

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE UBERLÂNDIA
TESISEM

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE TROCA RÁPIDA DE
FERRAMENTAS DE CORTE NO MANDRILAMENTO QUANTO AOS
PARÂMETROS DE USINAGEM E ERROS DE FORMA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

JUAN MARCOS NUÑEZ GUAITA

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Aprovada por:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado – (UFU) – Orientador

Prof. Dr. Luiz Airton Consalter – (UPF) – (UNISINOS)

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – (UFU)

Eng. M.Sc. Antônio Maria de Souza Júnior (FIAT / GM Powertrain)

Uberlândia, 26 de Outubro de 2001.

Ⓟ SISBI/UFU

205561 A.L

Universidade Federal de Uberlândia
BIBLIOTECA

FU-00014310-7

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

- N972a Nuñez Guaita, Juan Marcos.
Análise comparativa de sistemas de troca rápida de ferramentas de corte no mandrilamento quanto aos parâmetros de usinagem e erros de forma / Juan Marcos Nuñez Guaita. - Uberlândia, 2001.
106f. : il.
Orientador: Álisson Rocha Machado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Usinagem - Teses. 2. Máquinas - ferramenta - Teses. 3. Mandrilamento - Teses. 4. Sistemas de troca rápida - Teses. I. Machado, Álisson Rocha. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9(043.3)



ALUNO: JUAN MARCOS NUÑEZ GUAITA

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5991605-0

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

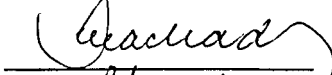
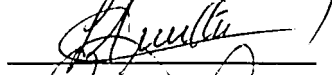

PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Análise Comparativa de Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas de Corte no Mandrilamento quanto aos Parâmetros de Usinagem e Erros de Forma”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X do Campus Santa Mônica, em 26 de outubro de 2001, às 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Álisson Rocha Machado, Prof. Dr.	UFU	
Luiz Airton Consalter, Prof. Dr.	UPF	
Márcio Bacci da Silva, Prof. Dr.	UFU	

Uberlândia, 26 de outubro de 2001.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas incontáveis bênçãos e oportunidades desde sempre.

Ao Prof. Álisson R. Machado pela orientação acadêmica, técnica e moral para o desenvolvimento deste projeto e pela paciência e confiança durante os tão incertos dias desde o início da nossa amizade.

A FIAT Automóveis S.A. (FA Powertrain) na pessoa do M.Sc. Antônio Maria de Souza Jr. pelo incentivo e confiança ao nos propor a efetivação deste trabalho e pelas incontáveis horas de reunião e telefonemas para nos providenciar materiais e equipamentos essenciais para o cumprimento deste trabalho.

A Walter Seppe Jr. pelo apoio em todo tempo e por partilhar comigo dos momentos árduos do trabalho.

A Reginaldo F. de Souza, pela amizade, orientação técnica e paciência em ensinar cada passo na utilização dos equipamentos utilizados neste projeto.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de crescer através dos conhecimentos de seus grandes profissionais, e aos que desde os bastidores pouco ou muito ajudaram a vencer cada pequeno detalhe.

Aos fornecedores dos Sistemas de Troca Rápida, Milton da GENOS, Miller da MAPAL, Amauri e Marcos Caldeira da KENNAMETAL, Paulo Maurício da SANDVIK, e a Ubiratán da AMERICAN TOOLS – TWILL pelas ferramentas.

Ao CNPq pela Bolsa de Estudos no Brasil.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia que sempre se dispuseram a ajudar em todos os problemas que se apresentaram.

A minha família longe e perto, aos amigos e 'irmãos' pelo carinho, paciência e amarguras suportadas nos momentos estressantes.

A todos os que direta ou indiretamente, visível ou imperceptivelmente, ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado.

Dedicada a:
Prof. Roberto Quintana

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 <i>Resenha Histórica</i>	7
2.2 <i>Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas</i>	10
2.6.1 HSK - (MAPAL-GÜHRING)	12
a) Geometria e Fixação	13
b) Esforços	14
2.6.2 KM [Catálogo Kennametal – Hertel]	15
a) Geometria	17
c) Tecnologia de Fixação	18
d) Esforços	19
2.6.3 CAPTO [SANDVIK]	20
a) Geometria	21
b) Fixação	22
2.6.4 VTS (GENOS) [Valenite WebSite]	23
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	26
3.1 <i>Metodologia dos Ensaios</i>	27
3.2 <i>Material Utilizado e Preparação de Amostras</i>	30
3.3 <i>Equipamentos utilizados</i>	31
3.3.1 Suporte de Fixação das Amostras	32
3.3.2 Ferramentas e Acessórios Utilizados	33
3.4 <i>Análise e medição das grandezas analisadas</i>	34
3.4.1 Forças de Usinagem	34
3.4.2 Potência Consumida	41
3.4.3 Cilindricidade	41
3.4.4 Circularidade	42
3.4.5 Acabamento da superfície	43
3.4.6 Sinais de vibração	44
3.5 <i>Comentários</i>	44

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	<i>Componentes de Força</i>	46
4.1.1	Comp. de Força Fx – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm ..	49
4.1.2	Comp. de Força Fx - Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	52
4.1.3	Comp. de Força Fy – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm ...	55
4.1.4	Comp. de Força Fy – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	57
4.1.5	Comp. de Força Fz – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm ...	58
4.1.6	Comp. de Força Fz – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	60
4.2	<i>Potência</i>	62
4.2.1	Potência – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm.....	63
4.2.2	Potência – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	66
4.3	<i>Cilindricidade.....</i>	68
4.3.1	Erro de Cilindricidade – Semi-acab. (A) – Diâm. do Pré-furo = 19mm.....	69
4.3.2	Erro de Cilindricidade – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	71
4.4	<i>Circularidade</i>	73
4.4.1	Erro de Circularidade – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm.....	74
4.4.2	Erro de Circularidade – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	76
4.5	<i>Acabamento da superfície.....</i>	78
4.5.1	Acab. da superfície [Ra] – Semi-Acab. (A) – Diâm. do Pré-furo = 19mm.....	78
4.5.2	Acab. da superfície [Ra] – Desbaste (B)-Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	81
4.6	<i>Vibração.....</i>	83
4.6.1	Vibração no Mancal – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm.....	84
4.6.2	Vibração no Mancal – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	86
4.6.3	Vibração no Suporte – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm.....	88
4.6.4	Vibração no Suporte – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm.....	90
5.	CONCLUSÕES	92
6.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	103
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
7.1	<i>Referência Bibliográfica.....</i>	104
7.2	<i>Catálogos Técnicos.....</i>	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Distribuição de Tempos de Produção dos Sistemas Convencionais [Kennametal Hertel do Brasil]	1
Figura 1.2	Distribuição do Tempo não Produtivo [Smith, 1981].....	3
Figura 1.3	Sistema de Troca Rápida – BTS [Catálogo Sandvik, C-1004.1-ENG]	4
Figura 2.2	Sistema de Troca Rápida HSK – Geometria [Catálogo Mapal-Gühring]	14
Figura 2.3	Sistema de Troca Rápida HSK – Esforços [Catálogo Mapal-Gühring]	14
Figura 2.4	Sistema de Troca Rápida KM para torneamento [Catálogo Kennametal-Hertel]	15
Figura 2.5	Sistema de Troca Rápida KM – Fresamento [Catálogo Kennametal - Hertel]	16
Figura 2.6	Geometria do suporte de fixação do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]	17
Figura 2.7	Geometria do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]	18
Figura 2.8	Fixação do suporte do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. a) Aberto ou Destravado; b) Fechado ou Travado	18
Figura 2.9	Fixação do porta-ferramentas para o Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. a) Posição de Troca; b) Movimento da Esfera; c) Posição de Trabalho.....	19
Figura 2.10	Diagrama de esforços do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. Três pontos de contato/esforço	19
Figura 2.11	Diagrama de esforços do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. Três pontos de contato: suporte facial e deformação elástica.....	20
Figura 2.12	Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]	21
Figura 2.13	Geometria do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]	22
Figura 2.14	Geometria do cone de fixação do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]	22
Figura 2.15	Sistema de fixação do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]	23
Figura 2.16	Cone de Fixação do Sistema de Troca Rápida GENOS	24
Figura 2.17	Porta-ferramentas ou mandril do Sistema de Troca Rápida GENOS.....	24
Figura 2.18	Dispositivo de fixação do Sistema de Troca Rápida GENOS.....	25
Figura 3.1	Sistema de Aquisição de Dados	30
Figura 3.2	Esquema geométrico das Amostras	31
Figura 3.3	Máquina Ferramenta – CNC	32
Figura 3.4	Sistema de Fixação de Amostras.....	33
Figura 3.5	Caraterísticas geométricas dos furos processados	35
Figura 3.6	Trajatória de Translação ou Interpolação Circular	36
Figura 3.7	Comportamento das Forças ao longo da trajetória de translação circular	37
Figura 3.8	Comportamento das Forças – Processo Intermitente.....	38

Figura 3.9	Modelo vetorial de forças e geométrico do furo e da barra de mandrilar em escala.....	39
Figura 3.10	Representação do comportamento da força resultante F considerando as dimensões reais	40
Figura 3.11	Esquema de Verificação do erro de Cilindricidade	41
Figura 3.12	Análise da Circularidade.....	42
Figura 3.13	Verificação do erro de Circularidade	43
Figura 3.14	Analizador de perfil tridimensional - Laboratório de Metrologia. FA Powertrain (Fiat Automóveis S.A.).....	43
Figura 4.1	Comportamento das componentes de força Fx e Fy	46
Figura 4.2	Comportamento da componente de força Fx ou Fy.....	47
Figura 4.3	Comportamento da componente de força Fz.....	48
Figura 4.4	Componente de força Fx – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	51
Figura 4.5	Componente de força Fx – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	54
Figura 4.6	Componente de força Fy – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	56
Figura 4.7	Componente de força Fy – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	57
Figura 4.8	Componente de força Fz – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	59
Figura 4.9	Componente de força Fz – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	61
Figura 4.10	Comportamento da potência durante a usinagem de um furo.....	62
Figura 4.11	Potência – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte	65
Figura 4.12	Potência – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	67
Figura 4.13	Verificação do erro de cilindridade	68
Figura 4.14	Erro de Cilindricidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte.....	70

Figura 4.15	Erro de Cilindricidade – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	72
Figura 4.16	Verificação do erro de circularidade.....	73
Figura 4.17	Erro de Circularidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	75
Figura 4.18	Erro de Circularidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	77
Figura 4.19	Acabamento da superfície [Ra] – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	80
Figura 4.20	Acabamento da superfície [Ra] – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	82
Figura 4.21	Vibração – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte	85
Figura 4.22	Vibração – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	87
Figura 4.23	Vibração – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte	89
Figura 4.24	Vibração – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

STR	Sistema de Troca Rápida
a_p	Profundidade de Corte
CI	Erro de Cilindricidade
Cr	Erro de Circularidade
f	Avanço
Fc	Força de Corte
Fa	Força de Avanço
Ff	Força Efetiva
Ra	Rugosidade média aritmética [μm]
Vc	Velocidade de Corte
ϕF	Diâmetro da Ferramenta
ϕf	Diâmetro do Furo
RMS	Raiz Média Quadrática (<i>Root Mean Square</i>)

NUÑEZ G., J.M. (2001). *“Análise comparativa de Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas de corte no mandrilamento quanto aos parâmetros de usinagem e erros de forma”*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 106 p.

RESUMO

Neste trabalho é comparado o desempenho de três Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas–STR bastante comuns: KM, CAPTO e VTS. Para tal, foram efetuados ensaios de usinagem no processo de mandrilamento interpolado com variação no pré-furo para desbaste e semi-acabamento e ainda variando-se as condições de velocidade de corte, avanço e uso ou não de fluido de corte. A potência de corte, a rigidez do sistema e as componentes das forças de usinagem foram monitoradas simultaneamente em tempo real através de um sistema de aquisição de sinais. Os furos resultantes dos ensaios foram submetidos à verificação de erros dimensionais e de forma (cilindricidade e circularidade) e acabamento da superfície. Com os resultados foi possível comparar os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas e determinar seus desempenhos para diversas condições de operação.

Verificou-se que os erros dimensionais e de forma (cilindricidade e circularidade) foram relativamente elevados para todas as condições analisadas e para todos os sistemas testados, mas não foi possível determinar nenhuma vantagem clara de um dos STR. Para o acabamento da superfície, observou-se uma clara deterioração quando se aumentava o avanço. (O comportamento dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas apresentou-se variado em cada situação, alternando-se os melhores e piores desempenhos). Foi possível montar um mapa de comportamento dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas para todas as condições analisadas, onde se classificou os STR para cada condição individual. O destaque de um STR de maneira geral não foi observado.

NUÑEZ G., J.M. (2001), "Comparative Analyses of Quick-Change Tooling Systems in Boring referenced at cutting parameters and final quality result", MSc Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia – MG - Brazil, 106p.

ABSTRACT

In this work three different commonly used quick-change tooling systems – STR (KM, CAPTO and VTS) are compared. Boring tests were carried out in a CNC machine center with interpolation of the path. Cutting speed, feed rate, and the initial diameter of the hole were varied. Dry cut and application of a cutting fluid were also tested. Machining force components were controlled by a Kistler piezoelectric dynamometer. Together with the power consumption and vibration controls the signals were recorded in real time and simultaneously with the aid of a data acquisition board. The hole obtained were posterior taken to a adequate equipment in order to determine their roundness and cylindricity as well as their surface roughness. With the results it was possible to compare the performance of the three STR tested. The roundness and cylindricity errs were relatively high for all cutting conditions and STR tested and but it was not possible to determine a clear advantage of a system. The surface roughness was clearly deteriorated when the feed rate was increased. The performance of the quick-change tooling systems was varied for each situation, alternating the classification among them according to the parameter and to the cutting condition considered. At the end it was possible to build a map of behavior of the three STR for the cutting conditions tested. This allowed a classification of them at each individual cutting condition. Identification of an outperforming system, however, was not observed.

1. INTRODUÇÃO

A produtividade vem sendo uma das variáveis mais importantes dentro da indústria nos últimos anos, e a otimização de processos um dos fatores de maior influência para este fim. A seleção do processo, a tecnologia utilizada, o equipamento, as ferramentas, a capacitação do pessoal envolvido, etc. contribuem diretamente para o aumento ou diminuição da produtividade.

Dentre as variáveis mencionadas, uma vez selecionado o processo, as definições do equipamento e das ferramentas de corte são os fatores mais importantes devido aos altos investimentos que são requeridos.

Quando estes 'sistemas' são montados com ferramentas simples, de aplicação direta e sem alta tecnologia de substituição e/ou produtividade, são denominados de Sistemas Convencionais.

A tecnologia de fabricação utilizando ferramentas convencionais, quando corretamente aplicada, apresenta altos índices de produtividade. Nos últimos 20 anos, a produtividade tem crescido assustadoramente, através de reduções em tempos e processos provocados pela correta seleção e implementação de sistemas de ferramentas adequados aos processos, mas mesmo assim estes sistemas apresentam perdas na produtividade provocadas pelos longos tempos de preparação (ou 'setup') e trocas de ferramentas e peças, em relação ao tempo real de processamento ou corte. A Figura 1.1 apresenta a distribuição dos tempos em Sistemas convencionais.

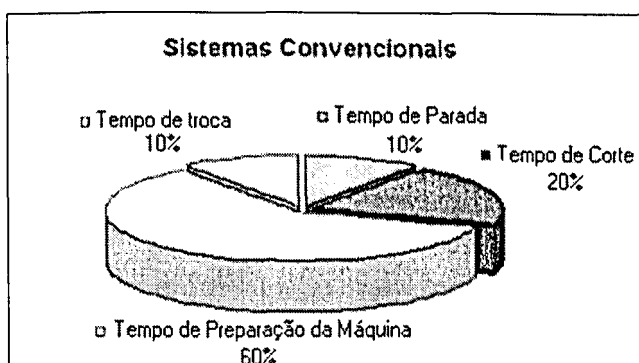


Figura 1.1 Distribuição de Tempos de Produção dos Sistemas Convencionais [Kennametal Hertel do Brasil]

A troca da ferramenta tem sido um dos principais itens a serem analisados devido ao tempo e recursos gastos para sua efetivação. Foi então necessário o desenvolvimento de Sistemas de Troca Rápida, cujo principal objetivo seria o de diminuir consideravelmente os tempos de preparação e ajuste das ferramentas (*Set up*).

Nos anos 70 foram desenvolvidos os primeiros Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas de corte. O primeiro modelo consistia em trocar o porta-ferramentas completo. A principal desvantagem deste processo consistia na complexidade física do trocador externo e da possibilidade de trocar apenas um tipo de porta-ferramenta. Ele foi utilizado apenas em aplicações restritas (em torneamento), de longos períodos produtivos, isto é, com baixos índices de troca de ferramentas, mas logo desapareceu com o advento da tecnologia de CNC. [Smith, 1981]

Outros sistemas envolveram a troca de ambas as partes, a ferramenta e o suporte, que era mais acessível à tecnologia de CNC, nos centros de torneamento. Estes sistemas tinham certas limitações com respeito ao peso e tamanho dos trocadores e das próprias ferramentas, o que significava que a capacidade de carga era bastante limitada. Mesmo com o uso de "*Tool Magazines*" (no caso de centros de torneamento e de usinagem) a capacidade de carga era também limitada, pois seu uso em processos de automação, por prolongados períodos de tempo não era possível. As grandes variedades de geometria e sistemas de suportes de ferramentas requeridos limitaram suas aplicações pela impossibilidade desses sistemas atenderem a todos os processos de usinagem, exigindo assim, dois ou mais sistemas.

Soluções completamente diferentes podem ser obtidas se todas estas desvantagens são analisadas individualmente.

Existem no mercado "*Tool Magazines*" com até 300 ferramentas, eliminando, talvez, desta forma, a necessidade de outros Sistemas de Troca Rápida, mas o custo de tais equipamentos os torna inviáveis, além do número de ferramentas continuar sendo limitado. [Smith, 1981].

Os fabricantes de máquinas-ferramenta têm investido muito tempo e dinheiro tentando aprimorar seus produtos, reduzindo os tempos não produtivos na usinagem convencional, utilizando estes Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas com "*Tool Magazines*".

Um estudo do Governo Americano em 1980, *"The Machine Task Force Study"* [Smith, 1981], encontrou que as empresas de médio porte que usavam máquinas-ferramenta convencionais tinha sua produtividade real de apenas 11% do tempo total gasto. O tempo não produtivo era despendido em atividades tais como: colocação e retirada da peça (6% do tempo total), troca de ferramentas (10%), montagem e medição (10%), falhas de equipamento (8%) e, finalmente, mas não menos importante, o uso incompleto ou inadequado dos Sistemas de Troca (55%) conforme apresentado na Figura 1.3. Isto significa que o tempo gasto para a troca e posicionamento das ferramentas é de no mínimo 20% do tempo útil da máquina-ferramenta. Por este motivo as empresas têm enfatizado seu interesse em reduzir estes tempos não produtivos, o que implica em melhorar o uso eficiente da máquina-ferramenta.

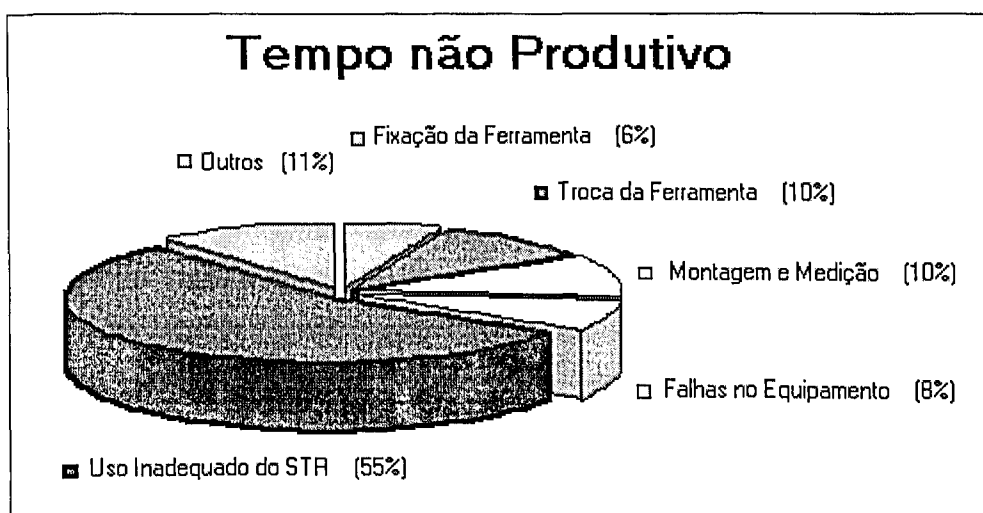


Figura 1.2 Distribuição do Tempo não Produtivo [Smith, 1981]

Agora, pode-se ver a real importância da redução dos tempos não produtivos das máquinas-ferramenta e que estes podem ser significativamente minimizados, pelo menos aqueles relativos à troca e posicionamento das ferramentas de corte. Se a empresa incorpora os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas dentro dos centros de torneamento e de usinagem a produtividade é aumentada e o tempo não produtivo é reduzido.

Devido a que grande parte das máquinas-ferramenta são monofuso (um eixo de rotação) ou multifuso (vários eixos de rotação), os centros de usinagem, uma das máquinas-ferramenta mais modernas, têm sofrido mudanças radicais. Os suportes convencionais foram trocados por suportes circulares (Tool Magazines), que giram posicionando a ferramenta adequadamente para cada operação. Em outros casos, um sistema robotizado posiciona a ferramenta adequadamente no suporte. Estes sistemas são muito caros e requerem grandes

investimentos, exigindo que os custos sejam rapidamente amortizados, portanto, o aumento de produtividade tem de compensar estes investimentos.

Novos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas foram desenvolvidos para minimizar os tempos improdutivos, e mesmo sendo basicamente muito similares aos anteriores, partilham do mesmo princípio lançado pelos “*Blocos Ferramenta, ou BTS = Block Tool System*”, baseado na troca de uma cabeça, normalmente quadrada, que suporta a ferramenta e é encaixada na cabeça do suporte, conforme ilustrado na Figura 1.3. A sua repetibilidade média é de $\pm 0.002\text{mm}$ [Smith, 1981], o que minimiza problemas dimensionais de produção. Para que o esforço axial não comprometa a integridade do bloco ferramenta, é utilizada uma força de fixação média de 25 kN. Esta é aplicada através de um sistema simples de molas, que são devidamente dimensionadas de maneira a aplicar esta força de forma constante. A troca pode ser manual, semi-automática ou automática. Em qualquer dos casos é possível reduzir, consideravelmente, erros dimensionais do componente usinado. Em sistemas automáticos, a força é aplicada por meios hidráulicos, ativados pelo próprio CNC.

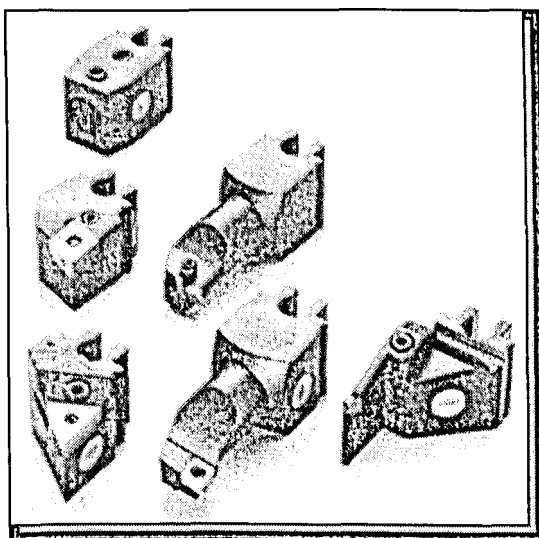


Figura 1.3 Sistema de Troca Rápida – BTS [Catálogo Sandvik, C-1004.1-ENG]

A principal vantagem do uso deste tipo de sistema de troca rápida, é a facilidade e rapidez de troca da ferramenta, diminuindo os tempos não produtivos. Elimina-se também o problema do peso das ferramentas, pois as ferramentas são pequenas, leves e funcionais, permitindo reduzir custos de estoques.

Uma análise simples do tempo gasto para a troca de ferramentas pode ser melhor entendido através do exemplo representado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Variação dos Tempos de Fabricação para Sistemas de Troca Rápida - BTS

Operação	Porta Ferramenta Convencional	Sistema de Bloco Ferramenta
Montagem	30 min	15 min
Troca de Ferramenta	03 min	01 min
Medição e controle dimensional	05 min	00 min
TOTAL	38 min	16 min

Nota-se no exemplo anterior, que, em um determinado processo, os tempos de montagem, troca de ferramentas e medição e controle dimensional com o uso de sistemas convencionais de troca de ferramentas foram, consideravelmente reduzidos, ao se utilizarem Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas.

Hoje, várias companhias fabricam os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas com tecnologia superior aos Sistemas de Bloco Ferramenta, mas baseados no mesmo princípio: trocar apenas uma pequena cabeça do porta ferramentas (onde está contida a ferramenta) de forma rápida e eficiente, cada um com diferentes sistemas de fixação, diferentes valores de repetibilidade, precisão e carga axial (principais parâmetros na análise dos Sistemas de Troca Rápida), e como podem ser aprimoradas para cada tipo de processo.

Além da redução de tempos de fabricação e o conseqüente aumento na produtividade, os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas proporcionam, também, melhoria na qualidade dos produtos fabricados, conseqüência natural das novas tecnologias envolvidas em todos os níveis do processo de fabricação.

O estudo e a comparação destes sistemas, normas e princípios de funcionamento dos diferentes fabricantes são necessários para encontrar o melhor método para cada aplicação prática a ser efetuada no campo industrial.

As empresas com alta produção nos processos de usinagem, particularmente as indústrias automobilísticas, entre elas a FA Powertrain, utilizam alguns desses sistemas

procurando diminuir os tempos de fabricação. Entretanto, para otimizar este processo são necessários estudos criteriosos de seus desempenhos.

O objetivo principal no presente estudo, de forma geral, é a identificação e determinação das principais diferenças entre três Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas bastante utilizados nas indústrias, a saber: VTS, CAPTO e KM, aplicados ao processo de mandrilamento de aço de livre corte. Para tanto, parâmetros como repetibilidade e precisão da troca, carga axial, acabamento da superfície produzido, erros dimensionais e de forma, energia consumida e outros fatores influentes decorrentes da troca da ferramenta serão considerados.

Efetuar a comparação entre eles exigirá a análise tecnológica do funcionamento de cada um dos Sistemas de Troca Rápida, tais como o sistema de fixação e a forma de troca. A determinação de parâmetros de comparação e de condições de operação e troca a serem analisados também é importante. Os critérios utilizados na comparação fazem necessária uma profunda análise dos fatores realmente influentes no processo de troca, para cada propriedade desejada, e em particular cada condição estabelecida.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, na qual se enfocam os processos de fabricação, as principais grandezas mensuráveis dos processos de usinagem, os sistemas de medição e controle dimensional e as principais características dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas mais utilizados na indústria. No capítulo 3 descreve-se a metodologia, o procedimento experimental e os materiais e equipamentos utilizados para os ensaios. No capítulo 4 são mostrados e analisados os resultados encontrados nos ensaios efetuados. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resenha Histórica

Por que mais velocidade ? Por que cada vez máquinas mais sofisticadas ? Por que tanta pesquisa para novos materiais para ferramentas que possuam melhores características ? Por que sistemas de controle e medição de produtos acabados e tanta preocupação com o tempo gasto nas trocas de ferramenta ? Por que ?

É difícil responder a todas estas perguntas, principalmente quando não se conhece tudo o que vem por trás desta explosão tecnológica dos últimos 100 anos na área de fabricação e de todas as ciências relacionadas, tais como Engenharia Metalúrgica, Engenharia Química, Engenharia de Projetos e Metrologia, Engenharia de Sistemas, entre outras.

Não faz muito tempo quando correias de couro, rudemente se conectavam a rodas gigantes nos diques dos rios para assim gerar o seu movimento através de engenhosos sistemas cinemáticos e quando o uso de força animal era comum aos processos de fabricação.

Pouco a pouco, novas idéias surgiram. Em alguns casos, para tristeza da humanidade, a tecnologia de que tanto esta se vangloria como sendo o fruto de sua inteligência, foi impulsionada pela guerra, a prova de todo o contrário.

Para o bem ou para o mal, tais 'engenhocas' sumiram, dando lugar a sofisticadas 'engenharias' que foram colorindo de cinza metálico nossa tecnologia moderna.

O forno e o martelo gradativamente foram dando lugar a novas tecnologias. Polias e correntes começaram a fazer parte dos sistemas mecânicos. O aparecimento do motor elétrico iniciou uma série de novas invenções. Desde um torno elétrico até o mais ínfimo dos eletrodomésticos tiveram sua brilhante entrada nesta época.

No campo das ferramentas de corte, não tardaram em serem percebidas as necessidades de maiores velocidades de corte e as tão elogiadas Ferramentas de Aço Rápido foram desenvolvidas. Nome característico devido às velocidades de corte possíveis para os materiais até então processados.

Apareceram depois as formidáveis ferramentas de metal duro, carregando junto a elas a tecnologia da metalurgia do pó.

Motores de menores tamanhos e com maiores potências propulsionaram engrenagens de módulo melhor projetado, e claro, rolamentos de maiores capacidades de carga e resistência foram utilizados. Grandes firmas nasceram, e a pesquisa desde já deu suas grandes contribuições.

Por outro lado a informática deixou de lado os seus grandes e pesados 'prédios cintilantes' para se transformarem em 'PCs', pequenos e portáteis. Logo foram incluídos na área de fabricação e num piscar de olhos já estavam controlando as principais linhas de produção do mundo inteiro.

Hoje, sistemas de controle metrológico são executados enquanto está-se processando o material. Controles 'On-line' de posição e desgaste são parte comum das novas máquinas-ferramenta. Totalmente computadorizadas, possuem até sua própria linguagem de programação e pedem mais. Sistemas gráficos lêem um desenho digital gerado num pequeno computador doméstico e geram as mais complexas superfícies tridimensionais ao estarem interligadas com as máquinas-ferramenta por um simples cabo e um par de idéias.

Toda esta evolução industrial, considerada como um dos despertares tecnológicos mais velozes da história da humanidade, tomou menos de 100 anos para estabelecer-se como uma cultura industrial. Devido a esta evolução constante e rápida, hoje não é mais comum encontrar cientistas tão seguros como os do começo do século que garantiam: 'Tudo já foi inventado !'

Como sempre, os grandes países tiraram vantagem desde o começo. Devido a sua posição geográfica, financeira e tecnológica, conseguiam ficar sempre um passo à frente, não permitindo, de certa forma, o 'nosso' desenvolvimento, ficando sempre defasados e por conseqüência considerados 'países subdesenvolvidos'.

Hoje, na 'Idade da Informação', com tudo ao alcance de um 'clique' é possível criar, desenvolver, acompanhar ou simplesmente conhecer, em qualquer lugar do mundo, os mais complexos projetos e estudos nesta e em qualquer outra área científica.

Com esta visão, fica mais simples entender o acontecido, mas... um longo caminho pela frente ainda é previsto. Novas tecnologias brilham a cada dia em todos os cantos do mundo como estrelas na noite.

Este é um dos principais motivos da pesquisa especializada. Uma tentativa de resolver problemas específicos, juntando todo o conhecimento, de todas as fontes permitidas, até descobrir a solução. Talvez o fim do problema, ou apenas o início de outro maior.

Um dos principais problemas hoje, na área da produção em série, é a determinação dos parâmetros que compõem cada pequeno passo. Para a fabricação, por exemplo, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, etc. Não basta serem efetivos, tem de ser os melhores, em resposta produtiva e econômica. Vidas de ferramentas devem ser estimadas para cada processo e cada parâmetro variado. Não é permitido perder tempo, nem sequer um segundo, pois este se multiplica por minutos, horas, dias.

Sistemas de troca rápida de ferramentas foram então a grande idéia em questão de economia de tempo. Não ser necessária a troca manual de cada ferramenta utilizada trouxe consigo, além de permitir reduzir consideravelmente o tempo perdido na produção, uma série de outras vantagens geradas através do estudo estatístico de resultados obtidos.

Novamente são muitas as opções. Qual tipo de Sistema utilizar ? Modular ? Cilíndrico ou Cônico ? Investir ou não ?

Sempre, antes de introduzir uma nova idéia na linha de produção, deve ser efetuado um teste de laboratório com todas as opções de mercado, tentando ao máximo reproduzir as características reais, e em seguida levar ao campo para a homologação dos resultados. Logo após verificada a eficiência, para cada parâmetro estabelecido, e após estudadas as vantagens e desvantagens de cada um, opta-se pelo melhor.

2.2. Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas

A produtividade tem sido um dos fatores mais importantes na determinação de processos de fabricação. A engenharia de produção está sempre procurando teorias e técnicas que garantem o aumento da produtividade para reduzir custos na indústria.

Uma das mais notáveis teorias a este respeito é a SMED (*"Single-Minute Exchange of Die"*), que tem por fundamento a redução dos tempos de *setup* considerando a diferenciação de duas etapas durante este procedimento: o *setup* interno, que são as atividades de preparação de componentes que precisam, necessariamente, ser efetuadas na máquina-ferramenta quando esta estiver parada (ex. troca de ferramenta, troca do cabeçote, etc.), e, *setup* externo, que são as atividades que podem ser efetuadas enquanto a máquina está em produção (ex. preparação da peça, ajuste de ferramentas, etc.) [Shingo, 2000].

Várias derivações desta técnica foram desenvolvidas ao longo do tempo, como o OTED (*"One-Touch Exchange of Die"*) e o NOTED (*"Non Touch Exchange of Die"*). Todas elas fundamentadas nos mesmos princípios.

Através da implementação destas técnicas foi possível efetivar uma notável redução nos tempos perdidos no *setup* e conseqüente incremento na produtividade, o que pode ser observado em grandes indústrias como a Mazda em Tóquio em 1950, a Mitsubishi Heavy Industries em Hiroshima em 1957, a Toyota no Japão em 1969, e muitas outras [Shingo, 2000].

A absorção pela indústria destas técnicas deu início ao desenvolvimento de dispositivos que permitissem facilitar sua implementação. Foi nestas condições que os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas nasceram e foram aprimorados com o passar do tempo, à medida que novas tecnologias iam surgindo.

Mesmo com o envolvimento de altas tecnologias, ainda existe a necessidade de aprimoramentos nos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas. Os sistemas ISO e ABS foram considerados muito eficientes e utilizados nas máquinas-ferramentas por muito tempo, inclusive em centros de usinagem CNC até o início dos anos 90, quando iniciou-se a fabricação de máquinas HSM (*"High Speed Machining"*) em escala industrial.

Com a chegada destas máquinas, sentiu-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas de fixação de ferramentas que fossem ao mesmo tempo, de troca rápida, e mantivessem suas dimensões e precisão de corte em rotações elevadas (superiores a 10.000 rpm). Esta necessidade impulsionou o desenvolvimento de outros sistemas com o HSK, o KM, o VTS e outros.

Uma das principais exigências dos Sistemas de Troca Rápida é a precisão do processamento e sua capacidade de repeti-la (repetibilidade), o que exige análises geométricas de verificação dimensional, pré e pós processamento. Foi verificado, na prática, que mesmo em processos automáticos, o ajuste manual é sempre necessário para garantir a repetibilidade requerida [Smith, 1981]. Porém, isto depende muito da precisão exigida na usinagem. É por isto que entre as características mais importantes de qualquer Sistema de Troca de Ferramentas implementado, encontram-se:

- Repetibilidade
- Precisão
- Versatilidade
- Custo do equipamento
- Capacidade de carga
- Custo da Implementação
- Rigidez do Sistema

Basicamente, todos os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas estão constituídos por componentes similares, podendo ser, na maioria dos casos, da seguinte maneira:

- um porta-ferramentas ou cabeça
- um suporte para a cabeça fixo à máquina
- um sistema de troca das cabeças (manual, automático ou semi-automático)

Utilizar um sistema modular parte da verificação de que este é um dos sistemas com as características que melhor se ajustam às necessidades.

Muitas vezes o comportamento do processo de fabricação não pode ser previsto para cada uma das situações ou condições existentes de forma prática, para assim determinar o equipamento necessário, devido ao alto custo ou tempo gasto. Uma das melhores formas para

esta determinação é a medição e monitoração de alguns sinais de resposta durante o processamento, para algumas condições particulares, que permitam o mapeamento geral do comportamento do processo, e assim traçar gráficos e curvas que permitam, com certa precisão, determinar as melhores condições e o melhor equipamento para o processamento. Uma das mais importantes grandezas utilizadas para este fim é a monitoração das forças de usinagem, que juntamente com as condições de corte, permitem classificar as operações de fabricação em desbaste pesado, desbaste médio ou acabamento.

Os principais Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas são diferenciados principalmente pelo método de fixação do porta-ferramentas e distribuição de esforços. Os mais utilizados são: ABS, CAPTO, VTS (Valenite Tool System), BTS (Block Tool System), KM (Kennametal Modular) e HSK.

2.6.1 HSK - (MAPAL-GÜHRING)

A Figura 2.1 apresenta uma fotografia do sistema de troca rápida com fixação do tipo HSK.

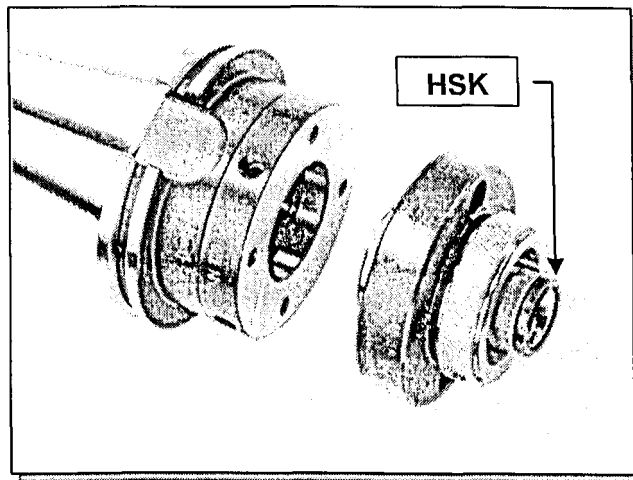


Figura 2.1 Sistema de Troca Rápida HSK [Catálogo Mapal-Gühring]

Este dispositivo permite ser utilizado em sistemas automáticos ou manuais diretamente na máquina-ferramenta ou através de porta-ferramentas. Entre suas principais vantagens estão [Gühring, 1999]:

- Possui alta rigidez estática e dinâmica. As forças axiais e radiais geradas na haste produzem a força de aperto necessária para o ajuste.
- Sua alta transmissão de torque e posicionamento radial é definido através de duas chavetas de fixação e pelo alto coeficiente de atrito entre as superfícies de contato.
- A sua alta precisão e repetibilidade de troca de ferramentas se deve ao ajuste circular e às chavetas; é gerada uma conexão firme e total entre o suporte e o porta-ferramentas.
- Quanto maior o número de revoluções melhor será a fixação e desempenho. A tração inicial entre os componentes é compensada pela expansão gerada pela força centrífuga, eliminando totalmente o jogo radial. A posição do plano de ajuste previne qualquer deslizamento na direção axial.

a) Geometria e Fixação

Bastante característica, a geometria dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas HSK possui duas partes importantes, o suporte e o porta-ferramentas.

O ajuste entre ambos é possível, graças a duas chavetas radiais contidas no eixo do suporte que é encaixado no porta-ferramentas, e, quando acionado por um parafuso, se expande provocando o ajuste entre os componentes. Um pino de ajuste permite travar o deslocamento entre ambos os componentes. A Figura 2.2 apresenta o esquema de encaixe e ajuste deste sistema.

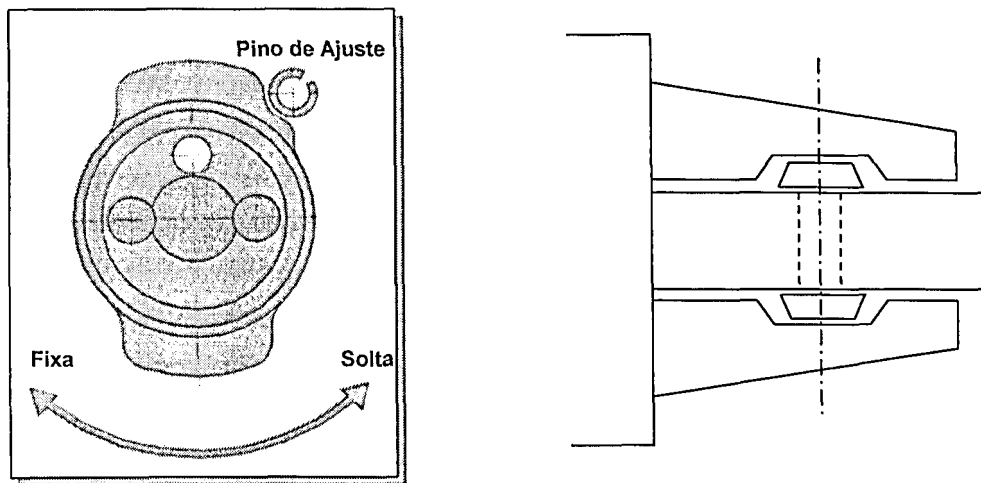


Figura 2.2 Sistema de Troca Rápida HSK – Geometria [Catálogo Mapal-Gühring]

b) Esforços

Os Esforços são distribuídos ao longo da superfície de contato de forma a distribuir os esforços do contato e ajustar perfeitamente ambas as partes. A Figura 2.3 apresenta o esquema de esforços antes e após do encaixe.

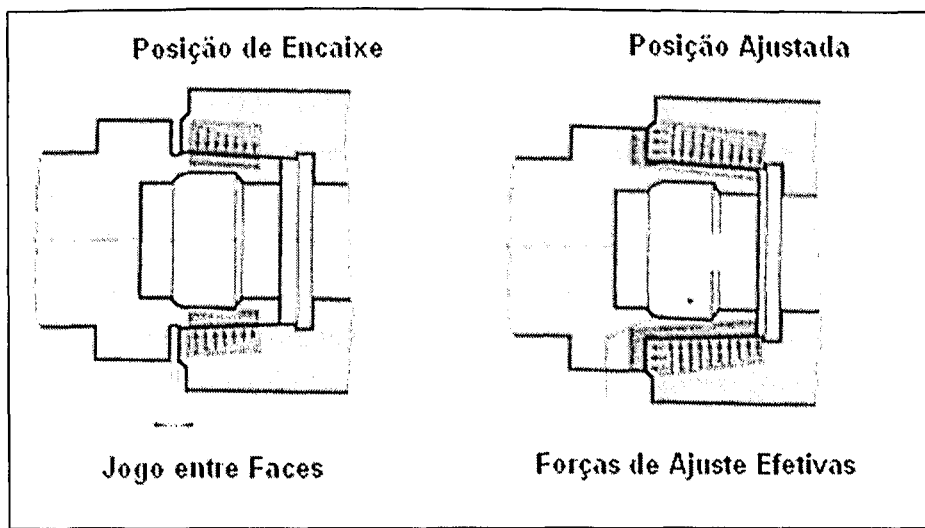


Figura 2.3 Sistema de Troca Rápida HSK – Esforços [Catálogo Mapal-Gühring]

2.6.2 KM [Catálogo Kennametal – Hertel]

A Figura 2.4 apresenta uma fotografia do Sistema de Troca Rápida do tipo KM para o processos de torneamento.

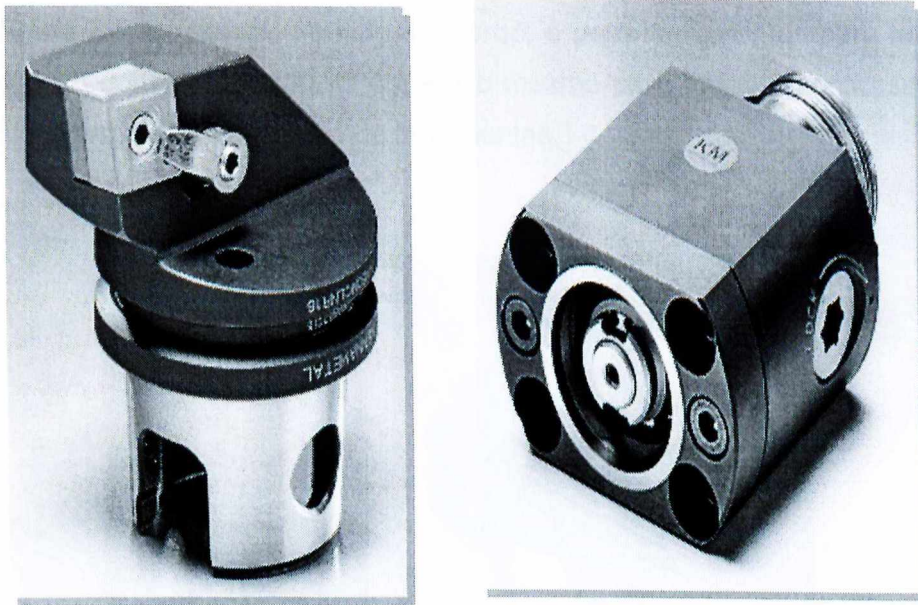


Figura 2.4 Sistema de Troca Rápida KM para torneamento [Catálogo Kennametal-Hertel]

Entre as principais características deste Sistema podemos mencionar:

O Sistema pode ser manual, semi-automático, ou automático, proporcionando funcionalidade para produtos e equipamentos em evolução para os próximos 10 a 20 anos. [Catálogo Kennametal - Hertel]

O Sistema de Troca Rápida modular Km pode ser aplicado em:

- Torneamento
- Madrilamento
- Aplicações rotativas
- Permite padronização entre máquinas

Este sistema possui versatilidade na rotação, pois permite rotação ambos sentidos no torneamento, mandrilamento e outras aplicações rotativas.

Possui um sistema de auto-alinhamento, permitindo a troca de ferramentas manual e automática.

A troca de ferramentas e do sistema refrigerante pode ser robotizada. Todas as ferramentas tem sistema refrigerante e luva de fixação para troca automática de ferramentas.

A Figura 2.5 apresenta, ao lado esquerdo, o porta-ferramentas para mandrilamento, e ao lado direito o cone de fixação. O cone é o mesmo para todos os processos que utilizem equipamentos com o mesmo padrão de ferramentas.

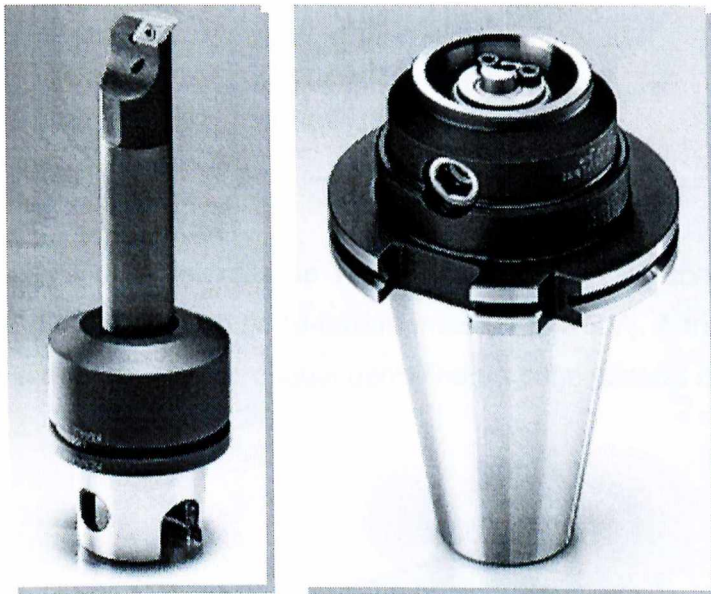


Figura 2.5 Sistema de Troca Rápida KM – Fresamento [Catálogo Kennametal - Hertel]

O sistema é compacto, rígido, preciso e de baixo custo. As ferramentas podem ser montadas em 'kits' e pre-configuradas para a trabalhar na direção radial ou axial.

Classificado por combinações de pinos ou "clamps", pode ser pré-configurado pois as cabeças estão providas de ambos os sistemas.

A ativação do sistema pode ser automática através de molas ou torque, permitindo a seleção da ativação do travamento ou destravamento.

A utilização deste sistema pode ser estacionário ou rotativo, pois foi desenvolvido para equipamentos multifunção, centros de usinagem e linhas de transferência.

Para fins de segurança, garante que as ferramentas não se soltaram acidentalmente nem como resultado de falhas hidráulicas ou elétricas na máquina. O sistema de centralização e travamento é automático.

Além destas vantagens, é possível a conversão e adaptação para usuários, não sendo necessárias modificações nos equipamentos existentes. Todo o equipamento foi desenvolvido para os mercados Norte Americano, Europeu e Asiático. É aplicável às máquinas manufaturadas nos maiores mercados mundiais.

a) Geometria

Como a maioria dos Sistemas de Troca Rápida, este está constituído por duas partes básicas: O suporte (Figura 2.6) e o porta-ferramentas (Figura 2.7). A troca é efetuada quando o porta-ferramentas é trocado por outro igual permitindo a continuidade da operação com apenas uma operação.

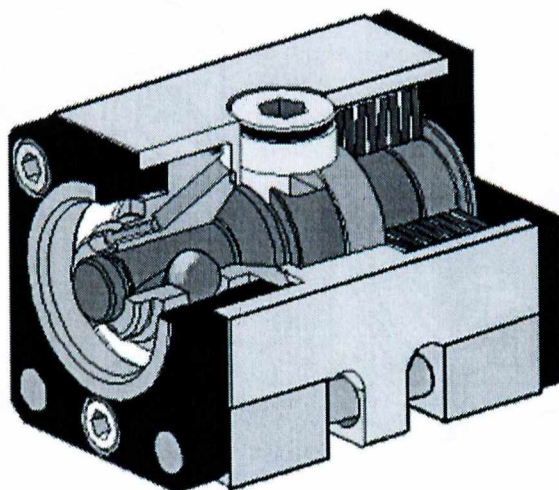


Figura 2.6 Geometria do suporte de fixação do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]

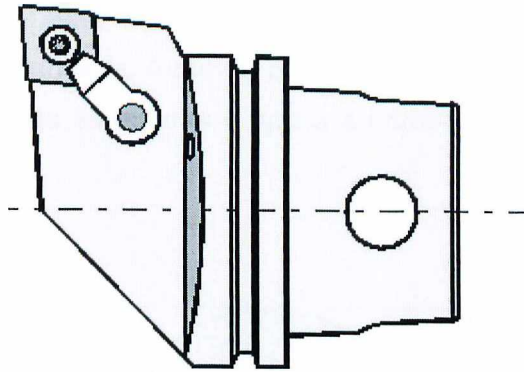


Figura 2.7 Geometria do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]

c) Tecnologia de Fixação

A fixação dos Sistemas KM se caracteriza pelo uso de duas esferas móveis (no suporte) que travam o sistema ao se encaixarem em dois furos diametralmente opostos (no porta-ferramentas), como mostrado na Figura 2.8.

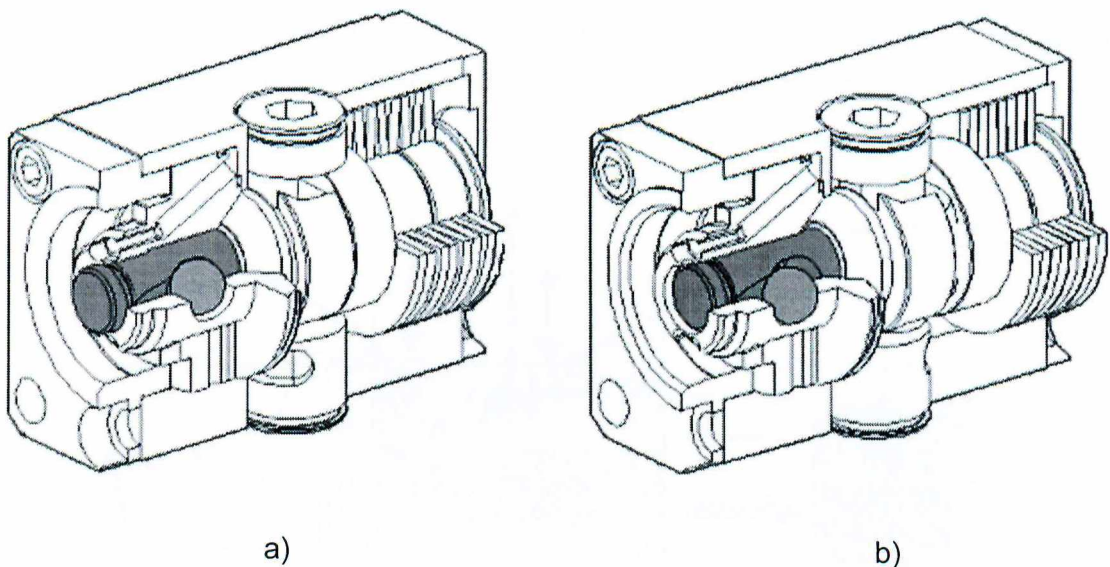


Figura 2.8 Fixação do suporte do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. a) Aberto ou Destravado; b) Fechado ou Travado

O ajuste é realizado através de um parafuso situado perpendicularmente ao encaixe do porta-ferramentas no suporte. Este, ao ser girado, movimentava um carro que contém as esferas, e as movimenta até as cavidades ou furos no porta-ferramentas, travando o sistema graças a uma camisa fixa que posiciona as esferas e ajusta o porta-ferramentas no suporte, conforme Figura 2.9.

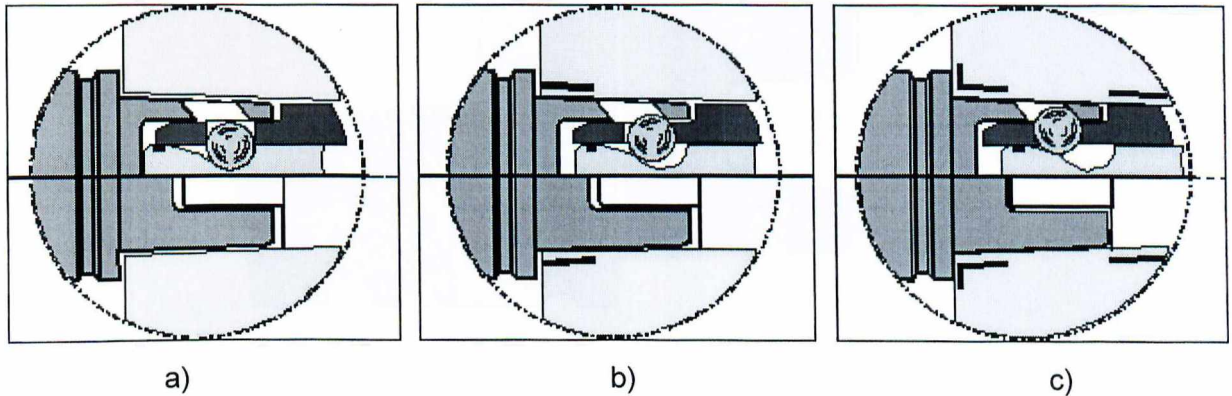


Figura 2.9 Fixação do porta-ferramentas para o Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. a) Posição de Troca; b) Movimento da Esfera; c) Posição de Trabalho.

d) Esforços

Detalhes importantes como a distribuição de esforços e forças inerentes aos sistemas foram considerados no projeto deste sistema, como mostrado na Figura 2.10.

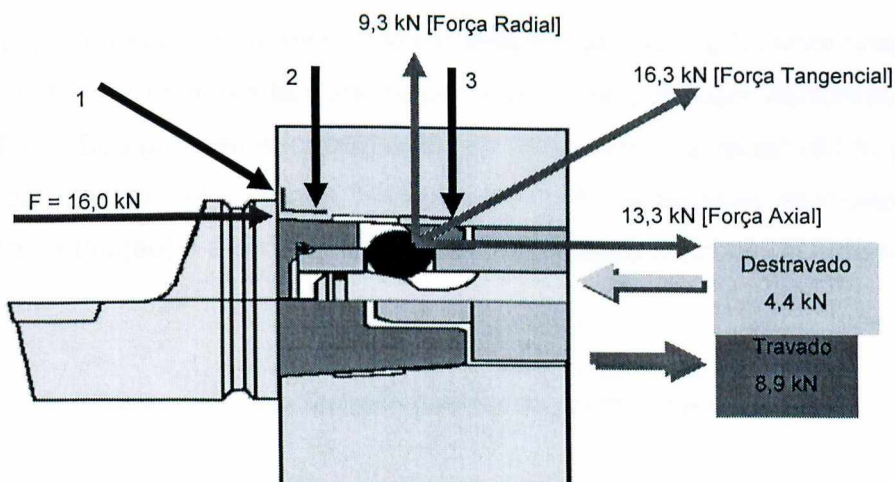


Figura 2.10 Diagrama de esforços do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. Três pontos de contato/esforço

Outra característica interessante deste sistema são os pontos de fixação, situado em três pontos, permitindo assim maior precisão e evitando vibração prejudicial ao acabamento do produto. Figura 2.11.

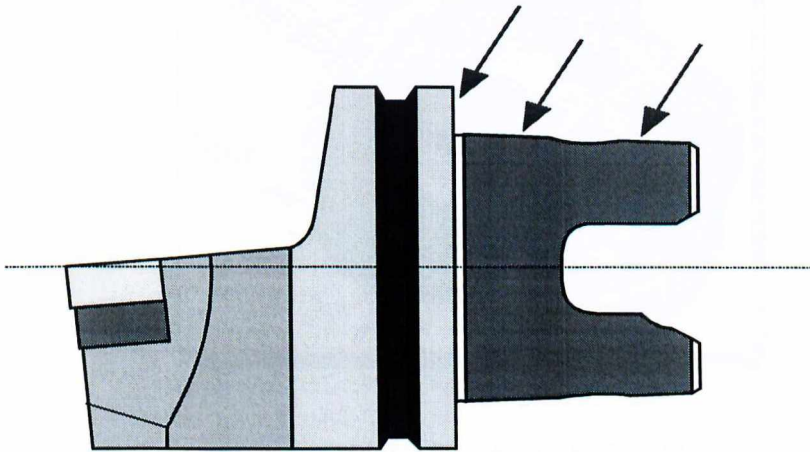


Figura 2.11 Diagrama de esforços do porta-ferramentas do Sistema de Troca Rápida KM [Catálogo Kennametal - Hertel]. Três pontos de contato: suporte facial e deformação elástica.

2.6.3. CAPTO [SANDVIK]

Pioneira no desenvolvimento de ferramentas modulares, a Sandvik possibilitou menores tempos de "set-up" e menores tempos de usinagem devido à maior estabilidade do dispositivo do tipo CAPTO. Sua geometria foi baseada nos "Block Tool Systems" (BTS) para os sistemas de corte linear (Torneamento) e nos "Sistemas Varilock" para cortes interrompidos e circulares (Fresamento e Furação) e é considerado o primeiro sistema modular de ferramentas universal.

A Figura 2.12 apresenta o formato padrão do porta-ferramentas CAPTO.

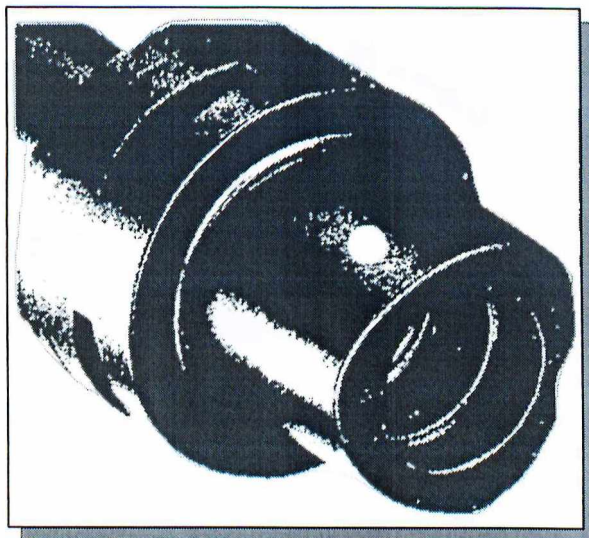


Figura 2.12 Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]

a) Geometria

O sistema é composto por duas partes, o suporte e o porta-ferramentas. O suporte possui uma cavidade triangular/cônica (trigonal), característica particular deste sistema, onde, dependendo do tipo de operação, está contido um parafuso que irá fixar o porta-ferramentas.

Esta geometria triangular permite uma melhor fixação do porta-ferramentas eliminando os riscos de vibração e maus acabamentos.

O porta-ferramentas, possui uma extremidade com a geometria triangular equivalente que será inserida na cavidade do suporte, contendo ainda um furo rosqueado onde será fixado o parafuso. Os porta-ferramentas podem variar de muitas formas, mas a sua geometria de ecaixe será sempre triangular permitindo assim uma ampla gama de modularidade.

Nenhuma adaptação especial é necessária nas ferramentas já utilizadas nem na torre de fixação. A refrigeração pode ser efetuada através da ferramenta.

A Figura 2.13 apresenta o esquema geométrico para os processos lineares. A força F de fixação é sempre na direção do suporte e varia de acordo ao aperto dado pelo torque M_y .

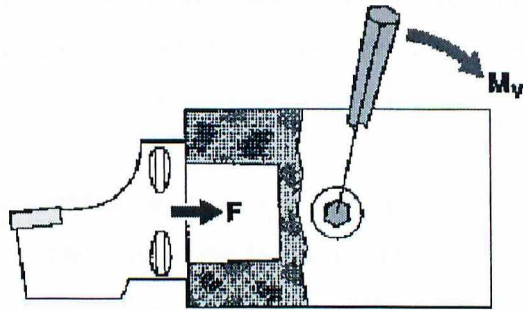


Figura 2.13 Geometria do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]

A Figura 2.14 apresenta o esquema geométrico para os processos rotativos.

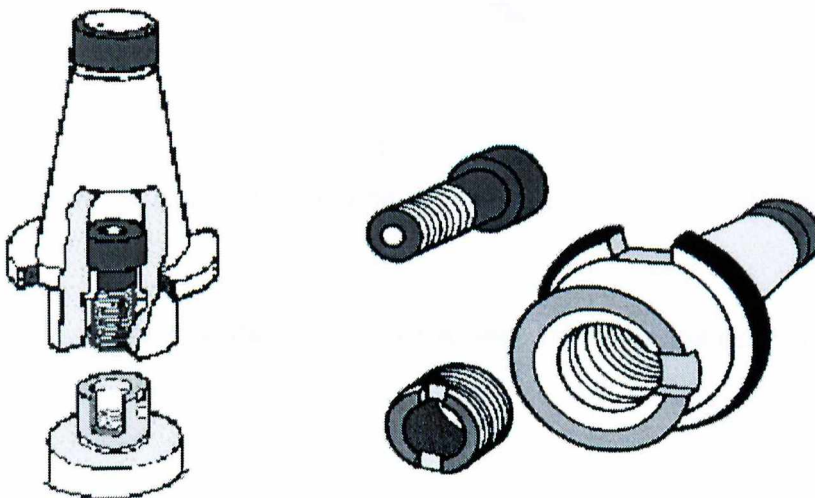


Figura 2.14 Geometria do cone de fixação do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]

b) Fixação

A fixação pode ser feita de três maneiras:

- Tirante de tração ("drawbar") ativado por came, onde o movimento do tirante é gerado por um came atuando a partir da face da unidade que gira em um canal no tirante de tração, conforme Figura 2.15 (a)

- Tirante de Tração ("drawbar") acionado por parafuso, onde o movimento do tirante é controlado por um parafuso acionado pela parte de trás da unidade. Uma chave hexagonal é usada para prender/soltar a unidade de corte ou porta-ferramentas. É necessária apenas uma volta do parafuso para a fixação. Figura 2.15 (b)
- Fixação por parafuso central, este é acionado por um parafuso pela parte de trás da unidade. Uma chave hexagonal é usada para prender/soltar a unidade de corte ou porta-ferramentas. São necessárias seis voltas do parafuso para a fixação. Figura 2.15 (c)

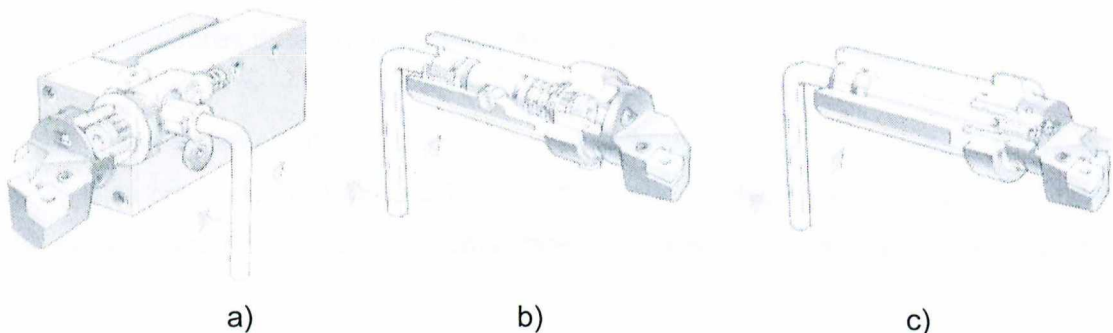


Figura 2.15 Sistema de fixação do Sistema de Troca Rápida CAPTO [Catálogo SANDVIK]

Existem outras formas de fixação especiais para equipamentos mais complexos. [Sandvik, 1997]

2.6.4 VTS (GENOS) [Valenite WebSite]

O Sistema de Troca Rápida do tipo VTS é um sistema modular que facilmente se adapta às máquinas-ferramentas comuns como aos centros de usinagem.

Este sistema é ideal para o torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, etc. A sua geometria fornece alta rigidez e precisão sem aumentar seu peso, permitindo a fácil manipulação.

Reduz consideravelmente o tempo de preparação e ajuste da máquina diminuindo os custos do processamento.

Seu ajuste pode ser efetuado com uma tração de volta de 155°, favorecendo a troca rápida das ferramentas.

A repetibilidade radial e axial deste sistema pode chegar até $\pm 0.0025\text{mm}$ dependendo das condições de processamento [Valenite WebSite].

É compatível com todos os equipamentos padronizados para esta tecnologia e ainda conta com adaptadores para equipamentos especiais.

Este sistema se caracteriza principalmente pelo seu método de fixação, que é efetuado através de uma chaveta. Na Figura 2.16 mostra-se o cone de fixação, na Figura 2.17 o mandril ou porta-ferramentas e na Figura 2.18 uma vista do dispositivo de fixação (cone e mandril).

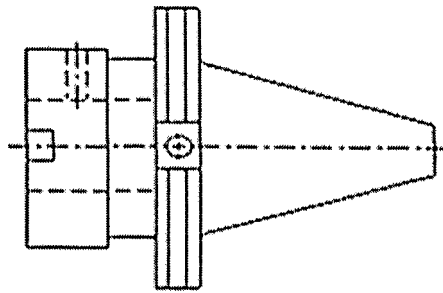


Figura 2.16Cone de Fixação do Sistema de Troca Rápida GENOS

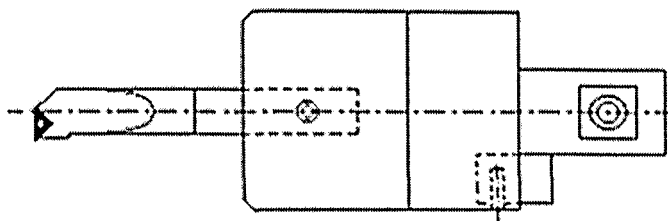


Figura 2.17Porta-ferramentas ou mandril do Sistema de Troca Rápida GENOS

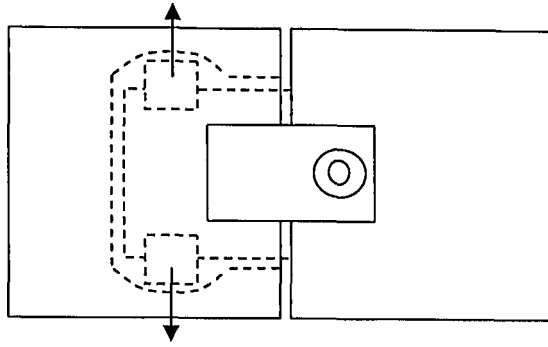
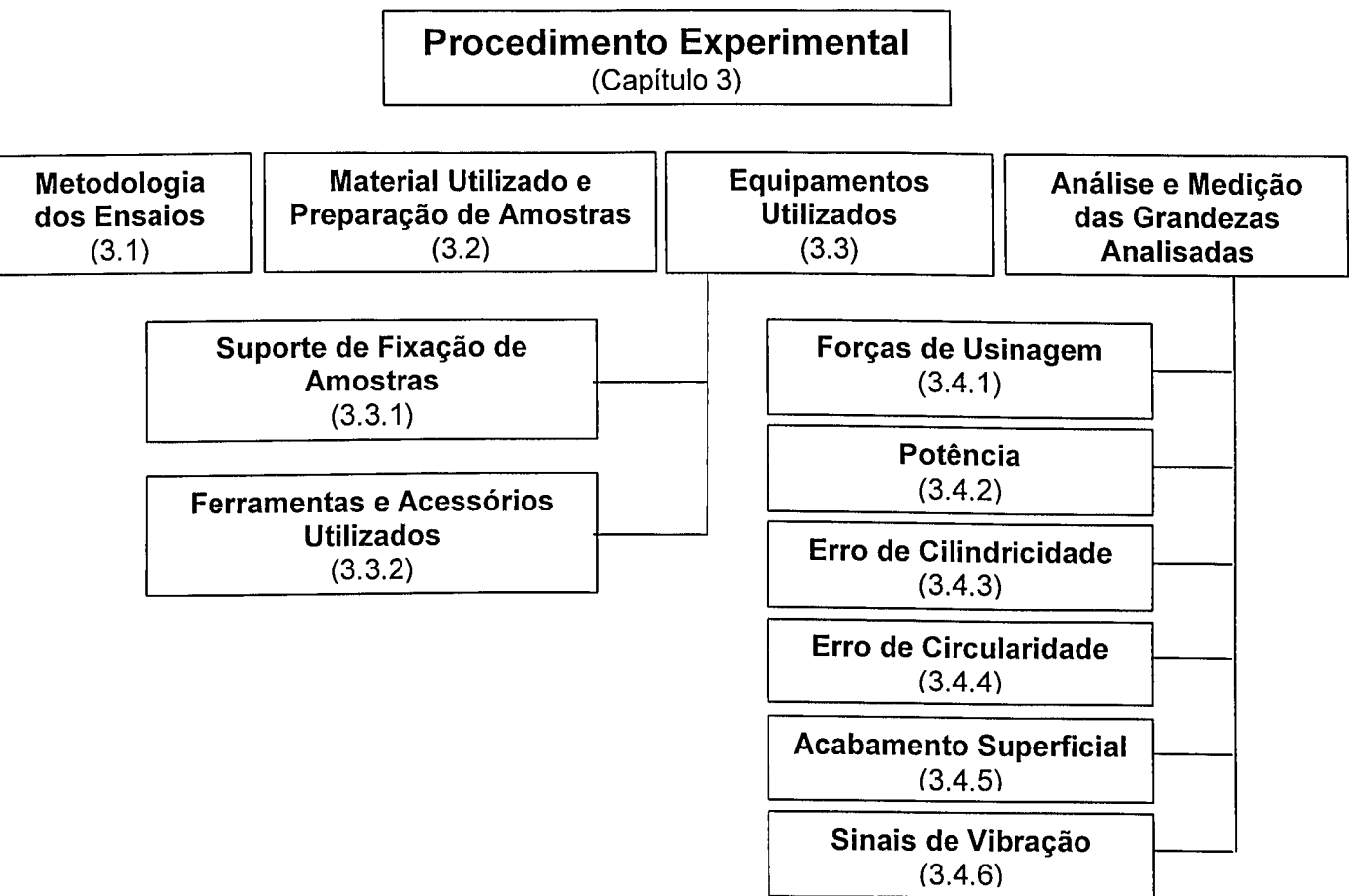


Figura 2.18 Dispositivo de fixação do Sistema de Troca Rápida GENOS

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para atingir os objetivos deste trabalho, isto é, comparar o desempenho dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas (STR), foram adotadas diversas experiências práticas e foram efetuadas várias análises teóricas das grandezas a serem monitoradas. A determinação da seqüência e da forma como estas experiências foram efetuadas será descrito detalhadamente a seguir.

O esquema a seguir apresenta o organograma do procedimento experimental adotado para a efetivação dos objetivos estabelecidos para este trabalho.



Organograma - Esquema do procedimento experimental

3.1 Metodologia dos Ensaios

Foram consideradas as componentes de força de usinagem, o consumo de potência, sinais de vibração e parâmetros geométricos (precisão de forma e dimensão e acabamento da superfície).

Os ensaios de usinagem e as medições de força, consumo de potência, vibração, e o monitoramento do desgaste foram efetuados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia.

As verificações do erro de circularidade e cilindricidade, e a verificação do acabamento da superfície foram realizadas no Laboratório de Metrologia da FA Powertrain. (Fiat Automóveis S.A.)

As análises dos dados obtidos foram realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia, com o auxílio de computadores, sistemas de análises de dados e geradores gráficos.

Foram selecionadas as seguintes variáveis, por serem considerados parâmetros fundamentais para esta análise:

- Velocidade de Corte
- Avanço
- Sobremetal
- Fluido de Corte
- Sistema de Troca Rápida

Estas variáveis foram combinadas de forma a proporcionar resultados mais próximos da realidade industrial, e que permitissem ao mesmo tempo, verificar e mapear o comportamento dos Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas (STR) numa vasta gama de condições de processamento.

O processo de fabricação selecionado para esta análise foi o Mandrilamento.

Determinou-se que o procedimento consistiria no seguintes passos:

- a) Preparação das amostras, onde estas seriam cortadas de uma barra maciça, em pequenos blocos e um acabamento seria dado nas suas superfícies transversais, para garantir que ambas as superfícies ficassem paralelas e eliminar qualquer inclinação ou desvio decorrente do corte.
- b) Posicionamento no Sistema de Fixação - Especialmente projetado para permitir a operação de furação e mandrilamento, garantindo referenciar as amostras na mesma posição relativa à máquina-ferramenta.
- c) Processo de furação - Nove furos foram feitos na amostra, todos passantes e todos com a utilização do mesmo fluido de corte. Para cada etapa da experiência, diferentes diâmetros iniciais foram adotados (desbaste e semi-acabamento), para deixar diferentes sobre-metais (profundidade de corte) para o processo de mandrilamento.
- d) Processo de Mandrilamento ou etapa de teste propriamente dita - Sem retirar as amostras, cada um dos nove furos foi mandrilado, obedecendo as mesmas condições para cada amostra processada.

Cada uma das amostras, representou uma condição especial de fabricação. A repetibilidade da troca, um dos principais fatores de análise, foi simulada pela troca rápida a cada três furos mandrilados, sendo o mesmo dispositivo apenas retirado e recolocado no lugar. Repetiu-se o mesmo procedimento para cada um dos Sistemas de Troca Rápida.

A fim de eliminar a influência de variáveis como o desgaste das ferramentas, optou-se por utilizar materiais de alta usinabilidade, ou seja de fácil corte, que combinadas com ferramentas de alta resistência e condições de processamento adequadas permitissem eliminar, senão totalmente, grande parte da sua influencia e, pelo monitoramento de todos os ensaios, foi possível garantir a substituição da aresta de corte da ferramenta antes do desgaste de flanco alcançasse 0.1 mm.

Os ensaios foram divididos em duas partes, sendo a primeira parte para pré-furos de diâmetro 19mm e a segunda parte para diâmetros de 16mm. As condições de processamento nestas duas etapas foram combinadas como apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2 .

Tabela 3.1 Metodologia - Condições de Processamento – 1ª Parte (Pre-furo 19mm)

A – PRIMEIRA PARTE					
A1 SEM FLUIDO DE CORTE			A2 1º – SEM FLUIDO DE CORTE 2º – COM FLUIDO DE CORTE		
PARÂMETROS FIXOS			PARÂMETROS FIXOS		
Diâ. Pré-furo $\phi = 19$ mm		Diâ. Final $\phi = 23$ mm	Diâ. Pré-furo $\phi = 19$ mm		Diâ. Final $\phi = 23$ mm
Avanço $f_c = 0.15$ mm/rev.			Velocidade de Corte $V_c = 190$ mm/min.		
PARÂMETRO VARIÁVEL: V_c			PARÂMETRO VARIÁVEL: f_c		
1	140 m/min	~2054 rpm	1	0,100 mm/rev.	
2	165 m/min	~2421 rpm	2	0,150 mm/rev.	
3	190 m/min	~2787 rpm	3	0,200 mm/rev.	
4	215 m/min	~3154 rpm	4	0,250 mm/rev.	
5*	230 m/min	~3374 rpm	5*	0,075 mm/rev.	
6*	250 m/min	~3668 rpm			

* Condições utilizadas apenas para o STR CAPTO para fins de ajuste.

Tabela 3.2 Metodologia - Condições de Processamento – 2ª Parte (Pre-furo 16mm)

B – SEGUNDA PARTE					
A1 SEM FLUIDO DE CORTE			A2 1º – SEM FLUIDO DE CORTE 2º – COM FLUIDO DE CORTE		
PARÂMETROS FIXOS			PARÂMETROS FIXOS		
Diâ. Pré-furo $\phi = 16$ mm		Diâ. Final $\phi = 23$ mm	Diâ. Pré-furo $\phi = 16$ mm		Diâ. Final $\phi = 23$ mm
Avanço $f_c = 0.15$ mm/rev.			Velocidade de Corte $V_c = 190$ mm/min.		
PARÂMETRO VARIÁVEL: V_c			PARÂMETRO VARIÁVEL: f_c		
1	180 m/min	~2641 rpm	1	0,100 mm/rev.	
2	205 m/min	~3007 rpm	2	0,150 mm/rev.	
3	230 m/min	~3374 rpm	3	0,200 mm/rev.	
4	250 m/min	~3668 rpm	4	0,250 mm/rev.	

Todas estas combinações de condições de processamento foram realizadas para cada um dos Sistemas de Troca Rápida, totalizando 72 ensaios (24 ensaios para cada STR). Foram monitoradas as componentes de força F_x , F_y , F_z , o consumo de Potência, e dois sinais de vibração para todos os furos em todas as amostras.

A Figura 3.1 mostra um esquema da montagem dos equipamentos de medição e da localização dos sensores utilizados.

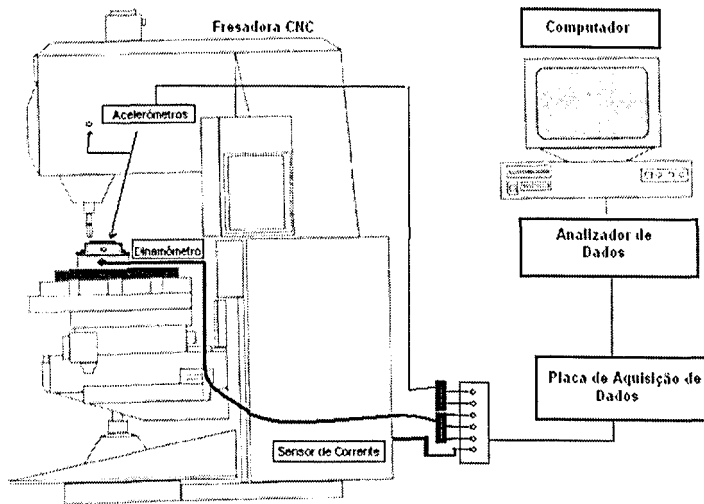


Figura 3.1 Sistema de Aquisição de Dados

3.2 Material Utilizado e Preparação de Amostras

O material utilizado foi o Aço ABNT 12L14, de seção 95x95x40 [mm], escolhido pela excelente usinabilidade diminuindo assim a influência do desgaste das ferramentas no acabamento da superfície e na precisão dos furos.

A composição química deste material é a seguinte (informações fornecidas pelo Fabricante - Aços Villares S/A).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Pb
0.08	0.01	1.08	0.052	0.277	0.15	0.09	0.02	0.16	0.004	0.19

A dureza média deste material, medida na seção transversal, é de 121 HB.

As amostras foram cortadas na serra mecânica e faceadas na fresadora de comando numérico até a dimensão de 95x95x40 [mm], a fim de garantir o paralelismo entre as duas faces. Logo após a marcação e numeração de todas as amostras, estas foram furadas com os respectivos diâmetros (19mm semi-acabamento e 16mm desbaste), específicos segundo o ensaio planejado.

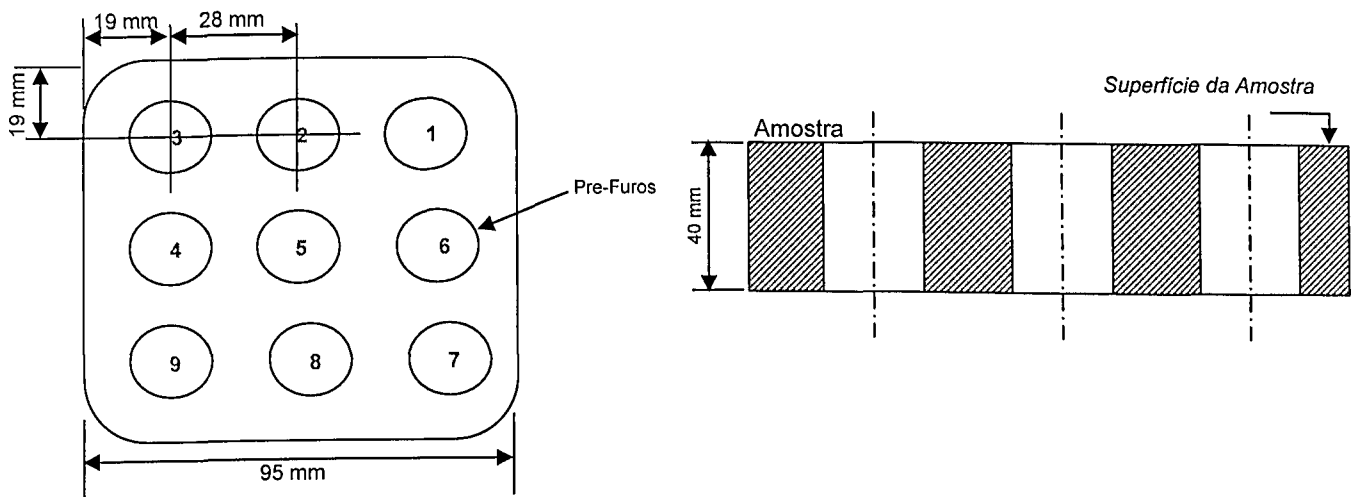


Figura 3.2 Esquema geométrico das Amostras

3.3 Equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios, tanto para a fabricação dos pré-furos como para o mandrilamento, foi utilizada a Fresadora CNC Romi Interact IV (Figura 3.3), de 16 KW de potência, com variação contínua de rotação do eixo árvore de 40rpm a 4000rpm e avanço rápido de 0 a 4800mm/min.

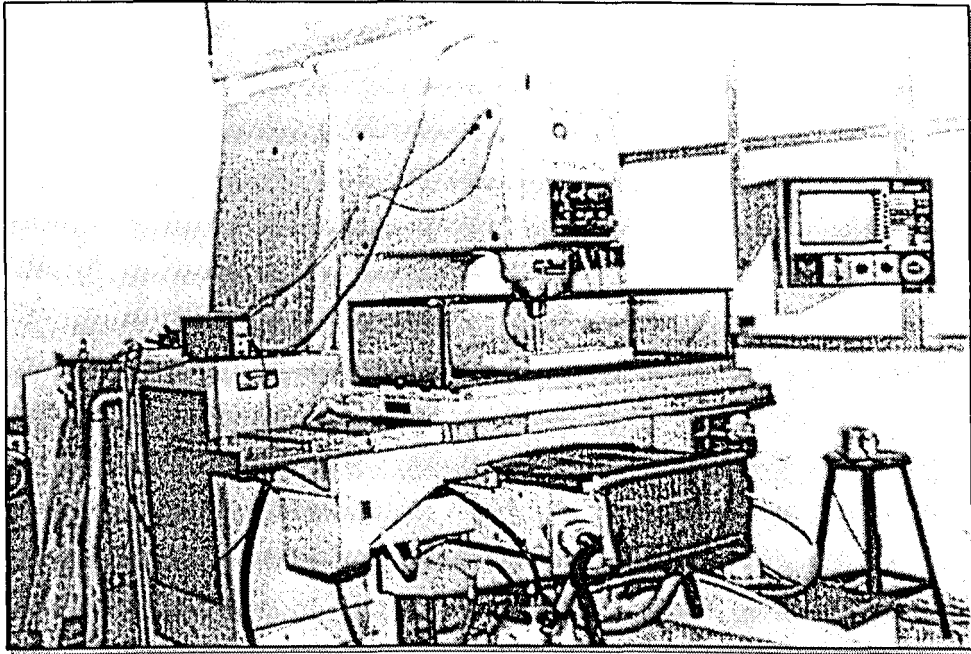


Figura 3.3 Máquina Ferramenta – CNC

Para a aquisição dos sinais a serem analisados foi montando um Sistema de Aquisição de Sinais, constituído principalmente por um Microcomputador com capacidade de processamento superior a 100Mhz, uma placa de aquisição de dados, um painel onde serão introduzidos os sinais recebidos dos sensores e um programa computacional para controlar e gravar os dados recebidos. Foi utilizado um software de aquisição e processamento de sinais (LabView 5.1) onde foi projetado um circuito equivalente ao sistema real de aquisição de sinais elétricos. O processamento dos dados e a gravação das informações foram efetuadas num formato predeterminado para facilitar a posterior análise dos dados armazenados.

3.3.1 Suporte de Fixação das Amostras

Foi desenvolvido um suporte especial para a fixação das amostras de forma a eliminar influências de ajuste e posicionamento que pudessem vir a prejudicar os resultados das

medições. Uma amostra foi fixada de cada vez, sendo esta ajustada de forma padronizada, no esquadro, e retirada apenas quando todo o ensaio correspondente tivesse sido concluído.

O sistema de fixação consta de uma base, duas faces metálicas fixas na base, e duas peças metálicas que se deslocam sobre a base permitindo o ajuste das amostras de forma que sua dimensão irregular (provocada pelo processo de fabricação) não venha a interferir na precisão dos ensaios. Três parafusos fixam a amostra entre as faces móveis. (Figura 3.4).

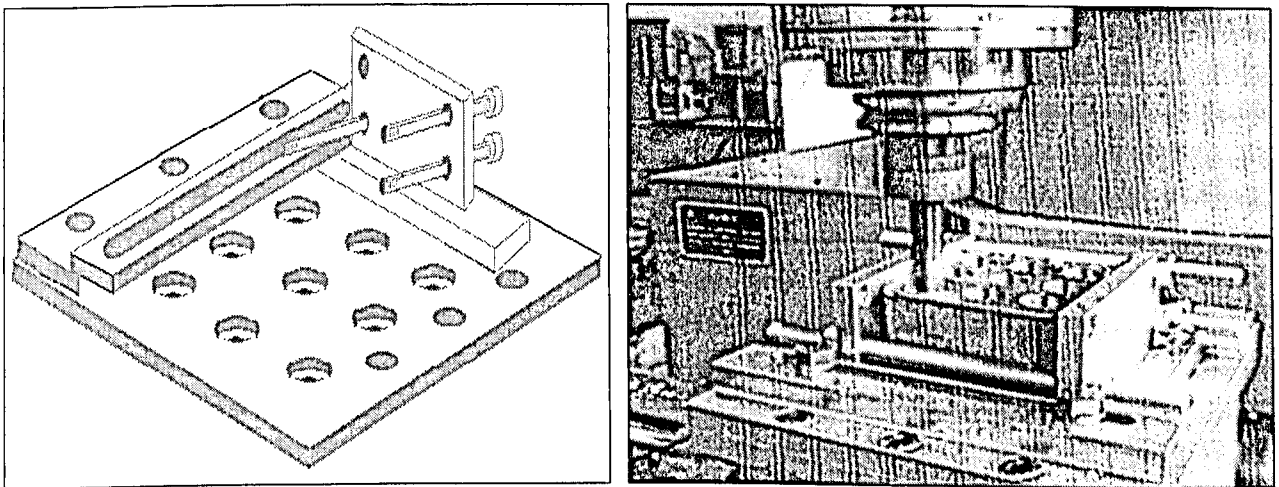


Figura 3.4 Sistema de Fixação de Amostras

Durante as experiências, uma das faces móveis foi fixada como referencial, e foi utilizado para referenciar a máquina nas coordenadas de processamento. A outra face foi utilizada para trocar as amostras sem interferir no referenciamento da máquina. Mesmo tendo alguma imprecisão no posicionamento das amostras, foi o posicionamento relativo entre furos o que permitiu manter a precisão.

3.3.2 Ferramentas e Acessórios Utilizados

Para a fabricação dos pré-furos, foram utilizadas brocas de Aço Rápido com a seguinte especificação: BROCA HSS - DIN 338 (Twill) com os diâmetros: 16mm e 19mm. O desgaste destas ferramentas foi monitorado para não influenciar na qualidade dos furos.

Para o mandrilamento, independente do STR, foram utilizadas pastilhas de metal duro TPMT-11-022-04LF (Kennametal) de forma e dimensões segundo o necessário para os STR utilizados.

Foram utilizados os seguintes STR:

- STR-01: CAPTO, fornecido pela Sandvik (Cone: C4-390.140-40030, Mandril: C4-STFCR—11070-11).
- STR-02: KM, fornecido pela Kenametal (Cone: DV40KM3240B 6163CFO, Mandril: KM32-S16ESTFPR11 - MFA 10106-UI4)
- STR-03: VTS, fornecido pela Genos (Cone: V40 ISO VT 50060 C, Mandril: S-16-R-STFC11, Alargador: VT50-E16-065).

O diâmetro final do mandrilamento, predeterminado para a efetivação dos ensaios, era de 20mm. Devido ao diâmetro mínimo produzido pelos STR fornecidos serem maiores que 21mm, foi necessário elevar o diâmetro final de teste para 23mm, produzindo-se assim a necessidade de efetuar uma interpolação geométrica durante o mandrilamento para alcançar este diâmetro.

O fluido de corte utilizado foi o Meca Fluid S4-ECO (Semi-Sintético) com uma concentração de 5%, tanto para a fabricação dos pré-furos como nos ensaios cujas condições de processamento previam o uso de fluido de corte. A vazão de aplicação do fluido foi constante para todos os ensaios e sistemas, e foi utilizado o sistema de refrigeração automático da máquina-ferramenta.

3.4 Análise e medição das grandezas analisadas

3.4.1 Forças de Usinagem

As forças foram medidas através de um dinamômetro piezoelétrico KITSLER Modelo 9265B, que permite o monitoramento das componentes F_x , F_y e F_z em tempo real durante o processamento.

Para tanto, é necessário entender o comportamento das forças neste tipo de processamento.

Devido os diâmetros das barras mandriladoras dos diversos STR serem diferentes, não foi possível efetuar a simples mandrilagem das amostras, com o mandril posicionado exatamente no centro do pré-furo. Foi necessário se fazer uma interpolação circular, garantindo a mesma quantidade de material removido para todos os STR. A Figura 3.5 ilustra o diâmetro do pré-furo (sendo 16mm para operações de desbaste e 19mm para operações de semi-acabamento), o diâmetro final (23mm) e a profundidade de corte – a_p , constante para todos os STR (sendo 3,5mm para desbaste e 2,0mm para semi-acabamento).

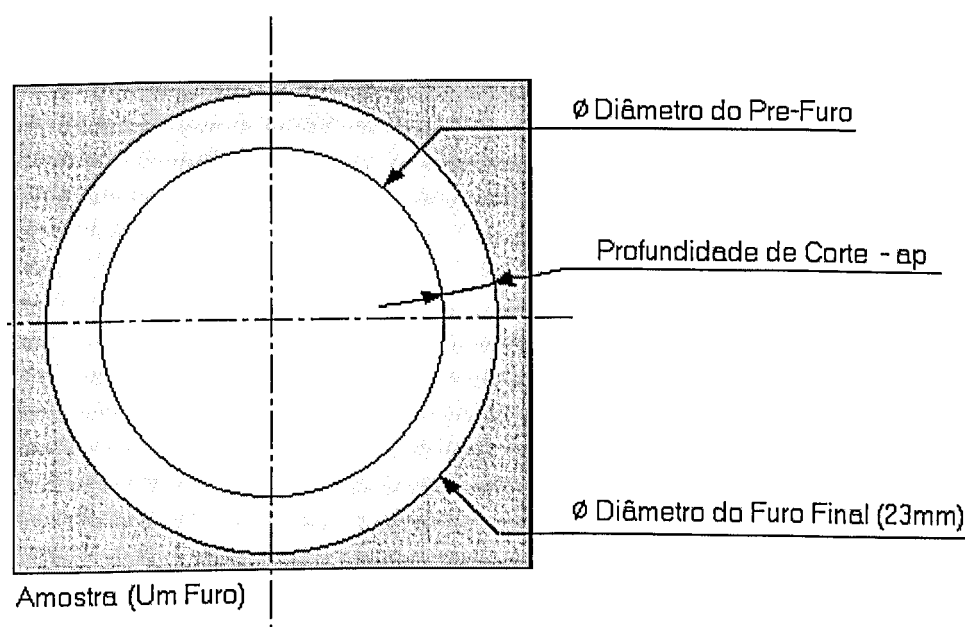


Figura 3.5 Características geométricas dos furos processados

A interpolação circular é uma aproximação numérica, realizada pelo comando numérico da máquina ferramenta que permite produzir um movimento de translação circular da ferramenta.

Calculou-se a diferença de diâmetros de cada uma das barras de mandrilar dos diferentes sistemas e obteve-se o raio 'Ri' de interpolação que representa a distância do centro do pré-furo e o centro da barra de mandrilar, conforme a Figura 3.6. (o desenho é apresentado fora de escala para facilitar a compreensão).

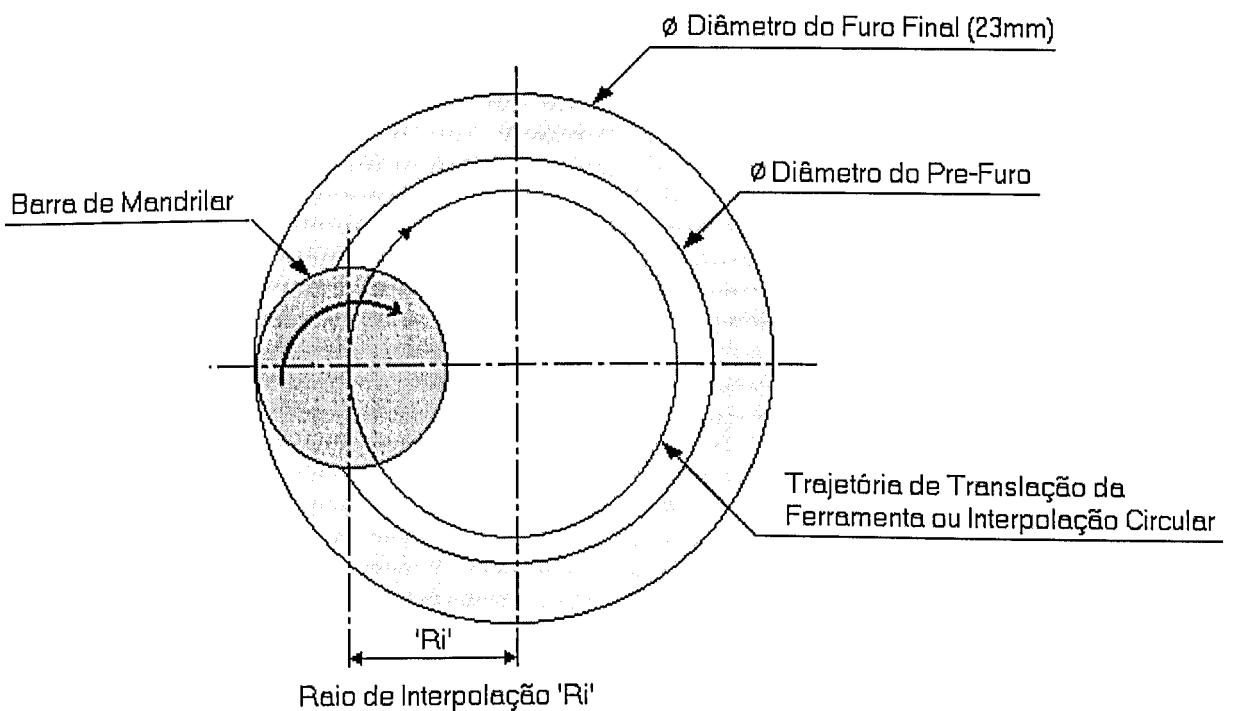


Figura 3.6 Trajetória de Translação ou Interpolação Circular

Devido ao movimento de rotação da barra de mandrilar e de translação circular (executado pela mesa porta-peça), as forças apresentam comportamentos oscilatórios de forma senoidal nas frequências de rotação referentes a estes movimentos.

Considerando o movimento da ferramenta dentro da amostra (de translação executado pela mesa) existirão componentes de forças negativas (comportamento senoidal). Este valor negativo se deve, por tanto, ao referencial utilizado pelo sistema de medição (Dinamômetro KISTLER) e à trajetória da ferramenta em relação ao mesmo.

A Figura 3.7 mostra o comportamento das forças durante este movimento de translação ou interpolação circular (a figura é apresentada fora de escala para facilitar a compreensão).

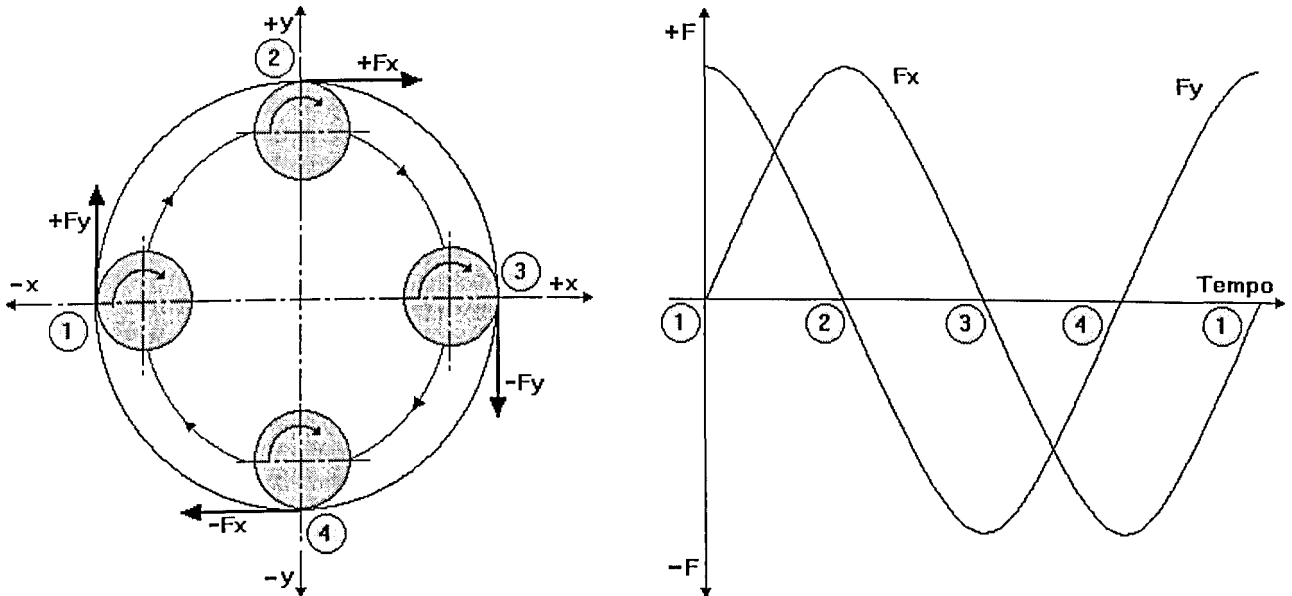


Figura 3.7 Comportamento das Forças ao longo da trajetória de translação circular

Nota-se que na posição 1 a componente de força F_y é máxima, enquanto que a componente F_x é nula. Na posição 2 esses valores se invertem. Nas posições 3 e 4 os valores das componentes de força voltam a se inverterem, mas assumindo valores negativos.

Ainda é necessário considerar o movimento de rotação da ferramenta, pois este também terá seu efeito sobre o comportamento das forças e atua simultaneamente com o movimento de translação.

Neste caso, o comportamento da força é similar ao observado no fresamento, por se tratar de um processo intermitente. Isto é, oscilando, sempre em valores positivos (ou de mesmo módulo, dependendo da posição de análise), variando apenas a amplitude conforme a ferramenta gira, entrando e saindo do material da amostra.

A Figura 3.8 mostra o comportamento do módulo da força resultante F para esta análise (a figura é apresentada fora de escala para facilitar a compreensão). Θ_1 representa o período ativo da ferramenta (de corte) e Θ_2 o período inativo.

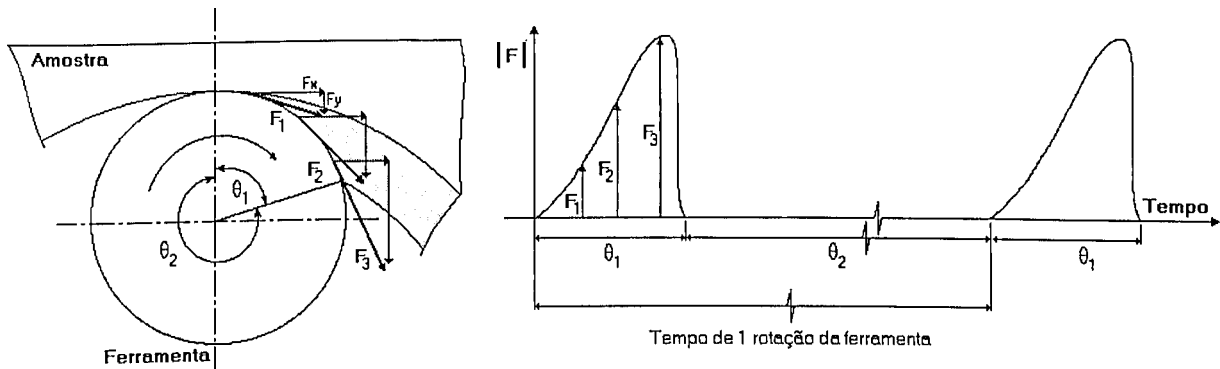


Figura 3.8 Comportamento das Forças – Processo Intermitente

Considerando as dimensões reais do pré-furo (16mm para desbaste e 19mm para semi-acabamento), do diâmetro final (23mm) e o diâmetro das barras de mandril dos diferentes Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas (ϕ STR-01 = 21,70mm, ϕ STR-02 = 21,92mm e ϕ STR-03 = 21,82mm), o desenho esquemático da Figura 3.8 se modificará para aqueles representados, em escala, nas Figuras 3.9 e 3.10.

A Figura 3.9 mostra o modelo geométrico, quando a ferramenta se encontra na posição de transação 2 conforme Figura 3.7.

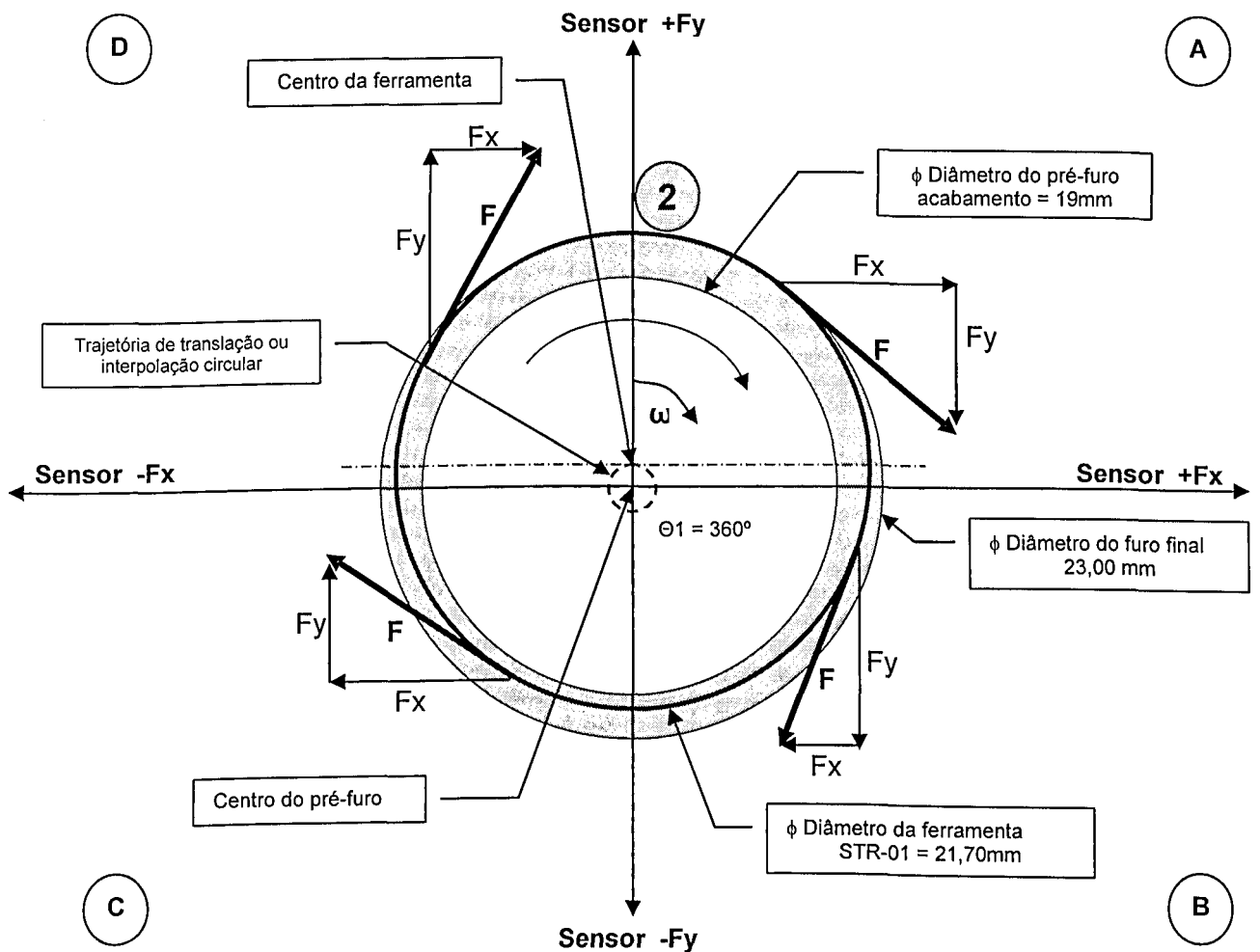


Figura 3.9 Modelo vetorial de forças e geométrico do furo e da barra de mandril em escala

Observa-se que Θ_1 (período ativo da ferramenta) assume o valor de 360° enquanto Θ_2 (período inativo) é igual a 0° , isto é, o corte se apresenta de maneira contínua, e não intermitente como no fresamento, existindo entretanto uma variação na espessura de corte – h , e conseqüentemente nas componentes da força, ao longo de uma revolução da ferramenta.

No quadrante A, F_x é positivo e F_y negativo. Estes valores se alternam conforme detalhado na Figura 3.9.

A Figura 3.10 apresenta o comportamento das componentes de força F_x e F_y para esta situação, durante uma revolução da ferramenta.

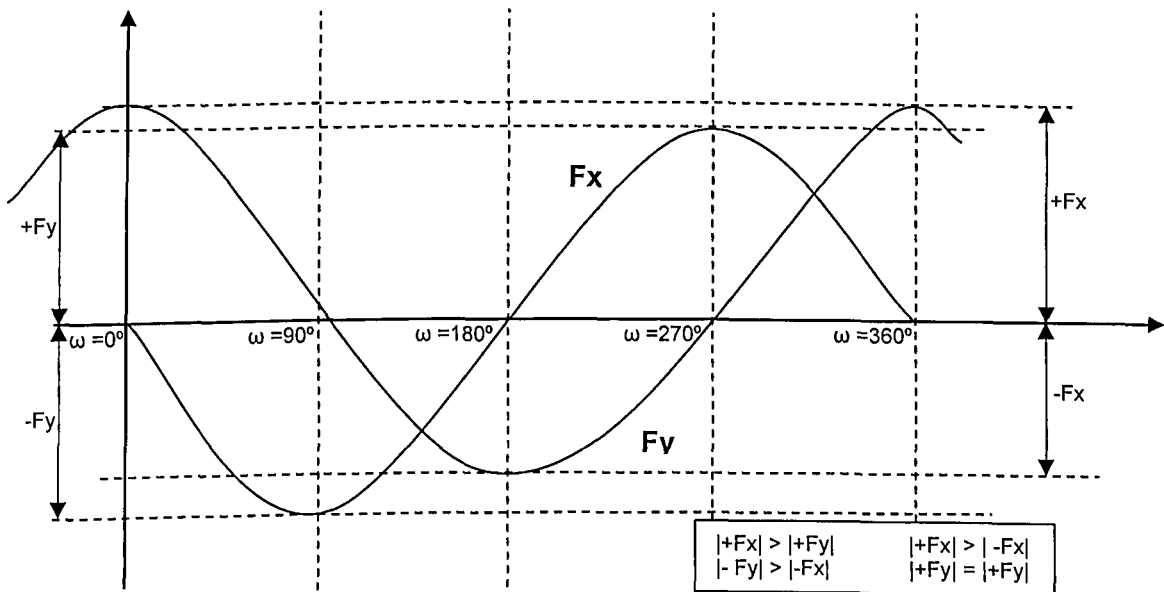


Figura 3.10 Representação do comportamento da força resultante F considerando as dimensões reais

Nota-se que no movimento em que a aresta de corte se encontra na posição $\omega=0^\circ$, a componente de força F_x atinge o valor máximo (e positivo). Esta posição coincide com a máxima espessura de corte – h .

Na posição $\omega=180^\circ$ a componente de força F_x assume o maior valor negativo, que em módulo, é inferior àquele observado em $\omega=0^\circ$, pois a espessura de corte, h , correspondente é proporcionalmente menor.

A componente de força F_y , também atinge valores máximos, defasados de 90° daqueles apresentados pela componente F_x . Em módulo, esses valores são inferiores ao máximo apresentado por F_x em $\omega=0^\circ$, porque a espessura de corte, h , é sempre inferior nestas posições.

É importante relembrar que simultaneamente ao movimento de rotação acontece o movimento de translação. Assim, quando a ferramenta se transladar para outras posições, como por exemplo 3, 4 e 1 da Figura 3.7, haverá flutuações das componentes de força F_x e F_y similares, cujos comportamentos dependem da posição de análise.

Deve-se salientar, ainda, que existe também o movimento de avanço na direção perpendicular ao plano das Figuras 3.9 e 3.10 (na direção Z), gerando componentes de forças F_z .

3.4.2 Potência Consumida

A potência foi medida com o auxílio de um sensor de efeito Hall, que mede a corrente de alimentação do motor do eixo árvore responsável pela rotação que movimenta a ferramenta de corte. A resposta deste sensor, dada em milivolts (mV) é amplificada 10.33 vezes antes de ser enviada ao sistema de aquisição de dados.

Este sinal é adquirido por um microcomputador onde é armazenado para ser analisado e processado posteriormente.

3.4.3 Cilindricidade

A verificação do erro de cilindridade, é definida como a diferença entre o raio máximo e mínimo encontrados no deslocamento vertical da superfície em análise.

A Figura 3.11 mostra o esquema geométrico da verificação do erro de cilindridade, efetuado em cada um dos furos analisados.

O erro de cilindridade foi verificado no Laboratório de Metrologia da FA Powertrain (Fiat Automóveis S.A.) no analisador de perfil tridimensional. (Figura 3.14)

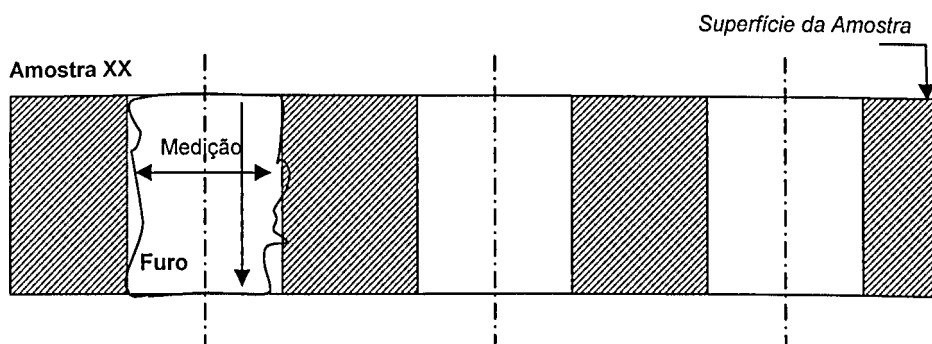


Figura 3.11 Esquema de Verificação do erro de Cilindridade

3.4.4 Circularidade

Para a verificação do erro de circularidade, definida como a diferença entre os raio máximo e o raio mínimo dos círculos imaginários onde esta inscrito o furo a ser analisado, sendo o raio máximo $R_{m\acute{a}x}$ e o raio mínimo $R_{m\acute{i}n}$, (Figura 3.12),

O erro de circularidade foi verificado no Laboratório de Metrologia da FA Powertrain (Fiat Automóveis S.A.) no analisador de perfil tridimensional. (Figura 3.14)

A Figura 3.12 apresenta o esquema do conceito de verificação de erro de circularidade, efetuado em todos os furos analisados.

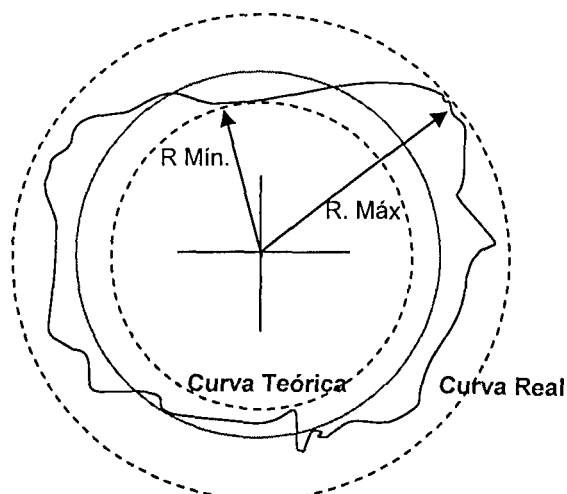


Figura 3.12 Análise da Circularidade

Foram adotados três pontos para a verificação deste erro, como mostrado na Tabela 3.3, a partir dos quais se obteve o valor médio da circularidade, valor utilizado na apresentação dos resultados.

Tabela 3.3 Esquema de Verificação do erro de circularidade

Circularidade Furo Nº X / Amostra Nº XX			
Medição	Posição (Em relação ao topo)	R máx	R min
1	2 mm	AA	aa
2	20 mm	BB	bb
3	35 mm	CC	cc

A Figura 3.13 apresenta o esquema das posições de verificação do erro de circularidade efetuado para um dos furos analisados.

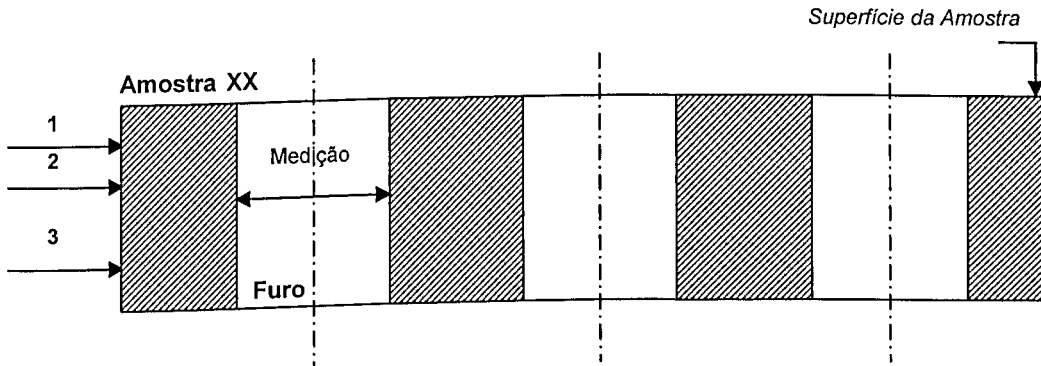


Figura 3.13 Verificação do erro de Circularidade

3.4.5 Acabamento da superfície

A verificação do acabamento da superfície, foi efetuada no Laboratório de Metrologia da FA Powertrain (Fiat Automóveis S.A.) no analisador de perfil tridimensional. A Figura 3.14 apresenta uma foto do equipamento utilizado.

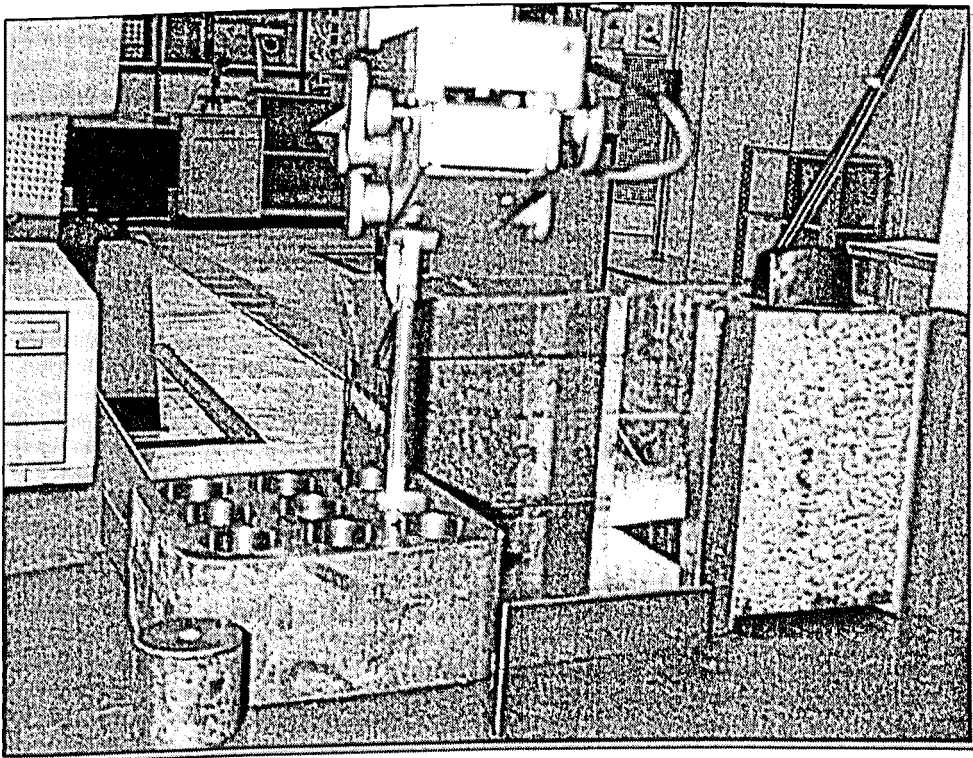


Figura 3.14 Analisador de perfil tridimensional - Laboratório de Metrologia. FA Powertrain (Fiat Automóveis S.A.)

3.4.6 Sinais de vibração

Foram monitorados dois sinais de vibração: no suporte de fixação das amostras e no mancal do eixo árvore de rotação da ferramenta, como mostrado na Figura 3.1, utilizando 02 acelerômetros e 02 amplificadores de sinal, equipamento fornecido pela Universidade Federal de Uberlândia.

Estes sinais foram adquiridos por um microcomputador e foram armazenados para posterior processamento e análise.

3.5 Comentários

Os STR-01 e STR-02 possuem mais de uma posição de encaixe do porta-ferramentas (o STR-02 não fornece nenhuma indicação da posição ideal de encaixe), dependendo da posição, o diâmetro final produzido pela ferramenta no mandrilamento normal (sem interpolação circular) era maior ou menor que o diâmetro nominal especificado, alterando assim os valores de R_i (Figura 3.6) provocando erros no processamento dos ensaios quando efetuado o mandrilamento com interpolação circular. Para tais casos (quando não há indicação) foi adotada, aleatoriamente, uma posição fixa para a efetivação de todos os ensaios.

Todos os STR anunciam um número determinado de voltas para o ajuste perfeito do porta-ferramentas no cone, mas, foi verificada a necessidade de efetuar, pelo menos, uma volta a mais para garantir o aperto do porta-ferramentas.

O tempo de troca verificado, para as simulações de troca de ferramentas, variou entre 55 a 30 segundos para todos os STR, diminuindo segundo aumentava o número de ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos dados adquiridos, durante os ensaios, considerando todas as variáveis analisadas, é possível traçar gráficos comparativos entre os três Sistemas de Troca Rápida, sendo, STR-01 o sistema CAPTO da Sandvik, STR-02 o sistema KM da Kennametal e STR-03 o sistema da GENOS (VTS). Foram feitos testes de semi-acabamento (ϕ Pré-furo = 19.00mm) e de desbaste (ϕ Pré-furo = 16.00mm). No texto a seguir, o primeiro tipo de teste (semi-acabamento) será convencionado pela letra "A" e o segundo pela letra "B".

Para verificar o comportamento do sistema, foram tomadas as médias dos valores obtidos para cada parâmetro investigado (força, potência, acabamento da superfície, etc.), considerando agrupamentos seqüenciais de 3 em 3 furos, que correspondem às paradas para troca de ferramentas. Estes valores são usados nos gráficos "maiores" apresentados posteriormente, sendo:

- (i) = média dos valores correspondentes aos furos 1,2 e 3 (1ª troca de ferramenta)
- (ii) = média dos valores correspondentes aos furos 4,5 e 6 (2ª troca de ferramenta)
- (iii) = média dos valores correspondentes aos furos 7,8 e 9 (3ª troca de ferramenta)

Para a verificação da repetibilidade dos STR foram considerados os desvios-padrão gerados a partir dos valores apresentados em cada troca de ferramenta, isto é, valores apresentados em (i), (ii) e (iii).

A média entre estes valores e os respectivos desvios-padrão são apresentados nos gráficos "menores", logo abaixo dos gráficos maiores, para todas as variáveis envolvidas. Valores de desvios-padrão relativamente elevados indicam baixa repetibilidade do sistema referente à variável considerada, e vice-versa.

Pontos faltantes nos gráficos são devidos a problemas durante a aquisição, tratamento ou armazenamento de sinais.

4.1 Componentes de Força

O comportamento das componentes de força F_x e F_y é senoidal, já que o processo de mandrilamento ocorre pelo giro da ferramenta e pela interpolação circular da superfície interna do pré-furo em 360° , como já observado no capítulo anterior.

A Figura 4.1 apresenta uma parte dos sinais das componentes de força F_x e F_y monitorados simultaneamente durante a usinagem de um furo. A linha azul representa a componente de força F_x e a linha verde representa a componente de força F_y . Observa-se que, como analisado anteriormente nas Figuras 3.7 e 3.10, as componentes F_x e F_y se apresentam defasadas no tempo.

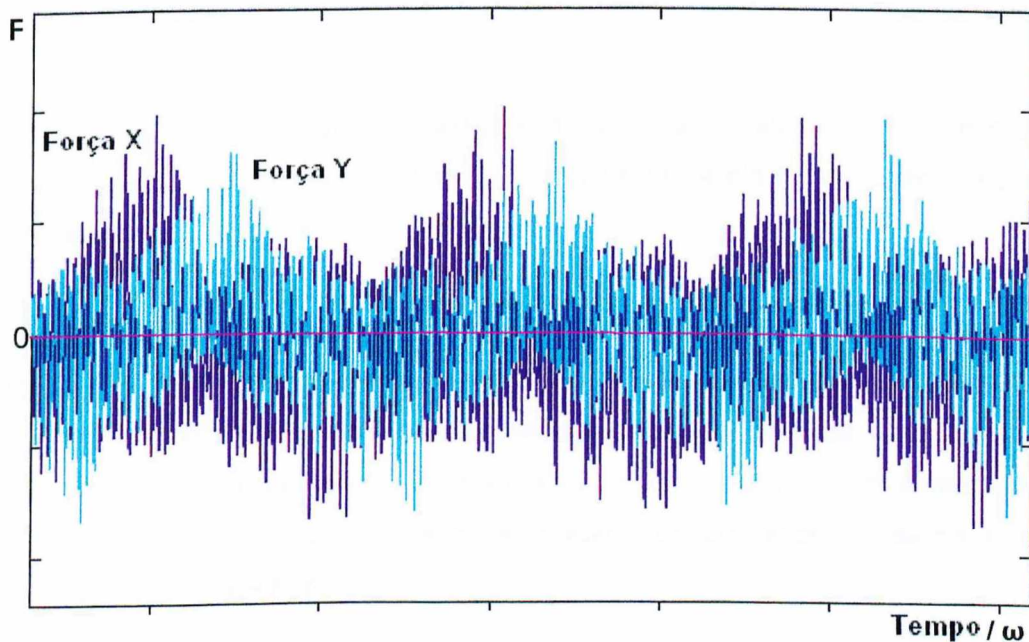


Figura 4.1 Comportamento das componentes de força F_x e F_y

A representação de apenas uma das componentes de força (F_x ou F_y , pois são similares) é observada na Figura 4.2. Nesta figura observa-se mais claramente o comportamento oscilatório da componente de força devido aos movimentos simultâneos de translação da mesa e rotação da ferramenta.

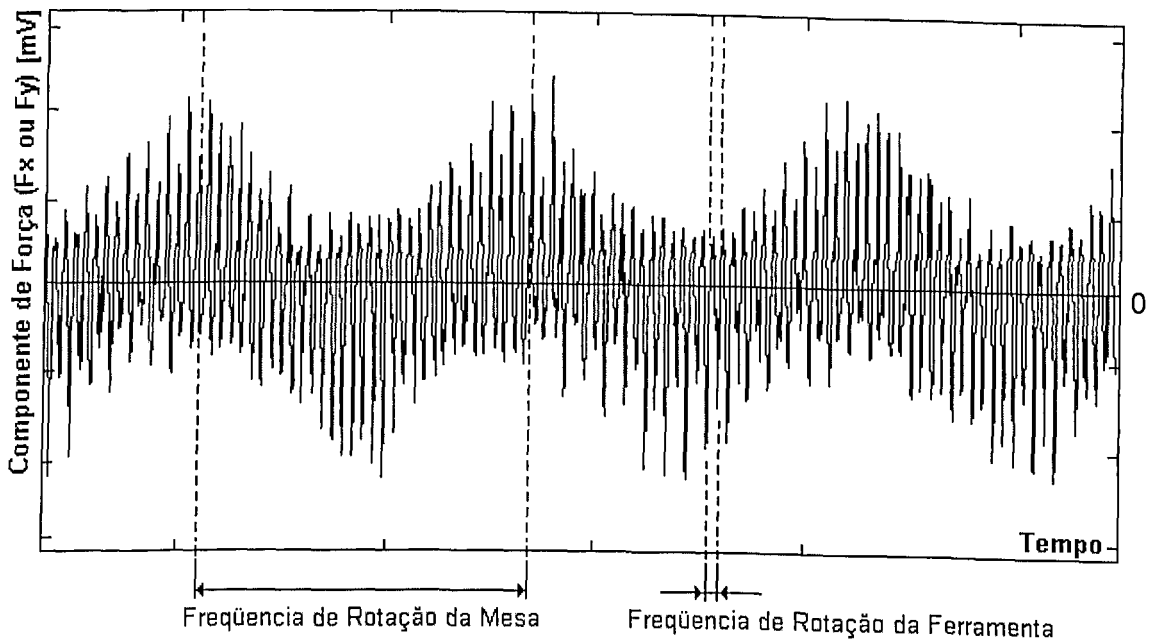


Figura 4.2 Comportamento da componente de força F_x ou F_y

A componente de força F_x assume o maior valor nas posições 2 e 4 da Figura 3.7, sendo que na posição 2 ela tem direção positiva e em 4 ela tem direção negativa (devido ao referencial do sensor).

O mesmo acontece com a força F_y mas nas posições 1 e 3 respectivamente. Para efeito de análise e comparação entre os STR, foi considerado o valor médio do módulo das forças nestes pontos máximos, dados pela amplitude do sinal de força nas frequências de rotação da mesa (ou movimento de translação) e de rotação da ferramenta para cada furo individual. Estes valores foram obtidos com auxílio de um algoritmo de tratamento de sinais (executado no software Matlab).

O comportamento da componente de força F_z , dado na direção de avanço axial da ferramenta, é mostrado na Figura 4.3.

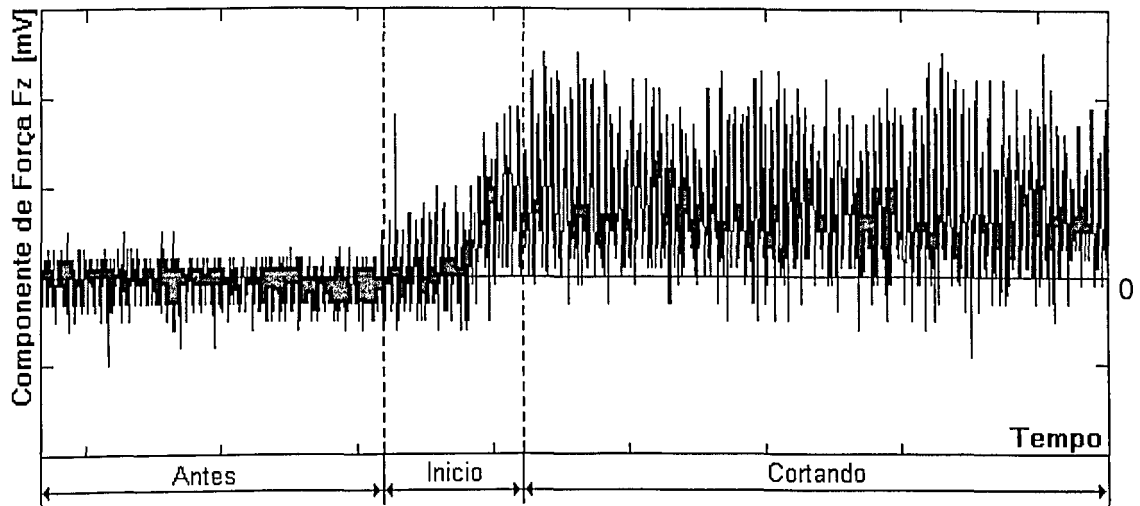


Figura 4.3 Comportamento da componente de força F_z

Observa-se nesta figura que o sinal tem um comportamento diferenciado em cada etapa, antes do corte, no início do corte e durante o corte. Para fins de análise, foi considerada apenas a etapa de corte.

A oscilação observada nesta figura (durante o corte), é relativa à variação da espessura de corte, h , durante um giro da ferramenta. (ver Figura 3.9). Para efeito de análise foram considerados valores médios dessa variação.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados da componente de força F_x , as Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados da componente de força F_y e as Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados da componente de força F_z .

As Figuras 4.4, 4.6 e 4.8 apresentam os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e as Figuras 4.5, 4.7 e 4.9 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada uma das figuras, o gráfico "a" representa o comportamento da componente de força em função da velocidade de corte; o gráfico "b" o comportamento da componente de força em função do avanço na condição a seco e o gráfico "c" o comportamento da componente de força em função do avanço na condição com fluido de corte.

4.1.1 Comp. de Força Fx – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.4-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação na componente de força Fx ou, ainda que tênue, uma tendência descendente no valor desta componente de força para todos os STR. Este resultado, nestas condições de corte, é normal para a maioria dos materiais metálicos, uma vez que o aumento da velocidade de corte, aumenta a geração de calor, que faz decrescer ligeiramente a energia total necessária para cisalhar o material durante a formação do cavaco [Trent. 1991]. Apenas na velocidade de 215m/min, esta tendência foi em parte quebrada. Observa-se que isto se repete também para a componente de força Fy (Figura 4.6-a). Isto pode estar relacionado com o processo ou com o equipamento utilizado. Confirmação das causas exige maiores investigações, o que está além dos objetivos primários deste trabalho. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR são similares, uma vez que as médias dos valores da componente de força Fx são bem próximas, principalmente para as duas primeiras velocidades de corte mais baixas. Observa-se, também, que para estas primeiras velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 12% do valor médio para STR-02 e $V_c=140\text{m/min}$). Para velocidades de corte maiores (acima de 165m/min) a repetibilidade dos STR diminuem. O desvio padrão das componentes de força Fx chega a 36% do valor médio para o STR-01 e $V_c=215\text{m/min}$. Nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 23%, e para STR-03 é 31%, o que mostra uma pequena vantagem para o STR-02 em termos de repetibilidade.

Na Figura 4.4-b (condição de semi-acabamento), é fácil perceber a tendência crescente no valor da componente de força Fx, como era esperado [Trent, 1991 e Nuñez, 1998]. No gráfico menor observa-se uma certa alternância de vantagens no desempenho dos STR, dependendo do avanço considerado, tanto quanto à magnitude como à repetibilidade (desvio padrão) da componente de força Fx. O STR-01 é o melhor para a condição de $f=0.250\text{mm/rev}$, o STR-02 é o melhor nas condições onde $f=0.100\text{mm/rev}$ e 0.150mm/rev , e o STR-03 apresenta-se como o de maior magnitude de Fx, mas com boa repetibilidade para todas as condições, exceto para $f=0.250\text{mm/rev}$.

Na Figura 4.4-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da componente de força Fx com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco, com diferentes alternâncias. Observa-se, entretanto, que no geral houve um ligeiro aumento dos valores

absolutos das componentes de força F_x com aplicação de fluido de corte em relação à condição a seco. Este é um comportamento característico quando o fluido de corte oferece uma maior ação refrigerante do que lubrificante. [Sales, 1999]

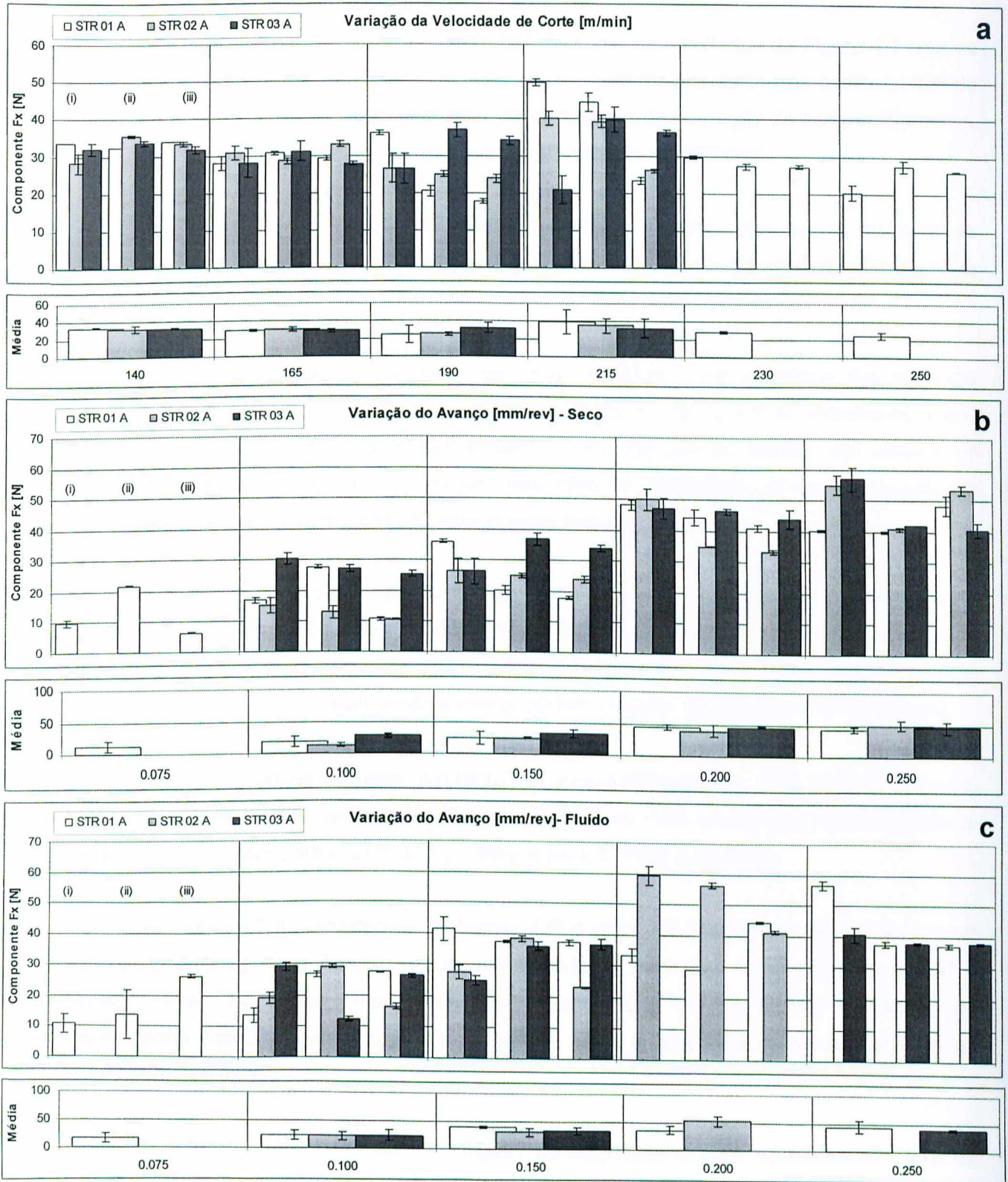


Figura 4.4 Componente de força Fx – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.1.2 Comp. de Força Fx - Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

Ao se comparar, nas mesmas condições de corte, os resultados da Figura 4.4 com os da Figura 4.5 observa-se, claramente, o aumento dos valores absolutos das componentes de força Fx para a operação de desbaste em relação àqueles da operação de semi-acabamento. Obviamente causado pela maior seção de corte na condição de desbaste.

Na Figura 4.5-a (condição de desbaste) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe uma perceptível variação na componente de força Fx ou, uma tendência descendente no valor desta componente de força para todos os STR.

Este resultado, nestas condições de corte, é normal para a maioria dos materiais metálicos [Trent, 1991]. Nos gráficos menores desta figura (Figura 4.5-a), observa-se que o comportamento de todos os STR são similares, uma vez que as médias dos valores da componente de força Fx são bem próximas, para todas as velocidades de corte a exceção de $V_c=190\text{m/min}$, onde as diferenças são ligeiramente maiores.

Observa-se que para estas velocidades de corte ($V_c=140\text{m/min}$, $V_c=165\text{m/min}$ e $V_c=215\text{m/min}$), as repetibilidades de STR-02 e STR-03 são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 9.68% para STR-02 e $V_c=165\text{m/min}$); no caso do STR-01, a repetibilidade é relativamente menor (desvio máximo 18.19% para $V_c=165\text{m/min}$).

Para a velocidade de corte $V_c=190\text{m/min}$ a repetibilidade dos STR diminui. O desvio padrão das componentes de força Fx chega a 34.57% do valor médio para o STR-03 (nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 20.54%, e para STR-03 é 20.49%).

Na Figura 4.5-b (condição de desbaste), é fácil perceber a tendência crescente no valor da componente de força Fx com o aumento do avanço, como era esperado [Trent, 1991 e Nuñez, 1998]. No gráfico menor observa-se uma certa alternância de vantagens no desempenho dos STR, tanto quanto à magnitude como à repetibilidade (desvio padrão) da componente de força Fx.

Para $f=0.10\text{mm/rev}$ o STR-01 é o melhor na magnitude mas na repetibilidade o STR-02 é o melhor (desvio padrão para STR-01 é 19.55% do valor médio, para STR-02 é 12.69% e para STR-03 é 38.71%).

Para $f=0.15\text{mm/rev}$ o STR-01 é o melhor na magnitude e na repetibilidade (desvio padrão para STR-01 é 20.49 do valor médio %, para STR-02 é 20.54%, e para STR-03 é 34.57%).

Para $f=0.20\text{mm/rev}$ o STR-03 é o pior na magnitude mas é o melhor na repetibilidade (desvio padrão para STR-01 é 17.22% do valor médio, para STR-02 é 10.97% do valor médio, e para STR-03 é 5.63%).

Para $f=0.25\text{mm/rev}$ o STR-03 é o melhor na magnitude mas na repetibilidade o STR-02 é o melhor (desvio padrão para STR-01 é 19.45% do valor médio, para STR-02 é 6.44% e para STR-03 é 12.33%).

Na Figura 4.5-c (condição de desbaste) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da componente de força F_x com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco. Observa-se, entretanto, que houve uma notável melhora na repetibilidade de todos os STR (desvio máximo de 26.95% do valor médio para STR-01 e $f=0.100\text{mm/rev}$) e, para a maioria dos avanços, um ligeiro aumento dos valores absolutos das componentes de força F_x com aplicação de fluido de corte em relação à condição a seco. Como já foi mencionado, este é um comportamento característico quando o fluido de corte oferece uma maior ação refrigerante do que lubrificante [Sales, 1999].

Pode-se concluir, entretanto, que apesar da menor ação lubrificante em relação à ação refrigerante, ela ainda é significativa, pois deve ser a principal responsável pelo menor desvio padrão (ou a maior repetibilidade) apresentado pelos STR quando o fluido de corte foi aplicado.

Numa análise mais criteriosa pôde-se classificar os STR individualmente, em cada condição de corte testada, verificando-se sempre alternâncias na classificação dos STR, com relação à componente de força F_x , tanto na condição de semi-acabamento como na condição de desbaste. De uma maneira global e mais superficial, entretanto, nota-se que as diferenças observadas entre os STR não são tão significativas, e portanto, indicando que a componente de força F_x não se mostrou um parâmetro diferencial entre os diversos STR testados.

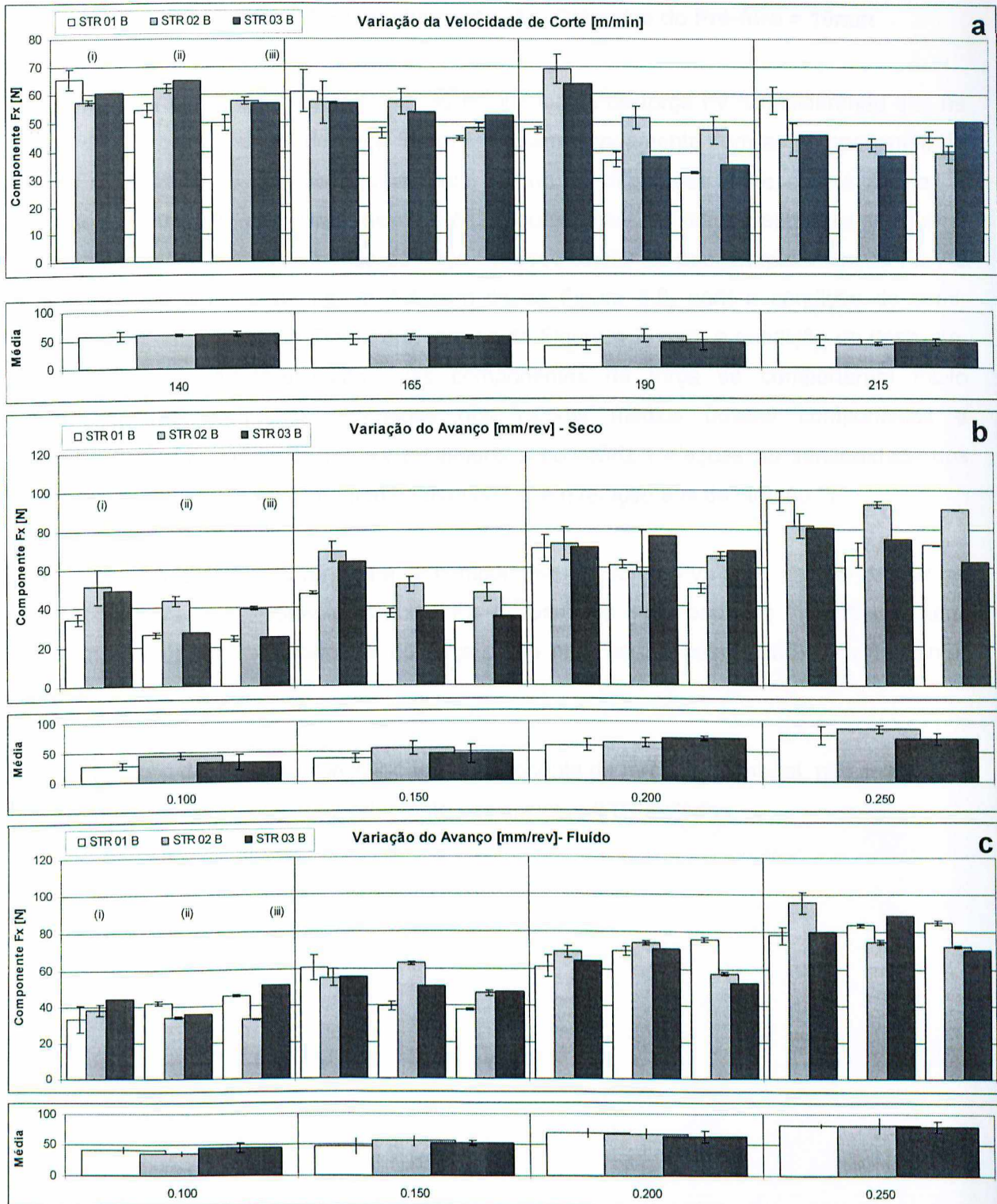


Figura 4.5 Componente de força Fx – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.1.3 Comp. de Força F_y – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as componentes de força F_y . Considerando que as leituras destas componentes de força foram feitas simultaneamente com as componentes de forças F_x , utilizando o mesmo equipamento, e que as diferenças entre elas é apenas a defasagem de 90° nas suas distribuições geométricas no plano, esperava-se que o comportamento destas componentes de força F_y fosse similar ao das componentes de F_x . Ao se comparar os gráficos da Figura 4.4 com os da Figura 4.6, para a condição de semi-acabamento e os gráficos da Figura 4.5 com os da Figura 4.7, para a condição de desbaste, constata-se que realmente estas duas componentes de força se comportaram muito semelhantemente. Pequenas alterações nos valores médios dessas componentes e respectivos desvios-padrão poder ser creditados a possíveis variações na sensibilidade dos transdutores de força do equipamento na direção “X” em relação aos da direção “Y”.

Poder-se-ia desenvolver, para a componente de força F_y , uma análise similar ao apresentado para a componente de força F_x . O resultado seria bastante semelhante, tanto para a magnitude das componentes de força como para os desvios-padrão, com raríssimas exceções.

Podemos desta forma concluir que a componente de força F_y , também, não se mostrou um parâmetro diferencial de comportamento dos diversos STR testados.

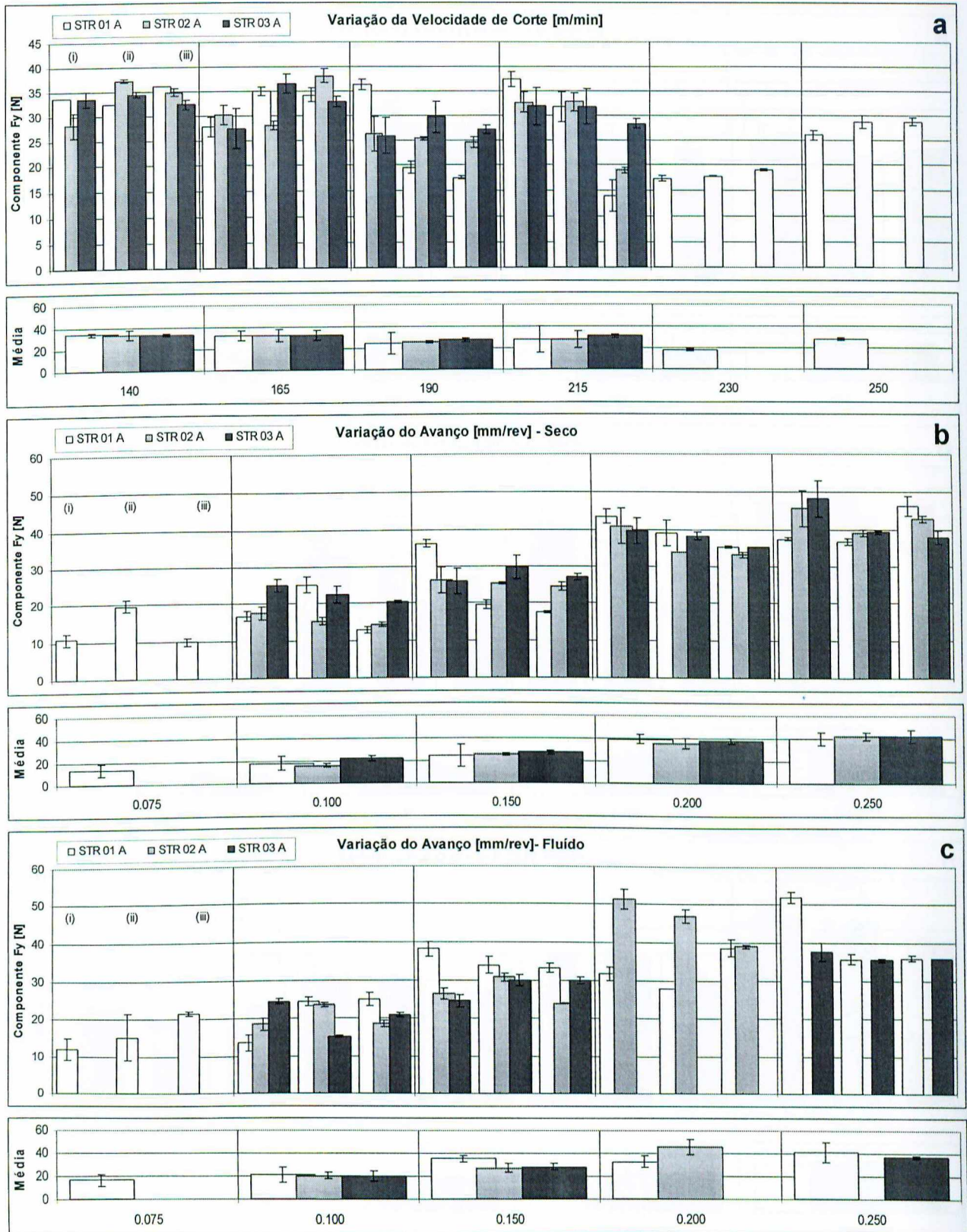


Figura 4.6 Componente de força Fy – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.1.4 Comp. de Força Fy – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

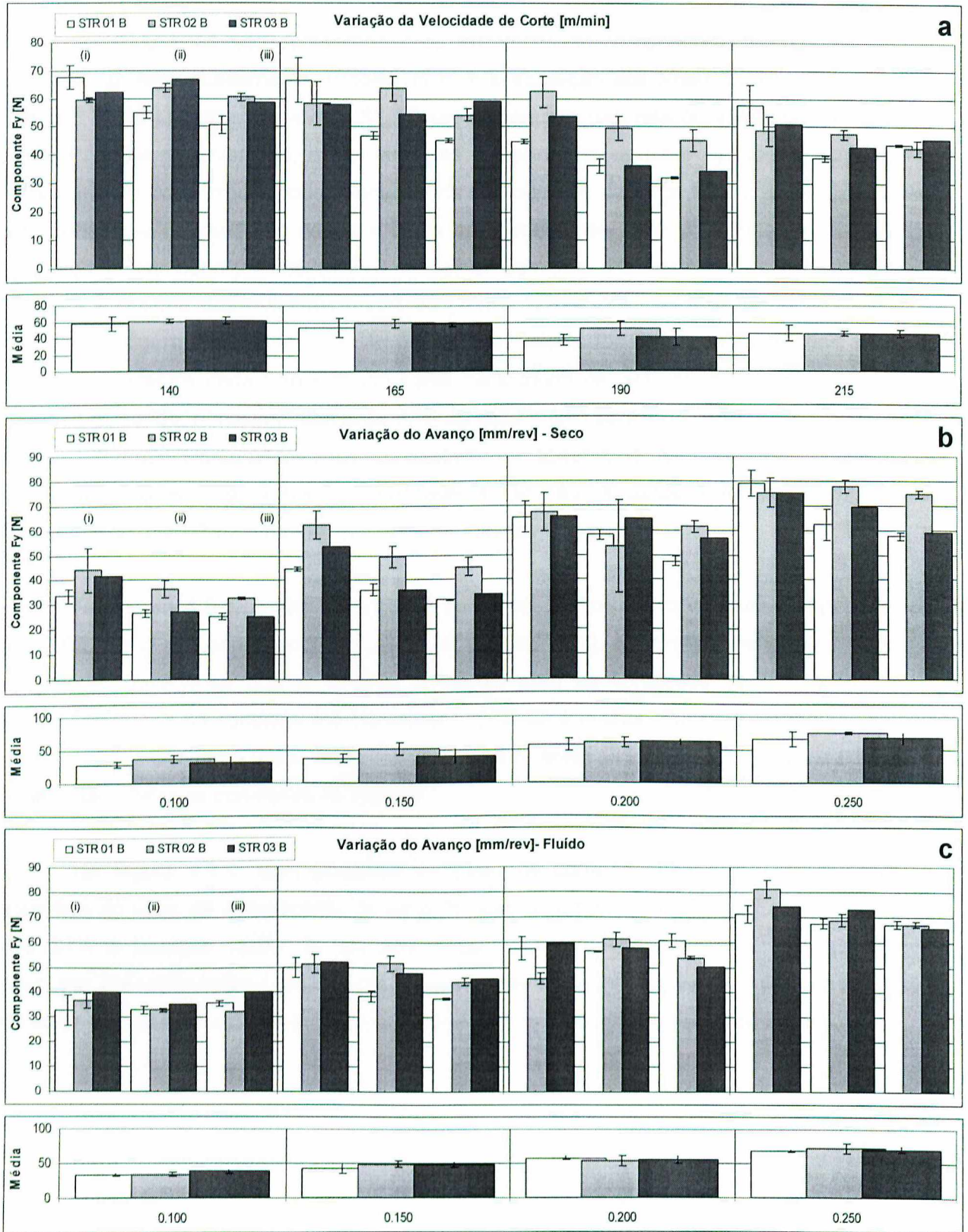


Figura 4.7 Componente de força Fy – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – f=0.15mm/rev; b) em função do avanço – Vc=190m/min – A seco; c) em função do avanço – Vc=190m/min – Com fluido de corte

4.1.5 Comp. de Força Fz – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados da componente de força Fz para a condição de semi-acabamento. Problemas com a aquisição dos sinais quando da usinagem com o STR-03 impediram que este STR fosse comparado com relação a esta componente de força. Pode-se observar que, assim como as componentes de Fx e Fy, com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação na componente de força Fz ou, ainda que tênue, uma tendência descendente no valor desta componente de força para todos os STR. Este resultado, nestas condições de corte, é normal também para a componente de força na direção “Z” para a maioria dos materiais metálicos [Trent. 1991]. Observa-se claramente no gráfico maior desta figura, que os desvios-padrão são, na maioria dos casos, bastante altos, isto é, a repetibilidade entre cada furo é muito baixa para todos os STR na maioria das condições analisadas, sendo, o máximo desvio de 27% do valor médio para a primeira troca (i) do STR-02 na $V_c=190\text{m/min}$. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que para todas as condições analisadas o STR-01 é melhor na magnitude, a exceção da condição de $V_c=215\text{m/min}$. Na repetibilidade, o STR-02 é melhor em todas as condições.

Na Figura 4.8-b, é fácil perceber a tendência crescente no valor da componente de força Fz, como era esperado [Trent, 1991 e Nuñez, 1998]. No gráfico menor, analisando a magnitude, observa-se que o STR-01 é melhor para as condições de $f=0.150\text{mm/rev}$ e $f=0.200\text{mm/rev}$, e na condição $f=0.10\text{mm/rev}$ o STR-02 é melhor. Para $f=0.250\text{mm/rev}$ ambos STR possuem o mesmo valor. Neste mesmo gráfico, analisando a repetibilidade, o STR-02 é melhor para todas as condições de análise.

Na Figura 4.8-c, com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da componente de força Fz com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco. Observa-se, entretanto, que não houve nenhuma alteração notável dos valores absolutos das componentes de força Fz com aplicação de fluido de corte em relação à condição a seco, na maioria das condições de análise.

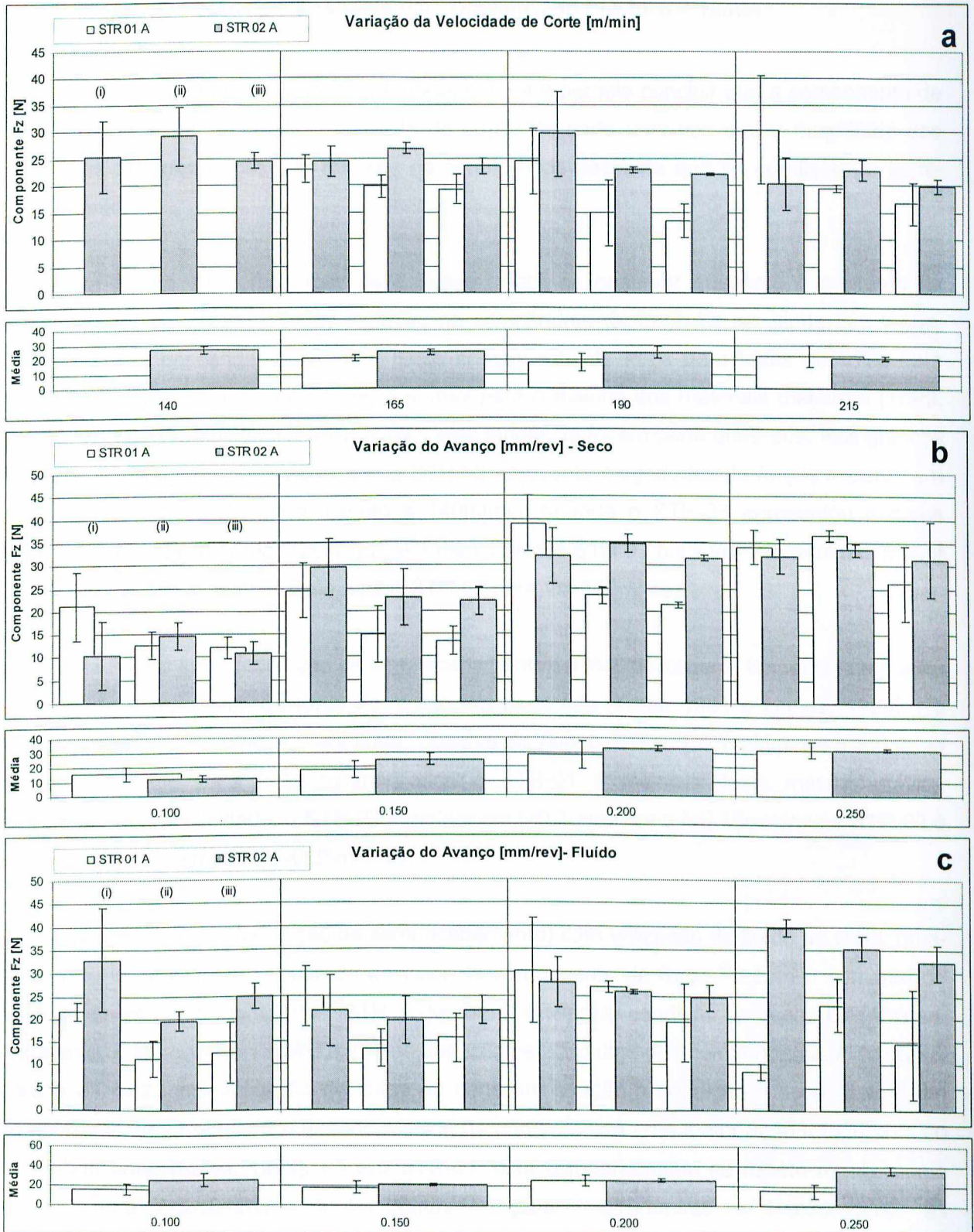


Figura 4.8 Componente de força Fz – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.1.6 Comp. de Força Fz – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A comparação dos gráficos da Figuras 4.8 e 4.9 permite concluir que a componente de força Fz é também sensível ao aumento da seção de corte uma vez que a magnitude dos valores médios das forças são maiores na condição de desbaste que na condição de semi-acabamento.

Na Figura 4.9-a (condição de desbaste) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação na componente de força Fz ou, ainda que tênue, uma tendência descendente no valor desta componente de força para todos os STR. Este resultado, nestas condições de corte, é normal para a maioria dos materiais metálicos [Trent, 1991]. Apenas na velocidade de 215m/min, esta tendência foi em parte quebrada. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o STR-02 apresenta magnitudes de forças maiores em todas as velocidade de corte, exceto a 140m/min, quando o STR-03 apresentou maiores forças. O maior desvio é de 29.6% do valor médio para o STR-02 para $V_c=215\text{m/min}$. O menor desvio é de 7.32% do valor médio para o STR-02 para $V_c=140\text{m/min}$.

Na Figura 4.9-b (condição de semi-acabamento), é fácil perceber a tendência crescente no valor da componente de força Fz, como era esperado [Trent, 1991 e Nuñez, 1998]. No gráfico menor, analisando a magnitude, observa-se que o STR-03 é melhor para todas as condições exceto para $f=0.15\text{mm/rev}$ onde o STR-01 é melhor. Neste mesmo gráfico, analisando a repetibilidade, o STR-02 é melhor em $f=0.10\text{mm/rev}$ e $f=0.15\text{mm/rev}$, e STR-03 é melhor em $f=0.20\text{mm/rev}$ e $f=0.25\text{mm/rev}$.

Na Figura 4.9-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da componente de força Fz com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco. Observa-se, entretanto, que houve um ligeiro aumento dos valores absolutos das componentes de força Fz, para o STR-02, com aplicação de fluido de corte em relação à condição a seco. Este é um comportamento característico quando o fluido de corte oferece uma maior ação refrigerante do que lubrificante. [Sales, 1999]. Para o STR-01, este comportamento se repete regularmente apenas para $f=0.10\text{mm/rev}$ e $f=0.20\text{mm/rev}$; para $f=0.15\text{mm/rev}$ e $f=0.25\text{mm/rev}$ as componentes de força diminuem ligeiramente.

A componente de força Fz, apesar de um pouco menos que as componentes de força Fx e Fy, também apresentou alternâncias de comportamento entre os diversos STR,

dependendo das condições de corte. A pequena variação de magnitude e do desvio padrão mostra que F_z também não é um parâmetro diferencial entre os STR testados.

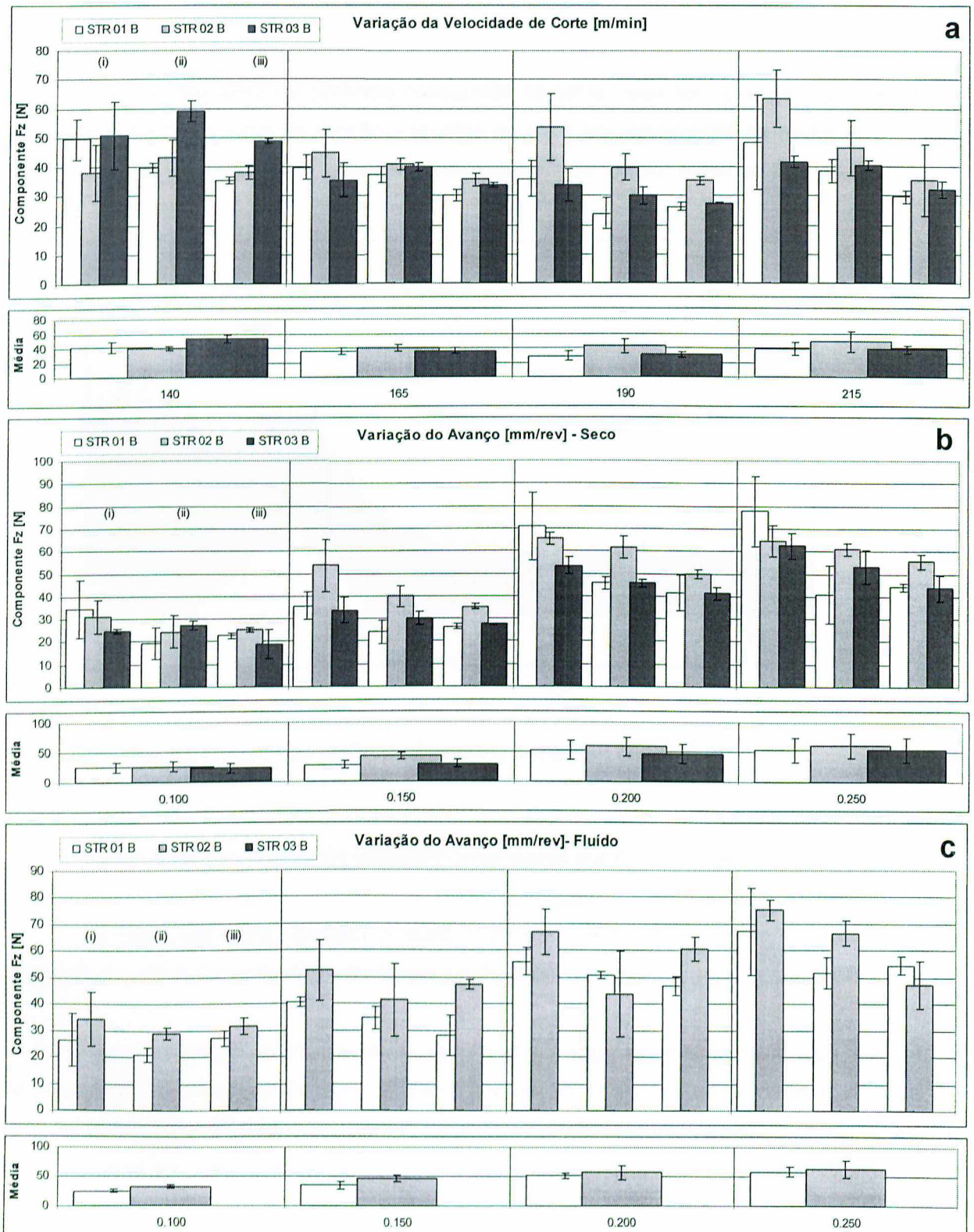


Figura 4.9 Componente de força F_z – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.2 Potência

O comportamento da potência consumida no corte pode ser visto na Figura 4.10. Na realidade trata-se do sinal de tensão adquirido no cabo de alimentação do motor no início do mandrilamento de um furo, até um determinado período de tempo, antes do final da operação.

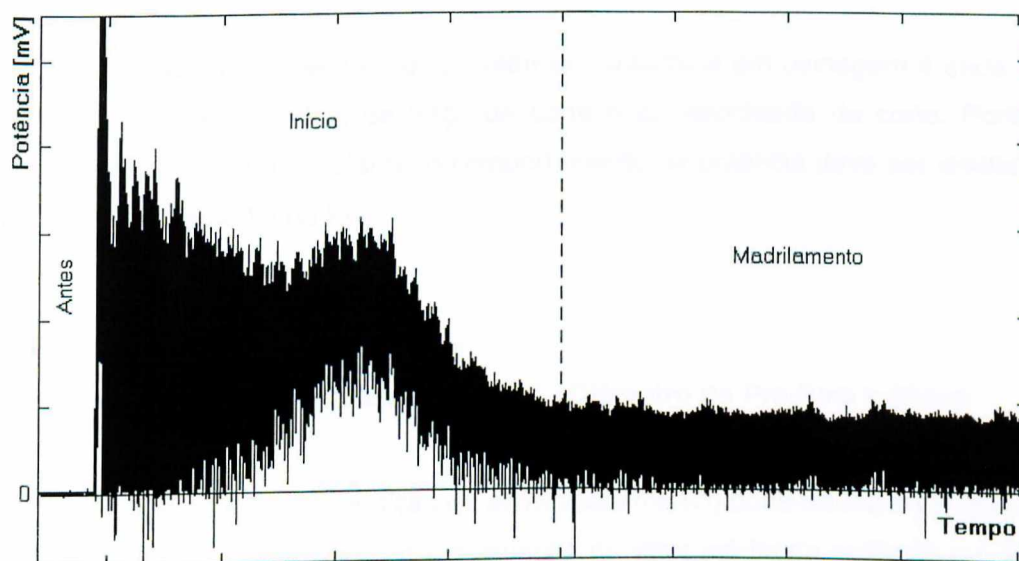


Figura 4.10 Comportamento da potência durante a usinagem de um furo

Observa-se que, o sinal de mandrilamento passa por duas etapas:

- o início do corte, quando o sinal sofre uma perturbação referente a um pico de engajamento da ferramenta na peça. Estes sinais foram desconsiderados nesta análise.

- mandrilamento, quando o sinal passa a oscilar regularmente durante toda a operação de mandrilamento; essa oscilação é referente à variação de espessura de corte, h , durante um giro da ferramenta (Figura 3.9). Foram considerados os valores médios dessa oscilação e transformados em valores de potência.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados da potência, onde a Figura 4.11 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.12 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada uma das figuras, o gráfico “a” representa o comportamento da potência em função da velocidade de corte; o gráfico “b” o comportamento da potência em função do avanço na condição a seco e o gráfico “c” o comportamento da potência em função do avanço na condição com fluido de corte.

É importante salientar que a potência consumida em usinagem é dada, com muito boa aproximação, pelo produto da força de corte e da velocidade de corte. Portanto, quando a velocidade de corte é constante, o comportamento da potência deve ser similar ao da força de corte (componente F_x ou F_y).

4.2.1 Potência – Semi-acabamento (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.11-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação no valor médio da potência ou, ainda que tênue, uma tendência ascendente neste valor para todos os STR. Este resultado, nestas condições de corte, é normal para a maioria dos materiais metálicos, considerando que o aumento da velocidade de corte aumenta a geração de calor, que faz decrescer ligeiramente a energia total necessária para cisalhar o material durante a formação do cavaco, diminuindo assim as forças de usinagem, então, o produto destas duas grandezas (força e velocidade de usinagem) provocará um comportamento levemente ascendente da potência devido às forças de usinagem não diminuírem na mesma proporção ao incremento da velocidade de corte, elevando a potência resultante quando se aumenta a velocidade de corte [Trent. 1991]. Nota-se que os desvios-padrão para a média entre furos, sem troca de ferramentas, do STR-01 é relativamente elevado. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR são similares, uma vez que as médias dos valores das potências são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-01 principalmente para as velocidades de corte $V_c=165\text{m/min}$ e $V_c=190\text{m/min}$. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 20% do valor médio para STR-01 e $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 7.88%, e para STR-03 é 17.31%).

Na Figura 4.11-b (condição de semi-acabamento), é fácil perceber a tendência crescente no valor da potência com o aumento do avanço, como era esperado [Trent, 1991 e Ferraresi, 1972]. Neste caso a velocidade de corte é constante e assim o aumento do avanço aumenta a componente de força de usinagem, como mostrado anteriormente, o que implica no aumento de potência consumida. No gráfico menor observa-se que há pouca diferença na magnitude da potência entre os STR, na mesma condição de corte. A repetibilidade também é boa (Desvio máximo 12.34% do valor médio para STR-01 e $f=0.250\text{mm/rev}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 4.35%, e para STR-03 é 4.19%).

Na Figura 4.11-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da potência com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco. Isto mostra um equilíbrio entre as ações refrigerantes e lubrificantes do fluido de corte [Sales, 1999]. A repetibilidade também é boa e em alguns casos com desvios até menores que na condição a seco.

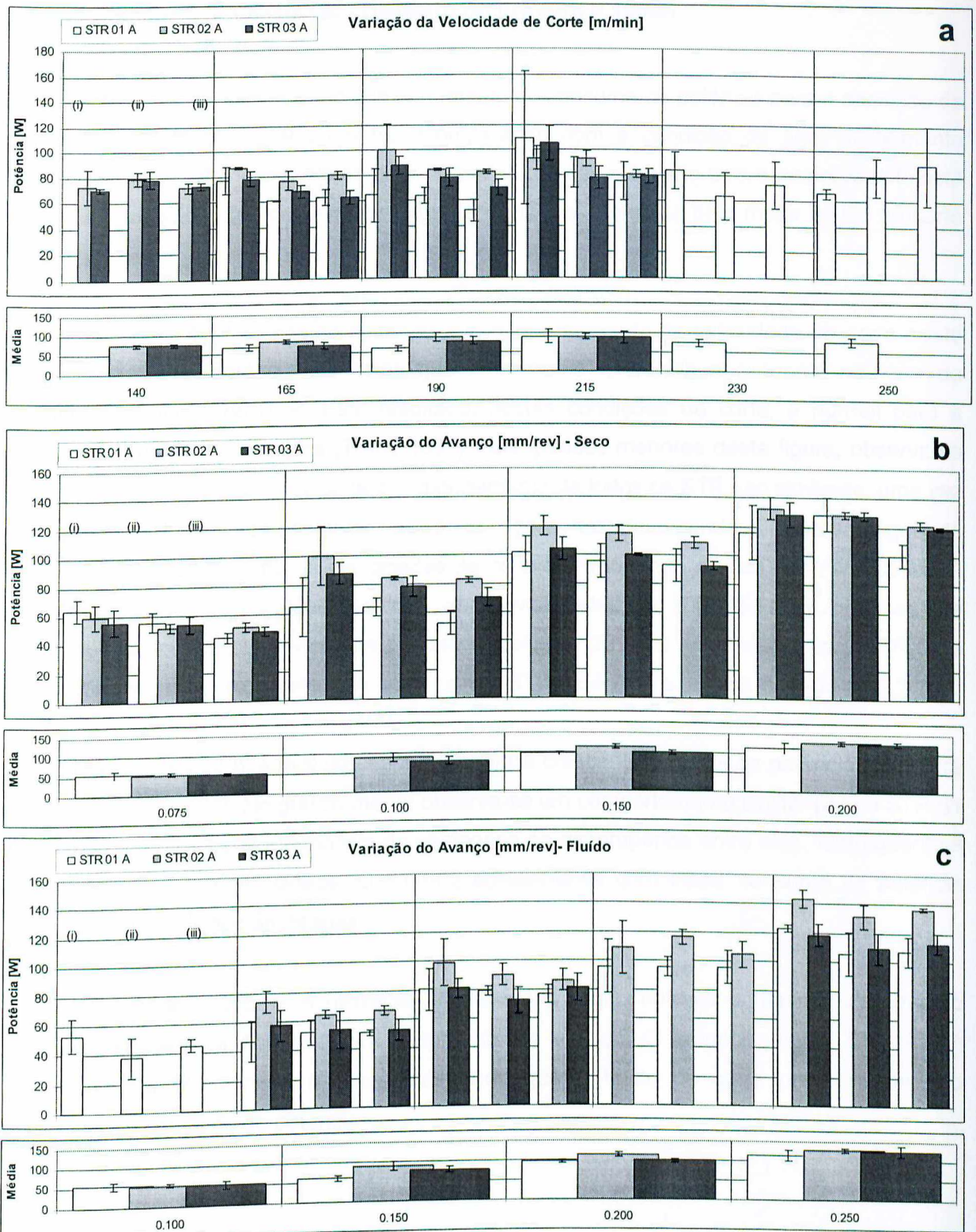


Figura 4.11 Potência – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.2.2 Potência – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 4.12 apresenta o comportamento do consumo de potência para a condição de desbaste para os três STR utilizados. Comparando com a condição de semi-acabamento (gráficos da Figura 4.11), os valores de potência para o desbaste são bem superiores. Isto está diretamente relacionado com a maior força de usinagem oferecida pela maior seção de corte nesta condição.

Na Figura 4.12-a pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação na potência ou, ainda que tênue, uma tendência ascendente no valor da potência para todos os STR. Este resultado, nestas condições de corte, é normal para a maioria dos materiais metálicos [Trent, 1991]. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que nas mesmas condições de corte o comportamento de todos os STR são similares, uma vez que as médias dos valores das potências são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-01 principalmente para as velocidades de corte $V_c=165\text{m/min}$ e $V_c=190\text{m/min}$. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 20% do valor médio para STR-01 e $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 7.88%, e para STR-03 é 17.31%).

Na Figura 4.12-b, é fácil perceber a tendência crescente no valor da potência, como era esperado [Trent, 1991]. No gráfico menor observa-se um comportamento similar para o STR-01 e STR-03 com uma certa alternância de vantagens no desempenho entre eles, tanto quanto à magnitude como à repetibilidade. O STR-02 apresenta-se com maior consumo de potência para todas as condições analisadas.

Na Figura 4.12-c, com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo crescimento esperado do valor da potência com o aumento do avanço. O comportamento dos STR é também similar à condição a seco, mostrando que o fluido de corte praticamente não influenciou no consumo de potência

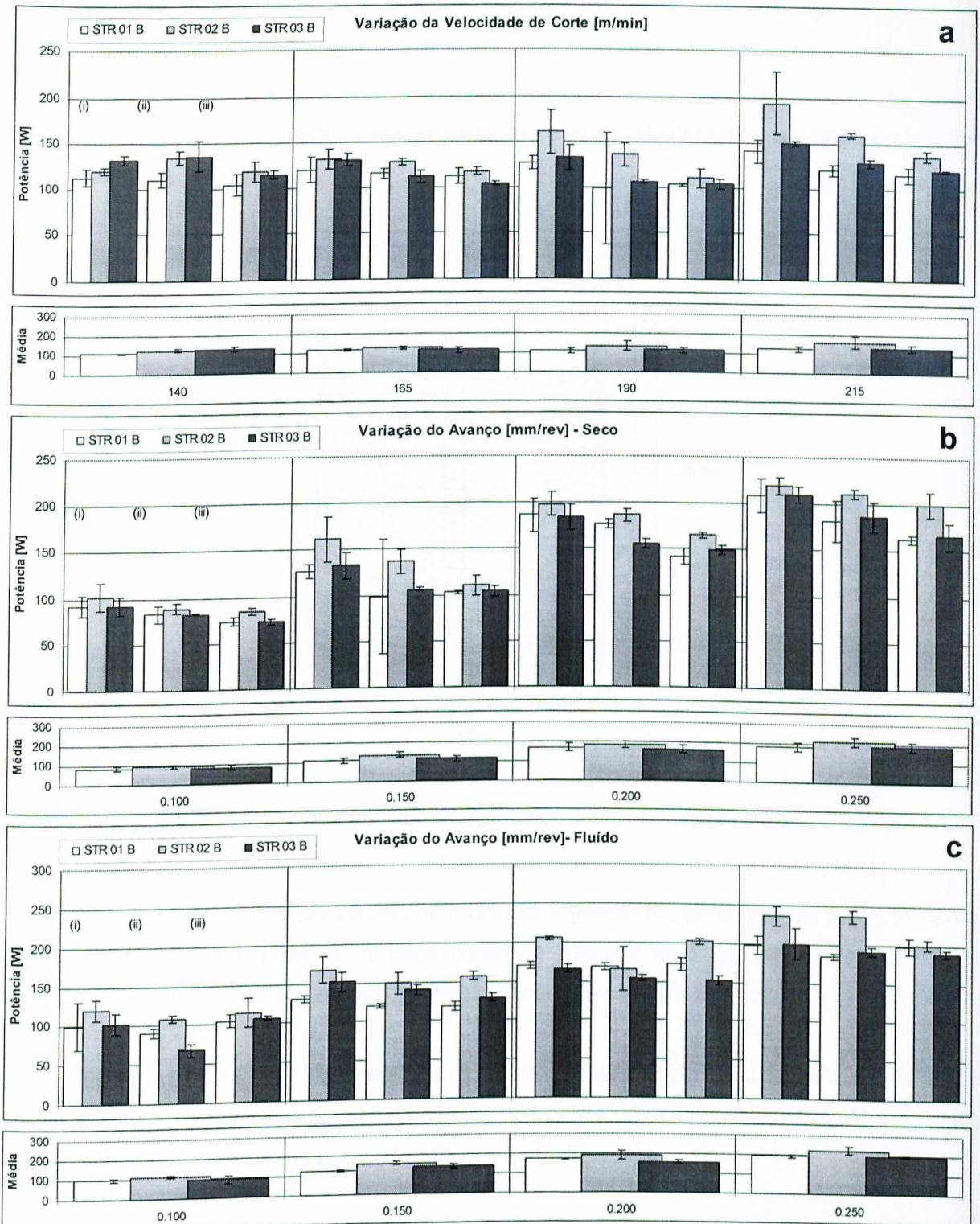


Figura 4.12 Potência – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.3 Cilindricidade

A Figura 4.13 apresenta o mapeamento do erro de cilindridade ao longo de um dos furos analisados.

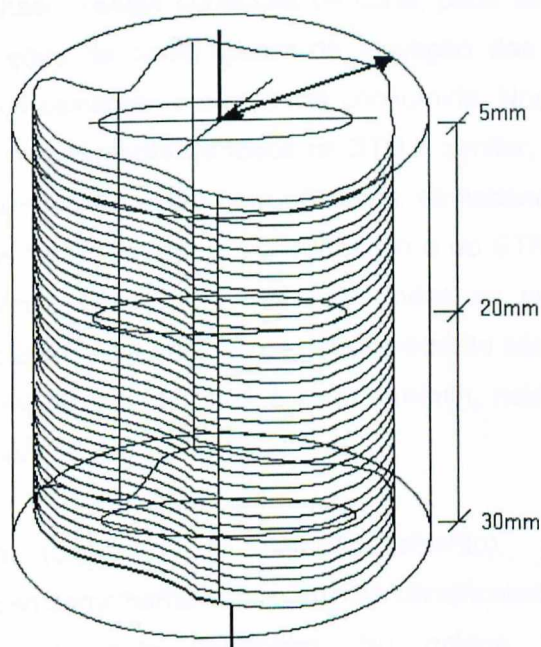


Figura 4.13 Verificação do erro de cilindridade

Foram tomados três pontos de medição desta grandeza, às alturas de 5mm, 20mm e 30mm a partir da parte superior da peça conforme ilustrado na Figura 3.16. Para efeito de análise foi considerado o valor médio dos erros de cilindridade obtidos nestas três posições.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados do erro de cilindridade, sendo que a Figura 4.14 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.15 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada uma das figuras, o gráfico "a" representa o comportamento do erro de cilindridade em função da velocidade de corte; o gráfico "b" o comportamento do erro de cilindridade em função do avanço na condição a seco e o gráfico "c" o comportamento do erro de cilindridade em função do avanço com aplicação de fluido de corte.

4.3.1 Erro de Cilindricidade – Semi-acab. (A) – Diâm. do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.14-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte não existe nenhuma mudança considerável no erro de cilindridade, e sim pequenas variações alternadas de forma ascendente ou descendente no seu valor do erro de cilindridade. Este resultado, nestas condições de corte, pode ser provocado pela rigidez dos STR para estas condições de corte apesar da elevação das energias envolvidas na usinagem, como as forças de usinagem e a potência consumida. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores dos erros de cilindridade são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-02 para as velocidades $V_c=140\text{m/min}$ e $V_c=165\text{m/min}$ e do STR-03 para as velocidades $V_c=190\text{m/min}$ e $V_c=215\text{m/min}$. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 12.89% do valor médio para STR-01 e $V_c=140\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 4.03%, e para STR-03 é 6.32%).

Na Figura 4.14-b (condição de semi-acabamento), pode-se perceber um comportamento também muito semelhante para o erro de cilindridade. O aumento do avanço não afetou consideravelmente este parâmetro. No gráfico menor observa-se um comportamento de repetibilidade muito alto, com exceção do alto desvio de 22.32% do valor médio para o STR-03 para $f=0.100\text{mm/rev}$ (neste avanço o desvio no erro de circularidade do STR-01 é 2.33% e do STR-02 é 2.66%).

Na Figura 4.14-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o comportamento similar ao da condição a seco, com praticamente nenhuma influência do avanço no erro de cilindridade. O comportamento dos STR é também semelhante à condição a seco, apresentando variações pequenas e alternadas entre as variações do avanço. A repetibilidade para todos os STR é alta, sendo o máximo desvio de 6.81% do valor médio para o STR-03 para $f=0.25\text{mm/rev}$ (neste avanço o desvio do erro de circularidade do STR-02 é 1.75% e do STR-01 é 5.71%).

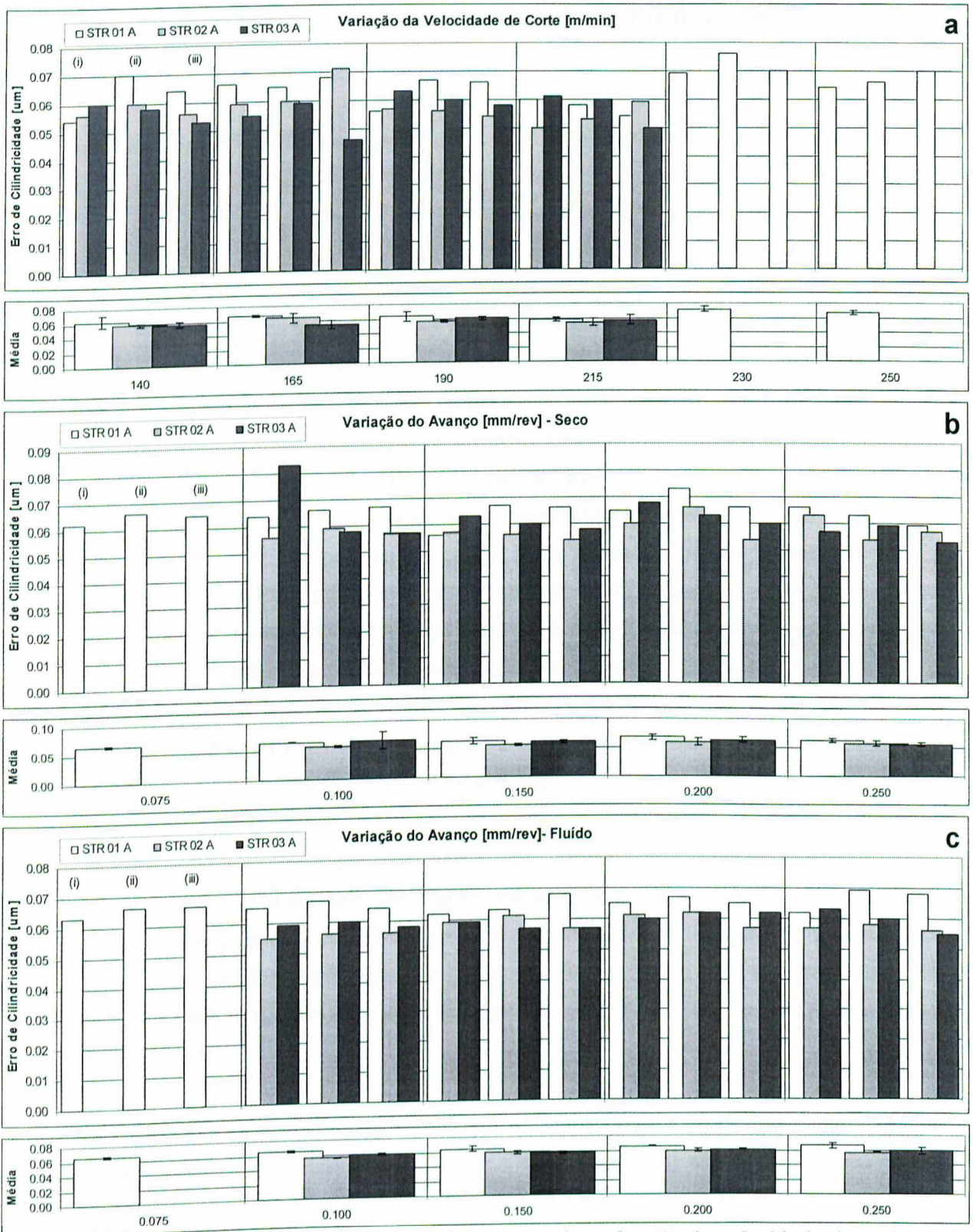


Figura 4.14 Erro de Cilindricidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.3.2 Erro de Cilindricidade – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 4.15 apresenta os resultados do erro de cilindridade para a operação de desbaste dos três STR testados. Nota-se que ao se aumentar a área de seção de corte não houve alteração nos valores médios do erro, com todos eles situados na casa dos $0.06\mu\text{m}$, mesmo valor observado na operação de semi-acabamento. É um resultado que denota boa rigidez desses STR

Na Figura 4.15-a pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte não houve nenhuma variação considerável no erro de cilindridade, ou sequer uma leve tendência ascendente ou descendente no seu valor, apenas uma leve oscilação. Este resultado, nestas condições de corte, pode ser provocado pela rigidez dos STR para estas condições de corte apesar das alterações observadas nas forças de usinagem e na potência consumida. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores dos erros de cilindridade são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-02 para todas velocidades de corte. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR-02 e STR-03 são relativamente altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos. Para o STR-01 a repetibilidade é relativamente baixa uma vez que os desvios-padrão chegam ao dobro do observado no STR-02 (máximo de 12.95% do valor médio para STR-01 e $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 6.19%, e para STR-03 é 8.57%).

Na Figura 4.15-b, é fácil perceber um comportamento praticamente constante para o erro de cilindridade com o aumento do avanço, especialmente para os STR-02 e STR-03. No gráfico menor observa-se que o STR-01 apresenta erros ligeiramente maiores que os outros dois STR e que a repetibilidade é muito alta, sendo o máximo desvio de 4.49% do valor médio para o STR-01 para $f=0.100\text{mm/rev}$ (neste avanço o erro de cilindridade de STR-02 é 4.19% e do STR-03 é 3.63%).

Na Figura 4.15-c com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo comportamento visto na condição a seco. O comportamento dos STR é também similar não apresentando nenhuma variação considerável além do STR-01 novamente se apresentar com erros de cilindridade superiores aos outros dois STR para todas as condições de corte.

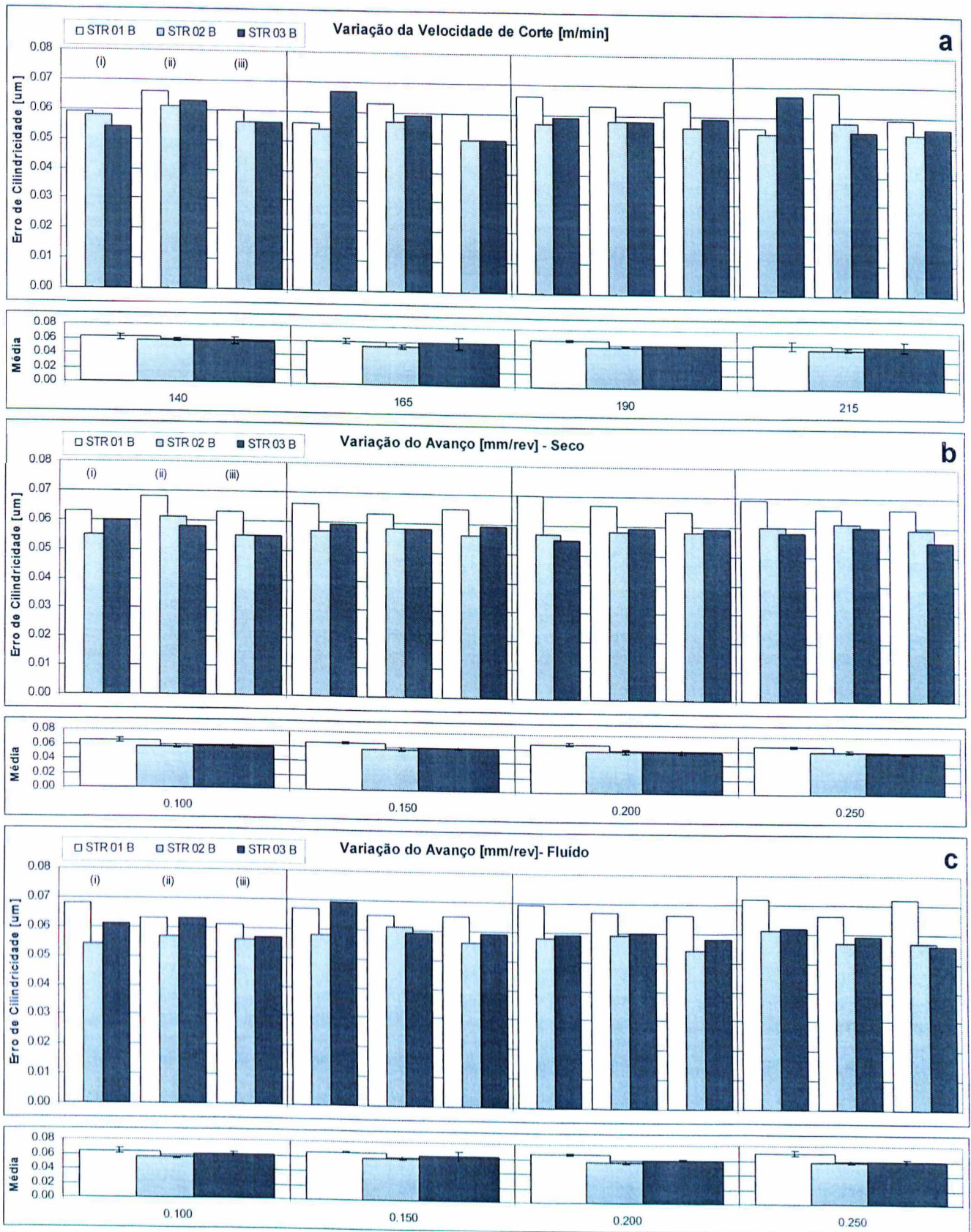


Figura 4.15 Erro de Cilindricidade – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.4 Circularidade

A Figura 4.16 apresenta o mapeamento do erro de circularidade ao longo de um dos furos analisados.

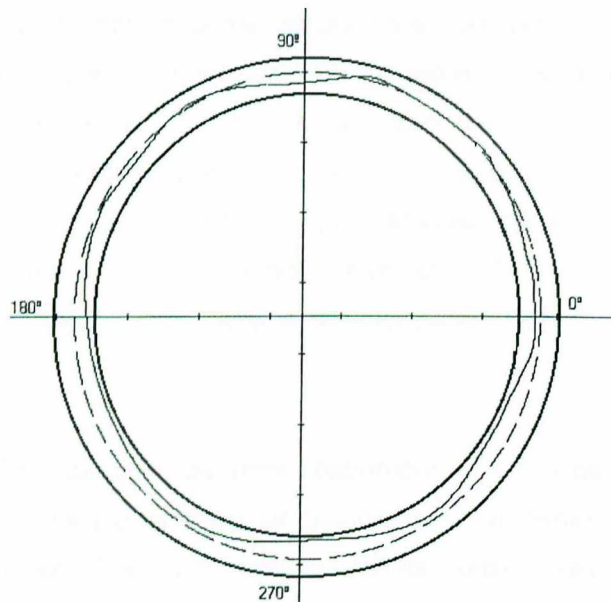


Figura 4.16 Verificação do erro de circularidade

O erro de circularidade foi obtido de forma sistemática e padronizada com o auxílio de um equipamento de alta precisão e um software de medição como parte do mesmo sistema de medição. Este sistema possui várias ferramentas de análise e filtração, através das quais foram obtidos os valores apresentados a seguir.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados do erro de circularidade, sendo que a Figura 4.17 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.18 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada uma das figuras, o gráfico "a" representa o comportamento do erro de circularidade em função da velocidade de corte; o gráfico "b" o comportamento do erro de circularidade em função do avanço na condição a seco e o gráfico "c" o comportamento do erro de circularidade em função do avanço na condição com fluido de corte.

4.4.1 Erro de Circularidade – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.17-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte não existe nenhuma variação considerável no erro de circularidade, ou sequer uma leve tendência ascendente ou descendente no valor do erro de circularidade. A boa rigidez dos STR pode ser responsável por este comportamento. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores dos erros de circularidade são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-02 para todas velocidades de corte a exceção de $V_c=165\text{m/min}$. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 13.74% do valor médio do erro para STR-01 e $V_c=140\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 0.36%, e para STR-03 é 6.65%).

Na Figura 4.17-b (condição de semi-acabamento), é fácil perceber um comportamento praticamente constante para o erro de circularidade. O aumento do avanço, portanto, não apresentou influência sensível. No gráfico menor observa-se um comportamento de repetibilidade muito alto, sendo o máximo desvio de 9.51% do valor médio do erro para o STR-01 para $f=0.200\text{mm/rev}$ (neste avanço o erro de cilindridade de STR-02 é 2.52% e do STR-03 é 3.21%).

Na Figura 4.17-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo comportamento visto na condição a seco. O comportamento dos STR é também similar não apresentando nenhuma variação considerável além da elevação na repetibilidade para todos os STR, sendo o máximo desvio de 3% do valor médio do erro, para todos os STR em diferentes condições de processamento.

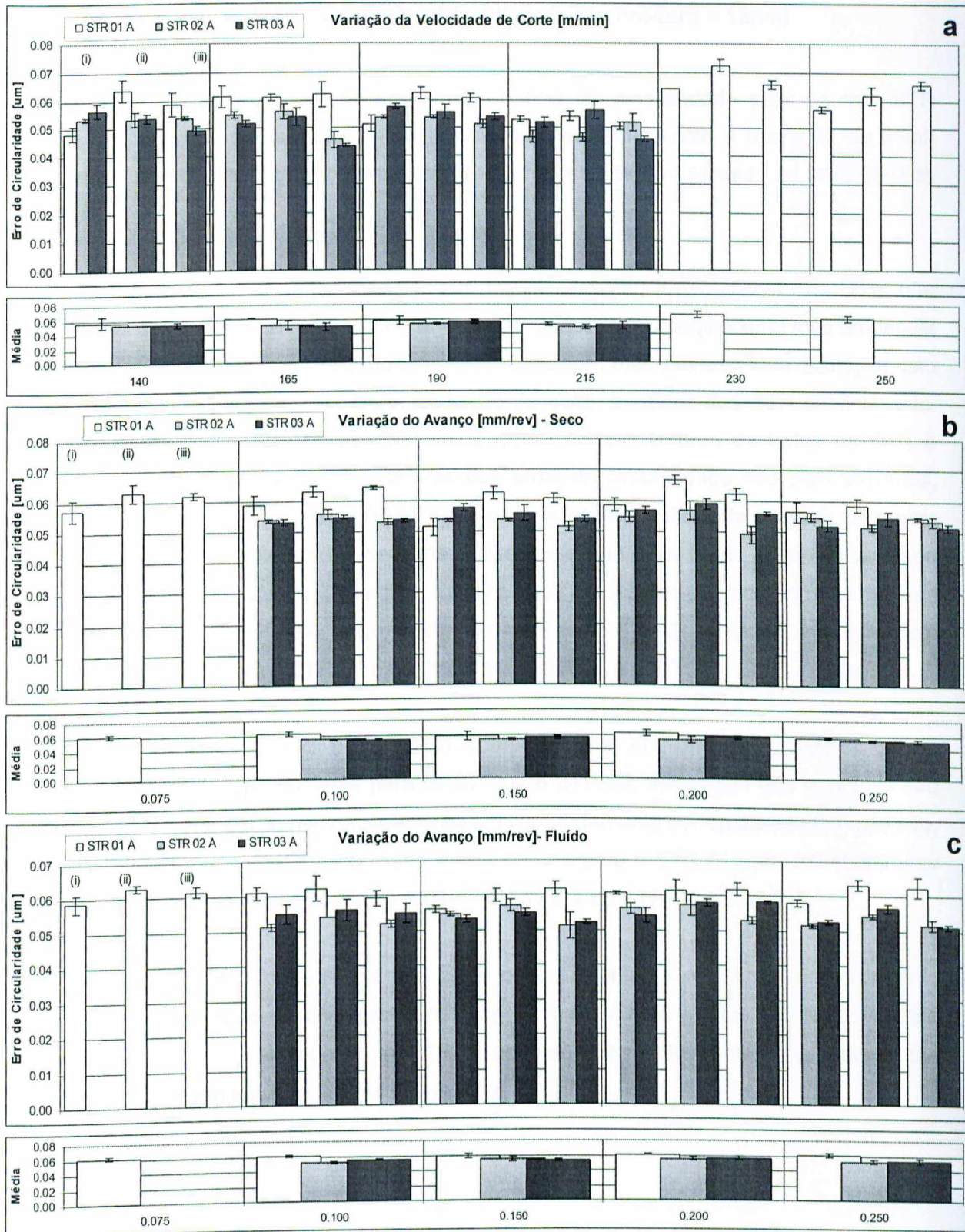


Figura 4.17 Erro de Circularidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.4.2 Erro de Circularidade – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 4.18 apresenta os resultados do erro de circularidade para os três STR testados na operação de desbaste. Nota-se que, comparando-se com a operação de semi-acabamento, não houve influência considerável nos valores dos erro (situado na faixa de 0.05 a 0.06 μm).

Na Figura 4.18-a pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte não existe nenhuma variação considerável no erro de circularidade, ou sequer uma leve tendência ascendente ou descendente no valor do erro de circularidade, mas sim uma leve oscilação. Isto mostra que, mesmo para maiores áreas de seção de corte, a rigidez dos STR continua alta. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores dos erros de circularidade são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-02 para todas velocidades de corte a ligeira vantagem do STR-02 para todas velocidades de corte. Observa-se que para todas as velocidades de corte, as repetibilidades dos STR são altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 12.95% do valor médio do erro para STR-01 e $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-02 é 6.19%, e para STR-03 é 8.57%).

Na Figura 4.18-b, é fácil perceber um comportamento praticamente constante para o erro de circularidade, especialmente para os STR-02 e STR-03, mostrando que o avanço não influencia no erro. No gráfico menor observa-se um comportamento de repetibilidade muito alto, sendo o máximo desvio de 4.49% do valor médio do erro para o STR-01 para $f=0.100\text{mm/rev}$ (neste avanço o erro de cilindridade de STR-02 é 4.19% e do STR-03 é 3.63%).

Na Figura 4.18-c com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo comportamento visto na condição a seco. O comportamento dos STR é também similar não apresentando nenhuma variação considerável além do STR-01 apresentar erros ligeiramente superiores que os outros dois STR em todas as condições de corte.

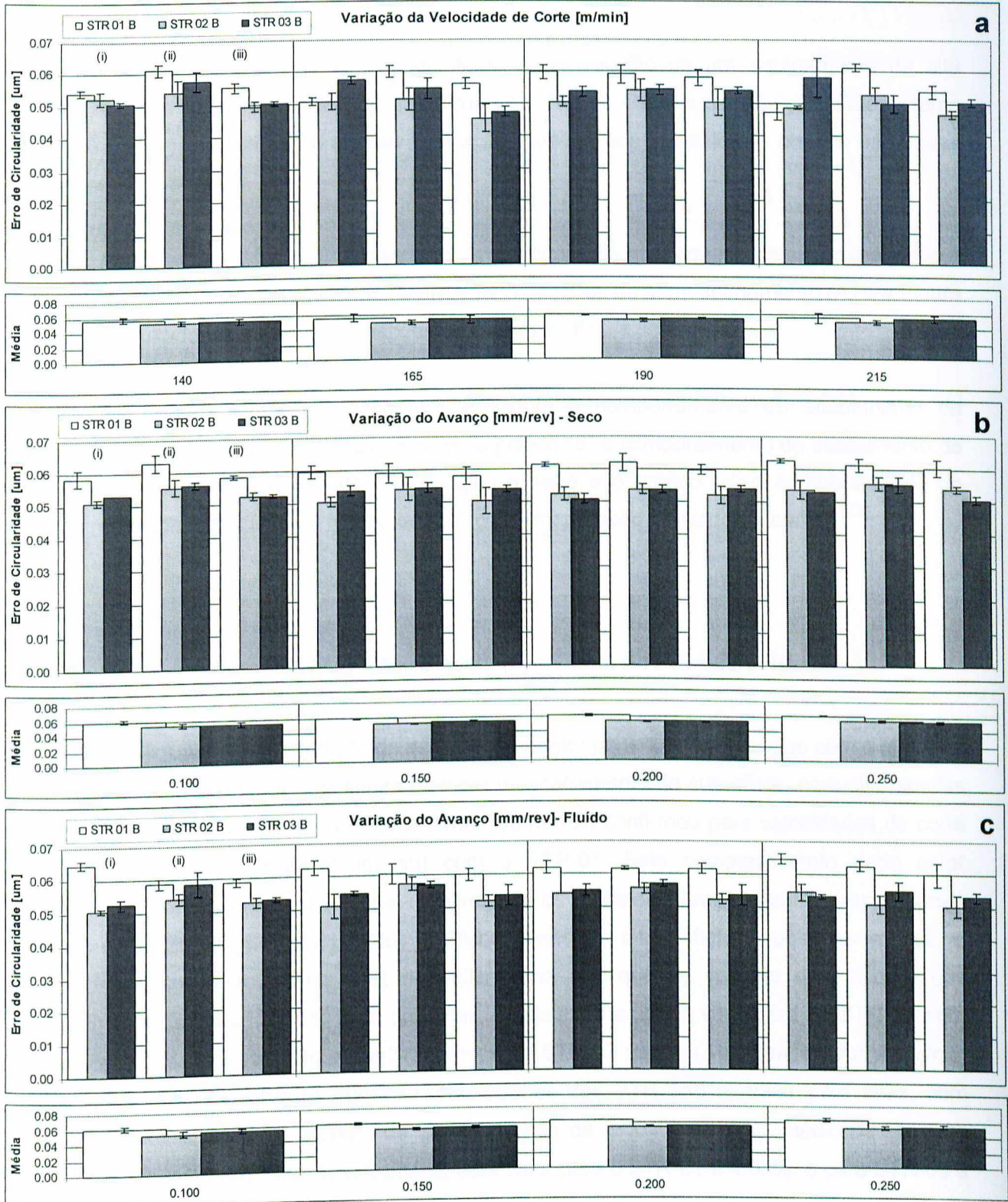


Figura 4.18 Erro de Circularidade – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.5 Acabamento da superfície

O acabamento da superfície foi obtido com o auxílio de um equipamento de alta precisão e um software de medição como parte do mesmo sistema de medição. Este sistema possui varias ferramentas de análise e filtração, através dos quais foram obtidos os valores apresentados a seguir.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados do acabamento da superfície, onde a Figura 4.19 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.20 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada figura, o gráfico "a" representa o comportamento do acabamento da superfície em função da velocidade de corte; o gráfico "b" o comportamento do acabamento da superfície em função do avanço na condição a seco e o gráfico "c" o comportamento do acabamento da superfície em função do avanço com aplicação de fluido de corte.

4.5.1 Acab. da superfície [Ra] – Semi-Acab. (A) – Diâm. do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.19-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte há uma ligeira melhora no acabamento da superfície, com alternâncias na classificação dos STR. Esta mesma tendência não se confirmou para velocidades de corte muito elevadas (acima de 230m/min) com o STR-01. Este comportamento pode estar relacionado com a rigidez do sistema, uma vez que os sinais de vibração também aumentaram nesta condição (Figura 4.21). Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores dos acabamento da superfície são bem próximas, destacando a ligeira vantagem do STR-02 para as velocidades $V_c=140\text{m/min}$ e $V_c=215\text{m/min}$ e do STR-03 para as velocidades $V_c=165\text{m/min}$ e $V_c=190\text{m/min}$. Observa-se que as repetibilidades dos STR são relativamente altas, com exceção apenas do valor máximo de desvio padrão de 24.01% do valor médio de Ra para STR-02 a $V_c=165\text{m/min}$ (nesta velocidade, este valor para o STR-01 é 4.03%, e para STR-03 é 6.32%).

Na Figura 4.19-b (condição de semi-acabamento), pode-se perceber um comportamento claramente ascendente de Ra com o aumento do avanço. Este resultado

confirma a influência teórica do avanço no acabamento da superfície. [Machado e da Silva, 1993] No gráfico menor desta figura observa-se uma ligeira vantagem do STR-03 para todas as condições de processamento a exceção de $f=0.25\text{mm/rev}$, onde o STR-01 apresentou R_a marginalmente menor. Nota-se que a repetibilidade dos STR é razoável para quase todas as condições analisadas, sendo o máximo desvio de 20.03% do valor médio para o STR-03 para $f=0.100\text{mm/rev}$ (neste avanço o desvio em relação ao acabamento da superfície do STR-01 é 18.81% e do STR-02 é 10.52%).

Na Figura 4.19-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo comportamento visto na condição a seco com uma notável elevação no valor de R_a quando se aumenta o avanço (pior acabamento). Este resultado mostra que o fluido de corte não foi eficiente na sua ação lubrificante (como aliás já constatado anteriormente, na análise das componentes de força) no sentido de melhorar o acabamento da superfície. O comportamento dos STR é também similar apresentando variações pequenas e alternadas entre as variações do avanço. A repetibilidade para todos os STR é razoável, sendo o máximo desvio de 25.68% do valor médio para o STR-01 para $f=0.075\text{mm/rev}$.

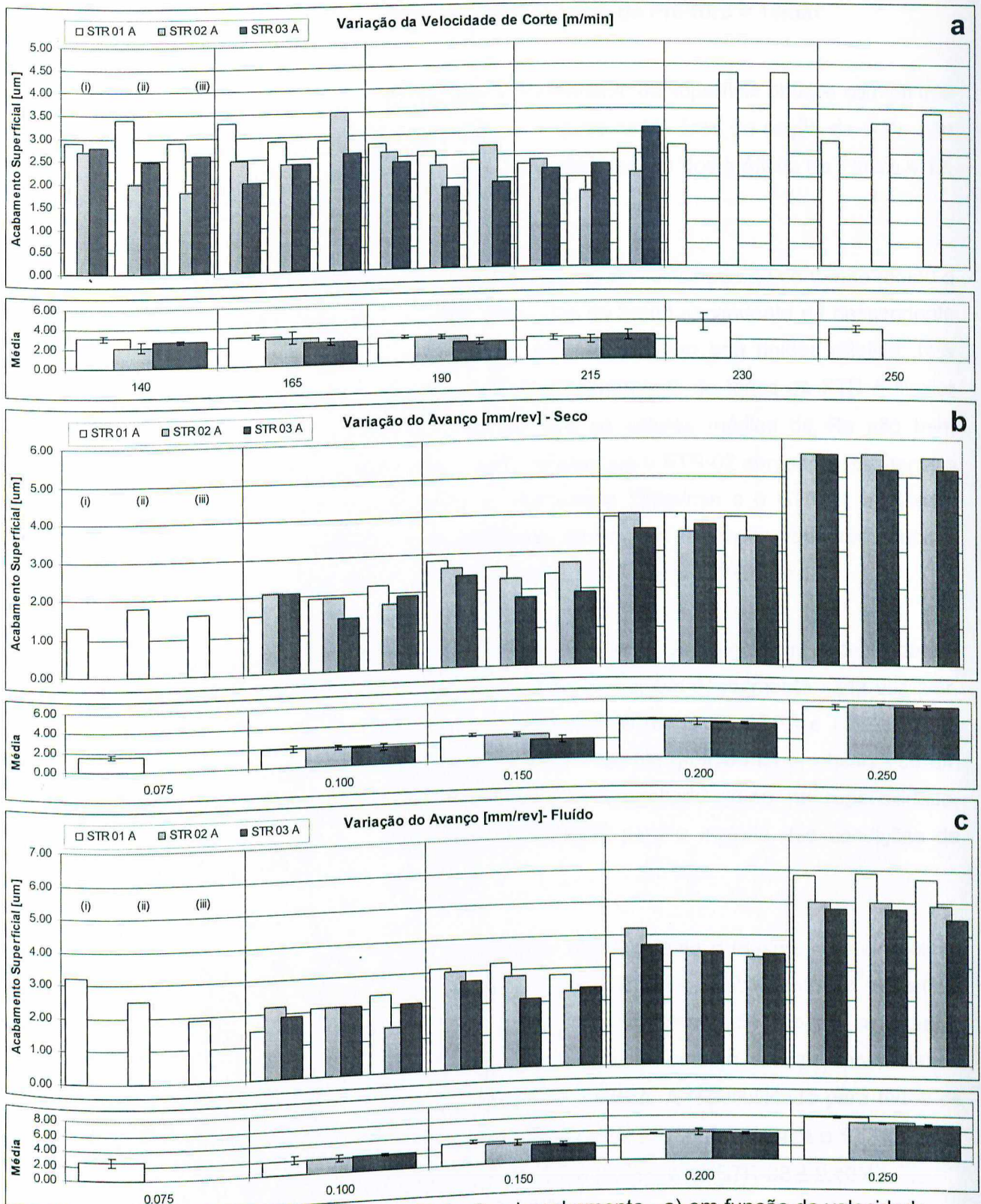


Figura 4.19 Acabamento da superfície [Ra] – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.5.2 Acab. da superfície [Ra] – Desbaste (B)-Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 4.20 apresenta os resultados de acabamento da superfície obtidos com os três STR, para a operação de desbaste. Nota-se que o aumento da área da seção de corte não influenciou significativamente os valores de Ra (compare com os dos gráficos da Figura 4.19, que se situam na mesma ordem de grandeza).

Na Figura 4.20-a pode-se observar que o aumento da velocidade de corte não afetou o acabamento da superfície. Houve variações alternadas de forma ascendente ou descendente no valor de Ra. Este resultado mostra que os STR apresentam boa rigidez relativa. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar com algumas alternâncias entre eles, uma vez que os valores médios de Ra são bem próximos. Uma análise mais criteriosa, entretanto, mostra que o STR-02 apresenta Ra menor a 140m/min, o STR-03 apresenta Ra menor a 165m/min e 190m/min e o STR-01 apresenta menor Ra a 215m/min. Analisando a repetibilidade, os valores são muito variados, sendo o máximo desvio de 11.01% do valor médio de Ra para o STR-02 e $V_c=190\text{m/min}$.

Na Figura 4.20-b, pode-se perceber um comportamento claramente ascendente para o acabamento da superfície com o aumento do avanço, isto é, um acabamento cada vez pior. Nota-se que na condição de $f=0.250\text{mm/rev}$, praticamente todos os STR se estabilizaram obtendo os mesmos valores de acabamento da superfície. No gráfico menor observa-se um comportamento similar para todos os STR tanto na magnitude como na repetibilidade, destacando apenas uma ligeira vantagem do STR-03 para a maioria das condições de processamento.

Na Figura 4.20-c com utilização de fluido de corte, nota-se o mesmo comportamento visto na condição a seco, com uma notável elevação no valor acabamento da superfície quando se aumenta o avanço (pior acabamento), como teoricamente era de se esperar [Machado e da Silva, 1993]. O comportamento dos STR é também similar, apresentando variações pequenas e alternadas para os diferentes avanços. A repetibilidade para todos os STR é razoável, sendo o máximo desvio de 18.04% do valor médio de Ra para o STR-02 para $f=0.150\text{mm/rev}$ (para este avanço o desvio do STR-01 é 15.56% e do STR-03 é 9.49%)

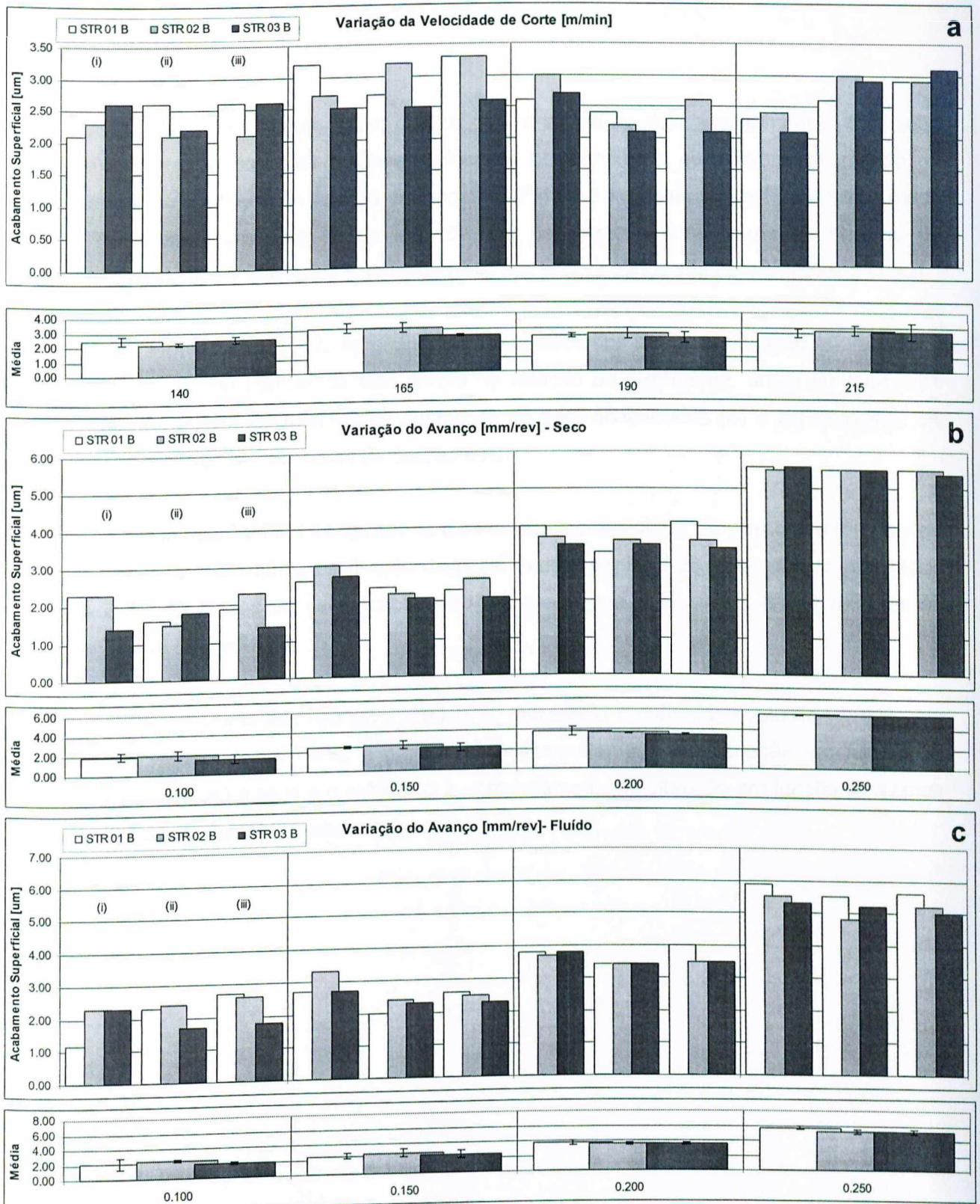


Figura 4.20 Acabamento da superfície [Ra] – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.6 Vibração

Os sinais de vibração foram obtidos com o auxílio de dois acelerômetros, com seus respectivos amplificadores de potência, colocados no mancal do eixo árvore de rotação da ferramenta e no suporte de fixação de amostras (Figura 3.1). Estes sinais foram introduzidos num microcomputador através de um software de medição como parte do sistema de monitoramento dos ensaios. Os valores do RMS dos sinais obtidos são apresentados a seguir.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam os resultados dos sinais de vibração referentes ao sensor colocado no mancal do eixo árvore de rotação da ferramenta, onde a Figura 4.21 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.22 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os resultados dos sinais de vibração referentes ao sensor colocado no suporte de fixação da peça, onde a Figura 4.23 apresenta os resultados relativos às operações de semi-acabamento (A) e a Figura 4.24 os resultados relativos às operações de desbaste (B).

Para cada uma das figuras, o gráfico "a" representa o comportamento da vibração em função da velocidade de corte; o gráfico "b" o comportamento da vibração em função do avanço na condição a seco e o gráfico "c" o comportamento da vibração em função do avanço na condição com fluido de corte.

4.6.1 Vibração no Mancal – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.21-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe uma ligeira tendência ascendente nos níveis de vibração. Este resultado, nestas condições de corte, pode ser provocado pela rigidez dos STR, da máquina-ferramenta e do suporte de fixação das amostras, e pela elevação das energias envolvidas na usinagem, como as forças de usinagem e a potência consumida. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que existem alternâncias na classificação dos STR a medida em que se varia a velocidade de corte. Destaca-se a ligeira vantagem do STR-01 para $V_c=140\text{m/min}$, do STR-03 para $V_c=165\text{m/min}$ e do STR-02 para $V_c=190\text{m/min}$ e $V_c=215\text{m/min}$. Observa-se que as repetibilidades dos STR são razoáveis, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 15.14% do valor médio para STR-03 e $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-01 é 13.76%, e para STR-02 é 7.27%).

Na Figura 4.21-b (condição de semi-acabamento), pode-se perceber um comportamento levemente ascendente para o nível de vibração, a exceção do STR-03 que diminui o valor até $f=0.200\text{mm/rev}$ e sobe para $f=0.250\text{mm/rev}$. No gráfico menor observa-se uma ligeira vantagem do STR-02 para todas as condições de processamento. Nota-se que a repetibilidade dos STR é alta para quase todas as condições analisadas, sendo o máximo desvio de 16.59% do valor médio para o STR-01 para $f=0.150\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 5.24% para o STR-02 e 2.49% para o STR-03).

Na Figura 4.21-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se um comportamento levemente ascendente do sinal de vibração, com o aumento do avanço, e mais semelhante entre os STR. Os níveis de vibração sofrem uma ligeira elevação em relação ao visto na condição a seco. Este resultado comprova a pouca eficiência dos fluido de corte na ação lubrificante. O comportamento dos STR é também similar apresentando variações pequenas e alternadas entre as variações do avanço. A repetibilidade para todos os STR é também inferior que na condição a seco, na maioria dos STR e avanços testados, sendo o máximo desvio de 25.09% do valor médio para o STR-01 para $f=0.150\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 5.70% para o STR-02 e 10.27% para o STR-03).

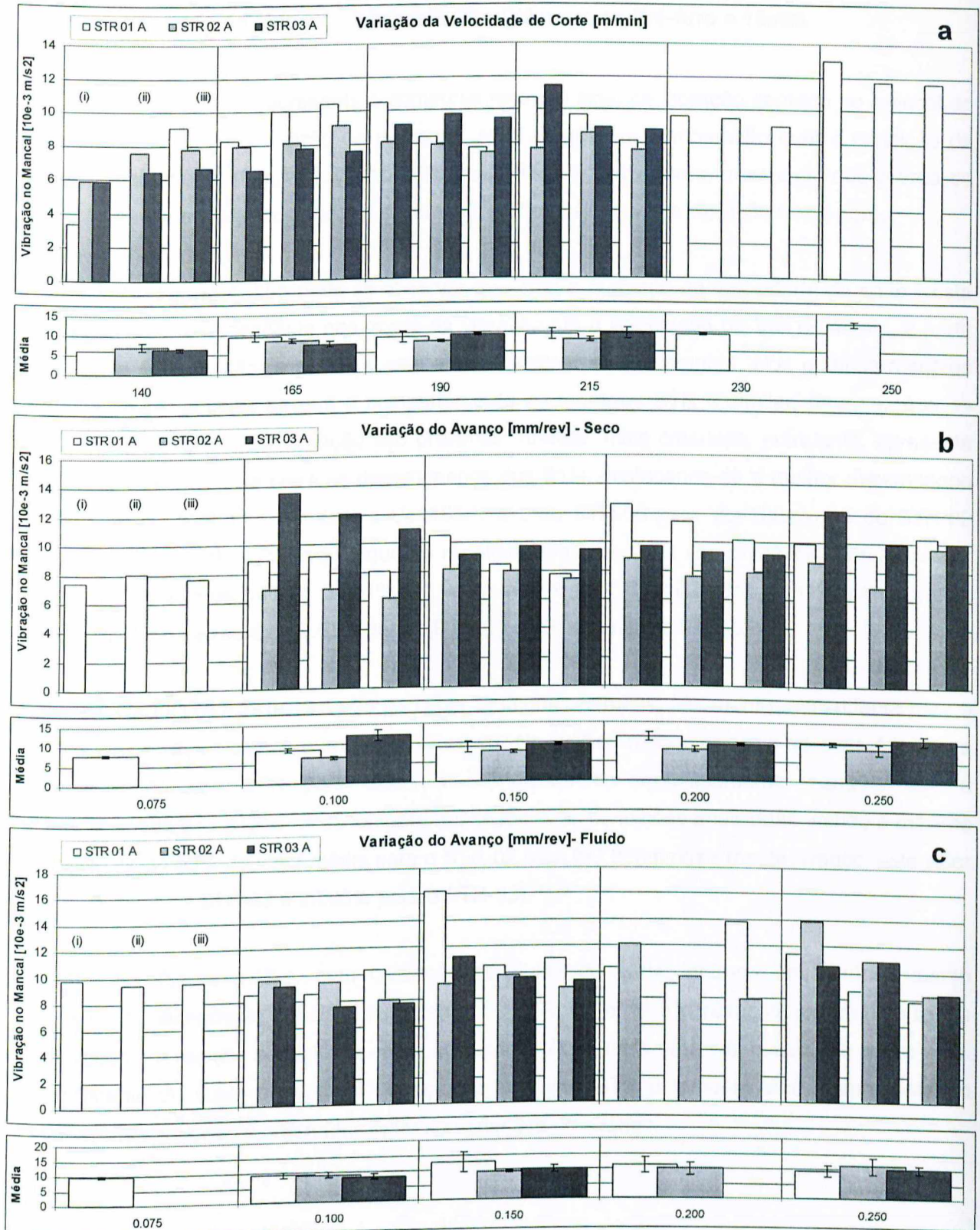


Figura 4.21 Vibração – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15$ mm/rev; b) em função do avanço – $V_c=190$ m/min – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190$ m/min – Com fluido de corte

4.6.2 Vibração no Mancal – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 4.22 apresenta o comportamento do sinal de vibração captado no mancal do eixo árvore para a condição de desbaste. Nota-se que em comparação com a condição de semi-acabamento (Figura 4.21) os valores do RMS são superiores, mostrando que a área da seção de corte afeta a rigidez dos sistemas medidos pelo sinal de vibração neste ponto.

Na Figura 4.22-a pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe uma tendência ascendente nos níveis de vibração até a velocidade de $V_c=190\text{m/min}$, a partir de onde esta tendência passa a permanecer praticamente constante. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores da vibração são próximas. Análise, mais criteriosa, entretanto, apresenta uma certa alternância entre os desempenhos dos STR, destacando-se o melhor desempenho de STR-01 para $V_c=140\text{m/min}$ e $V_c=165\text{m/min}$, do STR-03 para $V_c=190\text{m/min}$, e do STR-02 para $V_c=215\text{m/min}$. Observa-se que as repetibilidades dos STR são razoáveis, sendo o valor máximo de desvio padrão 34.51% do valor médio para STR-02 para $V_c=190\text{m/min}$ (nesta velocidade, o desvio é de 8.81% para o STR-01 e 29.05% para o STR-03).

Na Figura 4.22-b, pode-se perceber um comportamento levemente ascendente para o nível de vibração com o aumento do avanço. No gráfico menor observa-se alternâncias na classificação dos STR para todas as condições de processamento. Nota-se que a repetibilidade dos STR é razoável para quase todas as condições analisadas, sendo o máximo desvio de 34.55% do valor médio para o STR-02 para $f=0.200\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 8.81% para o STR-02 e 29.05% para o STR-03).

Na Figura 4.22-c, com utilização de fluido de corte, nota-se um comportamento levemente ascendente e mais próximo entre os STR. Os níveis de vibração sofrem uma ligeira elevação em relação ao visto na condição a seco, o que mais uma vez constata a pobre ação lubrificante do fluido de corte. O comportamento dos STR é também similar apresentando variações pequenas e alternadas entre as variações do avanço.

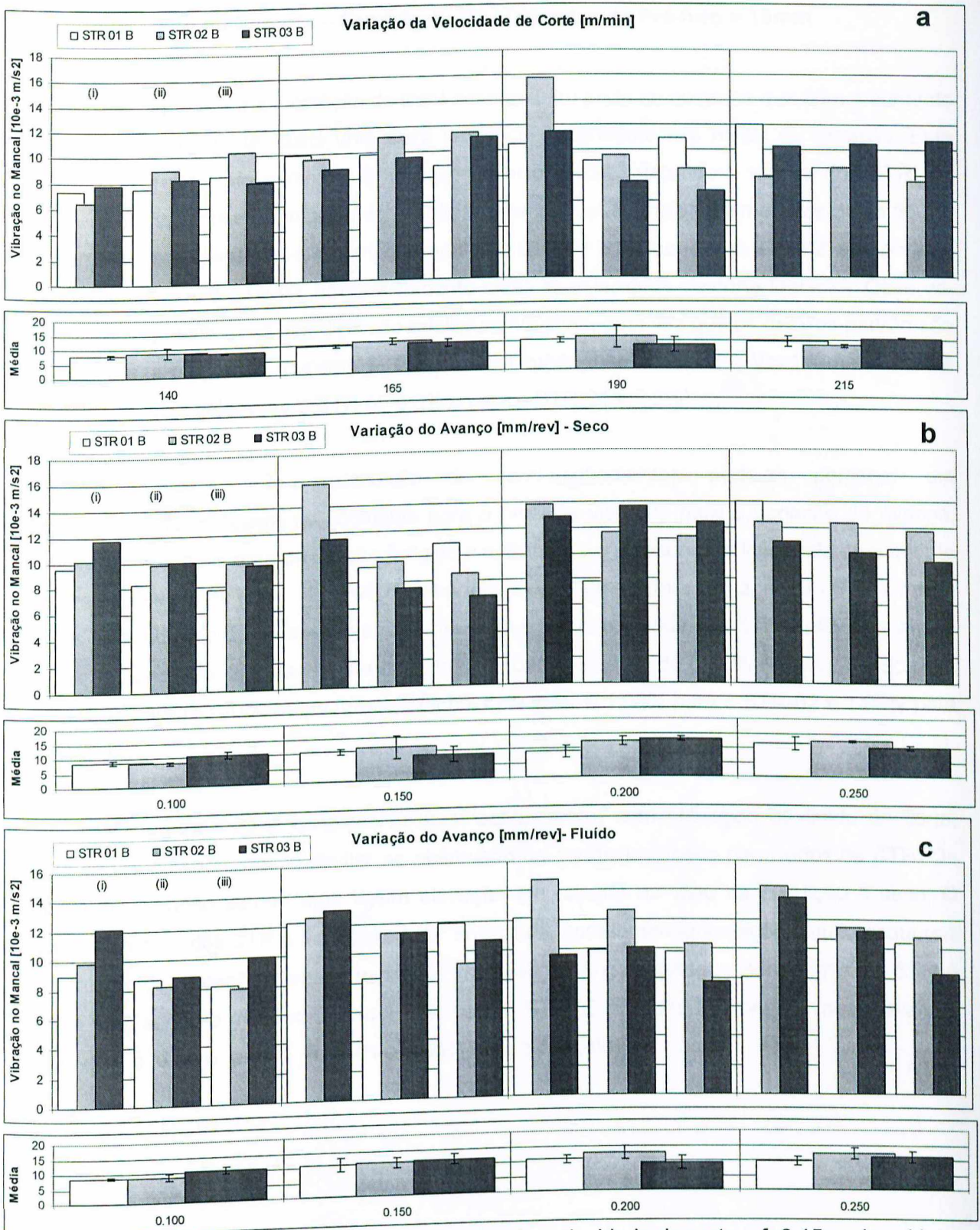


Figura 4.22 Vibração – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.6.3 Vibração no Suporte – Semi-acab. (A) - Diâmetro do Pré-furo = 19mm

Na Figura 4.23-a (condição de semi-acabamento) pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe uma clara tendência ascendente nos níveis de vibração. Este resultado é reflexo do aumento da rotação do eixo árvore, afetando a rigidez dos STR, da máquina-ferramenta e do suporte de fixação das amostras. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que, geralmente, o comportamento do STR-01 é melhor que o STR-02, que por sua vez é melhor que o STR-03, em praticamente todas as velocidades de corte testadas. Observa-se que as repetibilidades dos STR são relativamente altas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos (máximo 8.26% do valor médio para STR-02 e $V_c=140\text{m/min}$, nesta velocidade, este valor para o STR-03 é 3% e para o STR-01 é 2.5%).

Na Figura 4.23-b (condição de semi-acabamento), pode-se perceber um comportamento praticamente constante para o nível de vibração para a variação do avanço, mostrando que o sistema de fixação é rígido o suficiente para absorver a influência do aumento de área da seção de corte. No gráfico menor observa-se uma ligeira vantagem do STR-01 para todas as condições de processamento. Nota-se que a repetibilidade dos STR é alta para quase todas as condições analisadas, sendo o máximo desvio padrão de 5.59% do valor médio para o STR-01 para $f=0.200\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 1.06% para o STR-02 e 1.05% para o STR-03).

Na Figura 4.23-c (condição de semi-acabamento) com utilização de fluido de corte, nota-se um comportamento similar ao observado na condição a seco para todos os STR. Os níveis de vibração sofrem uma ligeira elevação em relação ao visto na condição a seco. O comportamento dos STR é também similar entre eles, apresentando variações muito pequenas nos níveis de vibração para as variações do avanço. A repetibilidade para todos os STR é muito alta, sendo o máximo desvio 1.70% para o STR-02 para $f=0.250\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 0.91% para o STR-01 e 1.45% para o STR-03).

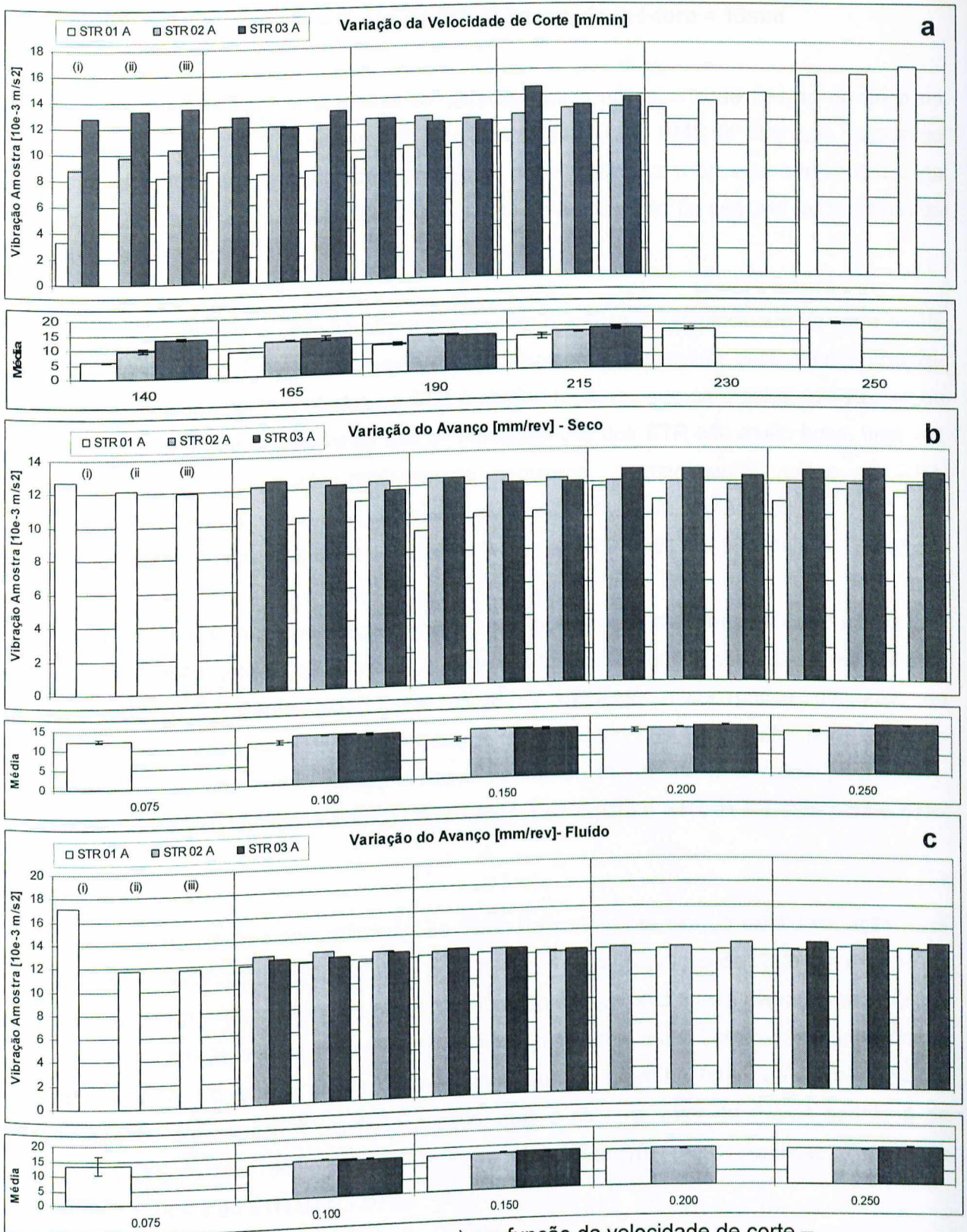


Figura 4.23 Vibração – Semi-acabamento - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

4.6.4 Vibração no Suporte – Desbaste (B) - Diâmetro do Pré-furo = 16mm

A Figura 24 apresenta o sinal de vibração obtido no suporte de fixação da peça na operação de desbaste. Nota-se que não houve aumento no nível RMS do sinal com o aumento da área da seção de corte (compare os valores deste gráfico com aqueles apresentados na Figura 4,23). Isto mostra que a rigidez do sistema de fixação não foi sensível ao aumento da área da seção de corte.

Na Figura 4.24-a pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte existe uma tendência ascendente nos níveis de vibração. Nos gráficos menores desta figura, observa-se que o comportamento de todos os STR é similar, uma vez que as médias dos valores da vibração são próximas. Observa-se que as repetibilidades dos STR são muito boas, uma vez que os desvios-padrão são relativamente pequenos, permanecendo, todos os STR, praticamente nos mesmos valores de desvio (máximo 5.22% do valor médio para STR-02 para $V_c=215\text{m/min}$, nesta velocidade, o desvio é de 0.5% para o STR-01 e 0.86% para o STR-03).

Na Figura 4.24-b, pode-se perceber um comportamento praticamente constante para o nível de vibração quando se aumenta o avanço. No gráfico menor observa-se melhor este comportamento constante para todos os STR, existindo muita pouca diferença de comportamento entre os STR. Nota-se que a repetibilidade dos STR é alta para todas as condições analisadas, sendo o máximo desvio padrão de 11.12% do valor médio para o STR-02 para $f=0.200\text{mm/rev}$ (neste avanço, este valor é 1.44% para o STR-01 e 1.49% para o STR-03).

Na Figura 4.24-c com utilização de fluido de corte, nota-se que existiu variação mais significativa de comportamento entre os STR para a mesma condição de corte em relação ao corte a seco. Em alguns casos os níveis de vibração sofrem uma ligeira elevação em relação ao visto na condição a seco. Este resultado ratifica, mais uma vez, a baixa ação lubrificante do fluido de corte. No gráfico menor pode-se notar que no geral há uma certa diminuição na repetibilidade em relação à condição a seco, mas o máximo valor de desvio padrão é de apenas 5.33% do valor médio para o STR-03 para $f=0.200\text{mm/rev}$ (nesta condição, o desvio do STR-01 é 1.28% e do STR-02 é 1.91%).

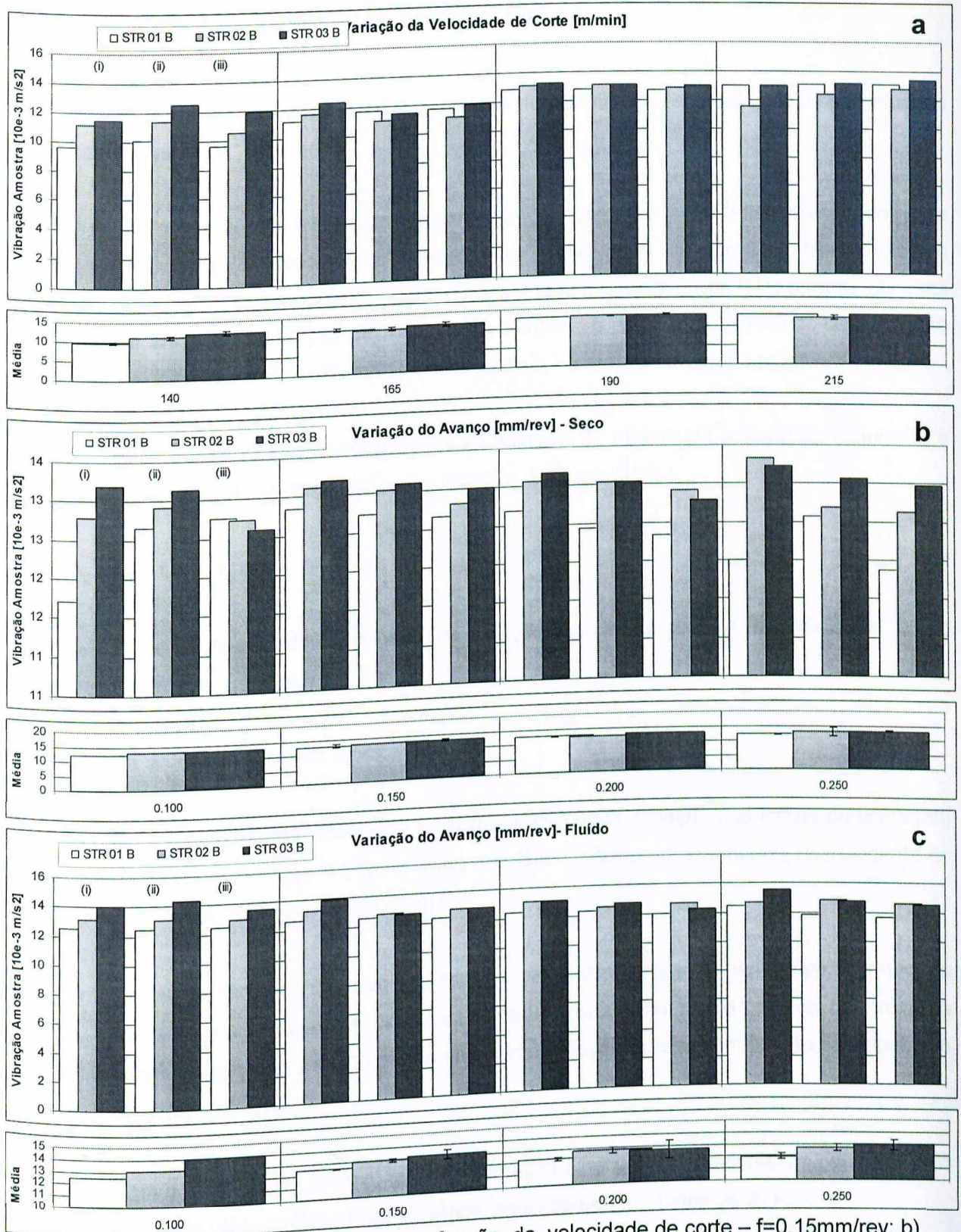


Figura 4.24 Vibração – Desbaste - a) em função da velocidade de corte – $f=0.15\text{mm/rev}$; b) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – A seco; c) em função do avanço – $V_c=190\text{m/min}$ – Com fluido de corte

5. CONCLUSÕES

As conclusões a seguir, vem das análises numéricas dos resultados obtidos, efetuadas no capítulo anterior.

São apresentadas tabelas de relacionamento e comparação entre estes resultados para todas as condições de processamento analisadas e para cada um dos STR. Nestas tabelas serão utilizados símbolos que expressam o comportamento relativo dos STR para as diversas condições analisadas (relação de magnitude), sendo: \uparrow o STR com melhor desempenho relativo, \leftrightarrow o STR com desempenho relativo médio e \downarrow o pior desempenho relativo.

Para cada condição são mostradas as relações de magnitude (coluna da esquerda) e de repetibilidade (coluna da direita), entre todos os STR analisados.

Forças de Usinagem

Para as forças de usinagem, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Da análise das forças, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação nas forças de usinagem (componentes F_x , F_y e F_z) ou, ainda que tênue, ocorre uma tendência descendente no valor desta força para todos os STR.
- Devido à variação da repetibilidade do valor das forças de usinagem, quando se aumenta a velocidade de corte, para cada STR analisado, não é possível determinar a tendência geral do seu comportamento (repetibilidade) apenas em função da velocidade de corte e do STR.
- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, as forças de usinagem têm uma tendência ascendente para todos os STR.
- A repetibilidade do valor das forças de usinagem, para a variação do avanço, segue uma leve tendência ascendente para a maioria dos STR, sendo esta tendência

quebrada várias vezes para diversas condições de análise, devido à grande oscilação dos seus valores.

Tabela 5.1 Comparação do desempenho para a componente de força Fx

Forças de Usinagem – Componente X												
	Semi-acabamento					Desbaste						
Velocidade de Corte [m/min]												
STR	140	165	190	215	230	140	165	190	215	230		
STR-01	↓	↑	↔	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑
STR-02	↑	↓	↓	↓	↔	↑	↔	↑	-	-	↔	↑
STR-03	↔	↔	↑	↔	↓	↔	↑	↔	-	-	↓	↔
Avanço [mm/rev] – A seco												
STR	0.075	0.10	0.15	0.20	2.25	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25		
STR-01	↑	↑	↔	↓	↑	↓	↔	↔	↑	↑	-	-
STR-02	-	-	↑	↑	↔	↑	↓	↓	↓	↔	-	-
STR-03	-	-	↓	↔	↓	↔	↓	↑	↔	↓	-	-
Avanço [mm/rev] – Com fluido												
STR	0.075	0.10	0.15	0.20	2.25	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25		
STR-01	↑	↑	↔	↑	↑	↓	↔	↔	↑	↑	↓	↑
STR-02	-	-	↑	↓	↔	↑	↓	↓	↓	↔	↔	↔
STR-03	-	-	↓	↔	↓	↔	↓	↑	↔	↓	↑	↔

Tabela 5.2 Comparação do desempenho para a componente de força Fy

Forças de Usinagem – Componente Y												
	Semi-acabamento					Desbaste						
Velocidade de Corte [m/min]												
STR	140	165	190	215	230	140	165	190	215	230		
STR-01	↓	↔	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑
STR-02	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↔	↑	-	-	↔	↑
STR-03	↔	↑	↔	↔	↔	↑	↔	-	-	↓	↔	↔
Avanço [mm/rev] – A seco												
STR	0.075	0.10	0.15	0.20	2.25	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25		
STR-01	↑	↑	↔	↓	↑	↓	↔	↔	↑	↔	-	-
STR-02	-	-	↑	↑	↔	↑	↓	↓	↓	↑	-	-
STR-03	-	-	↓	↔	↓	↔	↓	↑	↔	↓	-	-
Avanço [mm/rev] – Com fluido												
STR	0.075	0.10	0.15	0.20	2.25	0.075	0.10	0.15	0.20	0.25		
STR-01	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑
STR-02	-	-	↔	↑	↑	↓	↔	↔	-	-	↔	↔
STR-03	-	-	↑	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔

Tabela 5.3 Comparação do desempenho para a componente de força Fz

Forças de Usinagem – Componente Z																				
	Semi-acabamento										Desbaste									
Velocidade de Corte [m/min]																				
STR	140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↔	↓	-	-	↑	↓	↑	↓	↑	↔	↓	↔	-	-
STR-02	-	-	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↓	↔	↓	↓	↑	↓	-	-
STR-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	↔	↔	↑	↔	↑	↔	↑	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↔	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↔	-	-	↔	↑	↑	↑	↔	↓	↔	↓
STR-02	-	-	↑	↑	↔	↑	↔	↑	↔	↑	-	-	↓	↔	↓	↔	↓	↔	↓	↑
STR-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↑	↓	↔	↓	↑	↑	↑	↔
Avanço [mm/rev] – Com fluido																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	-	-	↑	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↔	-	-	↑	↓	↑	↔	↑	↓	↑	↓
STR-02	-	-	↔	↑	↔	↑	↔	↑	↔	↑	-	-	↑	↑	↓	↓	↔	↔	↔	↑
STR-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓	↔	↔	↑	↑	↑	↑	↔

Potência consumida

Para a potência consumida, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas na Tabela 5.4.

Da análise da potência, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe pouca variação na potência consumida, ou, ainda que tênue, uma tendência ascendente no valor da potência para todos os STR.
- A repetibilidade do valor da potência consumida alterna valores altos e baixos quando se aumenta a velocidade de corte, para cada STR analisado, não sendo possível determinar a tendência geral do seu comportamento (repetibilidade) apenas em função da velocidade de corte e do STR.
- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, a potência apresenta uma clara e forte tendência ascendente para todos os STR, com raras exceções.

- A repetibilidade do valor da potência, para a variação do avanço, não segue nenhuma tendência clara, apenas oscilando valores elevados e médios quando se aumenta o valor do avanço, para todos os STR.

Tabela 5.4 Comparação do desempenho para a potência

Potência																				
Semi-acabamento									Desbaste											
Velocidade de Corte [m/min]																				
STR	140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01	-	-	↑	↓	↑	↔	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↔	↑	↑	↑	↑	↑	-	-
STR-02	↔	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	-	-	↔	↔	↓	↔	↓	↓	↓	↓	-	-
STR-03	↑	↔	↔	↔	↔	↓	↔	↔	-	-	↓	↓	↑	↓	↔	↔	↔	↔	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	-	-	↓	↑	↓	↔	↑	↔	↑	↔	-	-	↓	↓	↑	↑	↔	↑	↑	↓
STR-02	-	-	↔	-	↔	↑	↓	↑	↓	↑	-	-	↔	↔	↓	↓	↓	↔	↓	↔
STR-03	-	-	↑	-	-	-	↔	-	↔	-	-	-	↑	↑	↔	↔	↑	↓	↔	↑
Avanço [mm/rev] – Com fluido																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↑	↔	↔	↑	↑	↑	↑	↓	-	-	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↔
STR-02	-	-	↓	↓	↓	↓	↔	↔	↓	↔	-	-	↓	↑	↓	↔	↔	↓	↔	↓
STR-03	-	-	↔	↑	↑	↔	-	-	↔	↑	-	-	↔	↔	↔	↓	↑	↔	↑	↑

Erro de Cilindricidade

Para a verificação do erro de cilindridade, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas na Tabela 5.5.

Da análise do erro de cilindridade, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe uma pequena variação desordenada do erro de cilindridade para todos os STR, não sendo possível determinar nenhuma tendência característica a não ser o possível comportamento constante para todas as condições analisadas e uma ligeira vantagem do STR-02 pela melhor repetibilidade.
- A repetibilidade do valor do erro de cilindridade alterna entre valores altos e baixos quando se aumenta a velocidade de corte, para cada STR analisado, não mostrando nenhuma tendência clara no seu comportamento a exceção de uma ligeira desvantagem do STR-01 pelo maior erro em relação aos outros sistemas.
- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, o erro de cilindridade não apresenta grandes alterações ou uma clara tendência no seu comportamento para todos os STR.
- A repetibilidade do erro de cilindridade, para a variação do avanço, não segue nenhuma tendência clara, apenas oscilando valores elevados e médios quando se aumenta o valor do avanço, para os STR-02 e STR-03. Para o STR-01 observa-se uma menor precisão na execução das trocas, provocando uma clara tendência de valores de erros maiores.

Tabela 5.5 Comparação do desempenho para o erro de cilindridade

Erro de Cilindridade																				
Semi-acabamento										Desbaste										
Velocidade de Corte [m/min]																				
STR	140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↔	↓	↔	↓	↓	↓	↔	-	-
STR-02	↔	↑	↔	↔	↑	↑	↑	↔	-	-	↔	↑	↑	↑	↑	↔	↑	↑	-	-
STR-03	↑	↔	↑	↔	↔	↔	↔	↓	-	-	↑	↓	↔	↓	↔	↑	↔	↓	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	-	↔	↑	↔	↓	↓	↔	↓	↔	-	-	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↔
STR-02	-	-	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↔	↓	-	-	↑	↔	↑	↔	↑	↑	↔	↑
STR-03	-	-	↓	↔	↓	↔	↔	↑	↑	↑	-	-	↔	↑	↔	↑	↔	↔	↑	↓
Avanço [mm/rev] – Com fluido																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↔	-	-	↓	↓	↓	↑	↓	↔	↓	↓
STR-02	-	-	↑	↑	↔	↔	↑	↔	↑	↑	-	-	↑	↑	↑	↔	↑	↓	↑	↑
STR-03	-	-	↔	↔	↑	↑	↔	↑	↔	↓	-	-	↔	↔	↔	↓	↔	↑	↔	↔

Erro de Circularidade

Para a verificação do erro de circularidade, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas na Tabela 5.6.

Da análise do erro de circularidade, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe uma pequena variação desordenada do erro de circularidade para todos os STR, não sendo possível determinar nenhuma tendência característica a não ser o possível comportamento constante para todas as condições analisadas.
- A repetibilidade do valor do erro de circularidade alterna entre valores altos e baixos quando se aumenta a velocidade de corte, para cada STR analisado, não mostrando nenhuma tendência clara no seu comportamento a exceção da desvantagem do STR-01 pelos maiores desvios em relação aos outros sistemas.

- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, o erro de circularidade não apresenta grandes alterações ou uma clara tendência no seu comportamento para todos os STR.
- A repetibilidade do erro de circularidade, para a variação do avanço, não segue nenhuma tendência clara, apenas oscilando valores elevados e médios quando se aumenta o valor do avanço, para os STR-02 e STR-03. Para o STR-01 observa-se uma elevada dispersão dos valores de circularidade na execução das trocas, provocando uma clara tendência de valores de erros maiores.

Tabela 5.6 Comparação do desempenho para o erro de circularidade

Erro de Circularidade																				
Semi-acabamento											Desbaste									
Velocidade de Corte [m/min]																				
STR	140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↔	↓	↔	↓	↓	-	-
STR-02	↔	↑	↔	↓	↑	↔	↑	↑	-	-	↔	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	-	-
STR-03	↑	↔	↑	↔	↔	↓	↔	↔	-	-	↑	↔	↔	↓	↔	↑	↔	↔	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	-	-	↓	↓	↓	↔	↑	↔	↓	↔
STR-02	-	-	↔	↓	↑	↔	↑	↓	↔	↓	-	-	↑	↔	↑	↓	↑	↑	↔	↑
STR-03	-	-	↑	↔	↔	↓	↔	↔	↑	↔	-	-	↔	↑	↔	↑	↔	↓	↑	↓
Avanço [mm/rev] – Com fluido																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	-	-	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓
STR-02	-	-	↑	↓	↔	↔	↑	↔	↑	↔	-	-	↑	↑	↑	↓	↑	↔	↑	↔
STR-03	-	-	↔	↔	↑	↑	↔	↑	↔	↓	-	-	↔	↔	↔	↔	↔	↓	↔	↑

Acabamento da superfície

Para a verificação do acabamento da superfície, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas nas Tabelas 5.7.

Da análise do acabamento da superfície, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe uma pequena variação desordenada do acabamento da superfície para todos os STR, não sendo possível determinar nenhuma tendência característica a não ser o possível comportamento constante para todas as condições analisadas.
- A repetibilidade do valor do acabamento da superfície alterna entre valores altos e baixos quando se aumenta a velocidade de corte, para cada STR analisado, não mostrando nenhuma tendência clara no seu comportamento a exceção de uma ligeira desvantagem do STR-01.
- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, o acabamento da superfície é pior para todos os STR.
- A repetibilidade do erro de circularidade, para a variação do avanço, mostra uma pequena tendência ascendente no seu comportamento, mas não pode ser generalizada a todos os casos.

Tabela 5.7 Comparação do desempenho para o acabamento da superfície

Acabamento da superfície																				
Acabamento											Desbaste									
Velocidade de Corte [m/min]																				
STR	140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01	↓	↔	↓	↑	↓	↑	↔	↑	↑	↑	↔	↓	↑	↔	↔	↑	↑	↓	-	-
STR-02	↑	↓	↔	↓	↑	↔	↑	↔	-	-	↑	↑	↑	↔	↓	↓	↔	↔	-	-
STR-03	↔	↑	↑	↔	↔	↓	↓	↓	-	-	↓	↔	↔	↑	↑	↔	↓	↑	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↔	↔	↓	↑	↓	↑	↑	↓	-	-	↔	↔	↓	↑	↓	↑	↔	↔
STR-02	-	-	↓	↑	↔	↔	↔	↓	↓	↑	-	-	↑	↓	↔	↓	↔	↔	↑	↑
STR-03	-	-	↑	↓	↑	↓	↑	↔	↔	↔	-	-	↓	↑	↑	↔	↑	↔	↑	↓
Avanço [mm/rev] – Com fluido																				
STR	0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↔	-	-	↔	↓	↑	↔	↓	↓	↔	↓
STR-02	-	-	↑	↔	↔	↓	↑	↓	↔	↑	-	-	↓	↑	↔	↓	↑	↑	↑	↔
STR-03	-	-	↔	↑	↑	↔	↔	↔	↑	↓	-	-	↑	↔	↑	↑	↔	↔	↑	↑

Vibrações

Para os sinais de vibração, as relações de magnitude e repetibilidade estão apresentadas nas Tabelas 5.8, 5.9.

Da análise da vibração, conclui-se:

- Com o aumento da velocidade de corte existe uma tendência ascendente dos níveis de vibração para todos os STR analisados.
- Com o aumento do avanço, tanto na condição a seco como na condição com fluido, os níveis de vibração tendem a ficar constantes ou com um comportamento levemente ascendente para todos os STR.
- A repetibilidade dos níveis de vibração é sempre boa, independente das condições de processamento, variando levemente para cada um dos STR

- Os níveis de vibração registrados no suporte de fixação das amostras são menores (em média 20%) que os registrados no mancal do eixo de rotação da ferramenta.

Tabela 5.8 Comparação do desempenho para o nível de vibração no mancal

Nível de vibração no Mancal																					
		Acabamento										Desbaste									
		Velocidade de Corte [m/min]																			
STR		140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01		↑	↑	↓	↓	↓	↓	↔	↔	↑	↑	↑	↔	↔	↑	↔	↑	↓	-	-	
STR-02		↓	↔	↔	↑	↑	↔	↑	↑	-	-	↓	↓	↓	↔	↓	↓	↔	↔	-	-
STR-03		↔	-	↑	↔	↔	↑	↓	↓	-	-	↔	↑	↑	↓	↑	↔	↓	↑	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																					
STR		0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01		↑	↑	↔	↔	↔	↓	↓	↔	↔	↑	-	-	↔	↔	↔	↑	↑	↓	↔	↓
STR-02		-	-	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	-	-	↑	↑	↓	↓	↔	↔	↓	↑
STR-03		-	-	↓	↓	↓	↔	↔	↑	↓	↔	-	-	↓	↓	↑	↔	↓	↑	↑	↔
Avanço [mm/rev] – Com fluido																					
STR		0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01		↑	↑	↓	↓	↓	↓	↔	↔	↓	↔	-	-	↑	↑	↑	↓	↔	↓	↑	↑
STR-02		-	-	↔	↑	↑	↑	↑	↑	↔	↓	-	-	↔	↔	↔	↑	↓	↔	↓	↔
STR-03		-	-	↑	↔	↔	↔	-	-	↑	↑	-	-	↓	↓	↓	↔	↑	↑	↔	↓

Tabela 5.9 Comparação do desempenho para o nível de vibração no suporte da amostra

Nível de vibração no Suporte																					
		Acabamento										Desbaste									
		Velocidade de Corte [m/min]																			
STR		140		165		190		215		230		140		165		190		215		230	
STR-01		↑	↑	↑	↔	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↔	↔	↑	↔	↔	↑	-	-
STR-02		↔	↓	↔	↑	↓	↑	↔	↑	-	-	↔	↔	↑	↑	↔	↓	↑	↓	-	-
STR-03		↓	↔	↓	↓	↔	↔	↓	↔	-	-	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↔	-	-
Avanço [mm/rev] – A seco																					
STR		0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01		↑	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	↓	↑	↔	↔	↑	↑	↓
STR-02		-	-	↓	↑	↓	↑	↔	↑	↔	↑	-	-	↔	↑	↔	↓	↑	↓	↔	↑
STR-03		-	-	↔	↔	↔	↔	↑	↔	↑	↔	-	-	↓	↔	↓	↑	↓	↔	↓	↔
Avanço [mm/rev] – Com fluido																					
STR		0.075		0.10		0.15		0.20		2.25		0.075		0.10		0.15		0.20		0.25	
STR-01		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↔	↔	↔	↑	-	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↔
STR-02		-	-	↓	↓	↔	↓	↑	↑	↑	↓	-	-	↔	↔	↔	↔	↓	↔	↔	↑
STR-03		-	-	↔	↔	↓	↔	-	-	↓	↔	-	-	↓	↓	↓	↓	↔	↓	↓	↓

Conclusão Final

A metodologia aqui empregada para comparar os três STR permitiu construir as tabelas apresentadas neste capítulo. Elas são o puro reflexo do comportamento relativo entre os STR em cada condição de corte testada. A observância dos resultados globais, entretanto, não permitiu distinguir o melhor ou pior comportamento de um STR individual de maneira a poder recomendá-lo para uma determinada aplicação. Isto significa que nesta metodologia não existe distinção entre os STR, com relação aos parâmetros controlados, o que não significa que não pode haver diferenças de comportamento entre eles em diferentes situações daquelas aqui apresentadas. Uma análise mais profunda permite perceber uma ligeira desvantagem, de um modo geral, por parte do STR-01, mas este resultado deverá ser confirmado por outros obtidos em função da análise do diâmetro resultante e de uma maior quantidade de ensaios e trocas que permitam mostrar dispersões estatisticamente mais confiáveis.

Um dos melhores parâmetros de comparação ou diferenciação entre os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas é o diâmetro. A cada troca e nova colocação, o dispositivo assume uma nova posição, produzindo um novo diâmetro. A dispersão desta variação indicará o melhor sistema. Neste trabalho, esta grandeza não foi possível de ser controlada, o que foi prejudicial à comparação dos sistemas.

Os parâmetros dimensionais mapeados neste trabalho (cilindricidade e circularidade) são indicadores mas não determinantes para mostrar a melhor repetibilidade pois estes parâmetros dependem de outros fatores como o material da peça, o balanço da ferramenta, a condição do mandril, a fixação da peça e outros.

Os parâmetros de potência, força e vibração servem para identificar as diferenças entre os sistemas mas não garantem que o melhor vai apresentar uma menor dispersão dimensional quanto ao diâmetros, cilindridade e circularidade.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Os Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas são muito utilizados na indústria, e a análise da eficiência e desempenho destes depende muito das condições de fabricação. Sugere-se estudar e comparar o comportamento dos STR para outras condições de processamento, incluindo outros tipos de fabricação, como ser a Usinagem Linear – Torneamento, um dos processos mais utilizados.

Uma análise profunda do desgaste e vida das ferramentas pode dar outra variável de comparação entre os STR permitindo montar tabelas e gráficos de condições ideais de processamento e permitir visualizar com um pouco mais de clareza as diferenças entre eles.

O monitoramento do diâmetro produzido permitirá obter resultados que, correlacionados aos obtidos com a Força e os Erros de Cilindricidade e Circularidade, permitirão efetuar uma análise comparativa mais precisa dos STR.

Para melhorar a confiabilidade dos resultados, pode-se efetuar um número maior de trocas rápidas, produzindo assim uma dispersão de resultados estatisticamente mais precisa.

Mesmo tendo sido analisados os três Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas mais comuns, ainda faltam vários outros importantes. O estudo de todos os sistemas encontrados no mercado (ABS, CAPTO, VTS, BTS, KM, HSK) permitiria ampliar consideravelmente a visão apresentada.

Utilizar equipamentos de monitoração e sistemas de controle e análise de dados mais sofisticados e modernos permitiria também enriquecer os conhecimentos comparativos entre os sistemas, permitindo visualizar melhor o comportamento de cada um dos STR a cada instante do processo, mapeando as principais diferenças.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1 Referência Bibliográfica

BOOTHROYD, G. E KNIGHT W.A. (1989). *Fundamentals of Machinning and Machine Tools*, 2ª.Edição. Universidade de Rhode Island. Rhode Island - Kingston, ISBN 0-8247-7852-9.

DE MELO, A.C.A. (1998). *Estimação da Temperatura de Corte utilizando Problemas Inversos em condução de calor*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1998. 116 pags.

FERRARESI, D. (1970). *Fundamentos da usinagem dos Metais*, 5ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo.

FERRARESI, D. (1972). *Usinagem dos Metais*, 4ª Edição, Associação Brasileira de Metais, São Paulo.

GONÇALVES, ARMANDO A. (1997). *Metrologia – Parte I – Laboratório de Metrologia e Automação – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina.*

MACHADO, A.R. e SILVA, M.B. (1993). *Usinagem dos Metais*, Laboratório de Pesquisa em Usinagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

NUÑEZ G., J.M. (1998). *Determinação experimental do comportamento das componentes das forças de usinagem no processo de torneamento e fresamento dos aços inoxidáveis ABNT 403 e SBNT 304 modificado*, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Anais do II Seminário de Iniciação científica. Março, 1998. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

ROSSI, M (1970). *Máquinas-Operatrizes Modernas*, Livro Ibero-americano Ltda, Rio de Janeiro.

SALES, W.F. (1999). *Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte*, Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

SHAW, M.C.(1986). *Metal Cutting Principles*, Oxford Science Publications, USA, ISBN 0-19-859002-4.

SHINGO, SHINGEO(2000). *Sistemas de Troca Rápida de Ferramentas. Uma revolução nos Sistema Produtivos*. Bookman. Porto Alegre - Brasil, ISBN 85-7307-528-7

SMITH, G.T.(1981). *Advanced Machining - The Handbook of Cutting Technology*, IFS Publications, UK, Spring-Verlag.

TAYLOR, F.W.(1907). 'On the Art of Cutting Metals', Trans. A.S.M.E. 28, 31.

TRENT, E.M.(1984). *Metal Cutting*, 2nd Edition, Butterworths, England, ISBN 0-408-10856-8

7.2 Catálogos Técnicos

GÜHRING (1999). *Das modulars werkzeugsystem GM 300*, (The modular tooling system Gm 300) DIN69.893 form machining centers and transfers lines. Alemanha.

KENNAMETAL (1997). *KM-Tooling System*, KM modular quick-change tooling systems for lathes and machining centres. 402.00 GB.

KENNAMETAL (1993). *KM-Modular quick-change tooling systems for lathes and machining centres*. 402.00 GB.

KOMMET (1998). *Kometric cartridges*, MMC60500108-50-06/98. Besigheim – Postfach 1361 – Alemanha

KOMMET (1998). *Rotating tool catalog*, MMC60500100-70-06/99. Besigheim – Postfach 1361 - Alemanha

KOMET (1998). *Turning tool catalog*, MMC60500114-70-06/98. Besigheim – Postfach 1361 - Alemanha

MAPAL (1985). *HSK clamping systems*, Clamping systems.10-045-0496-SP

SANDVIK (1985). *Block tool system*, C-1004:1-ENG. S-811 81 Sanviken, Suécia

SANDVIK (1997). *Sistema de Ferramentas modulares*, Coromant. Sanviken, Suécia

FU-00014310-7