	42	60	43	60	43	61
Média	42,3	60,3	42,5	60,3	42,8	61,3
Desvio	0,25	0,25	0,29	0,25	0,25	0,25

Tabela 5.15 - Valores de t_0 - Inferência sobre Médias (tabelas 5.14 e 5.4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
t_0	0,91	0,91	0,71	0	1,04	2,07

Lembrando que $t_{0,025;11} = 2,201$, o teste de inferência indicou inexistência de diferença significativa entre as médias a 95%. Uma vez que os valores de t_0 obtidos (tabela 5.15) foram inferiores a 2,201. E, portanto, a Máquina III encontrava-se qualificada para determinação do Número de Coppini.

5.4.4 - Máquina IV

Esta máquina localizava-se nas Indústrias Nardini S/A em Americana -SP. Estava na linha de montagem e não se encontrava completamente montada.

A data de fabricação é de 1995. Comando Numérico: Fanuch (Mach 6.0). Permitia rotações até 3000 rpm a 8,5 CV de potência. Porém, não comportava variação contínua de velocidades. A gama de rotações disponíveis era de 600 rpm, 750 rpm, 950 rpm e 1180 rpm na faixa, associada às velocidades de corte, pertinente ao *Teste de Calibração*.

A princípio, esta máquina deveria ser descartada. Pois, não permitia a reprodução exata da velocidade de corte em cada diâmetro, visto que: não dispunha de variação contínua de velocidades.

Selecionaram-se as rotações de 950 rpm, 600 rpm, 950 rpm, 750 rpm, 1180 rpm e 750 rpm, respectivamente para os passes P1, P2, P3, P4, P5 e P6.

Os valores medidos, utilizando-se a Fixação 1 (Desenho A.4 no Anexo A) encontram-se na tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Teste de Calibração - Máquina IV

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	40	59	41	60	40	61
2	40	58	41	59	40	61
3	42	60	42	61	41	61
4	43	60	43	61	42	62
Média	41,3	59,3	42	60,3	40,8	61,3
Desvio	0,75	0,48	0,41	0,48	0,48	0,25

Era perceptível, sem a necessidade de cálculos estatísticos, que os resultados da tabela 5.14 diferiam do padrão. Tentou-se implementar a Fixação 2 e, posteriormente, a Fixação 3 (ilustradas no Desenho A.4 no Anexo A), apesar de se constituírem em alternativas de ínfima viabilidade, pois, estavam ligadas a instabilidade maior, devido ao apoio desbalanceado da ferramenta. No entanto, representavam alternativas para se qualificar a máquina para determinação do Número de Coppini.

Os valores obtidos encontram-se na tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
5	39	58	40	58	39	59
6	39	59	39	60	39	60
7	39	58	40	59	39	59
Média	39	58,3	39,7	59	39	59,3
Desvio	0	0,33	0,33	0,58	0	0,58

Visivelmente, percebeu-se que a máquina estava distante de reproduzir os valores-padrão (tabela 5.4).

Decidiu-se desmontar a fixação adotada. Repetiu-se, então, a Fixação 1.

Obtiveram-se os resultados da tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
8	42	60	42	60	40	61
9	43	61	43	61	41	62

Os problemas repetiram-se, principalmente em relação a P5. Adotou-se a Fixação 3 (Desenho A.4 no Anexo A). Valores na tabela 5.19, a seguir.

Tabela 5.19 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
10	38	58	39	58	38	59
11	39	59	40	59	40	60

Os problemas persistiram, pois os valores obtidos continuavam distantes do padrão (tabela 5.4). A uma primeira vista, era impossível a calibração da máquina.

Analisaram-se, novamente, as possibilidades. Indubitavelmente, a Fixação 1 era a mais viável. Mudaram-se algumas das rotações fixas. Por exemplo, rotação de 950 rpm (ao invés de 1050 rpm) para P5. E repetiu-se o *Teste de Calibração*.

Os valores experimentais estão contidos na tabela 5.20.

Calculou-se t_0 pelas equações (5.2) e (5.3). Obtiveram-se os valores da tabela 5.21.

Estes valores indicam estabilidade da máquina-ferramenta a 95% de confiança, porque os valores de t_0 obtidos (tabela 5.21) foram inferiores a $t_{0,025;11} = 2,201$.

Conseguiu-se, portanto, calibrar a Máquina IV para medição da Propriedade de Resistência à Usinagem. Posteriormente, verificou-se, pelo "display" das condições de trabalho da máquina, que a última aproximava-se da velocidade de 180 m/min no diâmetro especificado, conforme estipulado pelo *Teste de Calibração*.

Tabela 5.20 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina IV

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
12	42	60	42	60	43	61
13	42	60	42	60	42	61
14	43	61	43	61	43	61
15	42	60	43	61	43	62
Média	42,3	60,3	42,5	60,5	42,8	61,3
Desvio	0,25	0,25	0,29	0,29	0,25	0,25

Tabela 5.21 - Valores de t_0 - Inferência sobre Médias (tabelas 5.20 e 5.4)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
t_0	0,91	0,91	1,59	1,59	1,04	2,07

5.4.5 - Máquina V

Localizava-se na Nicola Rome Ind. & Com. Ltda. em Mococa-SP. Tratava-se de uma máquina que trabalhava na linha de produção de peças fora-de-série.

Era uma máquina que pertencia ao inventário da empresa desde 1960, "retrofitada" com Mach 1.0. Permitia rotações de 2500 rpm e cerca de 20 CV. Não dispunha de variação

continua de velocidade. Proporcionava rotações de 600 rpm, 850 rpm e 1180 rpm na faixa de interesse do *Teste de Calibração*.

As rotações escolhidas foram 1180 rpm, 600 rpm, 1180 rpm, 600 rpm, 1180 rpm e 600 rpm, respectivamente para os passes P1, P2, P3, P4, P5 e P6.

Havia apenas duas chances possíveis e precárias de fixação do porta-ferramenta na máquina. Uma, sem dispositivo e apoio muito reduzido (Fixação 1). Outra, com apoio integral, porém o balanço era exageradamente grande (Fixação 2).

Inicialmente, adotou-se a Fixação 1 e os valores constam da tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Teste de Calibração - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	39	59	39	59	39	59
2	38	58	38	59	39	59
3	38	58	38	59	39	60

Visualmente os valores eram incompatíveis com os valores-padrão (tabela 5.4). Partiu-se para Fixação 2, cujos resultados experimentais encontram-se na tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
4	44	64	44	64	45	65
5	45	63	45	63	46	64
6	45	64	46	64	46	64

Insistiu-se na tentativa de calibração. Diminuiu-se a rotação para 850 rpm nos passes P1 e P6. Os valores obtidos, nestas condições, para Fixação 1 estão contidos na tabela 5.24.

Tabela 5.24 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
7	40	59	40	59	30	60
8	39	59	39	59	40	60

Percebeu-se que os valores mantinham-se distantes do padrão (tabela 5.4).

Montou-se, então, a Fixação 2. Foi programado 850 rpm para execução dos passes P1 e P6. Os valores obtidos estão na tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
9	46	63	45	63	45	65
10	45	64	45	64	46	65

Novamente, pode-se reconhecer, visualmente, que os valores continuavam distantes de reproduzir os valores-padrão.

Conversando com técnicos, relatou-se que a máquina, geralmente, não atendia aos requisitos de acabamento, caso o programa não tivesse suas instruções executadas bloco a bloco. Então, a máquina foi re-programada para execução de "job" bloco a bloco. Decidiu-se adotar 1180 rpm para P1 e 850 rpm para P6. Os valores experimentais, obtidos nestas condições para Fixação 1, encontram-se na tabela 5.26.

Tabela 5.26 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
11	39	59	39	60	40	61
12	39	59	39	60	40	61

Montou-se a Fixação 2, sob as condições descritas no parágrafo anterior. Obtiveram-se os dados que constam na tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
13	45	64	45	64	46	65
14	44	63	45	64	45	65

Novamente, tentou-se substituir 850 rpm para P1. Os valores obtidos para a Fixação 2 são apresentados na tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
15	45	63	45	63	46	64
16	45	63	46	64	47	65

Antes de se desistir da calibração, tentou-se, novamente, a Fixação 1. Os dados obtidos encontram-se na tabela 5.29.

Tabela 5.29 - Teste de Calibração (continuação) - Máquina V

CdP Número	Força de Avanço [kgf]					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
17	39	59	40	59	40	60
18	38	59	39	59	40	60

De modo que a Máquina V não permitiu ser calibrada. Podem-se citar o pequeno número de rotações disponíveis, sua idade (superior a 30 anos) e o fato de que a máquina foi readaptada para controle numérico. Não se objetiva, porém, discutir o porquê.

A máquina V não podia ser utilizada para determinação do Número de Coppini. Neste sentido, não foram feitas medições da propriedade nesta máquina.

5.5 - Teste de Medição

Após as máquinas terem sido calibradas, procedeu-se o *Teste de Medição* da propriedade. Seguiu-se a proposta de norma, contida no Apêndice.

A tabela 5.30 resume os valores do Número de Coppini, obtidos nos ensaios. Detalhes da medição encontram-se nas tabelas B7 (Máquina I-Material Aço ABNT 1212), B8 (Máquina I-Material Aço ABNT 12L14), B9 (Máquina I-Material Aço ABNT 1045), B10 (Máquina II-Material Aço ABNT 1212), B11 (Máquina II-Material Aço ABNT 12L14), B12 (Máquina II-Material Aço ABNT 1045) e B13 (Máquinas III, IV e V, Material: Aço ABNT 1212 e 12L14) no anexo B.

Executou-se um teste de inferência para se averiguar a influência do diâmetro do corpo-de-prova na determinação do Número de Coppini. Adotou-se um intervalo bilateral de 95% de confiança para verificar se existe diferença significativa entre os diâmetros de 20 mm e de 60 mm.

Calculou-se t_0 , através das equações (5.2) e (5.3), obtendo-se os valores da tabela 5.31, na comparação entre os diâmetros de 60 mm e de 20 mm para um mesmo material. Comparando os valores obtidos (tabela 5.31) com os valores: $t_{0,025;8} = 2,306$ e $t_{0,025;4} = 2,776$, concluiu-se que não existe diferença significativa com relação aos diâmetros a 95% de confiança. E, portanto, o diâmetro não indica, a 95% de confiança, influenciar a determinação do Número de Coppini.

Tabela 5.30 - Número de Coppini [kgf] por Material, Máquina e Diâmetro

	Material	Dia (mm)	Média	Desvio
Máquina I	1212	20	48,5	0,13
		60	48,5	0,14
	12L14	20	42,4	0,13
		60	42,5	0,14
	1045	20	53,9	0,13
		60	54,0	0,13
Máquina II	1212	20	48,5	0,16
		60	48,4	0,15
	12L14	20	42,4	0,11
		60	42,5	0,12
	1045	20	53,9	0,13
		60	54,0	0,15
Máquina III	1212	60	48,4	0,33
	12L14	60	42,5	0,31
Máquina IV	1212	60	48,4	0,30
	12L14	60	42,3	0,28

Tabela 5.31 - Valores de t_0 - Inferência sobre Diâmetros

	Material	t_0
Máquina I	1212	0
	12L14	1,17
	1045	1,22
Máquina II	1212	1,02
	12L14	1,37
	1045	1,13

Puderam-se, então, calcular os valores médios das medidas por diâmetro (visto que não existe diferença significativa), construindo-se a tabela 5.32.

Tabela 5.32 - Número de Coppini [kgf] por Material e Máquina

Material ABNT	Máquina I		Máquina II		Máquina III		Máquina IV	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1212	48,5	0,13	48,4	0,15	48,4	0,33	48,4	0,30
12L14	42,4	0,13	42,5	0,11	42,5	0,31	42,3	0,28
1045	54,0	0,13	53,9	0,13	-	-	-	-

Fazendo-se inferência se existe diferença significativa entre as medições obtidas nas diferentes máquinas para cada material (adotando-se a Máquina I como referência), obtiveram-se os valores da tabela 5.33.

Tabela 5.33 - Valores da t_0 - Inferência sobre Máquinas

	Material Aço ABNT		
	1212	12L14	1045
Máquina I	Máquina Referência		
Máquina II	1,59	2,03	1,72
Máquina III	0,799	0,820	-
Máquina IV	0,830	0,850	-

O valor de $t_{0,025;18} = 2,101$; inferior aos valores de t_0 obtidos e indicados na tabela 5.33, indicou que não existiam diferenças significativas entre as medições obtidas em máquinas diferentes num intervalo de confiança de 95%.

Portanto, a reprodutibilidade das medições comprovou estar na faixa de 95%.

5.6- Redimensionamento da Amostragem Mínima

Embasado nos valores obtidos na parte experimental, pode-se recalcular a amostragem mínima, necessária para 95% de confiança em intervalo bilateral, para determinação do Número de Coppini.

Calculando-se iterativamente, pela equação (5.1), para a medida crítica (ou seja, aquela de maior desvio: média= 48,4 e desvio= 0,30), tem-se que para um intervalo bilateral

de confiança de 95% com erro tolerável de até 10%: uma e somente uma medição é significativamente suficiente.

Cumpra-se que o valor de N_{min} , calculado pela equação (5.1), a princípio fornece um valor mais conservador que aquele, obtido pela equação (5.4), que se encontra detalhada no Anexo C.

$$N_{min} = \frac{(t_{a/2})^2}{d^2} (S_1^2 + S_2^2) \quad (5.4)$$

5.7- Validade e Representatividade do Número de Coppini

5.7.1 - Validade

I. O Número de Coppini, que quantifica a propriedade de resistência à usinagem, é desvinculado de um material-padrão, pois não necessita que este seja submetido a exaustivos e repetitivos testes, assim como o material a ser testado deve ser. E, também, independe de um critério, função de interesse do usuário do teste. Diferentemente dos índices de usinabilidade, em que são necessários um material-padrão (para se calcular o índice em relação ao material testado) e um critério, ou conjunto destes, arbitrado.

II. Por outro lado, a propriedade tecnológica usinabilidade é acolhida, sem restrições, no campo de validade da propriedade dos materiais: Resistência à Usinagem. E, inclusive, recomendam-se testes de usinabilidade para cada aplicação específica, caracterizada pelas circunstâncias do processo de fabricação a ser aplicado, especialmente, no caso de materiais que apresentem diferentes medições de resistência à usinagem. Isto é o que se espera de uma propriedade tecnológica: descrever e otimizar processos e não, caracterizar materiais.

III. O Número de Coppini é função exclusiva e intrínseca do material no escopo de um teste padronizado e quantifica uma propriedade, naturalmente, revelada pelo material ao ser usinado. A sua determinação não exige equipamento especial, podem ser empregados tornos convencionais, desde que possibilitem condições operacionais previstas na metodologia e respondam positivamente ao *Teste de Calibração* (descrito neste trabalho), para garantir a reprodutibilidade das medidas em diferentes máquinas. É executada através do *Teste de Medição*, que contempla a simulação de um roteiro completo de usinagem, a que um lote de material a ser testado é sujeito. Este lote envolve, por ensaio, oito corpos-de-prova, que devem ser submetidos a quatro séries, prevendo diferentes condições de usinagem, tentando estimular vários mecanismos de desgaste. Totaliza 32 operações de remoção de cavaco. A validade de Teste de Medição, portanto, faz-se dentro das observações descritas pelo *Teste de Calibração*. Entretanto, as medidas permitem extrapolações menos subjetivas, fora das condições dos mesmos.

IV. Na determinação do Número de Coppini, adotou-se ferramenta de metal duro com cobertura (3 μ m de TiN) - tendência da indústria que trabalha com processos de usinagem, pois esta ferramenta atende a ampla faixa de materiais (desde que não sejam

intensamente abrasivos ou quimicamente reativos com o cerâmico TiN da cobertura), suporta condições severas de usinagem e permite padrão mais contínuo de torneamento. A ferramenta é de geometria negativa, visando impor severas deformações no material a ser testado e propiciar desgaste da ferramenta durante o *Teste de Medição*. Diferentemente do teste de usinabilidade de curta duração, padronizado pela **AFNOR** (1981), que utiliza aço-ferramenta com geometria fragilizante.

V. A validade da propriedade sugerida e, respectiva metodologia de medição, não ficam comprometidas pela elaboração de propostas alternativas de parâmetros e ou metodologia de medição, que podem vir a ser acolhidos como escalas necessárias para caracterização de alguns grupos específicos de materiais, à medida em que se aproximem de condições reais e ou particularizadas da usinagem dos mesmos. *A priori*, permitem-se escolhas, sem distinção, de parâmetros, de ferramentas e/ou de condições operacionais, desde que se viabilizem a caracterização intrínseca do material e mostrem-se compatíveis com Número de Coppini.

VI. A validade da escala proposta, portanto, não exige exclusividade e, tampouco, pode se tornar um obstáculo a necessários desenvolvimentos nesta área tecnológica, em que emergem mudanças e adaptações constantes. Consequentemente, desde que se viabilize a caracterização intrínseca do material, a propriedade de Resistência à Usinagem pode e deve acolher escalas alternativas de medição.

5.7.2.- Representatividade e Extensão

I. O Número de Coppini fornece uma medida objetiva da quantidade média de esforço mecânico (em termos de força de avanço - parâmetro sensível ao desgaste da ferramenta) para se remover determinado volume de cavaco do material a ser testado. A escolha de apenas um parâmetro para medição da propriedade obedece a critérios de confiabilidade, no sentido de minimizar fatores envolvidos, evitando multiplicação ou composição de erros, inerentes a cada um dos mesmos.

II. A metodologia de determinação do Número de Coppini comprovou sua sensibilidade na caracterização de materiais de mesma composição química, porém submetidos a diferentes tipos de conformação, conforme encontra-se descrito neste trabalho.

III. A representatividade da medida, conforme discutido anteriormente, fica vinculada à qualificação da máquina, devendo-se utilizar o *Teste de Calibração* (contido no Apêndice), previamente à execução da medição. Este se faz necessário para garantir a estabilidade da máquina em relação aos valores-padrão de referência e, portanto, permitir reprodutibilidade das medidas entre diversos equipamentos.

IV. O fato de não haver diferenças significativas entre as medições obtidas nas quatro máquinas consagrou a reprodutibilidade da medida a nível de 95% entre máquinas de diferentes localizações, quer servindo em laboratórios, quer, em empresas ou, em indústrias.

V. Assumindo-se o material ABNT 1212 como padrão e calculando-se índices de usinabilidade para o ABNT 12L14 e ABNT 1045, obtêm-se valores distantes daqueles apontados na literatura(Metcut Researches, 1980): 160% e 60%, respectivamente. Porém, isto não inviabiliza a propriedade em termos de caracterizar materiais quanto à sua facilidade/dificuldade para remoção de cavaco. À medida em que fornece um valor intrínseco do material, obtido num teste com máquina pré-calibrada, com sensibilidade e reprodutibilidade comprovadas.

VI. A representatividade da propriedade de Resistência à Usinagem em termos de caracterização do material, não depende do parâmetro utilizado e ou da metodologia de medição, haja vista que estes valores são padronizados. Entretanto, o valor numérico da medida depende dos mesmos. Nada impede, conforme foi estabelecido no sub-item anterior e na proposta de norma (contida no Apêndice), que se padronize, por exemplo, um teste com ferramenta de CBN e medindo-se a força passiva na ferramenta, para caracterização de materiais altamente abrasivos. Neste caso, este novo parâmetro, metodologia e, conseqüentemente, nova escala de medição não devem estar em conflito com a metodologia original relativa ao Número de Coppini. Poder-se-iam, inclusive, estabelecer parâmetros de compatibilização e ou conversão de escalas, como acontece entre diferentes escalas para medida da dureza de materiais.

Capítulo 6

Conclusão

O presente trabalho apresentou à comunidade técnico-científica uma propriedade, naturalmente revelada pelo material, ao ser submetido a um processo de usinagem. Essa permite caracterizá-lo, em termos de sua facilidade/dificuldade intrínseca, quanto à remoção do cavaco. É denominada: *Resistência à Usinagem*.

A referida propriedade é quantificada pelo Número de Coppini, definido como o valor médio das forças médias de avanço registradas, sob a influência do desgaste da ferramenta. A metodologia de determinação compreende o *Teste de Medição* (proposta de norma inclusa neste trabalho), em que 8 corpos-de-prova do material a ser testado são submetidos a 4 séries de diferentes condições de usinagem, simulando um roteiro de fabricação, contendo 32 operações universais de remoção de cavaco.

A sensibilidade do parâmetro e da metodologia ficou comprovada, em se viabilizando a caracterização do aço ABNT 12L14, submetido a diferentes graus de trefilação. Trata-se de uma medição de complexidade e custos relativamente pequenos, visto que não se exigem equipamentos sofisticados. Pode ser implementada em máquinas-ferramenta convencionais do chão-de-fábrica. Entretanto, a máquina, empregada na medição, deve estar qualificada pelo *Teste de Calibração*, também descrito neste trabalho.

Após terem sido verificados 3 materiais (a saber: aços ABNT 1212, 12L14 e 1045) em 5 máquinas diferentes (duas pertencentes a laboratórios em universidades e três, a indústrias ou a empresas, situadas em diferentes pontos do território nacional), ficou consagrada a reprodutibilidade das medidas a 95% em intervalo bilateral de confiança.

A referida propriedade é uma contribuição à indústria mecânico-metalúrgica, servindo-se, sobretudo, como uma valiosa ferramenta à P&D de materiais de corte fácil. Portanto, de interesse, à indústria que desenvolve e produz estes materiais; bem como, àquela que os consome na manufatura de seus produtos, necessitando verificar seu desempenho característico durante a remoção do cavaco. O seu campo de atuação é extensível a aços ao carbono em geral, ligas, etc.

Cumprir afirmar que a propriedade de Resistência à Usinagem acolhe a propriedade tecnológica relacionada: usinabilidade. E, inclusive, sua utilização é recomendada na pesquisa, verificação e otimização das condições de usinagem para um processo específico, como se espera de uma propriedade de sua natureza. Mas, não na caracterização intrínseca de materiais para processos com remoção de cavaco, em que se exige uma propriedade independente das nuances do processo per si.

A proposta de norma, contida neste trabalho, também pode acolher escalas alternativas ou subsidiárias, desde que se apresentem necessárias e ou úteis para grupos específicos de materiais. Afinal, o presente não tem de ser um obstáculo, mas uma ponte e ou referencial para novos empreendimentos na área. Haja vista as mudanças e desenvolvimentos fantásticos, que emergem neste segmento de sensível importância à indústria metal-mecânica.

Capítulo 7

Sugestões para Trabalhos Futuros & Perspectivas

- I. Verificar a influência da composição química (dentro dos limites admissíveis por norma) e da dureza do material do corpo-de-prova nos valores-padrão (obtidos no *Teste de Calibração*), fixada uma montagem calibrada do sistema máquina/dinamômetro/ferramenta.
- II. Verificar a necessidade ou não de 32 passes, tentando minimizá-los.
- III. Verificar a possibilidade de se estabelecer regressão linear (ou curvas polinomiais de regressão) para compensar a não calibração de uma montagem específica, em máquina que permite calibração.
- IV. Idem à máquina, que não permite calibração. Inclusive, investigar as causas da não calibração.
- V. Informatizar o teste proposto.
- VI. A concepção de outro(s) parâmetro(s) para medição da propriedade, que permita(m) a concepção de metodologia de custo inferior e ou mais simples e ou que atenda(m) a grupo específico de materiais. À semelhança das escalas Rockwell, Brinell e Vickers para medição da dureza.
- VII. Verificar a sensibilidade e a confiabilidade das medições, obtidas através do(s) novo(s) parâmetro(s).
- VIII. Desenvolver metodologias alternativas para determinação do Número de Coppini, utilizando ferramenta de nitreto cúbico de boro para caracterizar à usinagem, uma classe específica de materiais super-abrasivos. Posteriormente, estabelecer condições operacionais compatíveis com a utilização deste material de ferramenta e desenvolver nova escala.
- IX. Idem à sugestão anterior. Porém, com ferramenta de diamante policristalino.
- X. Desenvolver, se possível, um fator de conversão entre as diversas escalas estabelecidas.

Referências Bibliográficas

- AFNOR, Paris. NF 03/654, *Méthodes de Contrôle de l'Usinabilité par Tournage des Aciers Destinés au Décolletage et des Aciers de Construction à l'Aide d'Outils en Acier Rapide*. Paris, 1981. 12p.
- AKERSTROM, G. et al. A Survey on Precipitation Hardened Perlite Steel in Forged/Automotive Components with Special Emphasys on Machinability. *Material & Design*, v.12, p.33-39, Feb.1991.
- ASM. *Metals Handbook*. 8 ed. Metals Park(OH): ASM, c1967. V.3
- ASME. *Tool Engineers Handbook*. 4.ed. New York: Mc Graw Hill, 1985.
- BOULGER, F.W. Materials and Machinability. In: ASM. *Material Machining and Practice*. 1.ed. Metals Park(OH): ASM, 1950. p.136-158.
- BS, London. BS 5623; *Tool Life Criteria and Evaluation*. London, 1979. 19p.
- CHAO, B.T. e TRIGGER, K.J. Thermophysical Aspects of Metal Cutting. *ASME Transactions*, v.74, p.1039-1054, Aug. 1952.
- CHILDS, T.H.C. e MAHIDI, M.I. On the Stress Distribution between the Chip and Tool during Metal Turning. *CIRP*, v.38, n.1, p.55-58, 1989.
- COOK, N.H. *Manufacturing Analysis*. 2.ed. London: Addison Wesley, 1966.
- CREVELING, J.H. et al. Some Studies of Angle Relationships in Metal Cutting. *ASME Transactions*, v. 79, p.127-138, Nov. 1957.
- CUPINI, N.L. e VILLELA, R.C. Contribuição à Propriedade de Resistência à Usinagem no Processo de Torneamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 7, 1986, Florianópolis. *Anais ...* Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. p.149-150.
- DAS, M.K. e TOBIAS, S.A. The Basis of a Universal Machinability Index. In: MACHINE TOOL DEVELOPMENT AND RESEARCH CONFERENCE, 5, 1965, Birmingham. *Proceedings ...* Birmingham: Birmingham University Press, 1965. p.183-198.
- DATSKO, J. *Materials Properties and Manufacturing Processes*. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- DAVIS, H.E.; TROXELL, G.E. e HAUCK, G.F. *The Testing of Engineering Materials*. 3.ed. London: Mc Graw Hill, 1992.

- DE ARDO, A.J. et al. A better Way to assess Machinability. *American Machinist*, v.137, n.5, p.33-35, May 1993.
- DESTRO, J.P.B. *Resistência à Usinagem - Contribuição à Caracterização de Materiais*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1993. 135p. (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- ELBESTAWI, M.A. et al. Modelling Machining Dynamics including Damping in the Tool Workpiece Interface. *ASME Transactions*, v.116, p.435-439, Nov.1994.
- ERIKSSON, U. The Quantitative Assessment of Machinability. In ISS/AIME. *Processing Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern High Strength Low Alloy Steel*. Warrandale: AIME; Volvo AB, 1992. p.121-149.
- EYADA, O.A. *Materials and Machinability*. Technical Presentation, Campinas:University of Campinas, Department of Manufacturing Engineering. June 14, 1994.
- FANG, X.D. e JAWAHIR, I.S. The Effects of Tool Wear and Tool Restricted Contact on Chip Breakability in Machining. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Proceedings...* Dearborn: SME, 1993. p.234-252.
- FEI, J. e JAWAHIR, I.S. A Fuzzy Classification Technique for Predictive Assessment of Chip Breakability for Use in Intelligent Machining. In IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE. ON FUZZY SYSTEMS, 2, 1994, California. *Proceedings...* California: IEEE, Mar. 1994. p.54-62.
- GRABEC, I. e KULJANIC, E. Characterization of Manufacturing Processes based upon Acoustic Emission Analysis by Neural Networks. *CIRP*, v.43, n.1, p.77-80, 1994.
- HIATT, G.D. e STRENKOWSKY, J.S. *A Fracture Mechanics Model for Predicting the Ductile Regime in Single Point Diamond Turning of Brittle Materials*. Raleigh: North Caroline State University, 1992, p.181-237. (Report).
- INAMURA, T. et al. On a possible Mechanism of Shear Deformation in Nanoscale Cutting. *CIRP*, v.43, n.1, p.47-50, 1994.
- INDEX. *Geração Index - GE 45 e GE 65*. Sorocaba: Ed. Weinert ; Index do Brasil Indústria & Comércio, 1991. 22p.
- ISO, Genebre. ISO 3685; *Tool Life*. Genebre, 1977. 25p.
- JASINEVICIUS, R.G. et al. Uma Revisão sobre Ferramentas de Diamante Monocristalino para Usinagem de Utraprecisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, dez. 1993. p.1615-1618.

- JAWAHIR, I.S. The Chip Control Factor in Machinability Assessments: Recent Trends. *Journal of Mechanical Technology*, v.7, p.213-224, 1988.
- JAWAHIR, I.S.; QUERESHI, N. e ARSECUTARAT, N.E.H. On the Interrelationships of Some Machinability Parameters in Finish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, v.35, n.2, p.709-723, 1992.
- KECCECIOUGLU, D. Shear Zone Temperature in Metal Cutting and its Effects on Shear Flow Stress. *ASME Transactions*, v.80, p.541-546, May 1958.
- KISO, H.; TAKATSU, S.; TAGUCHI, T. e KINURA, T. Relation between Machinability of Steels and Cutting Tool Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.402-412.
- KO, T.J. e CHO, D.W. Tool Wear Monitoring in Diamond Turning by Fuzzy Pattern Recognition. *ASME Transactions*, v.146, p.225-232, May 1994.
- KOBAYASHI, S. e THOMSEN, E.G. Some Observations on the Shearing Process in Metal Cutting. *ASME Transactions*, v.81, p.251-261, Nov. 1959.
- KOBAYASHI, S. et al. A Critical Comparison of Metal Cutting Theories with new Experimental Data. *ASME Transactions*, v.82, p.333-347, Nov. 1960.
- KOENIG, W. *Fertigungsverfahren*. V. 1, VDI Verlag, Duesseldorf-Alemanha, 1992.
- KOENIG, W. et al. Machining of New Materials. *CIRP*, v.39, n.2, p.34-40, 1990.
- KOENIG, W. e WAGEMANN, A. Machining of Ceramic Components: Process-Technological Potential. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.3-16.
- KOENIG, W. e ZABOKLICKI, A.K. Laser Assisted Hot Machining of Ceramics and Composite Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.455-464.
- KOMANDURI, R. Machining and Grinding: A Historical Review of Classical Papers. *Applied Mechanical. Review*, v.46, n.3, p.80-132, Mar. 1993.
- LOPÉZ, A.F.R. Emisiones Cancerigenas de Motores a Diesel, Prevencion y Control. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE INGENIERA MECÁNICA, 1, 1993, Madrid. *Anales...* Madrid: Universidad del Sur, Sep. 1993. p.97-102.

- LUCCA, D.A. e SEO, Y.W. Aspects of Surface Generation in Orthogonal Ultraprecision Machining. *CIRP*, v.43, n.1, p.43-46, 1994.
- MATSUMOTO, H. e PALLEROSI, C.A. Influência da Rigidez do Sistema sobre o Erro Dimensional e Geométrico em Torneamento. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE, 3, 1994, Belém. *Anais...* Universidade Federal do Pará: ABCM, jun. 1994. p.552-555.
- MARQUESI, J.V.O., Breda-Destro, J.P.B., Cupini, N.L. Materiais de Corte Fácil - Aplicações & Perspectivas. In CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 12, 1993, São Carlos. *Anais ...* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1994. p.273.
- MERCHANT, M.E. Mechanics of the Metal Cutting Process. *Journal of Applied Physics*, v.15, p.267-324, 1945.
- METCUT RESEARCH ASSOCIATES. *The Machining Data Handbook*. 2ed. Cincinnati: Machinability Data Center, 1980.
- MICHELETTI, G.F. Work on Machinability. *CIRP*, v.17, n.1, p.84-89, 1970.
- MILLS, B. e REDFORD, A.H. *Machinability of Engineering Materials*. 2ed. London: Applied Science Publishers, 1986.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 5ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- NARDINI. *Máquinas Nardini - Uma Solução para seus Problemas - Modelos GPR*. Americana: Ed. Poligono ; Indústrias Nardini S/A, 1991. 34p.
- NAYLOR, D.J.; LLEWELLYN, D.T. e KEANE, D.M. Control of Machinability in Medium Steels. *Metals Technology*, v.3, n.5, p.254-271, May-June 1976.
- OXLEY, P.L.B. Machinability : A Mechanics of Machining Approach. In: *On the Art of Cutting Metals - 75 Years Later: A Tribute to F.W.Taylor*. ASME: Ellis Horwood, 1989. p.37-62.
- OXLEY, P.L.B. Modelling Machining Processes with a View to their Optimization and to the Adaptive Control of Metal Cutting Machine Tools. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, v.4, n.2, Feb. 1988.
- PARTHIMOS, D. e EHMANN, F. A Model for the Stress Field around the Shear Zone. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Proceedings ...* Dearborn: SME, 1993. p.197-213.
- PROHÁSZKA, J. The Relationship between the Strain Hardening Coefficient and Machinability. *CIRP*, v.32, n.1, p.105-107, 1983.

- RADULESCU, R. e KAPOOR, S.G. An Analytical Model for Predicting Tool Temperatures Fields during Continuous and Interrupted Cutting. *ASME Transactions*, v.116, p.135-143, May 1994.
- RADULESCU, R. et al. An Investigation of the Vibration of the Face Milling Process During High Speed Machining. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Transactions of NAMRI...* v.23, p.237-246, 1993.
- RAI, G. The Metallurgy of CBN and its Wear in High Speed Machining of Ferrous Materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.501-516.
- ROMI. *Geração Cosmos*. São Paulo: Ed. Frase; Indústrias Romi SA, 1992. 5p.
- ROTH, R.N. A Model For Orthogonal Cutting Based on the Theory of Stress Singularities. *International Journal of Machine Tool Development & Research*, v.17, p.117-125, 1977.
- ROTH, R.N. The Range of Permissible Shear Angles in Orthogonal Machining for Variable Hydrostatic Stress on the Shear Plane and Variable Friction Angle along the Rake Face. *International Journal of Machine Tool Development & Research*, v.15, p.161-167, 1975.
- SANDVIK. Ferramentas para Tornear. *Sandvik Coromant*, C 1000; 2 - POR/BRA, 1987.
- SANDVIK. Herramientas para Tornear. *Sandvik Coromant*, C 1000; 4 - SPA, 1994.
- SANDVIK. Turning Tools and Inserts. *Sandvik Coromant*, C1000; 3 - ENG; 1992.
- SHAW, M.C. Some Observations Concerning to the Mechanics of Cutting and Grinding. *Applied Mechanical Review*, v. 46, n. 3, Mar. 1993.
- SHAW, M.C.; COOK, N.H. e SMITH, P.A. Free Machining Steel I: Tool - Life Characteristics of Resulphurized Steel. *ASME Transactions*, v.83, p.163-174, May 1961.
- SHAW, M.C.; COOK, N.H. e SMITH, P.A. The Mechanics of 3D Cutting Operations. *ASME Transactions*, v.74, p.1055-1064, Feb. 1952.
- SHAW, M.C., SMITH, P.A. e COOK, N.H. Free Machining Steel II - Tool Life Characteristics of Lead Steel. *ASME Transactions*, v.83, p.175-180, May 1961.
- SHAW, M.C., USUI, e SMITH, P.A. Free Machining Steel III - Cutting Forces, Surface Finish and Chip Formation. *ASME Transactions*, v.83, p.181-193, May 1961.
- SKINGLE, T.J. Machinability Testing - A Cutting Tool Manufacturer's Viewpoint. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND

- UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.176-183.
- SME. *Tool and Manufacturing Engineering Handbook*. 4.ed. Dearborn (Michigan): SME, 1983. v.1: Machining.
- SPIEGEL, M.R. *Estatística*. 4.ed. São Paulo: Schaumm Mc Graw Hill, 1984.
- SPIEKMAN, R. et al. Ultrasmall Waveguides Bends: the Corner Mirrors of the Future. *IEEE Proceedings in Optoelectronics*, v.142, n.1, Feb. 1995.
- STEEN, W.M. *Laser Material Processing*. 2.ed. Berlin: Springer Verlag, 1991.
- TIPNIS, V.A. e CHRISTOPHER, J.D. *Machinability Testing for Industry*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.3-32.
- TRANSTECH. *Particle Attrition, State-of-the-Art Review*. 2.ed. London: Transtech, 1987.
- TRAUBOMATIC. *Torno Universal TND 360 com Sistema de Comando TX 8 - Manual de Programação e Operação*. São Paulo: Ed. Abril; Traubomatic Ind. & Com. Ltda, 1990. 85p.
- VACCARI, J.A. Free - Machining-Steels. *American Machinist*, v.130, n.10, p.115-130, Oct.1986.
- WEINGAERTNER, W.L. et al. Usinabilidade de Ligas de Alumínio para Usinagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIÉRA MECÁNICA, 6, 1994, Santiago. *Anales...* Pontificia Universidad Católica del Chile: Santiago, nov. 1994. p.579-584
- WISE, M.L.H. e MILOVIC, R. Ranges of Application of Free-Cutting Steels and recommended Tool Materials. *Materials Science and Technology*, v.4, p.933-944, Oct. 1988.
- YUST, C.S. Tribology and Wear. *International Metals Review*, v.30, n.3, p.141-154, 1985.
- ZHANG, B. e BAGCHI, A. Finite Element Simulation of Chip Formation and Comparison with Machining Experiment. *ASME Transactions*, v.116, p.289-297, Aug. 1994.
- ZOREV, N.N. Interrelationship between Shear Processes occurring along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION, ENGINEERING AND RESEARCH, 2, 1989, Pittsburg. *Proceedings...* Pittsburg: ASME, 1989. p.42-49.

Bibliografia

- ABLER, A.J. e RO, P.I. Nanometric Dynamic Error Correction in Ultra-Precision Turning. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.261-266.
- ABNT, Rio de Janeiro. ABNT PI 296, *Características de Usinagem de Metais para Operação de Torneamento - Força e Velocidade de Corte de diferentes Metais*. Rio de Janeiro, 1986. 49p.
- AFNOR, Paris. AFNOR NF 02/610; *Recueil de Normes Françaises des Conditions de Réception des Machines-Outils*. Paris, 1980. 20p.
- ARAKI, T. e YAMAMOTO, S. An Evaluation of Machinability of Low Alloy Steel Materials with or without Heat Treatment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.117-131.
- ATKINSON, L.G. e MOORE, D.T. CAM Optical Fabrication System-Ultraprecision Machining and Automated Fabrication for Optics. *SPIE*, v.676, p.112-127, 1986.
- BHIRMANI, A. e BROMWICH, M. Advanced Manufacturing Technology and Accounting: a Renewed Alliance. *Computer Integrated Manufacturing System*, v.5, n.5, p.199-107, Aug. 1992.
- BLACK, J.T. Flow Stress Model in Metal Cutting. *ASME Transactions*, v.101, p.403-415, Nov. 1979.
- BLACKLEY, W.S. e SEATTERGOOD, R.O. Chip Topography for Ductile Regime Machining of Germanium. *ASME Transactions*, v.116, p.263-266, May 1994.
- BLUM, T. e INASAKI, I. A Study on Accoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. *ASME Transactions*, v.112, p.203-212, Aug. 1990.
- BLUME, C. e JACOB, W. Cutting Production Cost by a New Optimization Method. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.99-104.
- BOEHS, L. et al. Usinagem do Aço SAE 1045 Utilizando Material Cerâmico. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIÉRA MECÁNICA, 6, 1994, Santiago. *Anales...* Pontificia Universidad Católica del Chile: Santiago, nov. 1994. p.365-370.

- BOSSOM, P.K. Finish Machining of Hard Ferrous Workpieces. *Industrial Diamond Review*, v.50, n.5, p.228-232, 1990.
- BROZDA, J.T. Ceramic Tools Find New Applications. *Manufacturing Engineering*, p.34-39, May 1995.
- BSI, London. BS 3800; *Methods for Testing the Accuracy of Machine - Tools*. London, 1964. 58p.
- BULJAN, S.T. e SARIN, V.K. Machining Performance of Ceramic Tool. In: GORSLER, F. W. (Ed.). *Cutting Material*. Metals Park: ASM, 1981. p.335-358.
- BUTTON, S.T. *IM 325-Tópicos em Engenharia dos Materiais*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1994. (Notas de aula).
- CHANDRASEKARAN, H. e JOHANSSON, J.H.. Chip Flow and Notch Wear Mechanisms during the Machining of High Austenitic Stainless Steels. *CIRP*, v.43, n.1, p.101-105, 1994.
- CHIAVERINI, V. O Papel da Engenharia na Era dos Materiais. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE, 3, 1994, Belém. *Anais...* Universidade Federal do Pará: ABCM, jun. 1994. p.65-69.
- CHUNG, J.B. e KANNTEY-ASIBU, E. Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting. In: WORLD MEETING ON ACOUSTIC EMISSION, 4, 1991, Boston. *Proceedings...* Pittsburg: ASME, Sep. 1991. p.261-268.
- COULDING, B.N. Tool Life/Tool Temperature Relationship. *CIRP*, v.40, n.1, p.35-40, 1991.
- CRAFER, R.C. e OAKLEY, P.J. *Laser Processing in Manufacturing*. 2.ed. London: Chapman Hall, 1993.
- CUNHA, L.B. *Influência da Adição de Cobre nos Ferros Fundidos Nodulares Hiper-eutetóides sobre a Usinabilidade e Propriedades Mecânicas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1984. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica).
- COPPINI, N.L. e BREDÁ-DESTRO, J.P. *A Reliable Method for Measuring the Material Machining Strength Property*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 13, 12-15 dez., 1995, Belo Horizonte. (submetido).
- COPPINI, N.L. e BREDÁ-DESTRO, J.P. Parameter Analysis to Accomplish a Reliable Method to Characterize Intrinsic Material Machining Strength. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MATERIALS & TECHNOLOGY, Aug 12-15 1995, Dublin. *Proceedings ...* Dublin: Dublin City University Press, 1995. p.373-380. (AMPT' 95).

- COPPINI, N.L. e DESTRO, J.P.B. Machining Strength (MS) - A Property to Characterize Materials to Machining. In: CANADIAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 15, May 28 - June 01 1995, Victoria (Canada). *Proceedings ...* University of Victoria (British Columbia): B.Tabarrok and S. Dost Editors, 1995. p.684-685.
- COPPINI, N.L. e DESTRO, J.P.B. Resistência à Usinagem-Uma Propriedade de Caracterização dos Materiais. *Ciência & Tecnologia - Revista do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia*, Uberlândia: Editora da Universidade Federal de Uberlândia, n.2, p.37-45, jul./dez. 1994.
- CUPINI, N.L. e DESTRO, J.P.D. Resistência dos Materiais à Usinagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, dez. 1993. p.135-136.
- CUPINI, N.L. e DESTRO, J.P.B. Resistência à Usinagem - Contribuição à Caracterização de Materiais. In: CONGRESSO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 48, 1993, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, Jul. 1993. p.341-342.
- DALLY, J.W. et al.. *Instrumentation for Engineering Measurements*. 2.ed. New York: John Willey & Sons, 1984.
- DAN, L. e MATHEW, J. Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning-A Review. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, v.30, n.4, p.579-598, Jun. 1993.
- DAWSON, R.J. e CRAIG, G.B. Machinable White Iron. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.121-141.
- DEARNLEY, P.A. Rake and Flank Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Cemented Carbides. *ASME Transactions*, v.105, p.68-82, Aug. 1983.
- DE FILLIPI, A. e IPPOLITO, R. Analysis of the Correlation Among Cutting Force Variation (vs. Time), Chip Formation Parameters and Machinability. *CIRP*, v.21, n.1, p.29-30, 1972.
- DI GIANFRANCESCO, E. e PALLADINO, M. New Quality Control Systems. in Manufacturing Free-Cutting-Steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.104-116.
- DIETRICH, R. Polykristalline Diamant und CBN Werkzeug. *Werkstatt und Betrieb*, v.116, p.95-108, 1985.

- DRESCHER, J.D. et al. *Machining Forces in Diamond Turning of Plated Copper and Unplated Substrates*. Raleigh: North Caroline State University, 1990. p.35-78. (Report).
- DUMUR, D. e BOUCHER, P. New Predictive Solutions to very High Speed Machining. *CIRP*, v.43, n.1, p.363-366, 1994.
- FERREIRA, J.R. e CUPINI, N.L. Torneamento de Material Compósito reforçado com Fibras de Vidro e Carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, dez. 1993. p.1627-1630.
- FOCETT, S.C. Small Amplitude Vibration Compensation for Precision Diamond Turning. *Precision Engineering*, v.12, p.91-96, Apr. 1992.
- FRITISCH, R. New Approaches to Characterize the Performance of Coated Cutting Tools. *CIRP*, v.43, n.1, p.49-54, 1994.
- GONZALES, G.S. *Aspectos Metalúrgicos da Usinabilidade do Aço SAE 12L14 submetido a Crescentes Níveis de Deformação a Frio por Trefilação*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, out. 1992. (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- GORSLER, F.W. Machinability Data applied to Aircraft Engine Manufacture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.221-238.
- GORSLER, F.W. The Effect of High Densification on the Machinability of Cast Inconel 718. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.263-278.
- GREENSLET, J.M. e MINIS, I.E. Design of a Real Time Surface Roughness Measurement System for Turning. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.1483-1490.
- HERITIER, B., DUET, R. e THIVELLIER, D. Turning at Increasing Speed: A Convenient Method to Assess Machinability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.490-511.
- HOWERTON, D.H. *An Experimental and Numerical Investigation of Orthogonal Machining of Aluminum 6061-T6*. Raleigh: North Caroline State University, 1990. (PhD Partial Thesis).

- HUMPHREY, A.O., SHAW, S.W.K., MARTIN, J.W. Effect of Process Variables on the Structure of Directionally Recrystallized MA-6000. *Materials Characterization*, v.34, n.1, p.9-13, Jan. 1995.
- ISRAELSSON, J.A. A Progress Report on Cutting Tool Materials. *American Machinist*, v.136, n.12, p.39-40, Dec. 1992.
- IPT, São Paulo. MF-A5-11.11; *Máquinas - Ferramenta - Métodos de Ensaio*. São Paulo, 1974. 56p.
- ISO, Genebre. R 230; *Code d'Essais des Machines - Outils*. Genebre, 1961. 38p.
- IVETICH, M.J. e SCHMITT, L.B. The Use of a CNC Lathe For Machinability Testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.51-65.
- JAWAHIR, I.S. e FEI, J. A Comprehensive Evaluation of Tool Inserts for Chip Control using Fuzzy Modelling of Machinability Parameters. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Transactions of NAMRI...* v.23, p.205-214, 1993.
- JIS, Tokio. JIS 6000 Section B; *Machine Tool*. Nagoya, 1978. 25p.
- KANEDA, Y. Future Perspective of New Consumer Products and Automation Technology in Global Manufacturing Environment. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.5-12.
- KANKAANPÄ, H., PONTINEN, H. e KORHONEN, A.S. Machinability of Calcium - Treated Steels Using TiN-Coated High Speed Steel Tools. *Materials Science and Technology*, v.3, p.155-158, Feb. 1987.
- KATO, T., ABEYAMA, S. e KIMURA, A. The Effect of Ca Oxide Inclusions on the Machinability of Heavy Duty Steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.323-337.
- KOSKO, B. *Neural Networks and Fuzzy Systems*. 2.ed. London: Englewood Cliffs-Prentice Hall, 1992.
- KUNZELMANN, K.H. e HICKEL, R. The Machinability of different Dental Materials for CAD/CAM Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.479-488.
- LARSON, W.C. *Diamond Tool Wear*. Birmingham: Birmingham University, 1990. 25p. (Report).

- LESKOVAR, P. et al. The Metallurgical Aspects of Machining. *CIRP*, v.35, n.2, p.45-46, 1986.
- LIEBOWITZ, J. Expert Systems: A short Introduction. *Engineering Fracture Mechanics*, v.50, n.3/4, p.601-607, Mar-Apr. 1995.
- LIN, JT, BHATTACHARYYA, D. e LANE, C. Machinability of a Silicon Carbide reinforced Aluminium Metal Matrix Composite. *Wear*, v.181, p.883-888, 1995.
- LINDGREEN, B. Constant Feed Force Machinability Testing- Further Development and Industrial Application. *CIRP*, v.27, n.1, p.39-43, 1978.
- LIU, J.J. *Monitoring the Precision Machining Process: Sensors, Signal Processing and Information Analysis*. California: University of California at Berkeley, 1991. (PhD Thesis).
- LO CASTO, S. et al.. Cutting Temperatures Evaluation in Ceramic Tools: Experimental Tests, Numerical Analysis and SEM Observations. *CIRP*, v.43, n.1, p.73-76, 1994.
- LUCCA, D.A. et al. Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper. *CIRP*, v.40, n.1, p.69-72, 1991.
- LUO, R.C. et al. Future Trends in Multisensor Integration and Fusion. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELETRONICS, 3, 1994, Santiago. Proceedings... Santiago: IEEE, May 1994. p.7-12.
- MATSUMURA, T. et al. Autonomous Turning Operation with Predicting Tool Wear and Surface Roughness. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Transactions of NAMRI*... v.23, p.359-366, 1993.
- MERCHANT, M.E. Some Observations on the Past and Present of Research on Machining and Grinding. *Appl Mech Rev*, v.46, n.3, p.72-73, Mar. 1993.
- MILOVIC, R., WISE, M.L.H. e SMART, E.F. The Effect of Lead on the Machinability of low Carbon Steel with TiN Coated Tools. *CIRP*, v.32, n.1, p.79- 82, 1983.
- NAKAYAMA, K. et al. *Some Empirical Equations for Three Components of Resultant Cutting Force*. *CIRP*, v.32, n.1, p.33-35, 1983.
- NARANG, R.V. e FISCHER, G.W. Minimum Roughing Feed Rate for Double - Pass Turning Operation to be Economical under Finish Feed Constraint. In NORTH-AMERICAN MANUFACTURING AND RESEARCH CONFERENCE, 25, 1993, Oklahoma. *Transactions of NAMRI*... v.23, p.119-126, 1983.
- NARUTAKI, N. et al.. High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools. *CIRP*, v.42, n.1, p. 103-106, 1993.

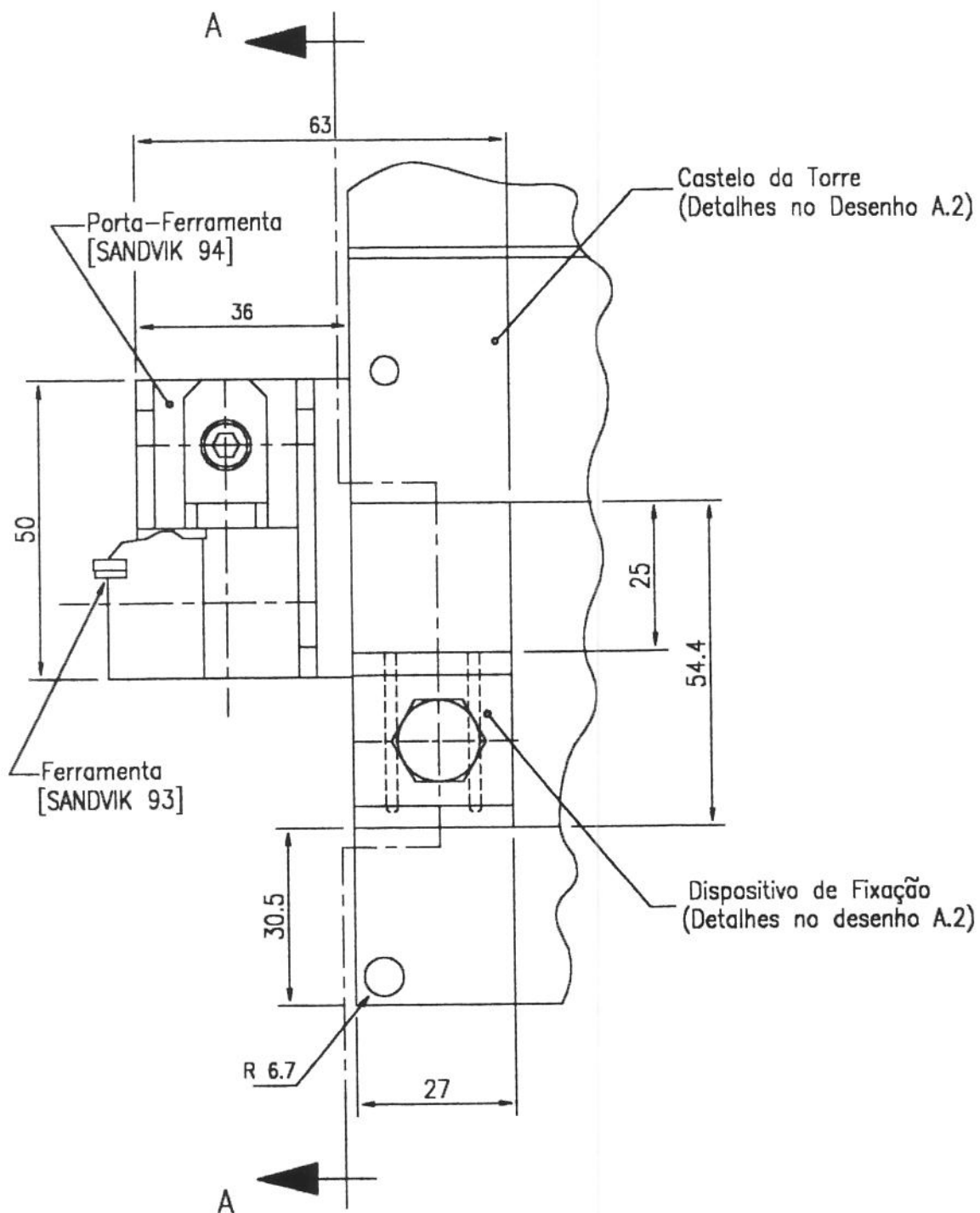
- NOAKER, P.M. Hard Effects on Hard Turning. *Manufacturing Engineering*, v.108, p.45-46 1992.
- OOMEN, J.M. e EISSES, J. Wear of Monocrystalline Diamond Tools During Ultraprecision Machining of Nonferrous Metals. *Precision Engineering*, v.14, p.206-218, Oct.1992.
- OWEN, D.B. *Handbook of Statistical Tables*. 2.ed. London: Addison Wesley, 1962.
- PARKER, R.A. et al. Tools Geometry and Wear Effects in Diamond Turning. *SPIE*, v.1320, p.341-352, 1990.
- PATTON, W.J. *Materials in Industry*. 1.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1968.
- PEKLENIK, J. The Impact of Engineering Materials on the Development of Fabrication Processes. *CIRP*, v.31, n.2, pp.471-475, 1982.
- PEYRE, J.P. e DUCHATEAU, D. As Perspectivas são de uma grande Evolução dos Revestimentos PVC e CVD. *Máquinas & Metais*, p.42-50, Abr. 1994.
- POWELL, J. *CO₂ Laser Cutting*. 3.ed. Berlin: Springer Verlag, 1993.
- PYTEL, S.M., GARCIA, C.I. e DE ARDO, A.J. *Quantitative Assessment of the Influence of Calcium Additions on Tool Wear in 8620 Steel*. SAE Technical Paper Series 930964, 1993.
- RAHMAN, M et al.. A Three - Dimensional Model of Chip Flow, Chip Curl and Chip Breaking under the Concept of Equivalent Parameters. *International Journal of Machine Tool Manufacturing*, v.57, p.1015-1031, 1995.
- ROENING, W. Machining of New Materials. *CIRP*, v.39, n.2, p.673-681, 1990.
- RODRIGUES, F.SALOMÃO, CUPINI, N.L., DESTRO, J.P.B. Calibração de Dinamômetro para Medição de Forças em Usinagem. In CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 12, 1993, São Carlos. *Anais ...* São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1994. p.134.
- SANTHANAKRISHNAN, G. et al.. Mechanics of Tool Wear Turning Advanced Fibrous Composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.489-500.
- SCHIMANOVICH, M.A. et al. Contactless Manufacturing in the Past, at Present and in the Future. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.1225-1228.
- SCHMIDT, L.B. e WANNEL, P.H. Improved Material Uniformity through Machinability Testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFLUENCE OF

- METALLURGY ON THE MACHINABILITY OF ENGINEERING MATERIALS, 1982, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, Sep. 13-15 1982. p.465-489.
- SCHULTO, H. High Speed Machining. *CIRP*, v.41, n.2, p.637-643, 1992.
- SILVA, A.D. e TONELLI, P.A. Consideração da Restrição de Força de Corte na Determinação das Condições de Usinagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, dez. 1993. p.1655-1658.
- SILVEIRA, J. *Influência de Fatores Metalúrgicos na Usinabilidade de Ferros Fundidos FE 6002, FE 4212 e FC 25*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1983. (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica).
- SPRAW, E.E. The New ABC's of Cost Justification. *Manufacturing Engineering*, v.109, p.27-32, 1992.
- STEEN, W.M. Laser Material Processing - The Market and the Technology. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA, 6, 1994, Santiago. *Anales...* Pontificia Universidad Católica del Chile: Santiago, nov. 1994. p.29-33.
- STRENKOWSKI, J.S. e LARSON, W.C. Tool Flank Wear in Single Point Diamond Turning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.295-302.
- SUKVITTAYAWONG, S. e INASAKI, I. Identification of Chip Form in Metal Cutting with an Acoustic Emission Sensor. In: WORLD MEETING ON ACOUSTIC EMISSION, 4, 1991, Boston. *Proceedings...* Pittsburg: ASME, Sep. 1991. p.80-87.
- TIPNIS, V.A. e JOSEPH, R.A. A Study of Machining of Low Carbon Resulphurized Steel on a Multispindle Automatic Screw Machine. *ASME Transactions*, v.93, p.571-584, May 1971.
- TOENSCOFF, H.K. et al. Wear Characteristics of Cermet Cutting Tools. *CIRP*, v.43, n.1, p.89-92, 1994.
- vAN VLACK, L.H. *Material Science for Engineers*. 4.ed. London: Addison Wesley, 1970.
- WANG, K. et al. A Statistical Model of R&D Cost in the Project Management. In: JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1994, Kobe-Japan. *Annals of...* Dearborn: SME, 1995. p.1143-1148.
- WEINERT, K. Relation between Process Energy and Tool Wear when Turning Hardfacing Alloys. *CIRP*, v.43, n.1, p.97-100, 1994.

- WEINERT, K. Turning of Fiber and Particle Reinforced Aluminium. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993, Maryland. *Proceedings...* NIST Special Publication n.847. Gaithersburg: Said Johanmir Editor, July 1993. p.437-446.
- WEINGAERTNER, W. et al. Análise Comparativa entre Usinagem de Ligas de Alumínio e Cobre com relação à Qualidade Superficial e à Formação de Cavaco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, dez. 1993. p.1659-1662.
- WEINGAERTNER, W.I. Torneamento de Aço Temperado com CBN. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA, 6, 1994, Santiago. *Anales...* Pontificia Universidad Católica del Chile: Santiago, nov. 1994. p.555-559.
- WHITAKER, J.W. e MILLER Jr., A.C. Acoustic Emission as a Process Monitor for Diamond Machining of Metal Optical Components. In: WORLD MEETING ON ACOUSTIC EMISSION, 4, 1991, Boston. *Proceedings...* Pittsburg: ASME, Sep. 1991. p.225-230.
- WIJENAYAKE, A.P. Machinability Testing and Utilization in Airframe Manufacture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINABILITY TESTING AND UTILIZATION OF MACHINABILITY DATA, 1986, Illinois. *Proceedings...* Metals Park: ASM, June 12-13 1986. p.253-273.
- WILKS, J., WILKS, E. *Properties and Applications of Diamond*. 3.ed. Oxford: Butterworths-Heinemann, 1991.
- YANNOULAKIS, N.J. JOSHI, S.B., WYSK, R.A. Quantitative Measures of Manufacturability for Rotational Parts. *ASME Transactions*, v.116, p.189-198, May 1994.

Anexo A

Desenhos Ilustrativos de Fixação do Porta-Ferramenta nas Máquinas



Corte A-A representado no desenho A.3
(conforme posição de montagem do porta-ferramenta)



UNICAMP

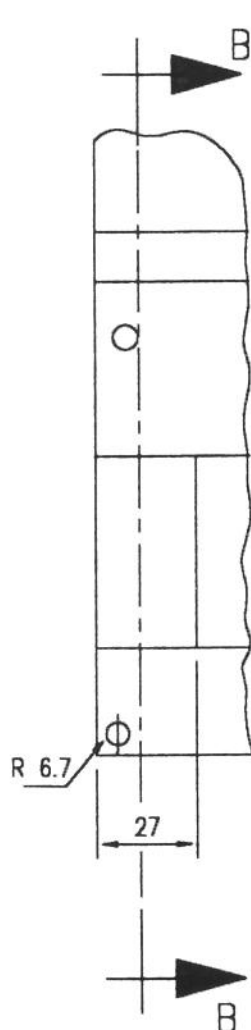
VISTA PRINCIPAL DE CONJUNTO DE FIXAÇÕES NA MÁQUINA II

ANEXO A

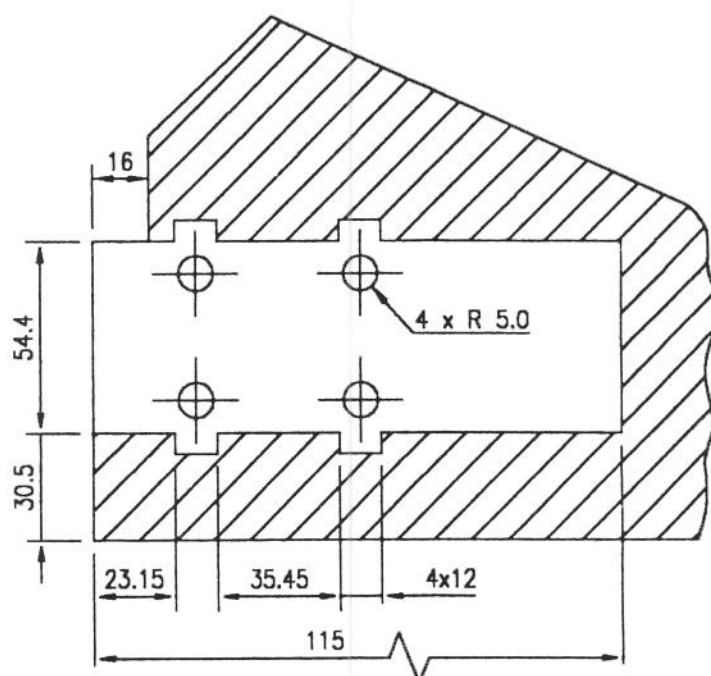
DESENHO A.1

DATA 15/12/95

PAG. A1

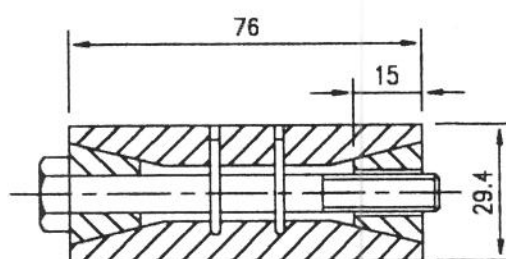


Detalhe 1
Sem Escala

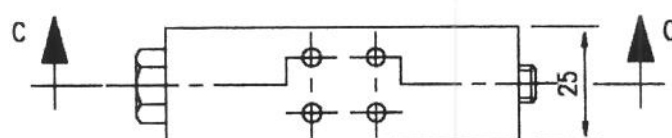


Corte BB
Sem Escala

Detalhe 2



Corte C-C



UNICAMP

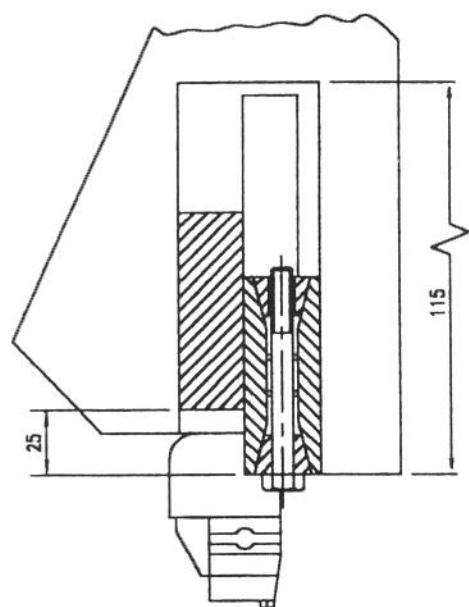
VISTA DE DETALHES DO DESENHO A.1

ANEXO A

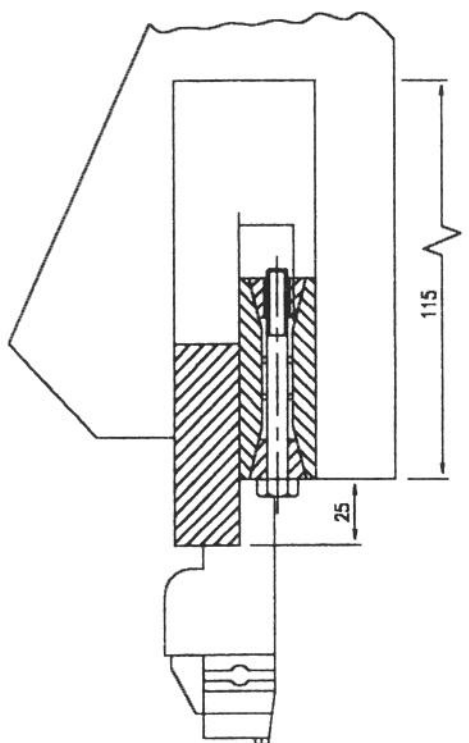
DESENHO A.2

DATA 15/12/95

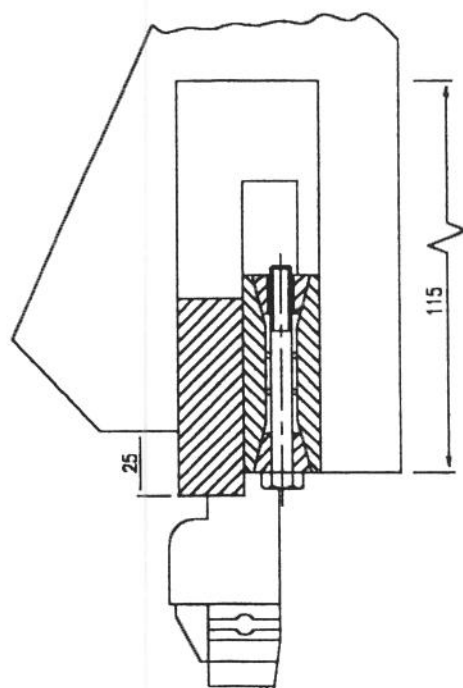
PAG. A2



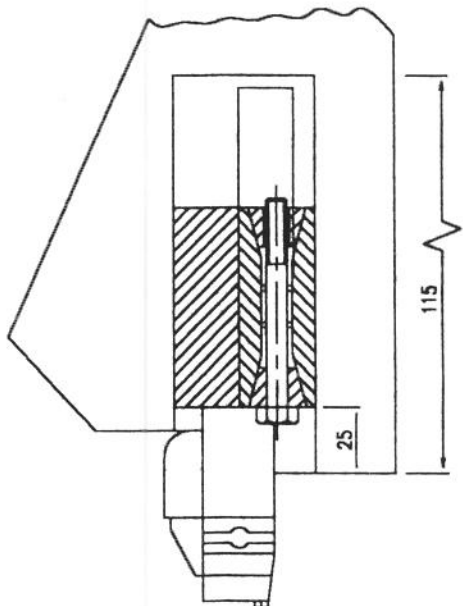
FIXAÇÃO 1
Corte A-A



FIXAÇÃO 2
Corte A-A



FIXAÇÃO 3
Corte A-A



FIXAÇÃO 4
Corte A-A

Sem Escala



UNICAMP

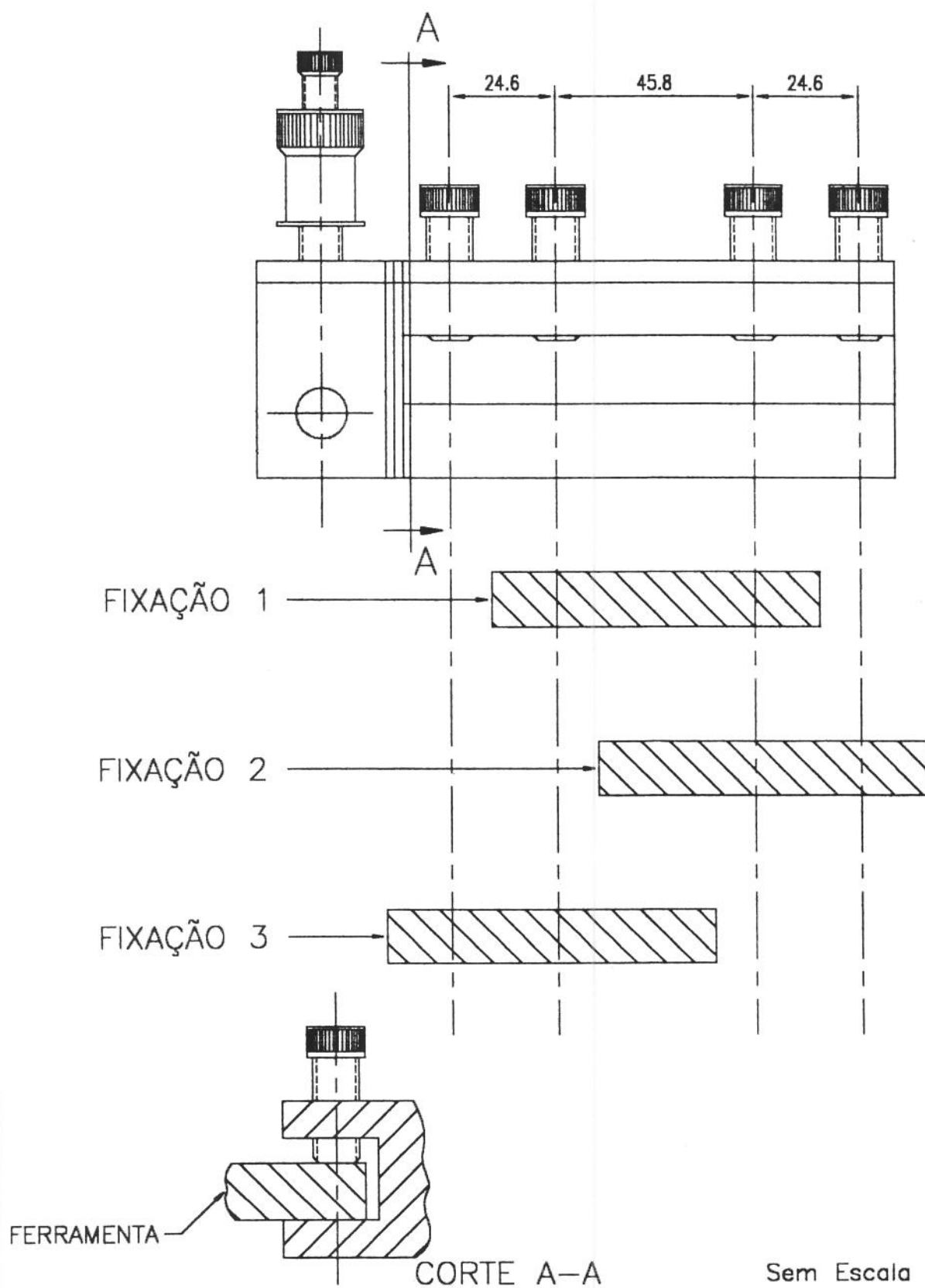
VISTA PARCIAL DAS FIXAÇÕES NA MÁQUINA II

ANEXO A

DESENHO A.3

DATA 15/12/95

PAG. A3



UNICAMP

ALTERNATIVAS DE FIXAÇÃO DO SUPORTE NA MÁQUINA IV

ANEXO A

DESENHO A.4

DATA 18/12/95

PAG. A4

Anexo B

**Resultados Completos da Medição
das Forças Médias de Avanço para
Cálculo do Número de Coppini**

Tabela B1.1A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 55 mm - Fixação I (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
55	1	38	38	38	38	38
55	2	39	38	38	38	38
55	3	40	39	38	39	38
55	4	41	39	39	39	38
55	5	41	40	39	40	39
55	6	41	40	39	40	39
55	7	42	40	40	41	40
55	8	42	41	41	42	41
53	1	43	42	42	43	42
53	2	43	42	42	43	42
53	3	43	42	43	43	43
53	4	43	42	43	43	43
53	5	44	43	44	44	43
53	6	44	44	44	44	44
53	7	45	45	45	45	44
53	8	46	46	45	45	45
51	1	49	49	48	48	48
51	2	49	49	48	48	48
51	3	50	49	48	48	48
51	4	50	49	49	50	49
51	5	51	49	49	51	49
51	6	51	50	50	51	50
51	7	52	51	51	51	51
51	8	53	51	51	52	51
49	1	60	59	59	60	59
49	2	60	60	59	60	59
49	3	61	61	60	61	59
49	4	61	62	60	61	60
49	5	62	63	61	62	61
49	6	63	63	61	63	62
49	7	64	64	62	63	62
49	8	65	64	63	64	63
Número de Coppini		49.3	48.6	48.1	48.8	48.0
Número de Coppini - Média Geral				48.5	Desvio	0.23

Tabela B1.2A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]

Diâmetro 55 mm - Fixação II (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
55	1	40	40	40	40	40
55	2	40	40	40	40	40
55	3	41	40	40	40	41
55	4	41	40	41	40	41
55	5	41	41	41	41	42
55	6	42	42	42	42	42
55	7	42	42	42	42	42
55	8	43	42	43	42	43
53	1	44	43	44	43	44
53	2	44	43	44	44	44
53	3	45	44	45	45	45
53	4	45	45	45	45	45
53	5	45	45	46	46	46
53	6	46	46	46	46	47
53	7	46	46	47	47	47
53	8	47	47	48	47	48
51	1	50	50	51	50	51
51	2	50	50	51	50	51
51	3	51	50	51	51	52
51	4	51	51	52	51	52
51	5	51	51	52	52	53
51	6	52	51	53	53	53
51	7	52	52	54	53	54
51	8	53	52	54	54	54
49	1	62	61	62	61	62
49	2	63	61	63	61	62
49	3	63	62	64	61	63
49	4	64	63	64	61	63
49	5	65	64	65	62	64
49	6	65	64	66	63	64
49	7	66	65	67	64	65
49	8	66	65	67	65	66
Número de Coppini		50.5	49.9	50.9	50.1	50.8
Número de Coppini - Média Geral				50.5	Desvio	0.20

Tabela B1.3A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 55 mm - Fixação III (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
55	1	38	38	38	38	38
55	2	39	38	39	39	39
55	3	40	39	40	40	39
55	4	40	39	40	40	40
55	5	40	40	41	40	40
55	6	41	41	41	41	41
55	7	41	41	41	41	41
55	8	42	42	42	41	41
53	1	43	43	43	42	42
53	2	43	43	44	42	42
53	3	43	43	44	42	42
53	4	44	44	44	43	43
53	5	44	44	45	43	43
53	6	44	45	46	44	44
53	7	45	46	47	44	45
53	8	46	47	48	45	45
51	1	49	50	49	49	49
51	2	49	51	50	50	50
51	3	49	51	50	51	50
51	4	50	52	51	51	52
51	5	50	52	52	52	52
51	6	51	52	52	52	52
51	7	52	53	53	52	53
51	8	53	54	53	53	53
49	1	59	60	60	60	59
49	2	59	60	61	60	60
49	3	60	61	62	61	61
49	4	60	62	62	62	62
49	5	61	63	63	62	63
49	6	62	64	64	63	63
49	7	63	65	65	64	63
49	8	64	66	66	64	64
Número de Coppini		48.9	49.7	49.9	49.1	49.1
Número de Coppini - Média Geral				49.3	Desvio	0.19

Tabela B1-1B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 55 mm - Fixação I (sem contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
55	1	38	38	38
55	2	39	39	38
55	3	39	39	38
55	4	39	39	39
55	5	39	40	39
55	6	40	40	40
55	7	41	40	40
55	8	42	41	41
53	1	43	42	42
53	2	43	43	42
53	3	43	43	42
53	4	43	43	43
53	5	44	43	43
53	6	44	44	43
53	7	45	45	44
53	8	46	46	45
51	1	49	49	48
51	2	49	49	48
51	3	49	49	49
51	4	49	49	49
51	5	50	49	49
51	6	51	50	50
51	7	52	50	51
51	8	53	51	51
49	1	60	59	59
49	2	60	59	59
49	3	61	60	60
49	4	61	60	60
49	5	62	61	61
49	6	63	62	62
49	7	64	63	63
49	8	65	64	63
Número de Coppini		48.9	48.4	48.1
Média Geral		48.5	Desvio	0.25

Tabela B1.2B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 55 mm - Fixação II (sem contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
55	1	39	39	39
55	2	40	40	40
55	3	41	40	40
55	4	41	41	41
55	5	42	41	41
55	6	42	42	42
55	7	42	42	42
55	8	43	42	43
53	1	44	43	44
53	2	44	44	44
53	3	45	45	45
53	4	45	45	45
53	5	45	46	46
53	6	46	46	46
53	7	46	47	46
53	8	47	47	47
51	1	50	51	51
51	2	51	51	51
51	3	51	51	52
51	4	51	52	52
51	5	52	52	53
51	6	52	53	53
51	7	53	53	53
51	8	53	53	53
49	1	59	60	61
49	2	60	61	62
49	3	61	62	63
49	4	61	63	64
49	5	62	64	65
49	6	63	65	66
49	7	64	66	67
49	8	65	67	67
Número de Coppini		50.0	50.4	50.8
Média Geral		50.4	Desvio	0.22

Tabela B1.3B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]

Diâmetro 55 mm - Fixação III (sem contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
55	1	38	38	39
55	2	39	38	39
55	3	40	39	40
55	4	40	39	40
55	5	40	40	40
55	6	41	41	41
55	7	42	41	41
55	8	42	42	42
53	1	43	43	44
53	2	43	43	44
53	3	43	44	45
53	4	44	44	45
53	5	44	45	45
53	6	45	45	46
53	7	46	46	46
53	8	46	46	47
51	1	48	48	49
51	2	49	49	49
51	3	49	50	50
51	4	50	50	50
51	5	51	51	51
51	6	52	51	52
51	7	52	52	52
51	8	53	52	53
49	1	60	59	60
49	2	60	59	61
49	3	62	60	62
49	4	63	61	63
49	5	64	62	64
49	6	64	63	65
49	7	65	64	66
49	8	66	65	67
Número de Coppini		49.5	49.1	49.9
Média Geral		49.5	Desvio	0.25

Tabela B2.1A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação I (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
45	1	38	38	38	38	38
45	2	39	38	38	38	38
45	3	39	38	39	39	38
45	4	39	39	39	39	39
45	5	40	39	39	40	39
45	6	40	39	40	40	40
45	7	40	40	40	40	41
45	8	41	41	41	41	42
43	1	42	42	42	42	43
43	2	42	42	42	43	43
43	3	42	43	43	43	43
43	4	43	43	43	43	44
43	5	43	43	44	43	44
43	6	43	44	44	44	44
43	7	44	45	45	44	45
43	8	45	45	45	45	46
41	1	48	48	49	48	49
41	2	48	48	49	48	49
41	3	48	49	49	48	49
41	4	49	49	50	49	49
41	5	49	50	50	49	50
41	6	50	50	51	50	51
41	7	51	51	51	51	52
41	8	52	52	52	52	53
39	1	59	59	59	59	60
39	2	59	59	60	59	60
39	3	59	60	61	60	61
39	4	60	60	62	60	61
39	5	60	61	63	61	62
39	6	61	62	64	62	63
39	7	63	63	65	63	64
39	8	64	64	66	64	65
Número de Coppini		48.1	48.3	48.8	48.3	48.9
Número de Coppini - Média Geral				48.5	Desvio	0.16

Tabela B2.2A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação II (com contra-ponto)

Dia[mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
45	1	40	40	40	40	40
45	2	40	40	41	40	41
45	3	40	40	41	40	41
45	4	41	41	41	40	41
45	5	41	41	41	40	41
45	6	42	41	42	41	41
45	7	42	42	42	41	42
45	8	43	42	43	42	42
43	1	44	44	44	43	43
43	2	44	44	44	43	43
43	3	45	45	44	43	44
43	4	45	46	45	43	44
43	5	46	46	45	44	45
43	6	46	46	46	44	45
43	7	47	47	46	45	45
43	8	48	48	47	46	46
41	1	50	50	51	51	51
41	2	50	50	51	52	52
41	3	51	51	52	52	52
41	4	51	52	53	53	53
41	5	52	53	53	54	53
41	6	52	54	54	55	54
41	7	53	55	55	55	54
41	8	54	56	56	55	54
39	1	59	61	61	59	61
39	2	59	62	62	60	62
39	3	60	63	62	61	63
39	4	60	64	63	62	64
39	5	62	65	64	63	65
39	6	64	65	65	65	66
39	7	65	66	66	66	67
39	8	66	67	67	66	68
Número de Coppini		50.1	50.8	50.8	50.1	50.7
Número de Coppini - Média Geral				50.5	Desvio	0.18

Tabela B2.3A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação III (com contra-ponto)

Dia[mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
45	1	40	40	39	40	39
45	2	40	40	40	40	40
45	3	40	40	40	40	40
45	4	40	40	40	40	40
45	5	41	40	41	41	41
45	6	41	41	41	41	41
45	7	41	41	42	41	42
45	8	42	42	42	42	42
43	1	43	43	43	44	43
43	2	43	44	44	44	44
43	3	44	44	45	45	45
43	4	44	44	45	45	46
43	5	45	45	45	46	46
43	6	45	45	45	46	47
43	7	46	45	46	47	47
43	8	47	46	47	48	48
41	1	49	50	50	50	50
41	2	50	51	50	51	50
41	3	50	52	50	52	51
41	4	51	52	51	52	52
41	5	51	53	52	52	52
41	6	52	54	52	52	52
41	7	52	54	52	53	52
41	8	53	55	53	53	53
39	1	60	60	61	61	60
39	2	61	61	61	62	61
39	3	62	62	62	63	62
39	4	63	63	63	64	63
39	5	64	64	64	65	64
39	6	65	65	64	66	65
39	7	65	65	65	67	66
39	8	66	66	66	68	67
Número de Coppini		49.9	50.2	50.0	50.7	50.3
Número de Coppini - Média Geral				50.2	Desvio	0.13

Tabela B2.1B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação I (sem contra-ponto)

Dia[mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
45	1	38	38	38
45	2	38	38	39
45	3	38	39	39
45	4	39	40	40
45	5	39	40	40
45	6	40	40	40
45	7	40	41	40
45	8	41	42	41
43	1	42	43	42
43	2	42	43	42
43	3	43	43	42
43	4	43	43	43
43	5	43	44	43
43	6	44	44	43
43	7	44	44	44
43	8	45	45	44
41	1	48	48	48
41	2	48	48	49
41	3	48	49	49
41	4	49	50	50
41	5	49	50	50
41	6	50	51	50
41	7	51	52	51
41	8	52	53	52
39	1	59	60	59
39	2	59	60	60
39	3	60	60	60
39	4	61	61	60
39	5	61	62	61
39	6	62	63	62
39	7	63	64	63
39	8	64	65	64
Número de Coppini		48.2	48.8	48.4
Média	48.5	Desvio	0.19	

Tabela B2.2B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação II (sem contra-ponto)

Dia[mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
45	1	39	39	39
45	2	39	40	40
45	3	40	40	40
45	4	40	40	40
45	5	41	40	41
45	6	41	40	41
45	7	41	41	42
45	8	42	42	42
43	1	44	43	43
43	2	44	43	44
43	3	44	44	45
43	4	45	44	45
43	5	45	45	45
43	6	45	46	46
43	7	46	47	47
43	8	47	47	48
41	1	49	50	50
41	2	50	51	50
41	3	50	51	51
41	4	51	51	51
41	5	51	52	51
41	6	51	52	52
41	7	52	53	53
41	8	53	54	54
39	1	60	61	61
39	2	60	62	62
39	3	61	63	63
39	4	62	63	64
39	5	63	64	65
39	6	64	65	66
39	7	65	66	67
39	8	66	67	68
Número de Coppini		49.7	50.2	50.5
Média	50.1	Desvio	0.23	

Tabela B2.3B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 45 mm - Fixação III (sem contra-ponto)

Dia[mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
45	1	38	38	38
45	2	38	38	39
45	3	38	39	39
45	4	39	40	39
45	5	40	40	40
45	6	40	40	40
45	7	41	41	41
45	8	42	42	42
43	1	43	43	43
43	2	43	43	43
43	3	44	43	43
43	4	44	44	43
43	5	45	44	44
43	6	46	44	44
43	7	46	45	45
43	8	47	46	46
41	1	49	48	49
41	2	49	49	49
41	3	50	49	50
41	4	50	50	50
41	5	51	51	51
41	6	52	51	51
41	7	53	52	52
41	8	53	52	53
39	1	60	59	60
39	2	61	60	61
39	3	62	60	62
39	4	63	61	63
39	5	64	62	64
39	6	65	63	65
39	7	66	64	66
39	8	67	65	67
Número de Coppini		49.7	48.9	49.4
Média	49.3	Desvio	0.21	

Tabela B3A - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 35 mm - Fixação I (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
35	1	38	38	38	38	38
35	2	39	38	38	38	38
35	3	39	39	39	38	39
35	4	40	39	39	39	39
35	5	40	40	40	39	40
35	6	41	40	40	39	40
35	7	41	41	41	40	40
35	8	42	41	42	41	41
33	1	43	42	43	43	43
33	2	43	42	43	43	43
33	3	43	43	43	43	43
33	4	44	43	44	44	43
33	5	44	44	44	44	43
33	6	45	44	45	45	44
33	7	46	45	45	45	44
33	8	46	45	46	46	45
31	1	49	48	49	48	49
31	2	49	48	49	48	49
31	3	49	48	49	48	49
31	4	49	48	49	49	49
31	5	50	49	50	50	50
31	6	51	50	51	50	50
31	7	52	51	52	51	51
31	8	53	52	53	52	52
29	1	60	59	60	59	59
29	2	60	59	60	59	60
29	3	61	59	60	60	60
29	4	61	60	60	60	61
29	5	62	61	61	61	62
29	6	63	62	62	62	63
29	7	64	63	63	63	64
29	8	65	63	64	63	65
Número de Coppini		49.1	48.3	48.8	48.4	48.6
Número de Coppini - Média Geral				48.6	Desvio	0.16

Tabela B3B - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 35 mm - Fixação I (sem contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
35	1	38	38	38
35	2	38	39	39
35	3	39	39	39
35	4	39	39	39
35	5	39	40	40
35	6	40	40	40
35	7	40	41	40
35	8	41	42	41
33	1	42	43	42
33	2	42	43	43
33	3	43	44	43
33	4	43	44	44
33	5	44	44	44
33	6	44	45	44
33	7	45	45	44
33	8	45	46	45
31	1	48	49	48
31	2	49	49	48
31	3	49	50	49
31	4	50	50	50
31	5	50	51	50
31	6	50	51	51
31	7	51	52	51
31	8	51	53	52
29	1	59	60	59
29	2	59	60	59
29	3	60	61	60
29	4	60	61	60
29	5	61	62	61
29	6	61	63	62
29	7	62	64	63
29	8	63	65	64
Número de Coppini		48.3	49.2	48.5
Média	48.6	Desvio	0.26	

Tabela B4 - EP 1 - Força Média de Avanço [kgf]
Diâmetro 25 mm - Fixação I (com contra-ponto)

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
25	1	38	38	38	39	38
25	2	38	38	39	39	38
25	3	39	38	39	39	39
25	4	40	39	40	40	39
25	5	41	40	40	40	40
25	6	41	40	41	41	40
25	7	41	41	41	41	40
25	8	42	41	42	42	41
23	1	43	42	43	43	42
23	2	43	42	43	43	43
23	3	43	43	44	44	43
23	4	44	44	44	44	44
23	5	44	44	45	44	44
23	6	45	44	45	45	45
23	7	45	45	46	45	45
23	8	46	45	46	46	45
21	1	49	48	49	49	48
21	2	49	49	49	49	49
21	3	49	50	50	49	50
21	4	50	50	50	50	50
21	5	51	51	51	50	50
21	6	51	51	51	50	51
21	7	52	52	52	51	51
21	8	53	52	53	52	51
19	1	60	59	60	60	59
19	2	60	60	60	60	59
19	3	61	60	61	61	60
19	4	61	61	62	61	61
19	5	62	61	63	62	62
19	6	62	62	63	62	63
19	7	63	63	64	63	64
19	8	64	64	65	64	64
Número de Coppini		49.1	48.7	49.3	49.0	48.7
Número de Coppini - Média Geral				49.0	Desvio	0.13

Tabela B5 - EP 2 - Força Média de Avanço [kgf]
Aço ABNT 1212 laminado a quente

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
20	1	38	38	38
20	2	38	38	38
20	3	38	38	39
20	4	39	38	39
20	5	39	39	39
20	6	40	39	39
20	7	41	40	40
20	8	42	41	41
18	1	43	42	42
18	2	43	43	42
18	3	43	43	43
18	4	43	43	43
18	5	43	43	43
18	6	43	44	44
18	7	44	44	44
18	8	45	45	45
16	1	48	48	48
16	2	48	49	48
16	3	49	49	49
16	4	49	50	49
16	5	50	51	50
16	6	51	51	50
16	7	52	52	51
16	8	53	53	52
14	1	60	60	59
14	2	60	60	59
14	3	61	60	60
14	4	61	61	61
14	5	62	61	61
14	6	63	62	62
14	7	64	63	63
14	8	65	64	63
Número de Coppini		48.7	48.5	48.3
Média	48.5	Desvio	0.13	

Tabela B.6A - EP 2 - Força Média de Avanço [kgf]

Aço ABNT 12L14 trefilado a 25%

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
20	1	38	38	38
20	2	38	38	38
20	3	38	38	38
20	4	38	38	38
20	5	39	39	38
20	6	39	39	39
20	7	39	39	39
20	8	39	40	40
18	1	40	41	41
18	2	40	41	41
18	3	41	41	41
18	4	41	41	41
18	5	42	41	41
18	6	42	42	41
18	7	42	42	42
18	8	42	42	42
16	1	43	43	43
16	2	44	43	43
16	3	44	43	44
16	4	45	44	44
16	5	45	44	44
16	6	45	44	44
16	7	46	45	45
16	8	46	45	45
14	1	52	51	51
14	2	52	51	51
14	3	52	51	52
14	4	52	51	52
14	5	53	52	52
14	6	53	52	53
14	7	53	52	53
14	8	54	53	53
Número de Coppini		44.3	43.9	44.0
Média	44.0	Desvio	0.12	

Tabela B.6B - EP 2 - Força Média de Avanço [kgf]
Aço ABNT 12L14 trefilado a 15%

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
20	1	35	35	35
20	2	35	36	36
20	3	36	37	37
20	4	36	37	37
20	5	37	38	37
20	6	37	38	38
20	7	38	39	38
20	8	38	39	38
18	1	39	40	39
18	2	39	40	39
18	3	40	40	39
18	4	40	40	40
18	5	40	40	40
18	6	41	41	40
18	7	41	41	41
18	8	42	41	41
16	1	43	43	43
16	2	43	43	43
16	3	44	44	43
16	4	44	44	43
16	5	44	44	44
16	6	45	44	44
16	7	45	45	44
16	8	46	45	45
14	1	51	50	50
14	2	51	50	50
14	3	52	51	51
14	4	52	51	51
14	5	53	52	52
14	6	53	52	52
14	7	54	53	53
14	8	55	54	53
Número de Coppini		43.4	43.3	43.0
Média	43.3	Desvio	0.13	

Tabela B.6C - EP 2 - Força Média de Avanço [kgf]
Aço ABNT 12L14 laminado a quente

Dia [mm]	CDP Nr.	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
20	1	33	33	33
20	2	33	33	33
20	3	34	34	34
20	4	34	34	34
20	5	34	35	34
20	6	34	35	35
20	7	35	35	35
20	8	36	36	36
18	1	37	37	37
18	2	37	37	38
18	3	37	38	38
18	4	38	38	38
18	5	38	38	39
18	6	39	39	39
18	7	39	39	40
18	8	39	40	40
16	1	43	44	44
16	2	43	44	44
16	3	43	44	44
16	4	44	44	44
16	5	44	44	45
16	6	45	45	45
16	7	45	45	45
16	8	46	46	45
14	1	51	52	51
14	2	51	52	51
14	3	51	52	51
14	4	52	52	52
14	5	52	53	52
14	6	53	54	53
14	7	54	55	54
14	8	55	56	55
Número de Coppini		42.2	42.6	42.4
Média	42.4	Desvio	0.13	

Tabela B7: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina I - Material: Aço ABNT 1212

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
2	38	38	39	38	39	38	38	38	38	38
3	39	38	39	39	39	39	39	39	38	39
4	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
5	39	40	40	40	40	39	40	40	39	39
6	40	40	40	40	40	40	40	40	40	39
7	41	40	41	41	40	40	41	40	40	40
8	41	41	41	42	41	41	41	41	41	41
9	42	42	42	43	42	42	42	42	42	42
10	42	42	42	43	42	42	42	42	42	42
11	42	43	43	43	42	42	43	42	42	42
12	43	43	43	43	43	42	44	43	43	43
13	43	43	43	44	43	43	44	43	43	43
14	44	44	44	44	44	43	45	44	44	44
15	45	45	45	45	45	44	45	45	44	45
16	46	46	46	45	46	44	46	46	45	46
17	48	48	49	48	49	48	49	48	48	49
18	48	48	49	48	49	49	49	48	49	49
19	49	49	49	48	49	49	49	49	50	49
20	49	49	50	49	50	49	50	50	50	49
21	50	49	50	49	50	50	50	50	50	50
22	50	50	51	50	51	50	50	51	50	50
23	51	50	52	51	52	51	51	52	51	51
24	51	51	53	52	53	52	53	53	52	52
25	59	59	60	59	60	59	60	60	59	59
26	59	59	60	59	60	59	60	60	59	59
27	59	60	60	60	60	59	60	60	60	60
28	60	60	61	60	61	60	61	61	60	61
29	60	61	61	60	62	60	62	62	62	62
30	61	62	62	61	63	61	63	63	63	63
31	62	63	63	62	64	62	64	64	64	63
32	63	64	65	63	65	63	65	64	64	63
Nr. Coppini	48.2	48.3	48.8	48.3	48.8	48.0	48.8	48.7	48.4	48.4
	Média		48.5			Média		48.5		
	Desvio		0.13			Desvio		0.14		
	Média Geral					48.5	Desvio		0.13	

Tabela B8: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina I - Material: Aço ABNT 12L14

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	33	34	33	33	33	33	33	33	33	33
2	33	34	33	34	33	34	34	33	34	33
3	33	34	33	34	33	34	34	33	34	33
4	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
5	34	35	34	34	34	34	35	34	34	34
6	34	35	34	35	35	35	35	35	35	34
7	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
8	35	36	35	36	36	36	35	36	35	35
9	37	37	38	37	38	38	38	37	38	38
10	37	37	38	37	38	38	38	37	38	38
11	38	37	38	37	39	39	38	37	38	38
12	38	38	38	38	39	39	38	38	38	39
13	39	38	39	38	40	39	39	38	39	39
14	39	39	39	39	40	39	40	38	39	39
15	40	39	39	39	40	40	40	39	40	39
16	40	41	40	40	41	41	41	40	41	40
17	43	44	43	43	44	44	43	43	44	43
18	43	44	43	43	44	44	43	43	44	43
19	43	44	44	43	44	44	43	43	44	43
20	44	44	44	44	44	44	44	44	44	43
21	44	44	44	44	44	45	44	44	45	44
22	45	45	44	44	45	45	44	44	45	44
23	45	45	45	45	45	46	45	45	45	44
24	46	46	45	45	46	46	46	45	46	45
25	51	52	51	51	52	52	51	51	52	51
26	51	52	51	51	52	52	51	51	52	51
27	51	52	51	51	52	52	52	52	52	52
28	52	52	52	52	52	53	52	52	52	52
29	53	53	52	52	53	53	52	52	53	53
30	53	54	53	53	54	54	53	53	53	53
31	54	55	54	54	55	55	54	54	54	54
32	55	56	55	55	56	55	55	55	55	55
Nr. Coppini	42.3	42.7	42.2	42.2	42.8	42.9	42.5	42.1	42.7	42.2
	Média		42.4			Média		42.5		
	Desvio		0.13			Desvio		0.14		
	Média Geral					42.4		Desvio		0.13

Tabela B9: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina I - Material: Aço ABNT 1045

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	41	42	41	42	42	41	42	42	41	41
2	41	42	41	42	42	41	42	42	41	41
3	42	43	42	43	42	42	42	43	42	42
4	42	43	42	43	43	42	43	43	42	42
5	43	44	43	43	43	43	43	44	43	43
6	43	44	43	44	44	44	44	44	44	44
7	44	44	44	44	45	45	45	45	45	44
8	45	45	45	45	45	45	46	46	46	45
9	46	46	47	46	47	46	47	47	46	46
10	46	46	47	46	47	46	47	47	46	46
11	47	47	47	47	47	47	48	48	47	47
12	48	47	48	47	48	47	48	48	47	47
13	48	48	48	48	48	48	48	49	48	48
14	48	48	48	48	49	48	48	49	49	48
15	49	49	49	48	49	49	49	50	49	49
16	50	49	49	49	50	49	49	50	50	50
17	54	53	53	53	54	53	54	54	53	53
18	54	54	53	53	54	54	54	54	54	53
19	55	54	53	54	54	54	54	55	54	54
20	55	55	54	55	55	55	55	55	55	54
21	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
22	56	56	56	56	56	55	56	55	56	55
23	56	56	56	56	57	56	56	56	56	56
24	57	57	57	57	58	57	57	57	57	57
25	68	67	68	67	68	67	68	68	67	68
26	69	69	69	67	69	68	69	69	67	69
27	69	69	69	68	70	69	69	69	68	69
28	70	70	69	68	70	70	70	70	68	70
29	71	70	70	69	71	70	71	71	69	71
30	72	71	70	70	72	71	71	71	70	72
31	72	71	71	71	72	72	72	72	71	72
32	73	72	71	72	73	72	72	73	72	73
Nr. Coppini	54.0	53.9	53.7	53.6	54.3	53.8	54.2	54.4	53.7	53.9
	Média		53.9			Média		54.0		
	Desvio		0.13			Desvio		0.13		
	Média Geral					54.0	Desvio		0.13	

Tabela B10: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina II - Material: Aço ABNT 1212

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	38	38	38	38	38	39	38	38	38	38
2	38	39	38	39	38	39	38	39	39	38
3	39	39	38	39	39	39	38	39	39	38
4	39	39	39	39	39	39	39	39	40	39
5	39	40	39	39	39	40	39	39	40	39
6	40	40	39	40	40	40	40	40	40	40
7	40	40	40	40	41	40	40	41	40	41
8	41	41	41	41	42	41	41	42	41	42
9	42	42	42	42	43	42	42	43	42	43
10	43	43	42	42	43	42	42	43	42	43
11	43	43	42	42	43	43	42	43	42	43
12	43	43	43	43	44	43	43	43	43	43
13	44	44	43	43	44	43	43	44	43	44
14	44	44	44	43	44	44	44	44	43	44
15	45	45	44	44	45	45	44	45	44	45
16	46	45	45	44	45	46	45	46	45	46
17	48	48	49	48	49	48	48	48	48	49
18	48	48	49	48	49	48	48	48	48	49
19	48	49	49	48	49	49	49	48	48	50
20	49	50	49	49	50	49	49	49	49	50
21	49	50	50	49	51	50	50	49	49	50
22	50	51	51	50	51	51	50	50	49	51
23	51	52	52	51	52	52	51	50	51	52
24	52	53	52	51	53	53	52	51	52	53
25	59	60	59	59	60	60	59	60	59	60
26	59	60	59	59	60	60	59	60	59	60
27	59	61	60	59	60	60	59	60	59	60
28	60	61	60	60	61	61	60	60	60	61
29	60	62	61	61	61	62	60	61	60	61
30	61	63	62	62	62	63	61	62	61	62
31	62	64	63	63	63	64	62	63	62	63
32	63	65	64	64	65	65	63	64	64	64
Nr. Coppini	48.2	48.8	48.3	48.1	48.8	48.8	48.1	48.5	48.1	48.8
	Média		48.5			Média		48.4		
	Desvio			0.16		Desvio			0.15	
	Média Geral						48.4	Desvio		0.15

Tabela B11: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina II - Material: Aço ABNT 12L14

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	33	33	33	33	33	34	33	33	33	33
2	33	33	33	33	33	34	33	33	33	33
3	33	34	33	33	34	34	33	34	33	33
4	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
5	34	35	34	34	34	35	34	34	34	34
6	34	35	34	35	35	35	35	35	35	34
7	35	35	35	36	36	36	36	35	35	35
8	36	36	36	37	37	36	37	36	36	36
9	37	37	37	38	38	37	38	38	37	38
10	37	37	37	38	38	37	38	38	37	38
11	37	37	38	38	38	37	38	38	38	38
12	38	38	38	38	39	38	38	39	38	39
13	38	38	39	39	39	38	39	39	39	39
14	39	39	39	39	40	38	39	40	39	39
15	40	39	39	40	40	39	40	40	39	39
16	40	40	40	40	40	40	40	41	40	41
17	44	43	43	43	43	43	44	44	43	44
18	44	43	43	43	43	43	44	44	43	44
19	44	43	43	44	43	43	44	44	43	44
20	44	44	44	44	44	43	44	44	44	44
21	44	44	44	45	44	43	44	45	44	45
22	45	44	45	45	44	44	45	45	45	45
23	46	44	45	45	44	45	45	46	45	46
24	46	45	46	46	45	46	45	47	45	46
25	51	51	52	52	51	52	51	52	51	51
26	51	51	52	52	51	52	51	52	51	51
27	51	51	53	53	51	52	51	52	51	51
28	52	52	53	53	52	53	52	53	51	52
29	52	52	53	54	52	53	52	53	52	52
30	53	53	54	55	53	54	53	54	53	53
31	55	54	55	55	53	55	54	55	53	53
32	56	55	56	56	54	56	55	56	54	54
Nr. Coppini	42.4	42.2	42.5	42.8	42.3	42.5	42.5	42.9	42.1	42.4
	Média		42.4			Média		42.5		
	Desvio		0.11			Desvio		0.12		
	Média Geral					42.5	Desvio		0.11	

Tabela B12: Força Média de Avanço [kgf]
Máquina II- Material: Aço ABNT 1045

Etapa Nr.	Diâmetro 20 mm					Diâmetro 60 mm				
1	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
2	41	42	42	42	42	42	42	42	42	42
3	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
4	42	43	43	42	43	43	42	42	42	43
5	43	43	44	43	43	43	43	43	43	43
6	43	44	44	44	44	43	44	43	43	44
7	44	45	45	45	44	44	44	44	44	45
8	45	46	46	46	45	45	45	45	45	46
9	46	47	47	47	46	46	46	46	46	47
10	46	47	47	47	46	47	47	47	46	47
11	47	47	47	47	46	47	47	48	47	48
12	47	48	48	48	47	48	48	49	48	48
13	48	48	48	48	47	48	49	49	48	48
14	48	48	49	48	48	49	49	50	49	49
15	49	49	49	49	48	49	49	50	50	49
16	50	49	49	49	49	50	49	50	50	50
17	54	53	53	53	53	54	53	54	53	54
18	54	53	54	53	53	54	53	54	53	54
19	54	53	55	54	53	55	54	54	54	54
20	55	54	55	54	54	55	54	55	54	55
21	55	54	56	55	54	56	55	55	54	55
22	56	55	56	55	55	56	55	56	55	56
23	56	56	57	56	56	57	56	56	55	57
24	57	57	58	57	57	58	57	57	56	58
25	67	67	68	67	67	68	67	68	67	68
26	68	68	69	68	68	68	68	68	67	69
27	69	69	70	69	69	69	68	69	68	69
28	70	70	70	70	70	69	68	70	69	70
29	70	70	71	70	71	70	69	70	69	70
30	71	70	72	71	71	71	70	71	70	71
31	71	71	72	72	72	72	71	72	71	72
32	72	72	73	73	72	73	72	73	72	73
Nr. Coppini	53.8	53.8	54.4	53.9	53.6	54.1	53.7	54.2	53.5	54.3
	Média		53.9			Média		54.0		
	Desvio		0.13			Desvio		0.15		
	Média Geral					53.9	Desvio		0.13	

Tabela B13: Força Média de Avanço [kgf]
Máquinas III e IV; Material: Aços ABNT 1212 e 12L14

Etapa Número	Máquina III				Máquina IV				
	Aço 1212		Aço12L14		Aço 1212		Aço 12L14		
1	38	38	33	33	38	38	33	33	
2	38	38	33	33	38	38	34	33	
3	38	39	34	33	38	38	34	33	
4	39	39	34	34	39	39	34	34	
5	39	39	34	34	39	39	35	34	
6	40	40	35	34	39	40	35	35	
7	40	41	36	35	40	40	35	35	
8	41	42	37	36	41	41	36	35	
9	42	43	38	37	42	43	38	37	
10	42	43	38	37	42	43	38	37	
11	43	43	38	38	43	43	38	38	
12	43	44	39	38	43	43	39	38	
13	43	44	39	39	43	44	39	38	
14	44	45	40	39	44	44	40	39	
15	44	45	41	40	44	44	40	40	
16	45	46	42	41	44	45	41	40	
17	48	49	44	43	48	48	43	42	
18	48	49	44	43	48	49	43	43	
19	48	49	44	43	49	49	43	43	
20	49	50	44	43	49	50	44	43	
21	49	50	44	44	49	51	44	44	
22	49	50	45	45	50	51	44	44	
23	50	51	45	45	51	52	45	45	
24	51	52	46	45	52	53	46	45	
25	59	59	52	51	59	60	52	51	
26	59	60	52	51	59	60	52	51	
27	60	60	52	51	59	60	52	52	
28	60	61	52	52	60	61	52	52	
29	61	61	53	52	61	62	53	52	
30	62	62	54	53	62	62	53	53	
31	63	63	54	54	62	63	54	53	
32	63	64	55	55	63	64	55	54	
Número de Coppini	48.1	48.7	42.8	42.2	48.1	48.7	42.6	42.1	
Número de Coppini- Média:		48.4		42.5		48.4		42.3	
Número de Coppini-Desvio:		0.33		0.31		0.30		0.28	
Aço ABNT 1212				Aço ABNT 12L14					
Número de Coppini-Média:		48.4		Número de Coppini - Média:		42.4			
Número de Coppini-Desvio:		0.18		Número de Coppini -Desvio:		0.18			

Anexo C

Considerações sobre Estatística - Teoria da Inferência

C.1 - Estimação Pontual da Média Populacional

Um estimador (E) pode ser utilizado para inferir o valor de um parâmetro desconhecido, relacionado a uma população, através de uma amostra de valores $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$.

Pode-se, por exemplo, inferir a média populacional através de amostras, extraídas da população a ser pesquisada. Neste caso, o estimador mais intuitivo é a média amostral ($\bar{X}$) referente a N observações (provenientes de N experimentos). De modo que se permite estabelecer a equação (A.1).

$$E(\bar{X}) = \mu; \quad sd(\bar{X}) = \lambda / \sqrt{N} \quad (A.1)$$

Em se tratando de amostras aleatórias, provenientes de uma população aproximadamente normal, recomenda-se a distribuição t de Student, quando o número de observações for inferior a 20 ($N < 20$). Neste caso, sendo $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ os valores de uma amostra aleatória, considera-se como intervalo de confiança de 100.(1-a)% para a média, aquele expresso pela equação (A.2), com respectivas definições na sequência.

$$\bar{X} \pm t_{a/2} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (A.2)$$

Em que:

$$s = \text{desvio-padrão relacionado à amostra} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 / (N - 1)};$$

$t_{a/2}$ = valor t de Student para intervalo de confiança bilateral a

$$\bar{X} = \text{média relacionada à amostra} = \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) / N.$$

Detalhes encontram-se didaticamente apresentados em **Montgomery** (1992).

C.2- Amostragem Mínima para Estimação da Média

Estipulando-se um erro máximo tolerável (d) e satisfazendo as hipóteses supracitadas, pode-se calcular o número mínimo de observações ($N_{\min}$), para que a amostra seja estatisticamente representativa da população dentro de intervalo de confiança $100(1-\alpha)\%$. Isto é expresso pela equação (A.3).

$$N_{\min} = \left(\frac{s \cdot t_{\alpha/2}}{d} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

A amostra crítica, que definirá $N_{\min}$, corresponde àquela de maior desvio

C.3- Estimação de Diferença entre Médias de Amostras

O intervalo de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para diferença de médias entre duas amostras pequenas ($N_1 < 20$ e $N_2 < 20$), empregando-se a distribuição t de Student, é dado pela equação (A.4).

$$(\bar{X} - \bar{Y}) \pm t_{\alpha/2} \cdot Sp \cdot \left[\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Admitindo-se, neste caso: $(N_1 + N_2 - 2)$ graus de liberdade e, também, a definição contida na equação (A.5).

$$Sp = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (\text{A.5})$$

A execução de um teste de hipóteses sobre existência de diferença significativa entre as médias de duas amostras contempla, a princípio, o estabelecimento da hipótese nula. No caso: igualdade entre as amostras. Então, calcula-se t_0 pela equação (A.6).

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{Sp \cdot (1/N_1 + 1/N_2)^{1/2}} \quad (\text{A.6})$$

Posteriormente, deve-se comparar este valor de t_0 , obtido pela equação (A.6), com aquele de $t_{\alpha/2}$, (N_1+N_2-2) , extraído de tabelas com valores padronizados da distribuição t de Student.

Se $t_0 > t_{\alpha/2}$, (N_1+N_2-2) , pode-se rejeitar a hipótese nula. Isto indica diferença significativa entre as duas amostras dentro de um intervalo bilateral de confiança, definido pela equação (A.4).

Caso contrário, não existe diferença significativa entre as médias das duas amostras dentro de um intervalo bilateral de confiança. Portanto, o teste de inferência vai indicar que se tratam de amostras, extraídas da mesma população.

C.4- Amostragem Mínima para Diferença de Médias

A faixa de incertezas, relacionada com a amplitude de erro admitida (d), para considerações acerca da média de duas amostras com mesmo número de observações N, é dada pela equação (A.7).

$$t_{a/2} \cdot Sp\left[\frac{2}{N}\right]^{1/2} = \frac{c}{2} = d \quad (A.7)$$

E o número mínimo de amostras ($N_{\min}$), dentro de limite de confiança de 100.(1-a)%, pode ser aproximado através da equação (A.8), cujos termos são definidos na sequência.

$$N_{\min} = \frac{(t_{a/2})^2}{d^2} (s_1^2 + s_2^2) \quad (A.8)$$

Em que:

$t_{a/2}$ = ponto superior de $a/2$ da distribuição t de Student;

d = erro máximo tolerável;

$s_{1,2}$ = desvio quadrático associado às pequenas amostras 1 e 2.

Apêndice

Resistência À Usinagem - Proposta de Norma Conceito e Metodologia de Determinação

1- Introdução

Um material, submetido ao processo de usinagem, naturalmente, revela uma facilidade/dificuldade intrínseca ao se remover determinado volume de cavaco. A esta propriedade, inerente ao material, dá-se o nome de *Resistência à Usinagem*.

A referida propriedade é quantificada pelo Número de Coppini, representado pelo valor médio entre as forças médias de avanço registradas e comprovou permitir a caracterização do material com sensibilidade em confiabilidade de 95%.

A metodologia de determinação do Número de Coppini não prevê equipamento especial, possibilitando, a princípio, a utilização de toda e qualquer máquina-ferramenta para se implementar a medição. Porém, a aferição do sistema máquina/ ferramenta/peça (M/F/P) faz-se necessária para se garantir a reprodutibilidade das medidas obtidas entre os diversos equipamentos existentes.

Esta aferição é executada através do *Teste de Calibração*, em que são experimentados fixações e ou posicionamentos da ferramenta. Estas fixações e ou montagens devem ser aferidas, até que o sistema M/F/P comprove a calibração.

Cumpra mencionar que nem todas as máquinas respondem positivamente, ou seja: permitem estabilização.

Existem vários fatores envolvidos no motivo de uma máquina prestar-se ou não para execução do teste. Tais como: precisão de deslocamento, rigidez, amortecimento dinâmico (e seu respectivo posicionamento em relação ao espectro de frequências naturais da máquina), etc. Correspondem a parâmetros inerentes ao projeto da máquina, cuja modificação implicaria em reformas estruturais do equipamento, que não são o objeto desta proposta de norma.

Por exemplo, quanto à influência da rigidez no desempenho de tornos, citam-se algumas afirmações de **Matsumoto & Pallerosi** (1994): “influi na deflexão do sistema máquina-ferramenta-peça somente quando a relação ap/D é significativa”; “é minimizada na utilização de contra-ponto móvel”, “é mais sensível na medição da força de profundidade”.

Modificações e ou melhoramentos, no sentido de adaptar ou modernizar equipamentos, podem ser executados. Estes aspectos, porém, não devem ser focalizados, pois fogem do escopo do *Teste de Calibração*, que visa exclusivamente a qualificação do equipamento para medição da propriedade. E apenas considerar-se-ão válidos, se após sua implementação, a máquina responder positivamente ao *Teste de Calibração*, provando estabilidade das medidas dentro da confiabilidade e condições especificadas para o mesmo.

A metodologia de determinação do Número de Coppini é executada mediante o *Teste de Medição*, em que um lote do material a ser testado (representado por oito corpos-de-prova, com dimensões específicas a cada diâmetro bruto da barra do material fornecida), é

submetido a um roteiro completo de usinagem, prevendo 32 medidas sob diferentes condições operacionais.

2- Definição do Parâmetro de Medição

A *Resistência à Usinagem*, propriedade naturalmente revelada pelo material ao ser submetido ao referido processo, caracteriza sua facilidade/dificuldade intrínseca em se remover determinado volume de cavaco.

É quantificada pelo Número de Coppini (NC), definido pela equação (1).

$$NC = \sum_{i=1}^N F_{fi} / N \quad (1)$$

Em que:

F_{fi} = força média de avanço registrada na etapa i ,

N = numero total de etapas no Teste de Medição = 32,

ETAPA = cada registros das forças médias de avanço por corpo-de-prova, num total de 8 corpos, que devem ser submetidos a 4 séries;

SÉRIE = par ordenado de velocidades de corte e avanços, num total de 4.

Por definição, corresponde à média dos esforços mecânicos médios registrados na direção de avanço, observados considerando-se o desgaste, imposto pelo material à ferramenta. Fisicamente, representa a evolução da força média de avanço no escopo de um teste padronizado, que acompanha e descreve o desgaste representativo da ferramenta. Entenda-se “representativo”, como aquele que, realmente é relacionado como desempenho do material em usinagem. Cumpre lembrar que a medição da força de avanço permite registrar diferenças sensíveis no fenômeno da remoção do cavaco, pois dá-se em direção preferencial com as mesmas e, portanto, capaz de caracterizar material em usinagem.

3- Corpos-de-Prova

Conforme o diâmetro bruto da barra de material fornecida, cuja propriedade deve ser medida, deve-se especificar a Classe de Diâmetro mais próxima, que determinará o diâmetro do corpo-de-prova.

A tabela 1 indica a classe, ao se entrar com o valor do diâmetro bruto do material a ser testado. Deve-se ressaltar, na especificação da Classe de Diâmetro, um sobremetal mínimo de 1 mm, para garantir a limpeza da superfície dos corpos-de-prova, evitando que o teste seja feito no diâmetro correspondente àquele de fornecimento da barra, independente desta ter sido laminada, trefilada, etc. Por exemplo, para se determinar o Número de Coppini de um aço ABNT 12L14, fornecido em barras de diâmetro bruto de 37 mm, deve-se adotar a classe M, que prevê corpos-de-prova com diâmetro de 30 mm de diâmetro. Ao passo que uma barra de diâmetro bruto de 37,5 mm, viabiliza corpos-de-prova da classe ML (diâmetro 35 mm).

Uma vez determinada a classe de diâmetro na tabela 1, a tabela 2 fornece as dimensões associadas ao corpo-de-prova padrão, cujo desenho encontra-se na Figura 1. A saber:

Li= comprimento útil de usinagem relativo à série "i";

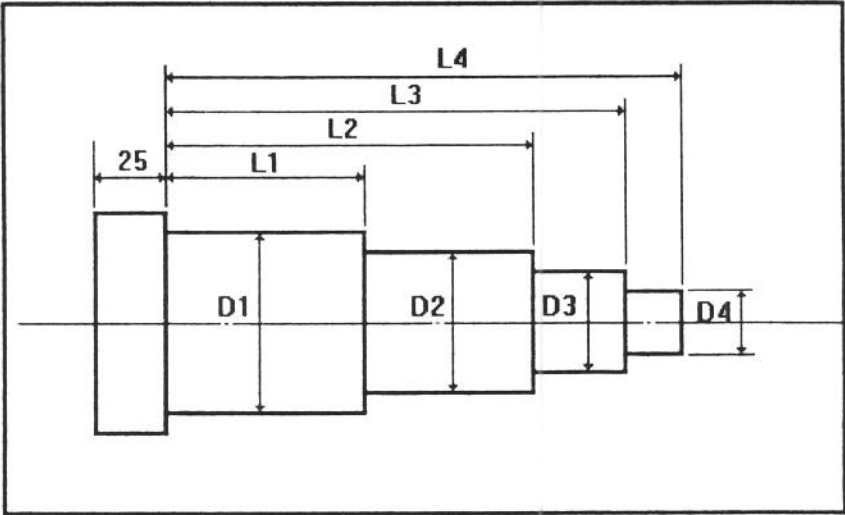
Di= diâmetro externo do corpo-de-prova relativo à série "i".

O corpo-de-prova deve ser fixo à placa da máquina em, pelo menos, 10 mm dos 25 mm previstos. E a outra extremidade deve ser apoiada em contra-ponto. Por isto, prevê-se furo na extremidade de menor diâmetro para montagem do contra-ponto, com pressão na faixa de 5 a 15 kgf/cm². Deve ser respeitada a tolerância 10 em campo H para todas as dimensões especificadas na tabela 1.

Tabela 1- Diâmetros [mm] da Barra, do Corpo-de-Prova e Classe de Diâmetro

Diâmetro bruto da barra [mm]	Classe de Diâmetro	Diâmetro do corpo-de-prova
até 27	K	20
de 27 até 32	KL	25
de 32 até 37	M	30
de 37 até 42	ML	35
de 42 até 47	N	40
de 47 até 52	NL	45
de 52 até 57	P	50
de 57 até 62	PL	55
de 62 até 67	Q	60
de 67 até 72	QL	65
de 72 até 77	R	70
de 77 até 82	RL	75
maior que 82	S	80

Figura 1- Corpo-de-Prova Padrão (cotas indicadas na tabela 2)



4- Ferramenta e Suporte

Deve-se utilizar ferramenta de metal duro com cobertura (3 µm de TiN) e geometria: (ISO) TNMG 16 04 04. Recomenda-se a classe GC 235 da **Sandvik** (1994).

A ferramenta deve ser fixada em suporte com geometria: (ISO) PTGNR 2532. Recomenda-se o porta-ferramenta BT25 da **Sandvik** (1992).

O suporte pode atuar como dinamômetro para registro da força de avanço. Recomenda-se utilização de extensômetros embutidos, ligados em ponte de Wheatstone. Neste caso, há necessidade de circuito eletrônico para fornecer e amplificar os sinais elétricos provenientes dos extensômetros, filtrá-los e efetuar a transdução para o valor da força, podendo apresentar a medida via mostrador.

Tabela 4.2- Dimensões (ilustradas na Figura 1) do Corpo-de-Prova [mm]

Diâmetro	Classe de Diâmetro												
Comprimento	K	KL	M	ML	N	NL	P	PL	Q	QL	R	RL	S
D1	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
L1	86	68	56	48	42	37	33	30	28	26	24	22	21
D2	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78
L2	96	74	61	51	44	39	35	32	29	26	24	23	21
D3	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76
L3	109	82	66	55	47	41	36	33	30	27	25	23	22
D4	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74
L4	126	91	71	59	50	43	38	34	31	28	26	24	22

Posteriormente, caso esta proposta de norma venha a ser aceita, instituto competente (INMETRO) estabelecerá parâmetros normativos, quanto à especificação mais detalhada de ferramenta e suporte. No momento, restringe-se `aquelas, realmente, utilizadas na confecção de uma proposta.

5- Teste de Calibração

Conforme foi discutido na introdução, não há necessidade de se adquirir um equipamento especial para se medir a propriedade de Resistência à Usinagem. Pode-se calibrar uma máquina convencional, que não precisa, necessariamente, ser um equipamento CNC com variação contínua de velocidades. Permite-se um torno engrenado, por exemplo, desde que prove sua estabilidade com valores especificados nesta proposta de norma.

Toda e qualquer máquina, entretanto, para se prestar à determinação do Número de Coppini deve estar qualificada e, portanto, apresentar resultados estatisticamente compatíveis com valores-padrão, dentro da confiabilidade especificada.

5.1- Corpos-de-Prova

O material-padrão para os corpos-de-prova corresponde ao aço ABNT 1212 laminado a quente, tendo sido previamente homogeneizado em forno elétrico. Recomenda-se a

composição de 0,11% de Carbono; 0,80% de Manganês; 0,10% de Fósforo e 0,13% de Enxofre, com dureza de 60 HRB na superfície cilíndrica do corpo-de-prova.

Correspondem àqueles da classe Q - diâmetro de 60 mm. As suas dimensões encontram-se na tabela 2. Essas seguem o corpo-de-prova padrão, cujo desenho encontra-se na Figura 1.

São mantidas demais considerações, pertinentes ao item 3, que devem ser rigorosamente cumpridas.

5.2- Ferramenta e Suporte

A ferramenta é de metal duro com cobertura (3 µm de TiN), geometria (ISO) TNMG 160404, que deve ser fixa em suporte (ISO) PTG NR 2532. Valem as recomendações, especificadas no item 4 desta proposta de norma.

5.3- Condições Operacionais

As condições de usinagem estão na tabela 3. A profundidade de usinagem é de 1,0 mm para todo e qualquer passe. O corpo-de-prova deve ser fixado com contra-ponto.

Percebe-se que os parâmetros de usinagem, adotados no *Teste de Calibração*, encontram-se na faixa das condições operacionais do *Teste de Medição* (tabela 5). Com exceção do maior valor de avanço, que corresponde ao extremo acrescido de 0,02 mm/volta.

Tabela 3 - Condições Operacionais para Teste de Calibração

Diâmetro*[mm]	Passe Nr.	Vc [m/min]	f [mm/volta]	L _u [mm]
60	1	180	0,57	28
58	2	120	0,77	29
56	3	180	0,57	30
54	4	120	0,77	30
52	5	180	0,57	29,5
50	6	120	0,77	29

* externo ao corpo-de-prova, antes de se proceder o respectivo passe.

5.4- Procedimento

O *Teste de Calibração* consiste em se registrar a força média de avanço em diversos passes em operação de torneamento cilíndrico.

O corpo-de-prova deve ser usinado com profundidade de usinagem de 1 mm em cada um dos passes, de um total de 6 (seis). A velocidade de corte, avanço e comprimento de usinagem para os passes e respectivos diâmetros encontram-se na tabela 3.

Tabela 4 - Valores-Padrão para Teste de Calibração

Passe Número	Diâmetro [mm]	Força de Avanço [kgf]	
		Média	Desvio
1	60	42,9	0,78
2	58	63,7	1,41
3	56	43,3	0,71
4	54	64,2	1,30
5	52	44,4	0,88
6	50	65,7	1,0

Para verificar se a máquina reproduz os valores da tabela 4, recomendam-se testes de inferência, utilizando-se a distribuição t de Student. Esses testes devem verificar a inexistência de diferença significativa em intervalo bilateral de 95% de confiança entre a média de, no mínimo, duas medições (relativas à fixação adotada) e aquela, correspondente ao valor-padrão para todos os passes, envolvidos no teste.

Justifica-se o emprego da distribuição t de Student, por tratar-se de amostras em número inferior a 20 ($N < 20$).

Os valores, contidos na tabela 4 foram utilizados, apenas e tão somente, para apresentar a viabilidade da existência de uma norma. Posteriormente, no caso de aceitação deste trabalho, é de se esperar que um sistema máquina/ dinamômetro/ ferramenta/ material do corpo-de-prova seja estabelecido por instituto de padronização competente (INMETRO). O mesmo deve especificar os valores-referência, a serem adotados por norma.

6- Teste de Medição

Após execução do *Teste de Calibração*, em que se garante a qualificação da máquina, procede-se a determinação do Número de Coppini, ou seja, o *Teste de Medição*.

6.1- Corpos-de-Prova

O *Teste de Medição* contempla ampla faixa de fornecimento de barras, diferentemente do *Teste de Calibração*, que só deve ser executado através de corpos-de-prova da classe Q (diâmetro 60 mm) com material específico.

Conforme diâmetro bruto do material a ser testado, deve-se adotar uma Classe de Diâmetros, através da tabela 1. As dimensões dos corpos-de-prova encontram-se na tabela 2, ilustradas na Figura 1.

Detalhes podem ser consultados no item 3 desta proposta de norma.

6.2- Ferramenta e Suporte

A ferramenta é de metal duro com cobertura ($3 \mu\text{m}$ de TiN), geometria (ISO) TNMG 160404, que deve ser fixa em suporte (ISO) PTGNR 2532. Valem as recomendações, especificados no item 4 desta proposta de norma.

6.3- Condições Operacionais

A profundidade de usinagem é mantida em 1,0 mm para todas as etapas no *Teste de Medição*. O corpo-de-prova deve estar fixo com contra-ponto.

Os valores da velocidade de corte e do avanço encontram-se na tabela 5, com explicações, a seguir.

D_1 = diâmetro externo inicial do corpo-de-prova [mm];

D_N = diâmetro externo final do corpo-de-prova [mm];

V_{ci}, f_i = velocidade de corte [m/min], avanço [mm/volta] associados à respectiva série .

Tabela 5- Condições Operacionais para Teste de Medição

Classe de Diâmetro	D _I [mm]	D _N [mm]	Velocidade [m/min]				Avanço [mm/volta]			
			V _{c1}	V _{c2}	V _{c3}	V _{c4}	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄
K	20	12	180	160	140	120	0,5000	0,5625	0,6429	0,7500
KL	25	17								
M	30	22								
ML	35	27								
N	40	32								
NL	45	37								
P	50	42								
PL	55	47								
Q	60	52								
QL	65	57								
R	70	62								
RL	75	67								
S	80	72								

6.4- Procedimento

Para cada ensaio, a aresta da ferramenta deve estar nova.

Não deve ser utilizado fluido refrigerante ou lubrificante. O ensaio deve ser realizado a seco.

Independente da classe de diâmetro, todo ensaio é constituído por 8 corpos-de-prova, que devem ser submetidos a 4 passes. Para cada um dos passes, está prevista uma condição diferente de usinagem, a que os oito corpos-de-prova devem ser submetidos.

Isto corresponde a uma série, conforme definição anterior.

Um ensaio consiste em quatro séries. Ou seja, às 4 condições operacionais previstas na tabela 5, a saber: (V_{c1}, f₁); (V_{c2}, f₂); (V_{c3}, f₃) e (V_{c4}, f₄).

O procedimento consiste em submeter os oito corpos-de-prova, sequencialmente, a (V_{c1}, f₁), anotando-se a força média de avanço para cada corpo-de-prova. Em seguida, mudam-se as condições operacionais para (V_{c2}, f₂). Então, os 8 corpos-de-prova devem ser submetidos, observando-se, novamente, o valor da força média de avanço para cada um deles. E, assim, sucessivamente para as condições (V_{c3}, f₃) e (V_{c4}, f₄).

O valor médio da força de avanço deve ser registrado, portanto, para cada corpo-de-prova em cada uma das etapas associadas a um ensaio.

Pode-se, então, calcular o Número de Coppini. Corresponde ao valor médio entre os valores das forças médias de avanço, obtidos nas 32 etapas do ensaio, conforme equação (1).

7- Extensão de escalas subsidiárias

Subsidiariamente, o conceito da propriedade de Resistência à Usinagem contempla parâmetros e metodologias alternativos à sua determinação, em alguns casos especiais.

Trata-se de casos que exigem escalas especialmente desenvolvidas, por razão de caracterização de grupos muito específicos de materiais.

A médio prazo, pode-se observar, por exemplo, a caracterização de compósitos. Estes, usualmente, são usinados com ferramenta de nitreto cúbico de boro, velocidade de corte superior a 200 m/min, avanço na faixa de 0,01 mm/volta a 0,05 mm/volta e profundidade de usinagem: 0,025 mm a 0,15 mm. Ora, estas condições são bastante diferentes daquelas utilizadas na metodologia, que é conteúdo desta norma.

Neste caso, estimula-se o estudo, conceituação e elaboração de uma escala específica e alternativa. O parâmetro eleito e metodologia (material da ferramenta, condições operacionais, etc) devem ser o mais próximo possível à caracterização, a que se propõe.

Porém, é claro, que esta escala subsidiária deve estar em harmonia com a precedente. De modo que a ordenação da classificação daquela mostre-se compatível com essa, ora proposta.

A presente proposta não objetiva, entretanto, tornar-se um obstáculo. Mas, um estímulo e ou referencial para ulteriores e necessários desenvolvimentos e propostas em termos de simplicidade, confiabilidade e pequeno custo de medição.