

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Maurício Corrêa
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 12.06.2001
J. Novaski
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Estudo das Características do
Fresotorneamento Ortogonal Radial Aplicado
em Aço Endurecido**

Autor: **Maurício Corrêa**
Orientador: **Olívio Novaski**

52/01

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

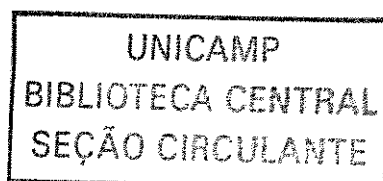
**Estudo das Características do
Fresotorneamento Ortogonal Radial Aplicado
em Aço Endurecido**

**Autor: Maurício Corrêa
Orientador: Olívio Novaski**

**Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

**Campinas, 22 de junho de 2001
S.P. – Brasil**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C817e

Corrêa, Maurício

Estudo das características do fresotorneamento ortogonal radial aplicado em aço endurecido / Maurício Corrêa. -- Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Olívio Novaski.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

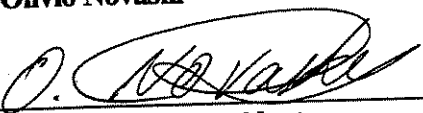
1. Usinagem. 2. Metais - Corte. 3. Fresas. 4. Ferramentas. I. Novaski, Olívio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

TESE DE DOUTORADO

**Estudo das Características do
Fresotorneamento Ortogonal Radial Aplicado
em Aço Endurecido**

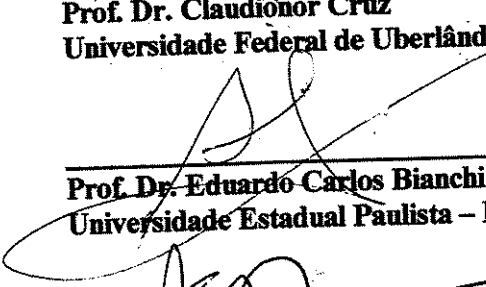
Autor: **Maurício Corrêa**
Orientador: **Olívio Novaski**



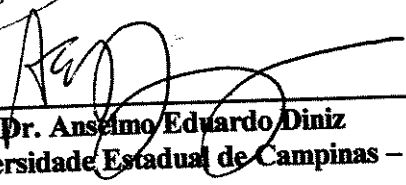
Prof. Dr. Olívio Novaski, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – Campinas - SP



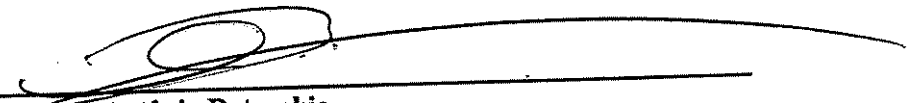
Prof. Dr. Claudionor Cruz
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia - MG



Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Universidade Estadual Paulista – Bauru - SP



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas – Campinas - SP



Prof. Dr. Antônio Batocchio
Universidade Estadual de Campinas – Campinas - SP

Campinas, 22 de junho de 2001

48657 10000

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Osório e Lourdes, à minha querida esposa Célia e a minha querida filha Paula, todos sempre com infinita paciência, carinho, e principalmente alegria, demonstrada nos momentos mais difíceis.

Agradecimentos

Quero prestar minha homenagem e deixar meus sinceros agradecimentos :

A Deus, pela generosidade, com que nos concede a vida.

Ao grande amigo Francisco E. Lima, pelo apoio, e acima de tudo, pela sincera e leal amizade durante todos estes anos de convivência.

Aos colegas Thorsten e Joachim, por todo o empenho e suporte, que possibilitaram a realização deste trabalho, e também pela ajuda e apoio nas horas de cansaço longe de casa.

Ao PTW (Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen), personificado pelo Prof. Dr. - Ing. Herbert Schulz, que incentivou este trabalho, acolhendo-o de portas abertas com toda a infra-estrutura necessária à consecução do mesmo.

Aos amigos que de alguma forma possam ter auxiliado neste trabalho e em especial ao Flávio, ao Ari, ao Marcos, ao Renato, ao Solerman, à Luciana, ao Rubens, ao Celso e ao Vinicius, pela grande solidariedade e colaboração empenhadas.

A todos os familiares, a quem agradeço pelo apoio sempre expresso de forma carinhosa.

A todos os funcionários do DEF/FEM, pela prestatividade e solicitude demonstrada durante todo o trabalho, e aos colegas que se fizeram presente ao longo deste tempo.

À FAPESP, CAPES e ao DAAD, pelo eficiente amparo e suporte financeiro concedido ao projeto e ao pesquisador, no Brasil e na Alemanha.

E a todos àqueles heróis, que insistente e corajosamente se dedicam com dignidade ao ensino e pesquisa neste país.

Agradecimento Especial

Quero aqui, por um dever de gratidão, respeito, amizade e reconhecimento, assinalar a minha homenagem, na forma mais extensa que estas palavras possam permitir, ao meu Orientador, Professor **Olívio Novaski**.

Foi na Unicamp que conclui minha graduação, mas foi aqui também, ao lado do meu orientador, professor e amigo, durante o meu mestrado e o meu doutorado, que experimentei o mais rico crescimento profissional e humano, que nunca durante minha vida será esquecido.

Obrigado pelo apoio, pela confiança demonstrada ao longo destes anos e principalmente por todo este tempo de convivência fraterna. Obrigado por tudo.

Sumário

Sumário	i
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
Capítulo 1 : Introdução	01
Capítulo 2 : Conceitos e Fundamentos Teóricos	08
2.1 Introdução	08
2.2 Conceituação da HSC	13
2.2.1 Algumas Vantagens Econômicas da HSC	15

2.2.2 Algumas Vantagens Técnicas da HSC.....	15
2.2.3 Máquinas ferramentas para Usinagem HSC.....	15
2.2.3.1 Eixos Árvores, Carros de Translação, Guias e Fusos.....	17
2.2.3.2 Sistemas de Controle CNC.....	21
2.2.3.3 Sistemas de Extração de Cavacos, Refrigeração e Segurança.....	22
2.2.4 Ferramentas para Usinagem HSC.....	24
2.2.4.1 Materiais de Ferramentas para HSC.....	24
2.2.4.2 Geometria da Ferramenta	26
2.2.4.3 Generalidades do Projeto de Ferramentas para HSC.....	27
2.2.5 Sistemas de Fixação Ferramenta-Máquina em HSC.....	28
2.3 Fundamentos do Fresotorneamento Ortogonal.....	29
2.3.1 Conceituação e Generalidades do Fresotorneamento.....	29
2.3.2 Princípios Básicos do Fresotorneamento.....	37
2.3.3 Fundamentos Teóricos do Fresotorneamento.....	40
2.3.3.1 Velocidade de Corte.....	40
2.3.3.2 Velocidade de Avanço.....	41
2.3.3.3 Avanço na Direção Axial por Rotação da Peça.....	43
2.3.3.4 Penetração de Trabalho.....	43

2.3.3.5 Avanço Tangencial por Rotação da Peça.....	44
2.3.3.6 Avanço Total por Rotação da Peça.....	45
2.3.3.7 Avanço por Dente.....	45
2.3.4 A Rugosidade Teórica no Fresotorneamento Ortogonal.....	46
2.3.5 O Mecanismo de Formação de Cavacos.....	48
2.3.5.1 Formação do Cavaco pela Aresta de Corte Secundária.....	50
2.3.5.2 Formação do Cavaco pela Aresta de Corte Principal.....	50
2.3.6 O A Influência do Desvio Axial na Qualidade da Superfície.....	53
Capítulo 3 : Procedimentos Experimentais.....	55
3.1 Introdução	55
3.2 Máquinas e Laboratórios Utilizados	56
3.3 Corpos de Prova	60
3.4 Ferramentas.....	61
3.4.1 Fresa.....	61
3.4.2 Insetos.....	63
3.5 Equipamentos de Medição.....	65
3.6 Condições Operacionais e Amostras Obtidas.....	65

Capítulo 4 : Resultados e Discussões.....	71
4.1 Introdução	71
4.2 Resultados de Rugosidade com Pastilhas de Metal Duro.....	71
4.3 Resultados de Desvios de Cilindricidade com Pastilhas de Metal Duro.....	82
4.4 Resultados de Rugosidade com Pastilhas de CBN.....	90
4.5 Resultados de Desvios de Cilindricidade com Pastilhas de CBN.....	97
Capítulo 5 : Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	104
5.1 Conclusões.....	104
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	105
Referências Bibliográficas	107
Referências Bibliográficas Complementares.....	115

RESUMO

CORRÊA, Maurício; *Estudo das Características do Fresotorneamento Ortogonal Radial Aplicado em Aço Endurecido*; Campinas - S.P.; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 2001; 116 p; Tese de Doutorado

O objetivo principal deste trabalho é apresentar definições e conceitos do processo de usinagem combinado, entre torneamento e fresamento, denominado de fresotorneamento ortogonal radial e estudar a viabilidade técnica do mesmo aplicado em aço endurecido. O método de fresotorneamento ortogonal foi objeto de análise experimental, através de ensaios de usinagem com corpos de prova de aço 42CrMo4, de 60-61 HRC de dureza. Utilizou-se pastilhas de CBN (alguns ensaios com metal duro também são apresentados), variando-se os parâmetros avanço, rotações da peça, da ferramenta e excentricidade. Testaram-se as condições, repetindo-se as mesmas por três vezes para cada ponto ensaiado, evitando-se dessa maneira, influências aleatórias inerentes aos ensaios e aumentando-se quantitativa e qualitativamente as amostragens obtidas. A máquina empregada nos ensaios foi um centro de usinagem CNC, cinco eixos. Através desses experimentos, monitorou-se a rugosidade da superfície e os desvios de cilindridade. Os resultados alcançados mostraram ser possível se atingir desvios de cilindridade e rugosidade baixos, demonstrando ser o processo uma opção tecnológica viável.

Palavras chaves : Fresotorneamento, usinagem HSC, CBN

ABSTRACT

CORRÊA, Maurício; Study Of The Radial Orthogonal Turnmilling's Features Applied In Hardened Steel; Campinas - SP; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 2001; 116 p; Tese de Doutorado

The main goal of this work is to present the concepts and definitions of a combined machining process, so called radial orthogonal turnmilling. The method of radial orthogonal turnmilling was object of experimental analysis, through machining tests. Workpieces made of 42CrMo4 steel with 60-61 HRc hardness were machined. CBN inserts were used (some tests with coated carbide inserts are also presented), varying the parameters as feed rate, workpiece speed rotation, tool speed rotation and eccentricity point. For this purpose, tests were carried out using three different cutting speeds associated to an specific feed for each material, avoiding the random influences inherent to them and increasing the obtained samples both in quality and quantity. Tests were conducted on a CNC machining center with five axes. Through these experiments, it was monitored roughness and cilindricity. The achieved results showed that low roughness and cilindricity values can be obtained, demonstrating that this process is an suitable technological option.

Keywords : Turnmilling, HSC machining, CBN

Lista de Figuras

Figura 2.1 – A Tecnologia da HSC.....	09
Figura 2.2 – Faixa de valores de velocidade de corte [m/min].....	13
Figura 2.3 – Construção típica de um motor para máquinas HSC	18
Figura 2.4 – Performance das ferramentas.....	24
Figura 2.5 – Performance de coberturas em HSC.....	25
Figura 2.6 – Variação do ângulo de saída x força de corte.....	26
Figura 2.7 – Conjunto de fixação da ferramenta.....	29
Figura 2.8 – Processo de torneamento.....	30
Figura 2.9 – Processo de fresamento tangencial.....	31
Figura 2.10 – Processo de fresamento cilíndrico.....	32
Figura 2.11 – Processo de fresotorneamento ortogonal.....	32
Figura 2.12 – Fresotorneamento ortogonal, coaxial, interno e externo.....	33
Figura 2.13 – Aspecto do cabeçote fresador em usinagem.....	34

Figura 2.14 – Aspecto da disposição ortogonal entre peça e ferramenta	35
Figura 2.15 – Aspecto da máquina com o cabeçote fresador em usinagem	35
Figura 2.16 – Fresotorneamento axial e ortogonal	38
Figura 2.17 – Fresotorneamento ortogonal excêntrico e centralizado	38
Figura 2.18 – Possibilidades de arranjo no fresotorneamento ortogonal	39
Figura 2.19 – Cinemática do fresotorneamento ortogonal	40
Figura 2.20 – Parâmetros para velocidade de avanço na direção radial	43
Figura 2.21 – Penetração de trabalho	44
Figura 2.22 – Avanço por dente no fresotorneamento ortogonal	46
Figura 2.23 – Rugosidade teórica no fresotorneamento	47
Figura 2.24 – Cavacos formados pelas arestas principal e secundária	48
Figura 2.25 – Formação dos cavacos nas arestas da ferramenta	50
Figura 2.26 – Espessura do cavaco na aresta secundária	51
Figura 2.28 – Geometria do cavaco formado pela aresta principal	52
Figura 2.29 – Possíveis posições axiais das fresas	53
Figura 2.30 – Influência do desvio axial entre dois dentes	54
Figura 3.1 – O fresotorneamento em virabrequins	56
Figura 3.2 – Máquina protótipo de fresotorneamento	57

Figura 3.3 – Centro de usinagem Deckel de 5 eixos.....	57
Figura 3.4 – Fresotorneamento ortogonal.....	58
Figura 3.5 – Fresotorneamento coaxial.....	58
Figura 3.6 – Corpo de prova.....	61
Figura 3.7 – Sistema de fixação utilizado.....	62
Figura 3.8 – Fresa utilizada.....	62
Figura 3.9 – Geometria dos insertos utilizados.....	63
Figura 3.10 – Posicionamento dos insertos.....	64
Figura 3.11 – Rugosímetro.....	65
Figura 3.12 – Estratégia de usinagem.....	67
Figura 3.13 – Pontos de medições.....	70
Figura 4.1 – Rugosidade x relação de frequência MD FUTURA vc 200.....	73
Figura 4.2 – Rugosidade x relação de frequência MD X-TREME vc 200.....	74
Figura 4.3 – Rugosidade x relação de frequência MD X-TREME vc 300.....	76
Figura 4.4 – Rugosidade x relação de frequência MD FUTURA vc 300.....	76
Figura 4.5 – Rugosidade x relação de frequência MD FUTURA vc 400.....	77
Figura 4.6 – Rugosidade x relação de frequência MD X-TREME vc 400.....	77
Figura 4.7 – Velocidade de corte x relação de frequência MD X-TREME e6.0.....	78

Figura 4.8 – Velocidade de corte x relação de frequência MD X-TREME e5.5.....	79
Figura 4.9 – Velocidade de corte x relação de frequência MD FUTURA e6.0.....	80
Figura 4.10 – Velocidade de corte x relação de frequência MD FUTURA e5.5.....	81
Figura 4.11 – Cilindricidade x relação de frequência X-TREME vc 200.....	83
Figura 4.12 – Cilindricidade x relação de frequência MD FUTURA vc 200.....	84
Figura 4.13 – Cilindricidade x relação de frequência X-TREME vc 300.....	85
Figura 4.14 – Cilindricidade x relação de frequência MD FUTURA vc 300.....	86
Figura 4.15 – Cilindricidade x relação de frequência X-TREME vc 400.....	86
Figura 4.16 – Cilindricidade x relação de frequência MD FUTURA vc 400.....	87
Figura 4.17 – Cilindricidade x velocidade de corte X-TREME e5.5.....	88
Figura 4.18 – Cilindricidade x velocidade de corte MD FUTURA e5.5.....	88
Figura 4.19 – Cilindricidade x velocidade de corte X-TREME e6.0.....	89
Figura 4.20 – Cilindricidade x velocidade de corte MD FUTURA e6.0.....	89
Figura 4.21 – Rugosidade x relação de frequência CBN vc 500.....	91
Figura 4.22 – Rugosidade x relação de frequência CBN vc 600.....	92
Figura 4.23 – Rugosidade x relação de frequência CBN vc 750.....	93
Figura 4.24 – Rugosidade x relação de frequência CBN vc 850.....	94
Figura 4.25 – Rugosidade x relação de frequência CBN vc 950.....	95

Figura 4.26 – Rugosidade x velocidade de corte CBN e5.5.....	96
Figura 4.27 – Rugosidade x velocidade de corte CBN e6.0.....	96
Figura 4.28 – Cilindricidade x relação de frequência CBN vc 550.....	98
Figura 4.29 – Cilindricidade x relação de frequência CBN vc 650.....	99
Figura 4.30 – Cilindricidade x relação de frequência CBN vc 750.....	100
Figura 4.31 – Cilindricidade x relação de frequência CBN vc 850.....	100
Figura 4.32 – Cilindricidade x relação de frequência CBN vc 950.....	101
Figura 4.33 – Cilindricidade x velocidade decorte CBN e5.5.....	102
Figura 4.34 – Cilindricidade x velocidade decorte CBN e6.0.....	102

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Algumas máquinas HSC comercialmente disponíveis.....	16
Tabela 2.2 – Frequência máxima de rotação para rolamentos.....	20
Tabela 3.1 – Propriedades das coberturas.....	64
Tabela 3.2 – Velocidades de corte para pastilhas [m/min].....	68

Nomenclatura

CBN	nitreto cúbico de boro	
HSC	High Speed Cutting – Altíssima Velocidade de Corte	
kW	Kilowatt	
MD	metal duro	
PTW	Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen	
v_c	velocidade de corte	[m/min]
v_f	velocidade de avanço	[m/min]
n_{wkzg}	rotação da ferramenta	[min ⁻¹]
ω_p	rotação da peça	[min ⁻¹]
f_z	avanço por dente	[mm]
f	avanço total	[mm]
f_r	avanço radial	[mm]
f_{tan}	avanço tangencial	[mm]
f_{ax}	avanço axial	[mm]
e	excentricidade	[mm]
z	número de dentes	[-]
d_f	diâmetro da ferramenta	[mm]
d_p	diâmetro da peça	[mm]
l	comprimento da aresta secundária de corte	[mm]
a_e	penetração de trabalho	[mm]
a_p	profundidade de corte	[mm]

r_L	raio da ferramenta	[mm]
h_{uss}	espessura de corte	[mm]
h_m	espessura média de corte	[mm]
χ_r	ângulo de posição da ferramenta	[°]
γ_o	ângulo de saída ortogonal da ferramenta	[°]
Ψ	ângulo de posição do dente	[°]
λ	relação de frequência ferramenta/peça	[-]
R_z	rugosidade medida	[μm]

CAPÍTULO 1 :

INTRODUÇÃO

A observação rotineira dos processos de fabricação mecânica mostra que, ainda hoje, a usinagem responde por grande parte dos mesmos. Dificilmente é possível se encontrar um produto que durante alguma etapa de seu processo de fabricação não sofra nenhuma espécie de operação de usinagem.

Devido a esta importância, as pesquisas, na área de usinagem, se caracterizam por uma procura constante de soluções tecnológicas, a fim de se aumentar às qualidades de trabalho, os acabamentos e a de se encontrar condições racionais que, propiciem aos processos de trabalho se adequarem às novas solicitações exigidas pelo mercado, quais sejam, o aumento da eficiência de trabalho e suas implicações na forma de gestão da produção. Estas soluções podem ser encontradas através da otimização de processos de usinagem, já conhecidos, ou através do desenvolvimento e emprego de novos processos [Cruz, 1995].

Desde meados dos anos oitenta, a globalização da competição mudou a forma das empresas brasileiras abordarem o processo de manufatura [Bianchi, 1997], em especial a usinagem de componentes metálicos.

Novas tecnologias, e conceitos de automação e estratégia têm sido adotados e implementados, no sentido de se incrementar a performance e eficiência da máquina e operador, objetivando a redução dos custos e o aumento da produtividade.

As transformações tecnológicas se constituem como um dos pilares e elementos chaves de sustentação e viabilização econômica da maioria das empresas no horizonte de negócios de médio e longo prazo, permitindo a melhoria da competitividade e a sustentabilidade da liderança de uma empresa frente aos seus concorrentes, ao atuar como quesito de diferenciação frente a concorrência [Porter, 1990].

Em nossos dias, a transformação tecnológica se faz sentir através das inovações e mudanças, quase que diárias na rotina das empresas, tudo sob os efeitos da pressão do mercado global e em muitos casos tornando o mesmo erodido pela agressividade de competidores do leste asiático e Europa, em particular [Brown, 1997].

A seguida evolução dos fundamentos da produção em massa com largo emprego da mão-de-obra intensiva, existente no princípio e meados do século XX, para a manufatura capital-intensiva progride a passos largos e irreversíveis.

Esta nova forma de manufatura, caracteristicamente é estruturada e solidificada na tecnologia e se distingue pela flexibilidade, requerendo das pessoas que administram as empresas, sensibilidade para a adoção de políticas que garantam a implementação e consolidação de mudanças, deixando de lado princípios obsoletos calcados em uma filosofia de produção já não mais compatível com o mercado [Drucker, 1999].

Simplificadamente, pode-se mesmo afirmar, que hoje a posição competitiva de uma empresa no mercado é consequência do resultado alcançado em alguns quesitos básicos de desempenho da mesma [Batocchio, 1997], os quais devem refletir as suas estruturas financeira e industrial [Porter, 1990]. Estes quesitos mostram, ainda, como estas estruturas se relacionam

com o mercado e de que maneira asseguram à empresa, sua presença como opção viável frente a um mercado exposto à competição global.

Na abordagem da estrutura industrial de uma empresa de manufatura, na qual são empregados processos de usinagem, normalmente destacam-se a tecnologia e as novas tecnologias empregadas e dentre estas novas tecnologias, que começam a ser adotadas e devem se constituir em um curtíssimo espaço de tempo como o caminho certo a ser trilhado na busca da competitividade, a tecnologia da altíssima velocidade de corte (HSC) pode oferecer novas e grandes vantagens técnicas e econômicas em amplos campos de aplicação [Schulz, 1996]

No caso das empresas onde existe a utilização de máquinas operatrizes, a difusão da tecnologia da altíssima velocidade de corte (HSC), proporciona o fortalecimento da estratégia competitiva [Schulz, 1999] ao atuar de forma bastante intensa em três fatores que alicerçam a posição favorável destas empresas frente aos seus concorrentes : o enfoque em custo reduzido, alta flexibilidade na produção, alta rapidez de resposta ao mercado, tudo aliado à garantia da qualidade do produto ou serviço oferecido. Impulsiona ainda o desenvolvimento de novas tecnologias em ferramentas, máquinas ferramentas, componentes e principalmente processos de usinagem.

A “HSC” se torna relevante como instrumento de vantagem competitiva ao, nitidamente, influenciar os condutores de formação dos custos de uma empresa ou gerar um grau singular de diferenciação das atividades desta empresa no mercado e capacitá-la à inserção global.

É dentro deste contexto, que devem ser priorizados os estudos da viabilidade de aplicação desta tecnologia em seus mais diferentes espectros, dentre eles os novos processos de usinagem, como a aplicação do fresotorneamento, um processo de usinagem, onde agregam-se alguns conceitos e possibilidade tecnológicas do torneamento e fresamento.

Normalmente para se alcançar elevada qualidade de trabalho e baixas rugosidades, em peças rotacionais simétricas, são utilizados, como processos mais divulgados, a retificação cilíndrica [Dedini, 2000], ou o torneamento duro [Lima, 2001], todavia estes processos apresentam certas limitações, sendo a retificação, por exemplo, um processo relativamente caro e inflexível, trazendo consigo, problemas de meio ambiente, devido a grande quantidade de refrigeração necessária à operação, dentre outros.

Em relação ao torneamento duro a existência de fatores limitantes como, por exemplo, a força centrípeta na placa [Schulz, 1990]; altas oscilações de frequência no eixo árvore devido à rotação da peça, limitam a usinagem de peças de parede fina, ao provocar deformações por forças centrípetas [Schulz, 1990].

Neste contexto, é que deve ser priorizado o estudo da viabilidade de aplicação do fresotorneamento. Desta forma, o fresotorneamento, apresenta novas soluções tecnológicas e pode, dependendo do caso, ser uma alternativa ao torneamento ou à retificação.

Em relação à retificação, o fresotorneamento possivelmente pode apresentar a vantagem de ser um processo à seco, sem prejudicar o meio ambiente. Em relação ao torneamento duro, pode também possivelmente apresentar a característica, por ser um corte interrompido, de não aquecer a peça e conseqüentemente, não alterar as características metalográficas do componente.

Além disso, o fresotorneamento oferece a oportunidade de se combinar os processos convencionais de torneamento e fresamento de forma que, a peça e a ferramenta, tenham movimentos de rotação, sendo que, as elevadas velocidades de corte possíveis são alcançadas pelas altas rotações fornecidas pelo cabeçote fresador.

Esforços no sentido de aprimorar o processo de fresotorneamento, bem como consolidá-lo como opção viável para o emprego usual vêm sendo realizados através de prolongadas e intensivas pesquisas na Alemanha, na Inglaterra e no Brasil. Em particular

um grande salto nas bases teóricas do processo de fresotorneamento foi conseguido através de pesquisas conduzidas no “Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen (PTW)” da “Technische Universität Darmstadt”, o qual, possui tradição centenária, equipamentos e recursos modernos e exerce pesquisa contínua sobre o assunto. Em razão deste fato, o presente estudo realizou-se em âmbito comum a esta instituição de pesquisa e o NMQ (Núcleo de Manufatura e Gestão da Qualidade) Unicamp, sob a supervisão direta do Prof. H. Schulz e do Prof O. Novaski.

O objetivo deste projeto de pesquisa é apresentar minimamente as bases teóricas, até então aceitas, todavia não consolidadas ainda, do processo de fresotorneamento ortogonal radial, no que concerne aos seus conceitos teóricos básicos utilizados, para cálculo de velocidades de corte e avanço, bem como estudar as possíveis influências que a variação de fatores operacionais do mesmo, como a excentricidade do processo, a velocidade de corte e o tipo de ferramenta possam ocasionar nos desvios microgeométricos (rugosidades), e macrogeométricos (cilindricidade).

Ressalta-se que, os conceitos empregados para o fresotorneamento ortogonal radial, foram obtidos através da analogia do processo com os conceitos do fresotorneamento ortogonal axial, obtidos em função de extensivos ensaios e larga experiência alcançada através de anos de estudos conduzidos por vários pesquisadores, além de contar com precioso trabalho de paciência para modelamento cinemático do processo e posteriores testes e ensaios práticos para a checagem dos mesmos, conduzidos por pesquisadores do PTW.

Além disso, tem-se também como objetivo específico deste projeto comprovar, através dos testes a eficácia, ou não, do processo de fresotorneamento ortogonal em altíssima velocidade de corte na obtenção de acabamentos de superfície com qualidade de retífica, na usinagem de metais endurecidos (acima de 50Rc). Particularmente, nos ensaios conduzidos, utilizou-se como modelo, um corpo de prova com geometria, material e tratamento térmico similares à virabrequins.

Atualmente, para o atual estágio de conhecimento do fresotorneamento, recomenda-se a aplicação do mesmo, a princípio com algumas vantagens, nos casos em que [S.A, 1994] é difícil o controle de cavacos provenientes da usinagem de grandes diâmetros, em materiais dúcteis, uma vez que, o fresotorneamento produzirá cavacos curtos, em qualquer material, na usinagem em peças com estruturas instáveis (peças delgadas) ou, quando se tem a necessidade de se ter uma vida da ferramenta que dure pelo menos a usinagem completa de um componente; ou ainda, em operações de acabamento em peças de grandes diâmetros, tratadas termicamente, e não possíveis de serem usinadas por torneamento, pois permite que a rotação da peça seja pequena.

Este projeto, deve ainda, possibilitar o restabelecimento de um novo ponto inicial, para a retomada da realização de novos estudos sobre o processo no Brasil, bem como tornar de conhecimento e domínio público bases teóricas até então restritas a estudos experimentais conduzidos na Alemanha, do processo, e fomentar ainda bases propícias para a criação de grupos de pesquisas em processos que, se utilizam da usinagem em altíssima velocidade de corte (HSC).

O monitoramento dos resultados de rugosidade das superfícies das peças usinadas em seus mais diferentes parâmetros de teste, e as respectivas cilindrícidades obtidas nos ensaios conduzidos neste trabalho, procuram confirmar, rever ou buscar hipóteses para a complexidade de análise que se faz necessária ao entendimento deste processo combinado de usinagem. Procurou-se desta maneira associar as possíveis vantagens da associação do emprego do fresotorneamento aos conceitos de usinagem em altíssima velocidade de corte para o material testado, em diferentes condições operacionais.

Visando facilitar-se à compreensão e leitura do texto, o presente estudo foi dividido em cinco capítulos cuja breve descrição do conteúdo dos mesmos tem-se a seguir :

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO :

Capítulo 2 - ESTADO DA ARTE : faz uma breve apresentação da evolução da usinagem em altíssima velocidade de corte, enquanto nova tecnologia, sua importância no desenvolvimento da usinagem. Relata ainda, as bases teóricas para o processo de fresotorneamento ortogonal radial e alguns conceitos empíricos normalmente empregados no seu uso.

Capítulo 3 - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS : trata dos procedimentos, equipamentos, materiais e critérios adotados nos ensaios de fresotorneamento.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES : apresenta os resultados dos ensaios realizados durante todo o projeto, incluindo os ensaios e procedimentos preparatórios realizados com ferramentas de metal duro.

Capítulo 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS : mostra a contribuição desta tese ao processo de fresotorneamento e sugere futuros estudos dentro da área de usinagem com novas possibilidades de emprego para este processo.

CAPÍTULO 2 :

CONCEITOS E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - Introdução

O processo de fresotorneamento está baseado numa combinação cinemática dos processos de torneamento e fresamento, todavia, não é um simples arranjo dos dois processos, pois os cálculos necessários à determinação das suas variáveis operacionais (dinâmicas e cinemáticas), não pode ser obtido com a aplicação dos conceitos teóricos do fresamento e do torneamento, exigindo sim uma elaboração teórica específica ao mesmo [König, 1984] [Wedeniowski, 1984].

Reforçando esta consideração, o fresotorneamento, ainda, na grande maioria das vezes [Siegwart, 1985] costuma ser aplicado com velocidades de corte classificadas como sendo pertencente à zona de velocidades inserida nos conceitos de “High Speed Cutting”, sugerindo que, o domínio dos conceitos desta tecnologia deva ser minimamente entendido anterior ao efetivo emprego do fresotorneamento. Convém portanto, introduzir algumas considerações sobre a tecnologia da HSC anterior à apresentação das bases teóricas do fresotorneamento.

Atravessando eras durante a história da humanidade, da Neolítica até os dias atuais, passando pela idade do bronze e outras, as velocidades de corte apresentaram uma

elevação [Arndt, 1970], mantendo uma evolução segura e relativamente constante, sem apresentar grandes discontinuidades. Esta evolução sempre foi acompanhada de empenho no sentido de se estabelecer bases teóricas consistentes para os progressos alcançados, visando o domínio conceitual e teórico da HSC.

A tecnologia da HSC, ou mais especificamente a tecnologia da altíssima velocidade de corte, em si própria, tem sido tema de interesse de vários pesquisadores [Iwata, 1981], [Mathew, 1982], [Komanduri, 1986], e engenheiros [De Groat, 1960], [Flow, 1984], e muitos outros, que trabalham diretamente com a manufatura, ao redor do mundo.

Há muitos anos, o estudo e desenvolvimento de processos de usinagem que permitam a utilização de altíssimas velocidades de corte são objetos de intensos esforços de trabalho. Todavia, definir o que vem a ser “altas” velocidades de corte é um problema de ordem complexa, envolvendo uma série de aspectos inerentes aos processos de usinagem e suas inter-relações, como por exemplo, o material que está sendo usinado, o tipo de ferramenta, o processo e muitos outros mais, conforme se observa na Figura 2.1, abaixo:

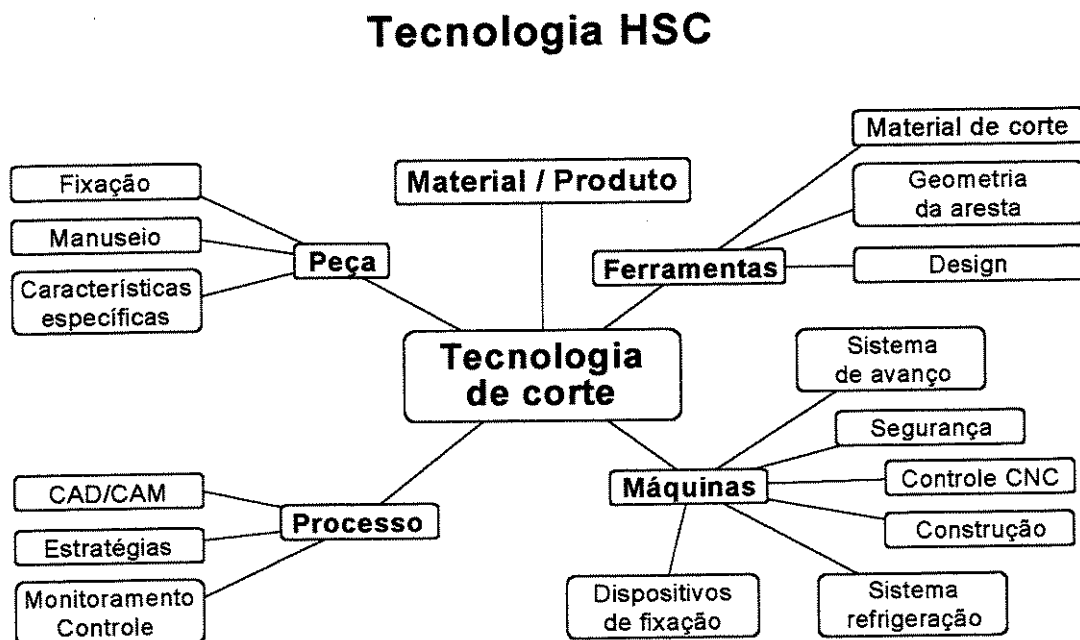


Figura 2.1: A Tecnologia da HSC

Os conceitos primordiais da usinagem em altíssima velocidade de corte (HSC) originaram-se nas primeiras pesquisas sobre a viabilidade técnica do emprego da mesma, no ano de 1920. Nesta época, o Dr. Carl Salomon [Salomon, 1925], pioneiramente, destacou-se como o primeiro pesquisador no mundo a empreender investigações científicas sobre o tema.

Os experimentos do Dr. Salomon, constituíram-se na usinagem de aços dentro da faixa de velocidades de corte superiores a 440 m/min, na usinagem de cobre com velocidades de corte de até 2850 m/min e ligas de alumínio com velocidades superiores a 16500 m/min, valores os quais, se caracterizavam (e ainda se caracterizam) como altíssimas velocidades de corte.

Tais valores somente foram possíveis de se obter devido ao grande diâmetro das ferramentas empregadas. Deve ser lembrado que à época ainda existiam sérias limitações tecnológicas ao aumento da frequência de rotação dos motores das máquinas ferramentas disponíveis.

Em seus experimentos, Dr. Salomon propôs uma velocidade crítica de corte para cada combinação de ferramenta e material usinado. Esta velocidade crítica foi estabelecida através da observação do aumento da temperatura do processo durante o corte.

Tal como nos dias atuais [Chubb, 1980], [Ber, 1989], [Colding, 1991], sabia-se que o aumento do desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem está diretamente relacionado ao aumento da temperatura do mesmo. Entretanto, Dr. Salomon inferiu que a temperatura do processo, decairia quando eram aplicadas velocidades superiores às críticas, as quais o mesmo havia determinado. A partir desta conclusão, Dr. Salomon estabeleceu ser possível a usinagem em altíssimas velocidades de corte, sendo necessários no entanto o desenvolvimento de novas ferramentas e máquinas ferramentas e processos, propriamente ditos.

Sabe-se hoje que Salomon estava equivocado em relação a esta observação [Mc Gee, 1978], [Lin, 1992], [Schulz, 1990].

As pesquisas sobre HSC, então, se seguiram de forma muito incipiente, até que novas investigações tomaram forma, nos Estados Unidos, nos meados dos anos cinquenta. Nesta época o objeto de pesquisa foi a utilização de altíssimas velocidades de corte para a usinagem em ligas de alumínio. Estas pesquisas foram conduzidas no “ Lockheed an The Denver Research Institute “ [Koontz, 1977].

As velocidades de corte utilizadas nos experimentos aproximaram-se a valores da ordem de 70000 m/min. O principal objetivo destes estudos era a verificação dos conceitos propostos por Dr. Salomon, em relação ao comportamento da temperatura do processo. Foi determinado que estes conceitos estavam equivocados.

Seguiram-se as pesquisas, e, nos meados dos anos setenta, mais precisamente em 1978, [Khales, 1978] foram divulgados trabalhos que procuravam concentrar esforços na tentativa de melhor conceituação das bases da HSC, definindo minimamente o que seria a HSC, quais seus limites e seus fatores de interação, possibilidades e requerimentos, tomando como base de referência laboratórios de pesquisas e indústrias ao redor do mundo, este estudo foi amplamente divulgado através do CIRP.

Nesta época, começam também surgir significativas melhorias tecnológicas na construção de máquinas ferramentas [Heisel, 1996], juntamente com o aparecimento das primeiras máquinas a comando numérico auxiliadas por computadores. Estas novidades, até então inexistentes, viabilizaram novos experimentos em usinagem com altíssimas velocidades de corte, em particular, com ensaios em fresamento e torneamento [Komanduri, 1985].

Um dos mais sistemáticos projetos de pesquisa sobre usinagem em altíssimas velocidades de corte foi conduzido à época, durante quatro anos, iniciando-se em 1979,

intitulado AMRP (Advanced Machining Research Program), pelo DARPA (Defense Advanced Research Project Agency), nos Estados Unidos.

Esta pesquisa tinha por finalidade principal estabelecer bases científicas confiáveis para usinagem com altas taxas de remoção de material, tal qual a usinagem em altíssimas velocidades de corte ou, a época, a usinagem a laser. A faixa de velocidades de corte estudadas nos experimentos variou de 0,0013 m/min à 24500 m/min. Alguns resultados deste projeto, como a metodologia para o estabelecimento de requisitos básicos, de uma máquina ferramenta para usinagem HSC, foram publicados [Komanduri, 1985] relatando os progressos obtidos.

A partir do início dos anos oitenta grande empenho é alocado nas pesquisas em usinagem com HSC na Alemanha, em particular, impulsionada com vultosas verbas do Ministério de Tecnologia e Pesquisa da Alemanha (BMFT), destinadas aos laboratórios das universidades do país.

O PTW (Instituto de Máquinas Ferramentas e Tecnologias de Produção), em especial, recebe grande aporte de verba e passa a desenvolver trabalhos extensivos de pesquisa em HSC, conduzidos pelo Prof. H. Schulz, [Schulz, 1981...1998], enfatizando as condições tecnológicas para a viabilização do emprego total da usinagem em altíssimas velocidades de corte.

As pesquisas empreendidas pelo PTW até o presente instante concentram-se não somente em tecnologia da altíssima velocidade de corte, mas também profundamente em ferramentas para aplicações em HSC, máquinas ferramentas e componentes para HSC, processos em HSC, enfim a viabilização da tecnologia da HSC como real opção de trabalho, colocando desta maneira o PTW como referência mundial em excelência de pesquisas com usinagem HSC.

Hoje, processos que se utilizam da HSC são objetos de trabalho de mais de centena de laboratórios de universidades e empresas ao redor do mundo [Schulz, 1998], dentre eles o Núcleo de Manufatura e Gestão da Qualidade (NMQ), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, conduzido pelo Prof. O. Novaski [Novaski, 1997..1998], do qual, toma parte este projeto de pesquisa.

2.2 - Conceituação da HSC

Atualmente, definir com exatidão a altíssima velocidade de corte é arriscado, devido a grande abrangência de facetas que o tema comporta, todavia, uma das definições usualmente empregadas baseia-se intimamente no tipo de material usinado, tipo de operação de corte, etc.

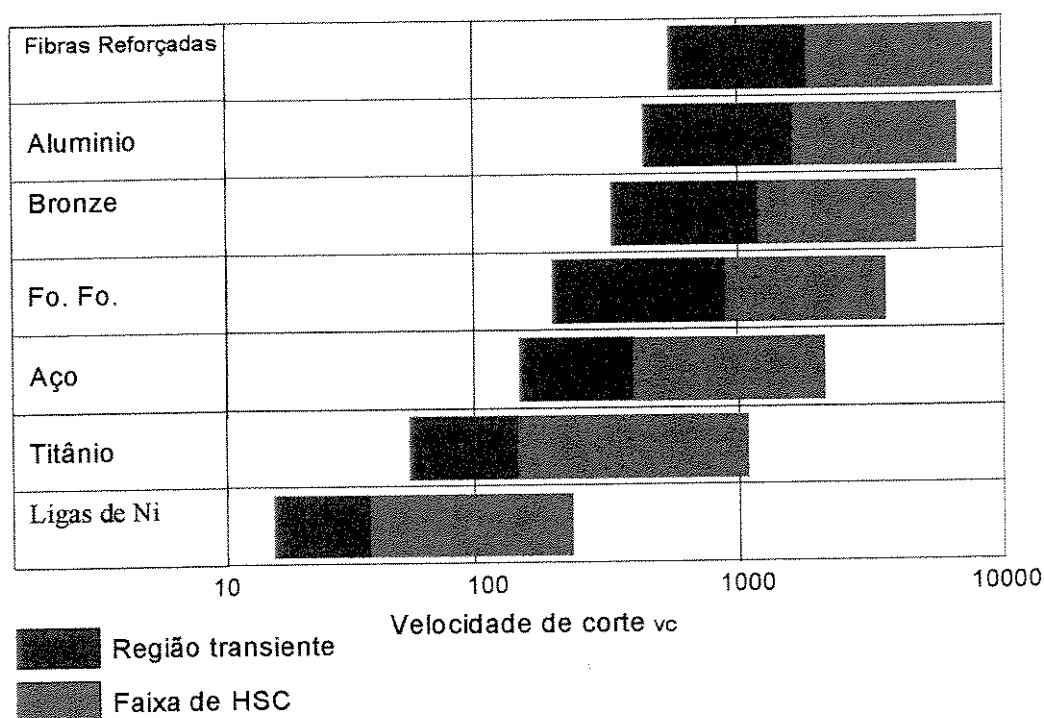


Figura 2.2 : Faixa de valores de velocidade de corte [m/min] em função do material

Observa-se na Figura 2.2, a faixa de valores [Finzer, 1997], que definem a HSC em função dos materiais a serem usinados

A adoção da HSC pode possibilitar às empresas a obtenção de vantagens competitivas através do aprimoramento dos processos de fabricação, por meio da inovação das tecnologias existentes, para usinagem de componentes e desenvolvimento de novas formas, objetivando o aumento da produtividade e eficiência comercial, reduzindo custos e oferecendo alternativas às necessidades requeridas pelo setor produtivo [Charteen, 1989], preservando a competitividade, a qualidade do trabalho e não interferindo, degradativamente, no meio ambiente.

As características mais relevantes do emprego e utilização de altíssimas velocidades de corte (HSC), se encontram sob os aspectos econômicos e técnicos, entretanto existem alguns fatores de limitação da tecnologia.

Os desgastes das ferramentas e a energia necessária para gerar o processo de corte (momento de energia) é um fator limitante para o uso da HSC, pois, quando uma peça é cortada e o cavaco é gerado, o processo de corte exige uma energia adicional, afim de acelerar a passagem do cavaco pela zona de cisalhamento.

A energia associada a este momento é proporcional à três vezes a magnitude da velocidade de corte, tornando o momento necessário equivalente a mais ou menos a mesma magnitude quando se alcançam velocidades próximas a 30000m/min [Komanduri, 1986], [Nakayama, 1988].

2.2.1 - Algumas Vantagens Econômicas da HSC :

O dimensionamento de todas as vantagens, trazidas pelo uso da HSC, é de natureza complexa e difícil, porém resumidamente pode-se considerar [Blawit, 1996]:

- ☐ incremento da produtividade;
- ☐ maior flexibilidade comercial trazida (pedidos atendidos em menor tempo);
- ☐ redução do ciclo de fabricação;
- ☐ maior flexibilidade no alocamento de mão de obra;
- ☐ aumento da taxa de retorno investida no desenvolvimento do produto.

2.2.2 - Algumas Vantagens Técnicas da HSC :

O conhecimento e aplicação da tecnologia de usinagem HSC, proporciona vários ganhos de ordem tecnológica, tais como [Schulz, 1992]:

- ☐ melhoria da exatidão das peças, especialmente em usinagem de peças delgadas,
- ☐ melhoria nos mecanismos de formação de cavaco;
- ☐ incremento da qualidade superficial das peças;
- ☐ diminuição das forças de corte, proporcional ao aumento das velocidades de corte;
- ☐ melhoria na dissipação de calor do processo.

2.2.3 - Máquinas Ferramentas para Usinagem HSC

Como já observado [Schulz, 1996], dentre os fatores que são decisivos para o êxito da aplicação da usinagem HSC, está o desenvolvimento de novas soluções, não convencionais de concepção de máquinas ferramentas e seus componentes.

As principais características construtivas de máquinas ferramentas, objetos chaves de estudo, são os eixos árvores, carros de translação, guias, fusos, sistemas de controle CNC, sistema de extração de cavaco, refrigeração e itens de segurança [Heisel, 1996].

Atualmente, encontra-se disponível no mercado diferentes tipos de máquinas ferramentas equipadas com fusos de alta frequência de rotação, possibilitando a obtenção de elevadas rotações para as ferramentas de corte empregadas. Estas máquinas possuem ainda como características o aumento significativo das taxas de avanço disponíveis, chegando algumas a ordem de 60 m/min. Algumas destas máquinas, disponíveis comercialmente, se encontram listadas abaixo (Tabela 2.1)

Fabricante - Modelo - País	Máx. N [rpm]	Máx. V_f [m/min]	Pot. Disponível [kW]	CNC
Ex-Cell-O, XHC440, Alemanha	44000	60	40	Ex-Cell O
Nigata, UHS100, Japão	150000	45	55	Fanuc
Rigid ZT 800, Suíça	24000	20	40	Fanuc

Tabela 2.1: Algumas máquinas para HSC comercialmente disponíveis

Mecanismos de aceleração e desaceleração para manutenção de altas taxas de avanço são hoje objetos de pesquisa [Thusty, 1993]. Uma das principais consequências das exigências de taxas de aceleração e desaceleração elevadas é a obrigatoriedade de projetos que contemplem as partes mecânicas móveis destes sistemas, com o mínimo de massa possível, gerando desta forma um baixo momento de inércia, o que ocasiona a facilitação para o aumento destas taxas [Komanduri, 1985].

Todavia, além destas características, as máquinas ainda devem apresentar um conjunto com elevada rigidez dinâmica associada a propriedades que permitam o

amortecimento de vibrações, características as quais normalmente exigiriam grandes massas [Voll, 1991..96].

Visando esta condição, todos os componentes da máquina devem ser produzidos mantendo-se uma relação de peso bastante reduzida [Grönn, 1988], usando novos materiais como o alumínio, o titânio, plásticos reforçados, etc. Alguns destes materiais proporcionarão uma redução do momento de inércia em torno de 40%.

Além do material outros fatores, que podem ser utilizados para este fim são : a otimização da geometria dimensional, a melhoria conceitual do projeto e busca por melhores sistemas de fixação. Existem ainda outras importantes considerações a se fazer sobre as características construtivas destas máquinas, as quais se colocam a seguir.

2.2.3.1. Eixos Árvores, Carros de Translação, Guias e Fusos

O mais importante componente de uma máquina ferramenta para usinagem em altíssimas velocidades de corte é o seu fuso principal, ou eixo árvore, que deve estar integrado a um motor [Tilman, 1996].

A opção pelo uso de motores lineares [Walz, 1996], [Voll, 1999] deve-se ao alto grau de solicitação a que são submetidos os mesmos durante o processo de usinagem HSC, no qual, componentes convencionais, como correias e engrenagens não seriam capazes de transmitir o torque combinado a rotação disponibilizada pelo motor, propriamente.

Somente motores assíncronos trifásicos são utilizados nos projetos destas máquinas [Schmitt, 1996], sendo o estator do mesmo fixado na caixa do motor e refrigerado por um circuito de óleo ou água, associado a um trocador de calor, ambos independentes. A frequência destes motores é normalmente controlada por transformadores de frequência convencionais [Destefani, 1997].

Uma construção compacta e rígida deste motores, resulta em máquinas cujo alcance de frequências de rotação são de ordem superior a 80000 rpm, por exemplo. A construção destes motores tem como um dos pontos chaves, os tipos de rolamentos empregados nos mesmos [Weck, 1999]. Basicamente três tipos de rolamentos são utilizados : rolamentos especiais (cerâmicos, por exemplo) , rolamentos magnéticos ou rolamentos a ar.

Pode-se observar (Figura 2.3). esquematicamente um típico projeto de motor para máquinas HSM (High Speed Machines).

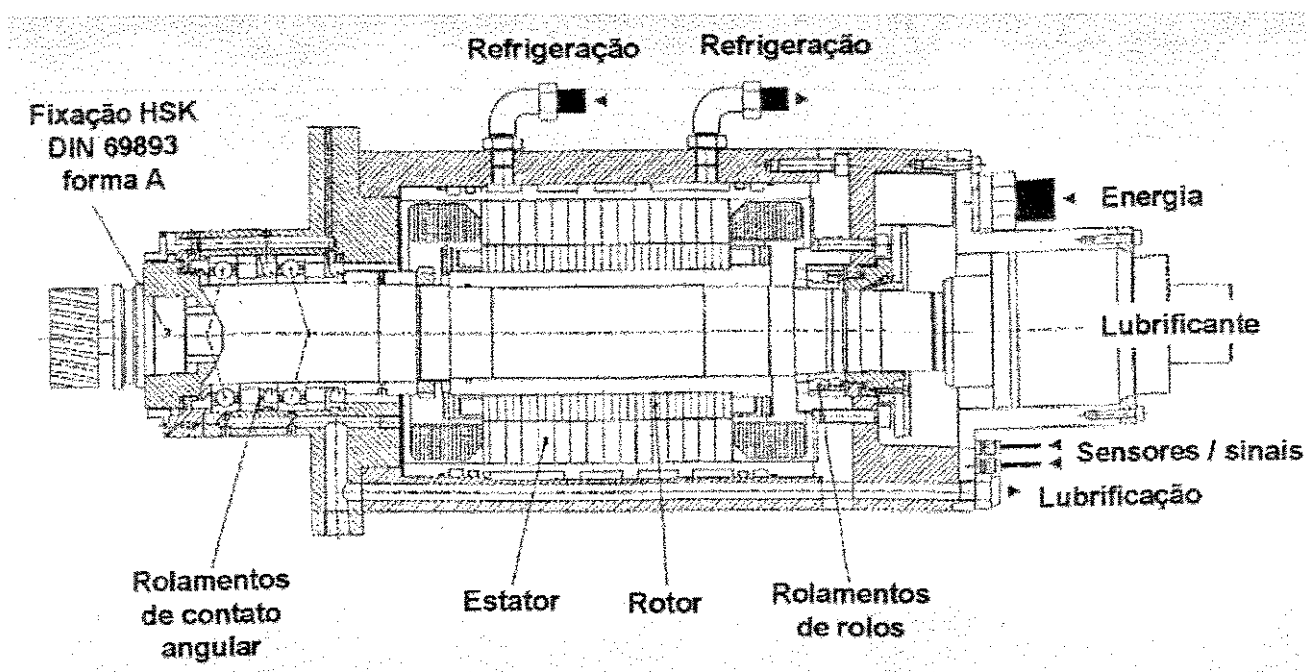


Figura 2.3 : Construção Típica de Motor para Máquinas de HSC

Não se utilizam rolamentos hidrostáticos ou hidrodinâmicos devido a grandes perdas de eficiência, que os mesmos apresentam para estas aplicações [Niemeyer, 1991], [Weck, 1993].

Na maioria dos projetos de motores HSC são utilizados rolamentos angulares de esferas, os quais, suportam velocidades de 150 m/s, com forças altíssimas atuando sobre

suas esferas, nas direções radiais e axiais. Tais forças, se comparadas às forças envolvidas no processo de usinagem, são superiores em módulo de grandeza às mesmas. Devido a esta característica o tamanho dos rolamentos e o diâmetro dos rotores devem se tornar menores [Thusly, 1987], proporcionalmente a frequência de rotação que deseja-se obter do motor a ser construído [Giebner, 1987].

O diâmetro da montagem destes rolamentos será limitado principalmente pela velocidade periférica (força centrífuga) e pelas características do material utilizado [Schmitt, 1996]. Operações contínuas e de grande duração poderão atingir velocidades da ordem de 7500 m/min, já operações de ciclos curtos e alta repetibilidade, poderão utilizar velocidades de até 9000 m/min.

Um conceito diferente, com a utilização de rolamentos a ar também pode ser adotado. Neste caso, o rotor é envolto por uma película de ar. As principais vantagens de rolamentos a ar são o longo tempo de vida e pequenas perdas que os mesmos ocasionam, devido à quase inexistência de atritos. Em adição a este fato, ainda, valores elevados de frequência de rotação são alcançados.

Todavia, existem desvantagens em sua aplicação, relacionadas basicamente ao custo dos mesmos pelo lado financeiro, e a baixa rigidez do conjunto montado, não suportando sobrecargas, pelo lado tecnológico.

Por fim, ainda, pode-se optar pelo uso de rolamentos magnéticos ativos (AMB), cujas aplicações iniciais datam de início dos anos setenta. O princípio de funcionamento é a sustentação do rotor por forças magnéticas nas direções radiais e axiais. A posição do rotor é permanentemente monitorada por sensores, os quais, através da emissão de controles, garantem o ajuste dos movimentos do rotor, sincronizando-os [Paiha, 1989].

As principais vantagens de aplicação destes rolamentos são as altíssimas frequências de rotação que os mesmos podem suportar. Para efeito de comparação, o valor da rotação

máxima nos rolamentos em motores de máquinas para usinagem HSC é função de uma constante (K), a qual depende do tipo de rolamento a ser empregado, e cuja qual é diretamente proporcional ao diâmetro do mesmo (D_{rol}) multiplicado pela máxima frequência de rotação suportada. A equação utilizada para o cálculo, é:

$$N_{motor} \times D_{rol} = K \quad (2.1)$$

Na tabela 2.2, segue exemplos para diferentes tipos de rolamentos, com diâmetros de 60mm, e a frequência máxima de rotação assegurada pelos mesmos.

Tipo de Rolamento	Valor K ($N_{motor} \times D_{rol}$)	Máxima Frequência de Rotação [rpm]
Convencional	$1,3 \cdot 10^6$	21600
Magnético	$4,0 \cdot 10^6$	67666
Cerâmicos	$2,5 \cdot 10^6$	41600

Tabela 2.2 : Frequência de Rotação Máxima para Rolamentos

Em relação às guias, em máquinas para usinagem HSC praticamente todos os componentes móveis possuem guias lineares, por apresentarem redução do coeficiente de atrito e garantias de melhor precisão, com a utilização de rolos e esferas. E em consideração a este fato, pode-se afirmar que a opção de fusos de esferas recirculantes ocasiona a redução de folgas e do próprio momento de inércia, aumentando o avanço por rotação em até três vezes [Voll, 1996], podendo nestes casos atingir até 100 m/min.

As tecnologias dos servo-motores de acionamento conjugado aos fusos de esferas recirculantes apresentam ótimas características dinâmicas, oferecendo controles de reversão com baixas constantes de tempo e momentos de torque elevados também em pequenos espaços de tempo [Tönshoff, 1999].

2.2.3.2 Sistemas de Controle CNC

Devido às elevadas taxas de avanço envolvidas em máquinas para usinagem em altíssima velocidade de corte [Noaker, 1995], e o grande volume de informação que os mesmos devem processar as exigências quanto à velocidade de funcionamento dos processadores do comando são bastante severas.

Os atuais sistemas CNC são extremamente lentos [Hock, 1996], para as taxas de avanço requeridas, visto que, o tempo de processamento da sentença de comando é mais alto do que o tempo de acesso aos pontos programados para a trajetória de corte [Dumur, 1994], pois, as complexas curvas geradas pelos programas de CAD/CAM devem ser transformadas em percursos de ferramenta através de aproximações baseadas em segmentos de retas entre pontos, dentro de uma faixa de tolerância. Quanto menor a faixa de tolerância, maior será o número de blocos NC exigido para o comando linearizar o percurso [Distler, 1996].

Além disso, os atuais programas CNC utilizam uma quantidade de linhas de comando bastante elevada, tendo que se programar muitos pontos de trajetória. Um típico bloco de processamento demora em média de 2 a 8 ms para transformar o comando em movimento.

A consequência direta desta lentidão dos atuais CNC é a parada das máquinas, a espera do processamento da sentença de comando. Logo, os comandos em máquinas para usinagem HSC devem possibilitar o processamento de muitas sentenças à frente dos movimentos das máquinas.

Estas máquinas exigem controles que processem as informações, e as transformem em comando em 0,05 ms [Glantschnig, 1990]. Tipicamente os controles convencionais conseguem processar 64 blocos de informação a frente, variando cada modelo a quantidade de bits habilitadas por bloco. Porém, alguns já testados controles CNC para

máquinas de altíssima velocidade de corte, conseguem processar até 8000 blocos de informações antecipadamente, função conhecida popularmente como “*look ahead*”.

Uma das soluções encontradas, para viabilizar a introdução deste novo conceito de CNC é a utilização da interpolação flexível, conhecida também como NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*) recurso este, que agrupa diversas sentenças de interpolação linear em uma única sentença, reduzindo, assim, o tempo de resposta para as acelerações e desacelerações decorrentes da modificação da trajetória e da alteração das taxas de avanço.

Outras soluções buscam enfrentar a limitação atual dos comandos CNC, situada na interface padrão utilizada para transferência de dados do comando para o controle de movimentos da máquina. Atualmente a grande maioria dos CNC disponíveis utilizam interfaces, que permitem a transferência de 960 caracteres por segundo, o que se constitui um severa limitação em operações que exijam uma grande alteração de taxas de movimento e larga quantidade dos mesmos, em curto espaço de tempo, caso típico do fresamento em altíssima velocidade de corte de moldes e matrizes [Altan, 1993].

2.2.3.3 Sistemas de Extração de Cavacos, Refrigeração e Segurança

A eliminação dos cavacos é de grande importância em condições severas de usinagem, tais quais ocorrem em máquinas para usinagem HSC. Afim, de se facilitar a remoção dos cavacos muitas destas máquinas possuem sistemas que possibilitam fixar a peça verticalmente, facilitando a retirada dos cavacos da área de corte, mesmo que por gravidade.

Em relação aos sistemas de refrigeração, a única grande alteração passa a ser a obrigatoriedade dos mesmos serem submetidos à altas pressões.

Como consequência direta das altas velocidades envolvidas no processo de usinagem HSC, grandes volumes de cavacos são removidos e grande vazão de fluidos de refrigeração (em processos onde se utilizem dos mesmos), e de corte ocorrem, de tal forma que torna o encapsulamento do local de trabalho quase que obrigatório.

Neste aspecto, proteções contra a quebra de ferramentas, são de extrema prioridade, fazendo com que as cabines de encapsulamento sejam resistentes o suficiente para absorver a energia de impacto, caso existam quebras ou lançamento de componentes em altíssimas velocidades. Além disso, alguns pesquisadores já reportaram níveis de ruídos de até 97 dB [Palleau, 1992].

Enfim, apesar dos pré requisitos vistos anteriormente acrescerem em um primeiro instante os custos da implantação da tecnologia da HSC, os resultados alcançados pelo emprego das máquinas para usinagem HSC justifica sua opção. A redução de tempo obtida com as mesmas é extremamente significativa [Schulz, 1997].

Hoje o mercado de máquinas para usinagem HSC se apresenta com crescimento extremamente promissor, onde todas as máquinas fabricadas são atualmente vendidas, requerendo espera para atendimento de novas encomendas. No mundo existem atualmente por volta de 200 máquinas deste tipo [Finzer, 1997] em uso comercial, estando em sua maioria concentrada na Europa e Ásia.

Além das máquinas o emprego de novas ferramentas nestes processos se faz necessário e isto envolve desde o design até a cobertura e material das mesmas, conforme será visto a seguir.

2.2.4 - Ferramentas para Usinagem HSC

2.2.4.1 - Materiais de Ferramentas para HSC

O conhecimento dos fenômenos de desgaste [Kramer, 1980] no material de corte selecionado para utilização em ferramentas é um dos principais fatores para seleção dos mesmos [Rao, 1977].

Em usinagem convencional o desgaste por abrasão, se apresenta como o mais preocupante dentre os possíveis. Na usinagem com altíssimas velocidades de corte, o desgaste por abrasão torna-se apenas mais um componente a se considerar.

Em usinagem HSC, o aumento da temperatura causada pelo aumento da velocidade de corte, tende a acelerar a ocorrência de outros fenômenos de desgaste, entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão e a oxidação [Lewis, 1993]. Os materiais mais apropriados para aplicação em usinagem HSC são os diamantes policristalinos para materiais não ferrosos (especialmente alumínio) e nitreto cúbico de boro [Sentuko, 1986], para materiais ferrosos.

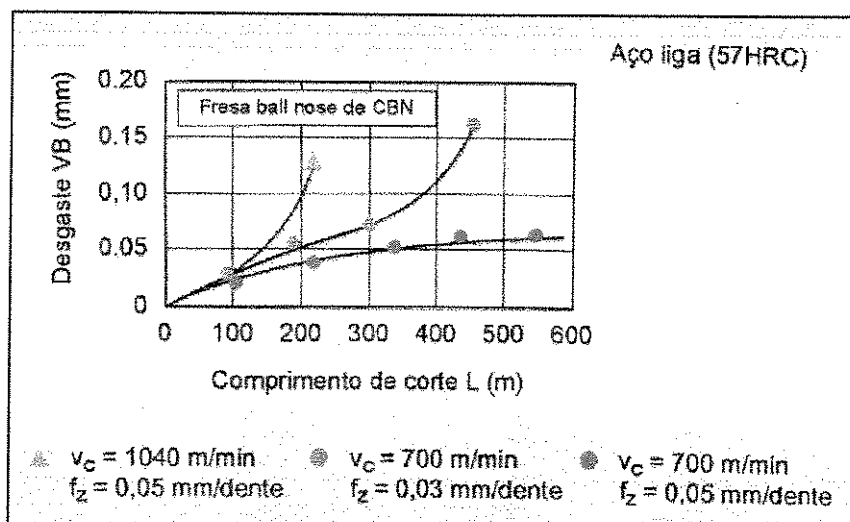


Figura 2.4 : Performance de ferramentas de CBN em HSC

Tais materiais apresentaram bons resultados (Figura 2.4) em termos de vida de ferramenta, rugosidade da peça após a usinagem e custo, propriamente dito.

Em relação às possíveis coberturas a se aplicar em usinagem em altíssima velocidade de corte pode-se afirmar, que as fabricadas com processos de deposição física a vapor (PVD) podem resistir a altas temperaturas de trabalho, possuindo elevada dureza e resistência ao desgaste. Em alguns testes realizados, pode-se observar a predominância de coberturas PVD, como o nitreto de alumínio titânio (TiAlN). Uma ilustração desta afirmação pode ser verificada na figura 2.5, mostrada a seguir onde tem-se o comprimento usinado (torneamento de aço 42CrMo4; com $v_c = 200\text{m/min}$, $f = 0,8\text{ mm/min}$) em função do tipo de cobertura utilizado, para diversos fabricantes (A,B,C,D,E,F).

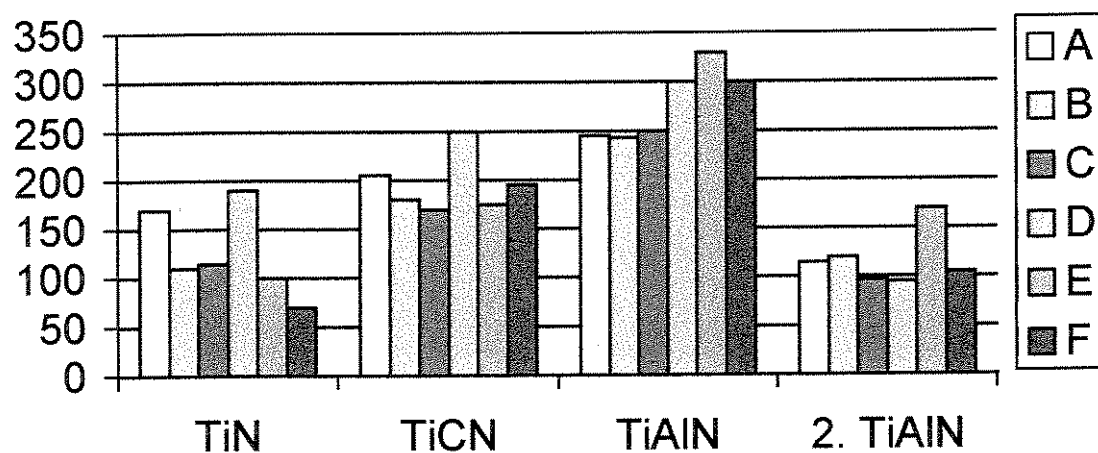


Figura 2.5 : Performance de Coberturas em HSC [metros usinados]

Os desgastes apresentados pelos mesmos, demonstram que possuem uma maior resistência à abrasão em altas temperaturas, em comparação às pastilhas recobertas por carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (Ti[C,N]), óxido de alumínio (Al_2O_3) e materiais cerâmicos. Este fato é de grande importância, visto que na usinagem HSC, as temperaturas são extremamente elevadas devido às altíssimas velocidades de corte empregadas e o atrito entre peça e ferramenta.

2.2.4.2 Geometria da Ferramenta

Assim como na usinagem convencional, também na usinagem HSC os ângulos da ferramenta influenciam a magnitude dos esforços de corte durante a usinagem. Pode-se observar na figura 2.6 o resultado da variação do ângulo de saída efetivo na usinagem HSC na força de corte. Assim como este, os demais ângulos da ferramenta ao sofrerem variações também podem vir a influenciar os resultados da usinagem.

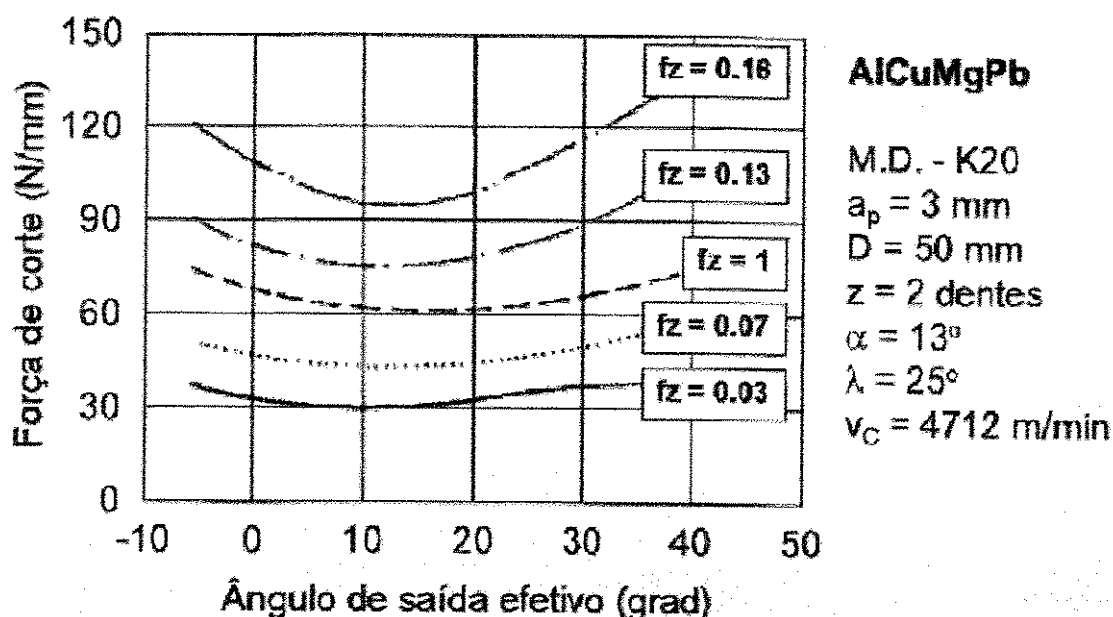


Figura 2.6 : Variação do Ângulo de Saída x Força de Corte

Alguns testes vêm sendo realizados no PTW (Institut für Produktionstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen), em Darmstadt, Alemanha, para se determinar quais seriam alguns valores recomendáveis para otimização de geometrias de ferramentas para usinagem HSC. Apesar dos mesmos estarem relacionados às operações de fresamento e fresotorneamento em HSC, espera-se poder recomendá-los de uma forma genérica.

2.2.4.3 Generalidades do Projeto de Ferramentas para HSC

Algumas pesquisas realizadas pelo PTW têm sugerido novas soluções para o projeto de ferramentas de corte para HSC, através da utilização de métodos de cálculos de elementos finitos, e, inferem que pode ser um grande problema em ferramentas para usinagem HSC a tensão acumulada nos entalhes das ferramentas devido aos cavacos armazenados em seus bolsões. Estes bolsões, usualmente se concentram principalmente na região de fixação das pastilhas.

Em função destas observações alguma recomendações genéricas podem ser consideradas no desenvolvimento de projeto de ferramentas para usinagem em HSC. São elas :

- ☐ preferência por materiais dúcteis;
- ☐ redução de bolsões de armazenamento de cavaco;
- ☐ redução dos efeitos causados por entalhes através do reprojetado das arestas de corte;
- ☐ minimização da massa dos componentes do ferramental;
- ☐ ajustar o centro de massa das ferramentas sobre o menor raio possível

As pastilhas de corte a serem usadas em HSC devem suportar elevadas temperaturas [Loladze, 1978], o que conduz àquelas resistentes aos desgastes, nestas condições, quais sejam, diamantes policristalinos e nitreto cúbico de boro policristalino.

Outrossim, também, atenção deve ser dada aos porta ferramentas, que por atuarem em elevadas velocidades (caso do fresamento HSC e do fresotorneamento HSC), devem possuir exatidão suficiente para evitar qualquer folga causadora de vibração, esforços radiais, axiais, com a consequente perda de tolerância das peças.

As pesquisas que estão sendo conduzidas, na área, apresentam um progresso contínuo e procuram suprir os custos envolvidos, com a redução dos custos relacionados aos processos, com a diminuição dos tempos, sequenciamento, eliminação de etapas, etc.

2.2.5 - Sistemas de Fixação Ferramenta - Máquina em HSC

Outro fator de bastante relevância em usinagem HSC são os mecanismos de fixação das ferramentas, onde a rigidez deve considerar o alto nível de solicitações aos quais os mesmos estão submetidos [Agapiou, 1995].

A interface ferramenta - eixo árvore é o ponto onde ocorre a maior concentração de esforços entre a peça e a máquina [Tobias, 1964].

Esta interface deve garantir, além das condições usuais de rigidez e requisitos gerais de corte (transmissão de torque, por exemplo), ótimas condições geométricas (batimento, concentricidade) e principalmente possibilitar troca rápida de ferramentas, sem causar qualquer prejuízo na resistência do material às forças centrífugas, que atuam sob a mesma, dilatando o eixo mais do que a ferramenta, ocasionando desta maneira uma deformação axial nesta interface [Rondé, 1994].

Uma possível solução para este fato é o uso de superfícies limitantes como flanges [Weck, 1994], já contempladas pela norma DIN 69893. Este sistema já provou em testes, suportar até quatro vezes o esforço gerado na usinagem. Desta maneira está atendido também o quesito segurança.

Este sistema apresenta um cone 1:10 e canais correspondentes a série ISO tamanhos 30, 40, 45 e 50 (Figura 2.7). A sua diferenciação construtiva está na metade no uso da metade da massa de um cone ISO, resultando boa rigidez do conjunto, além da transmissão de torque corresponder plenamente às exigências de solicitação. Outra característica

própria deste sistema é o aumento da pressão de contato proporcionalmente ao aumento da frequência de rotação, que acabam por atuar nas superfícies internas do cone.

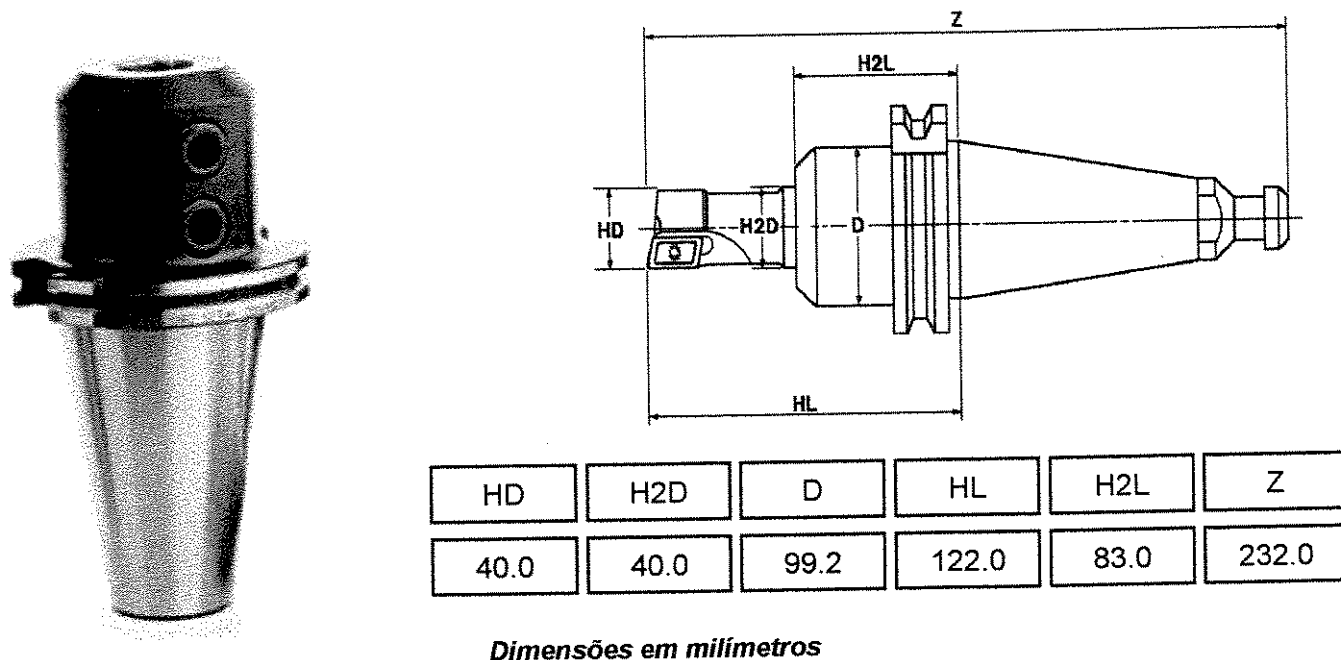


Figura 2.7 :Conjunto de fixação da ferramenta

2.3. - Fundamentos do Fresotorneamento Ortogonal

2.3.1 - Conceituação e Generalidades do Fresotorneamento

Dentro da HSC, o fresotorneamento coloca-se como opção frente a outros processos já maturados do ponto de vista tecnológico e financeiro, caso do torneamento e retificação [Lehmann,1991], [Derstroff, 1997], além disso, o mesmo não se limita às inflexibilidades inerentes aos processos anteriores [Sorge, 1983]. O fresotorneamento é ainda, um processo ecologicamente mais sustentável [Young, 1997] em comparação aos demais

processos de usinagem e em particular à retificação, e sua viabilização tecnológica e comercial torna-se importante de uma maneira ampla para o país.

Uma vez que o processo, ora denominado de fresotorneamento, utiliza como ferramenta de usinagem a fresa, interessante se faz, inicialmente ver os conceitos relativos ao torneamento e ao fresamento.

Torneamento é o processo de usinagem com movimento de corte geralmente circular e qualquer, num ciclo completo, de maneira que a direção de avanço permanece perpendicular à direção de corte. O eixo de rotação do movimento de corte (eixo de rotação da peça) mantém sua posição em relação ao movimento de avanço (movimento da ferramenta)[DIN 8589(a), 1982] (Figura 2.8)

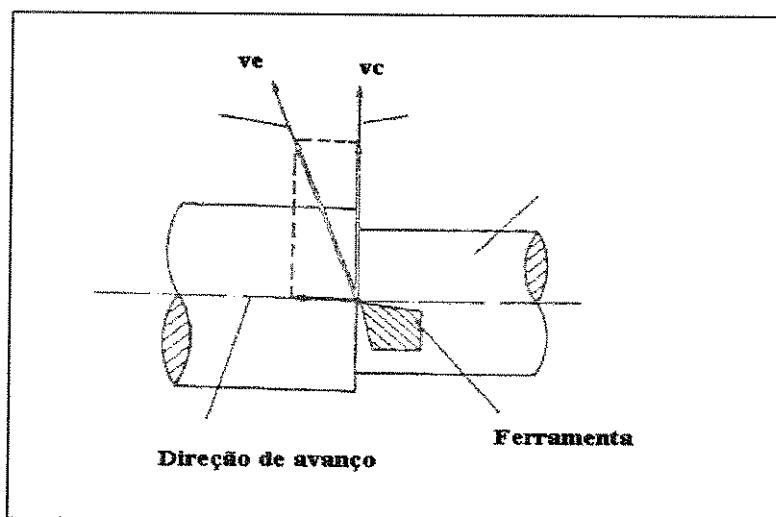


Figura 2.8 : Processo de torneamento

Fresamento é o processo de usinagem executado com ferramentas rotativas, geralmente multicortantes, objetivando gerar uma superfície qualquer (Figura 2.9). Para tanto são utilizados movimentos conjugados de corte e avanço, sendo este último perpendicular ou inclinado em relação ao eixo da ferramenta [DIN 8589(b), 1982]

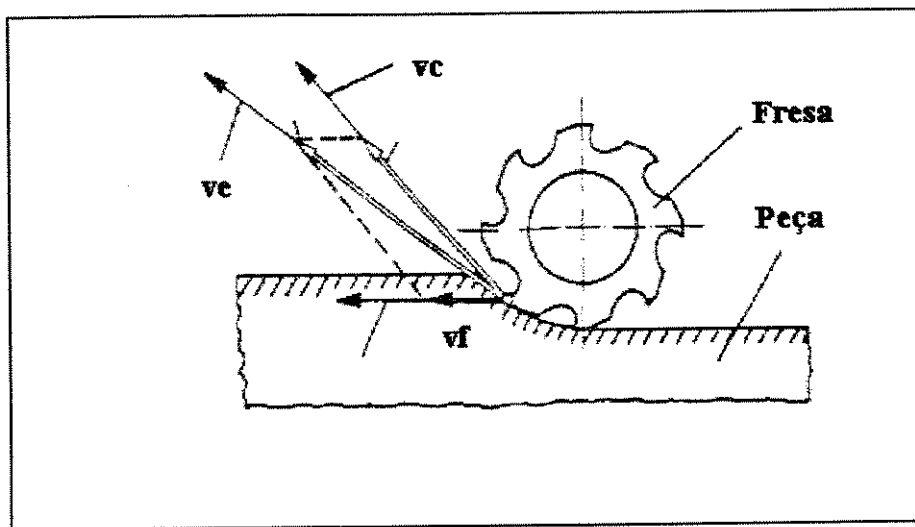


Figura 2.9 : Processo de fresamento tangencial

Ao contrário do processo de torneamento, a velocidade de corte, no fresamento resulta da rotação da ferramenta. O processo de fresotorneamento ortogonal, embora apresente movimento circular da peça, utiliza, como ferramenta de corte, uma ferramenta rotativa. Devido a este fato, este processo conjugado, movimentos circulares da ferramenta e peça, passou a ser denominado de fresotorneamento.

Há de ser levado em conta, todavia, que não deve ser confundido com o fresamento cilíndrico, definido pela norma DIN 8589, parte 3.

O fresamento cilíndrico (Figura 2.10) é o processo de fresamento no qual, as arestas principais de corte, geram, em função do movimento circular de avanço, uma superfície cilíndrica. O eixo de rotação da peça, bem como a superfície obtida são paralelos ao eixo de rotação da ferramenta.

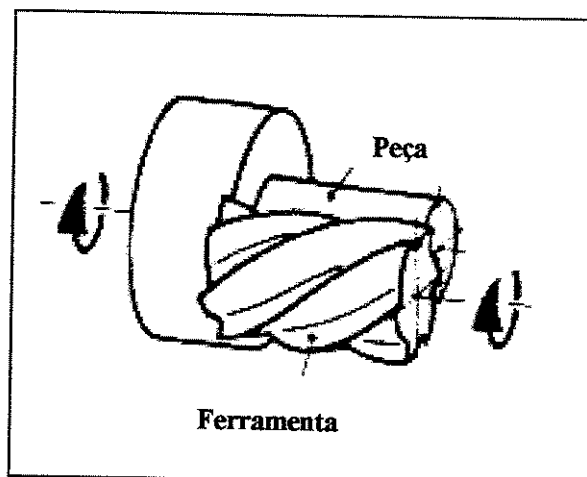


Figura 2.10 : Processo de fresamento cilíndrico

A Figura 2.11 mostra o processo de fresotorneamento ortogonal, onde nota-se que, a superfície usinada obtida é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta, ao contrário do fresamento cilíndrico, onde a superfície usinada obtida é paralela ao eixo de rotação da ferramenta.

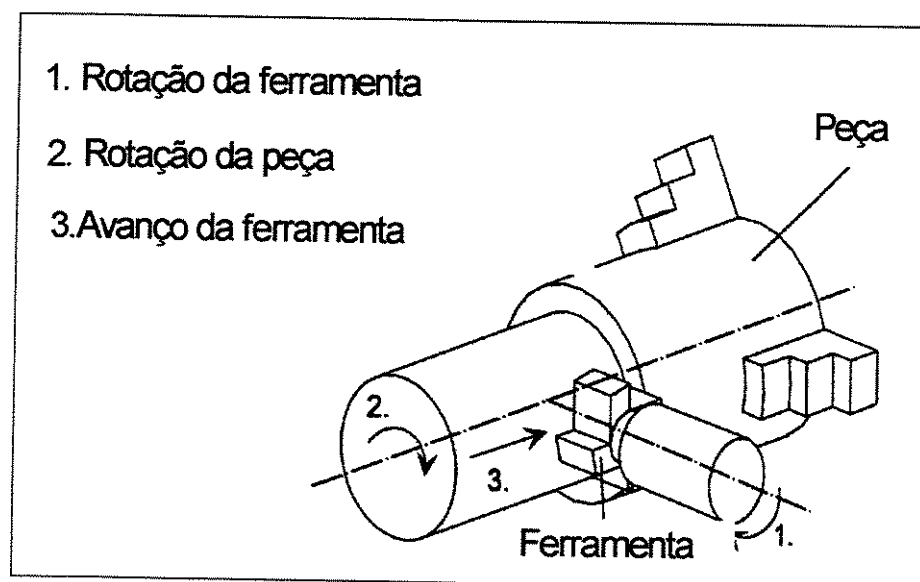


Figura 2.11 : Processo de fresotorneamento ortogonal

O fresotorneamento pode então ser dividido em dois métodos básicos (Figura 2.12), o ortogonal, onde o eixo da ferramenta é disposto de forma ortogonal em relação ao eixo da peça, e o axial, onde o eixo da ferramenta avança paralelamente ao eixo de rotação da peça.

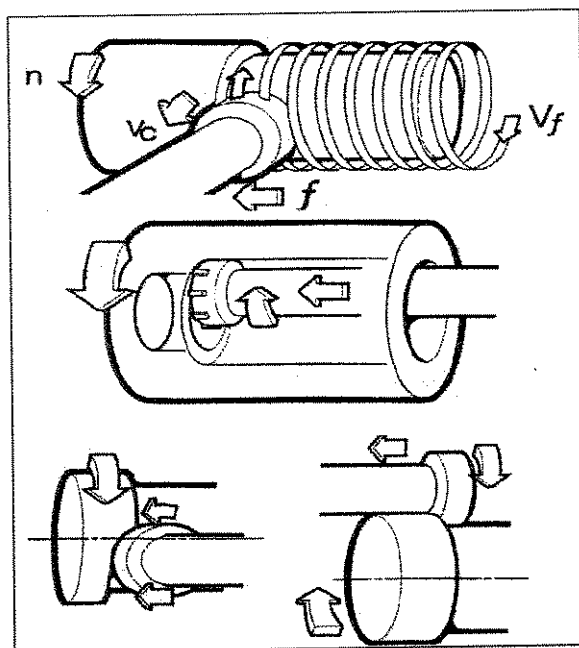


Figura 2.12 : Fresotorneamento ortogonal, coaxial, interno e externo

Pode-se dizer que, o fresotorneamento teve seu início por volta do final do século XIX, quando um torno manual foi alterado, se adaptando ao mesmo uma ferramenta giratória no local do carro porta-pastilhas, conseguindo-se, desta forma, melhorias significativas em relação à quebra das ferramentas[Tilghman, 1889]. Notou-se também, a redução da temperatura da peça, durante a usinagem.

Nos anos cinquenta surgiram novas experiências com o processo, mas desenvolvimentos significativos foram feitos a partir dos anos oitenta.

O processo sofreu uma abordagem científica mais profunda e teve seu emprego industrial viabilizado [König e Wand 1985] ; [Svennigson, 1989]. Nos anos noventa, o fresotorneamento é provido de um ganho competitivo extremamente importante, ao começar a ser empregado com velocidades na zona de transição e em altíssimas velocidades de corte [Sahm, 1996].

Ensaio de usinagem, utilizando-se o processo de fresotorneamento, no Brasil, foram realizados pela primeira vez, de maneira cientificamente adequada, por Novaski e Lisboa [Lisboa, 1996] no ano de 1995. Estes experimentos tinham como principal finalidade iniciar estudos com rigor científico, sobre a real possibilidade de emprego do fresotorneamento, como processo de usinagem de larga escala.

Deve-se ressaltar que, a precariedade dos equipamentos utilizados dificultou uma análise mais segura dos resultados encontrados, ficando o mérito destes experimentos, calcado em seu viés tecnológico de construção dos equipamentos que possibilitaram a realização destes experimentos, apesar da falta de rigidez do conjunto máquina ferramenta utilizado, onde observa-se (Figuras 2.13 à 2.15) que até o cabeçote fresador foi adaptado, comprometendo desta maneira quesitos como rigidez do conjunto e fixação da ferramenta, além das condições operacionais (velocidade de corte da ferramenta, avanço, etc).

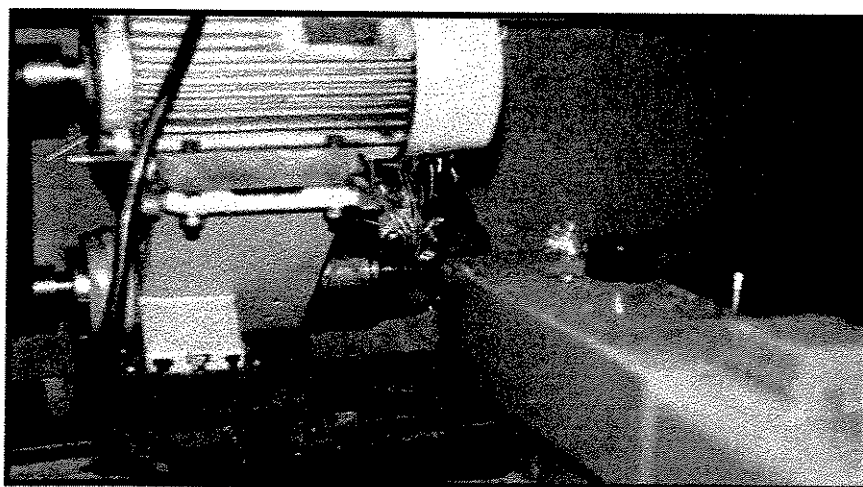


Figura 2.13 : Aspecto do cabeçote fresador em usinagem

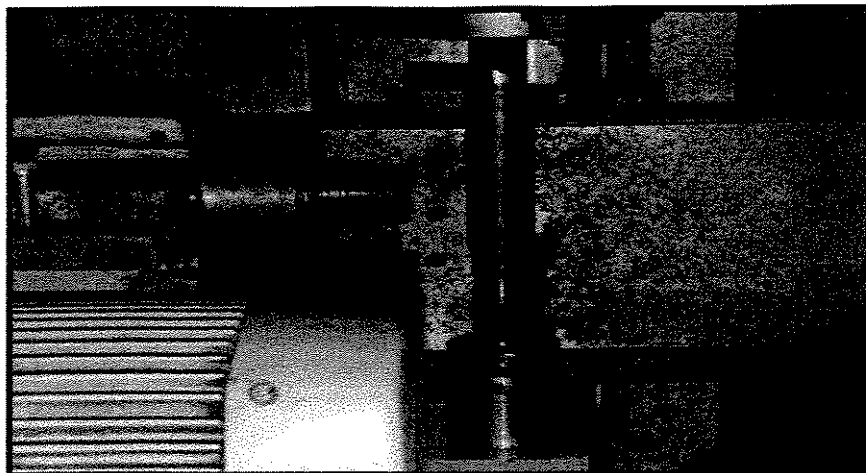


Figura 2.14 : Aspecto da disposição ortogonal entre peça e ferramenta

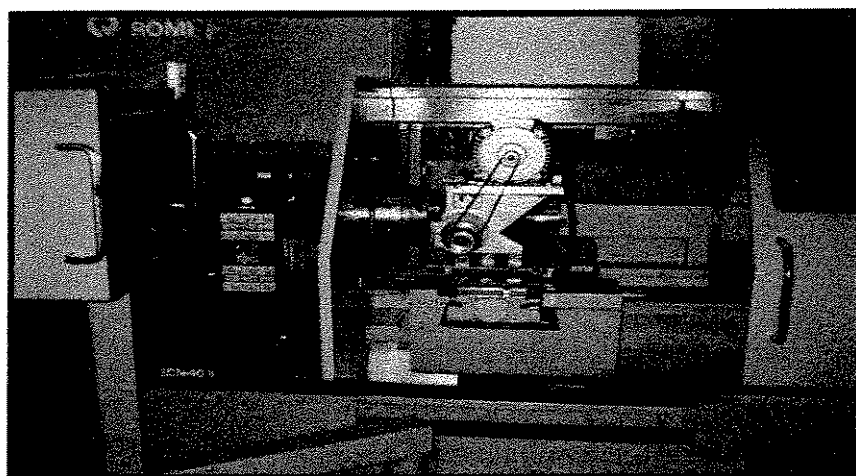


Figura 2.15 : Aspecto da máquina com o cabeçote fresador em usinagem

O processo de fresotorneamento em altíssimas velocidades de corte pode, dependendo do caso, ser uma alternativa ao torneamento e à retificação, até então processo mais divulgado para se alcançar elevada qualidade de trabalho e baixas rugosidades. Este processo (a retificação) é caro e inflexível, trazendo consigo, problemas de custos, velocidade de manufatura e danos ao meio ambiente.

O emprego do fresotorneamento depende basicamente, das máquinas disponíveis para o processo, das ferramentas e também dos tipos de operações de usinagem a se utilizar, além é claro do material da peça a ser usinada. O mesmo pode oferecer possibilidades de ganhos de produtividade através da remoção de grandes quantidades de material, redução de custos, ao eliminar processos anteriores e posteriores ao fresotorneamento.

O fresotorneamento oferece, na usinagem final de peças, algumas vantagens em relação à retificação e ao torneamento.

Pode-se considerar que, o fresotorneamento apresenta a vantagem de ser um processo à seco, não prejudicial ao meio ambiente, flexível, utilizado tanto para acabamento como desbaste em várias possibilidades geométricas de peças, propicia ainda, maiores taxas de remoção de material por unidade de tempo, ou seja é mais rápido, baixas temperaturas e altíssimas velocidades de corte, eliminando as restrições tecnológicas dos processos de torneamento e retificação, tornando-se desta forma bastante competitivo sob o aspecto econômico.

No fresotorneamento, a peça e a ferramenta são providas de movimentos de rotação, sendo que, as elevadas velocidades de corte possíveis são alcançadas pelas altíssimas rotações fornecidas pelo cabeçote fresador.

O fresotorneamento pode ser aplicado, em princípio, com algumas vantagens, nos casos em que[S.A., 1994]:

- ☐ é difícil o controle de cavacos provenientes da usinagem de grandes diâmetros, em materiais dúcteis, uma vez que, o fresotorneamento produzirá cavacos curtos, em qualquer material;
- ☐ usinagem em peças com estruturas instáveis (peças delgadas) ;

- ☐ necessidade de se ter uma vida da ferramenta que dure pelo menos a usinagem completa de um componente;
- ☐ operações de acabamento em peças de grandes diâmetros, tratadas termicamente, e não possíveis de serem usinadas por torneamento, pois o fresotorneamento permite que a rotação da peça seja pequena.

Além disto, apresenta as seguintes características[Schulz, 1990]:

- ☐ possibilita elevadas velocidades de corte, superando os fatores limitantes do torneamento e fresamento, como por exemplo, a força centrípeta na placa e ferramenta simultaneamente;
- ☐ há pequenas oscilações de frequência no eixo árvore, devido à baixa rotação da peça, possibilitando a usinagem de paredes finas, sem deformações por forças centrípetas.

2.3.2 - Princípios Básicos do Fresotorneamento

O princípio do fresotorneamento é obtido através dos movimentos relativos do cabeçote fresador e peça simultaneamente, conforme se observa na Figura 2.16. A velocidade de corte (v_c) é dada pela velocidade periférica da fresa. A rotação da peça (n_p), em combinação com o avanço axial da ferramenta (f), resulta na velocidade de avanço (v_f). Portanto, o fresotorneamento é um processo de usinagem composto por dois movimentos: o de corte e o de avanço, sendo que, o movimento de avanço é subdividido em movimentos axial (devido ao deslocamento linear da ferramenta) e rotacional (devido à rotação da peça).

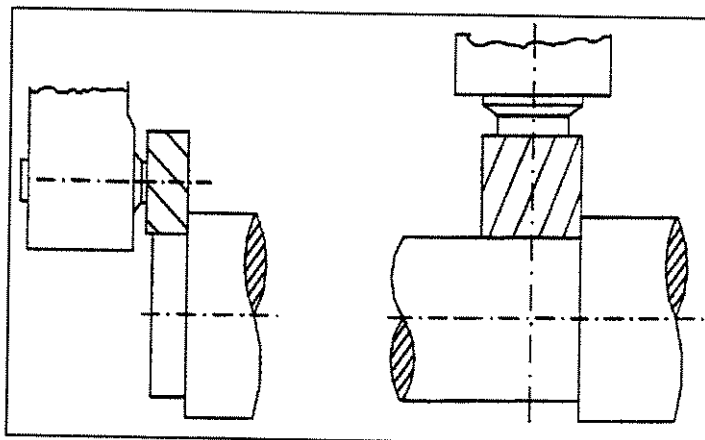


Figura 2.16 : Fresotorneamento axial e ortogonal

O fresotorneamento ortogonal pode ser conduzido de maneira centralizada ou excêntrica (Figura 2.17)

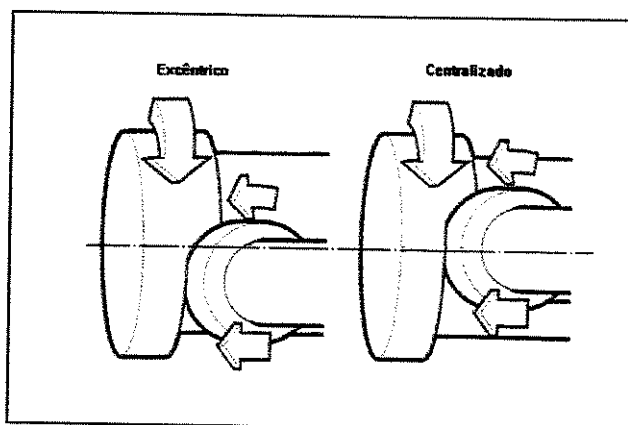


Figura 2.17: Fresotorneamento ortogonal excêntrico e centralizado

O fresotorneamento centralizado faz com que a componente axial do avanço (f) seja limitada pelo comprimento da aresta cortante (l) e ao se empregar o método excêntrico, pode-se utilizar avanços (axiais e por dente) maiores, que atingem seus valores máximos na configuração mostrada na Figura 2.18, caso C, permitindo a retirada de maiores volumes de cavaco. Para a excentricidade mostrada na Figura 2.18-C ($e = d_f/2 - l$), pode-se calcular de maneira aproximada o avanço máximo possível, como sendo [König , 1984] :

$$f_{\text{máx.}} = 2 \cdot [(d_f/2)^2 - l^2]^{1/2} \quad (2.2)$$

Aumentando-se ainda mais a excêntrica (Figura 2.18-D), o avanço máximo possível de ser empregado volta a um valor mínimo. Diretamente dependente do valor da excentricidade é o valor do raio do contorno (R) (Figura 2.18).

No modo centralizado, o raio obtido na peça é a reprodução do próprio raio da ferramenta, que aumenta de valor à medida que aumenta a excentricidade.

Dos quatro casos apresentados na Figura 2.18, o caso "C" é, portanto o que possibilita a maior taxa de remoção de material.

Desta forma, tem seu emprego mais recomendado para peças de dimensões grandes, onde se necessita alta taxa de remoção de material [Strate, 1984].

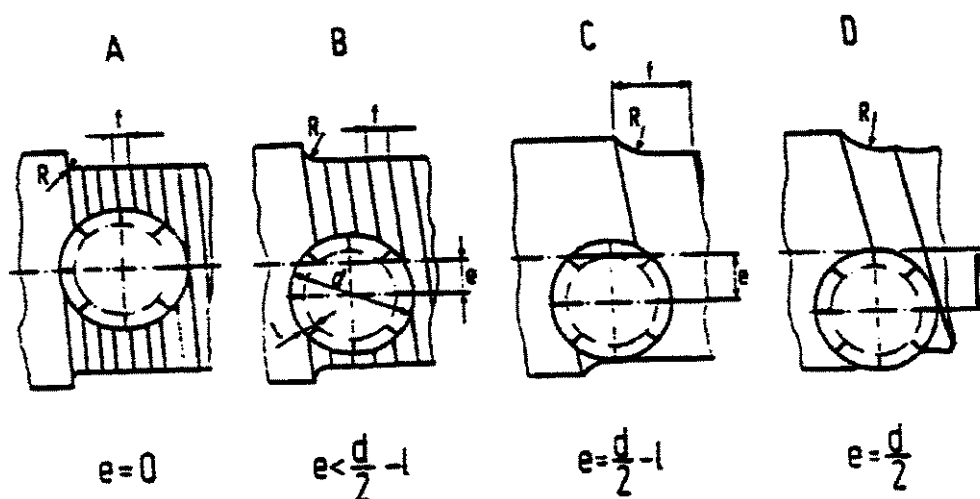


Figura 2.18 : Possibilidades de arranjo no fresotorneamento ortogonal

Portanto, o avanço axial pode ser aumentado, até alcançar um valor igual ao comprimento projetado da aresta secundária na peça, sem que a mesma perca sua forma cilíndrica. Neste caso, atinge o seu valor máximo, porque o contato entre a peça e as arestas secundárias, alcança seu comprimento máximo.

2.3.3 - Fundamentos Teóricos do Fresotorneamento Ortogonal

O estudo da cinemática e da dinâmica do processo de fresotorneamento se mostra bastante complexo, já que o mesmo agrupa movimentos relativos entre a peça e a ferramenta simultaneamente (Figura 2.19). Em função deste fato associam-se elementos de análise análogos ao fresamento e torneamento, empregados ao fresotorneamento, para a elaboração de seus fundamentos teóricos elementares.

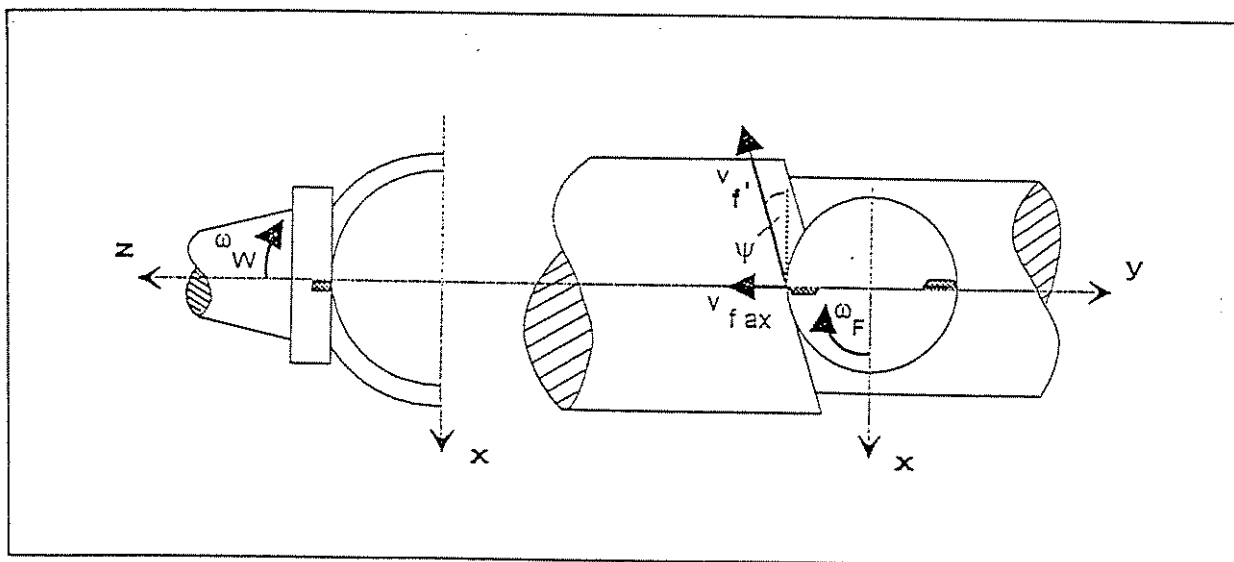


Figura 2.19 : Cinemática do Fresotorneamento Ortogonal

2.3.3.1 - Velocidade de Corte

A velocidade de corte no fresotorneamento é determinada pela rotação da ferramenta com uma determinada frequência n_f [1/min] e pelo diâmetro d_f [mm], da fresa empregada na usinagem, analogamente ao cálculo de velocidade de corte do fresamento. A mesma se calcula através da seguinte equação :

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_f \cdot n_f}{1000} \quad (2.3)$$

2.3.3.2 - Velocidade de Avanço

A cinemática do movimento de avanço é determinada através da combinação do movimento de rotação da peça em relação à ferramenta, que esta também sendo rotacionada, e do movimento linear da ferramenta paralelo ao eixo de rotação da peça usinada.

Assim, o movimento de rotação da peça com o seu raio teórico de acabamento ($d_p/2 - a_p$) resulta na velocidade de avanço tangencial da ferramenta e pode ser mensurado através da seguinte equação :

$$v_{f \tan} = \omega_p \cdot \left(\frac{d_p}{2} - a_p \right) \quad (2.4)$$

onde ω_p é a velocidade angular da peça.

O outro componente do avanço é obtido através do movimento linear da ferramenta ao longo do eixo de rotação da peça resultando na velocidade de avanço axial (v_{fax}).

Através da combinação destas duas componentes, ou seja, a velocidade do avanço tangencial e a velocidade do avanço axial da ferramenta, obtêm-se a equação que possibilita calcular a velocidade do avanço real empregado durante a usinagem :

$$v_f = \sqrt{v_{fax}^2 + v_{tan}^2} = \sqrt{v_{fax}^2 + \omega_p^2 \cdot \left(\frac{d_p}{2} - a_p \right)^2} \quad (2.5)$$

A direção da velocidade do avanço calculada, é obtida através do ângulo de posição do dente (ψ) para o fresotorneamento (DIN 8589), formado pelo desvio do vetor velocidade de avanço real v_f , em relação ao eixo ortogonal ao eixo de rotação da ferramenta (x). Este ângulo (ψ) é calculado através das componentes axiais e tangenciais de avanço (v_{fax} e v_{tan}), onde :

$$\tan \psi = \frac{v_{fax}}{v_{tan}} = \frac{v_{fax}}{\omega_p \cdot \left(\frac{d_p}{2} - a_p \right)} \quad (2.6)$$

Além das velocidades de avanço tangencial e axial, o processo de fresotorneamento apresenta ainda a velocidade do avanço radial (v_{frad}), embora a mesma tenda a ser bastante próxima da velocidade do avanço por dente da fresa.

Todavia, o seu equacionamento deve considerar a possibilidade da existência de excentricidade no processo, o qual irá alterar este avanço.

Para o cálculo do mesmo deve-se considerar, que as arestas de corte dos insertos da fresa descrevem um raio no percurso de movimento da ferramenta, bem como levar-se em consideração a rotação da ferramenta, através do ângulo formado pelos insertos e o eixo ortogonal ao eixo de giro da ferramenta, conforme mostrado na Figura 2.20.

$$v_{frad} = \omega_p \cdot (r \cdot \cos \varphi + e) \quad (2.7)$$

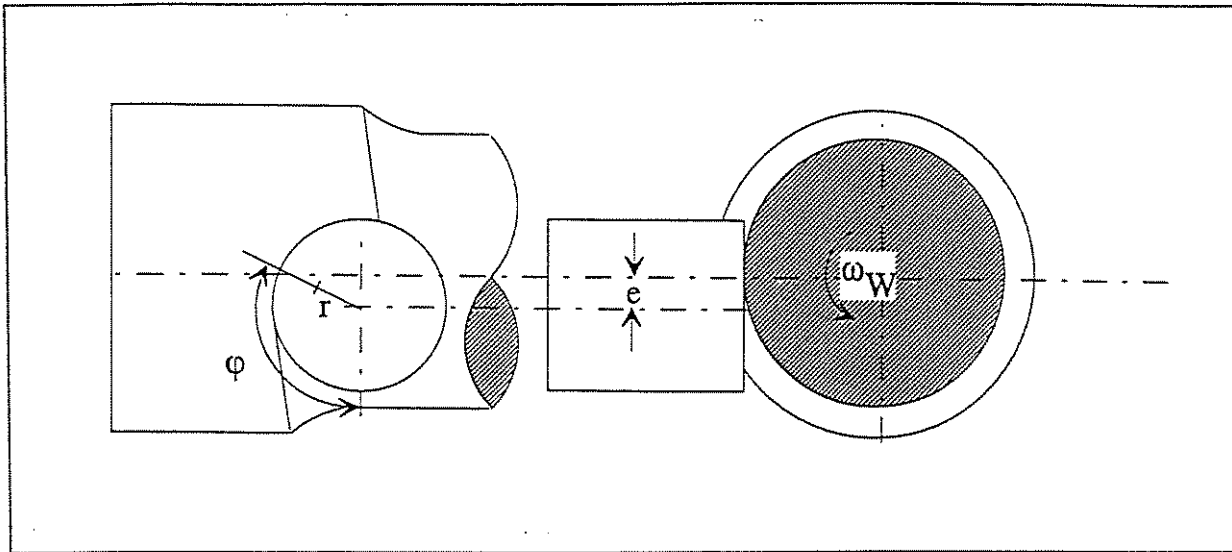


Figura 2.20 : Parâmetros para velocidade de avanço na direção radial

2.3.3.3 - Avanço na Direção Axial por Rotação da Peça

O avanço na direção axial no fresotorneamento ortogonal pode ser obtido através da divisão da taxa de avanço (v_{fax}) pela frequência de rotação da peça de trabalho n_p . Este avanço pode ser expresso pela seguinte equação:

$$f_{ax} = \frac{v_{fax}}{n_p} \quad (2.8)$$

2.3.3.4 – Penetração de Trabalho

No fresotorneamento ortogonal o inserto percorre uma trajetória espiral, levando-se em consideração da rotação da peça, a rotação da ferramenta e os movimentos relativos entre as mesmas. Para obter-se a efetiva penetração de trabalho (a_e), deve-se saber qual o ângulo de posição do dente, ψ , e através dele calcular-se o comprimento efetivo de corte como representado na Figura 2.21 e descrito pela equação :

$$a_e = \cos \psi \cdot f_{ax} \quad (2.9)$$

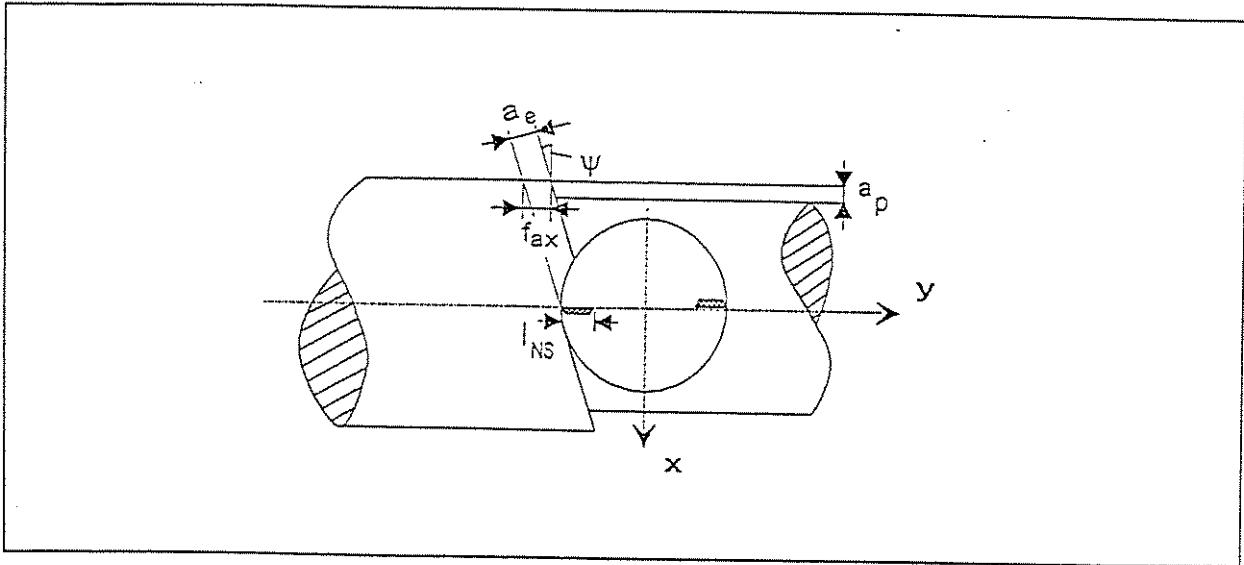


Figura 2.21 : Penetração de Trabalho

Uma grande quantidade de cavaco pode ser removida no fresotorneamento ortogonal através do avanço axial, porém a limitação para o bom funcionamento do processo é a relação entre a aresta de corte da ferramenta e o avanço axial empregado na mesma.

O avanço axial deve sempre ser menor ou no máximo igual ao comprimento da aresta de corte, independente da excentricidade a ser empregada no processo. Entretanto, através de ensaios práticos, observa-se que os melhores resultados do processo são alcançados, para valores recomendados de avanço axial não superior a 80% do valor da aresta principal de corte.

2.3.3.5 - Avanço Tangencial por Rotação da Peça

O avanço na direção tangencial, no fresotorneamento ortogonal está associado diretamente a rotação da peça, sendo facilmente determinado pela equação :

$$f_{tan} = \pi \cdot d_p \quad (2.10)$$

2.3.3.6 - Avanço Total por Rotação da Peça

O avanço total resultante por rotação da peça é calculado considerando-se a resultante de seus avanços axiais e tangenciais. Ou seja :

$$f = \sqrt{(f_{ax}^2 + f_{tan}^2)} = \sqrt{(f_{ax}^2 + (\pi \cdot d_p)^2)} \quad (2.11)$$

2.3.3.7 - Avanço por Dente

O avanço por dente da ferramenta é analogamente calculado através do avanço por dente no fresamento normal, onde os fatores a se considerar são a velocidade de avanço, o número de dentes e a rotação da ferramenta. Dai têm-se que o avanço por dente é obtido por

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n_f} \quad (2.12)$$

onde substituindo o valor da velocidade de avanço (v_f), têm-se :

$$f_z = \frac{\sqrt{f_{ax}^2 + \pi^2 \cdot (d_p - 2 \cdot a_p)^2}}{z \cdot \lambda} \quad (2.13)$$

onde,

$$\lambda = \frac{n_f}{n_p} \quad (2.14)$$

Pode-se observar esquematicamente na Figura 2.22, abaixo o avanço por dente da ferramenta :

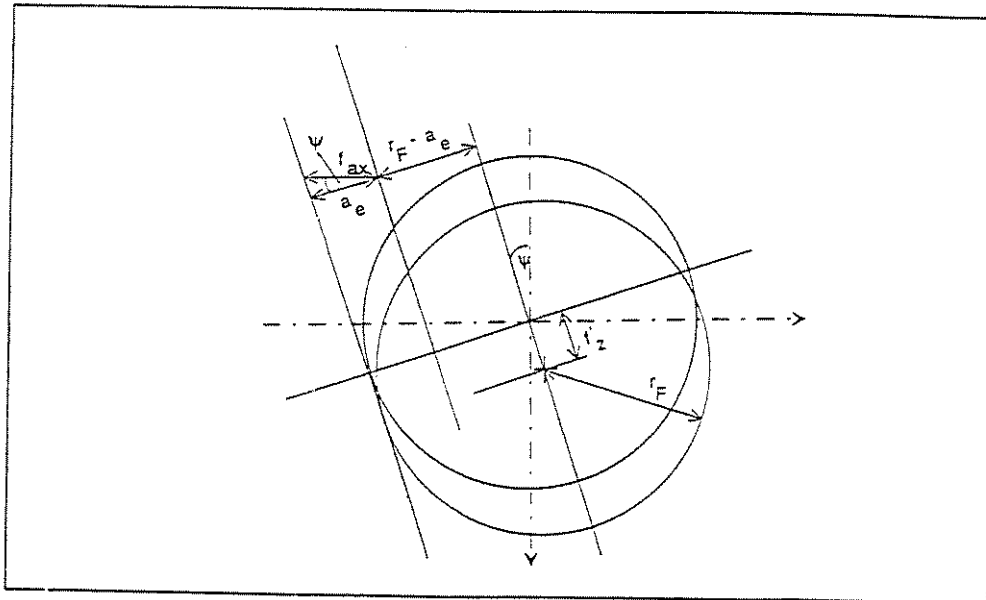


Figura 2.22: Avanço por dente no fresotorneamento ortogonal

2.3.4 - A Rugosidade Teórica no Fresotorneamento Ortogonal

A rugosidade teórica no fresotorneamento ortogonal é expressa em função de λ , que fornece a relação entre a rotação da ferramenta e a rotação da peça, e , pode ser observada na Figura 2.23.

Além disso, considera-se ainda o número de dentes empregados na ferramenta, o diâmetro da peça e a profundidade de corte durante o processo. A equação que a expressa é dada por:

$$R_{cin} = \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{\lambda \cdot z}\right)\right]}{\cos\left(\frac{\pi}{\lambda \cdot z}\right)} \cdot \frac{d_p - 2 \cdot a_p}{2} \cdot 1000 \quad (2.15)$$

Como a rugosidade teórica é expressão única dos fatores geométricos, não considerando fatores como material da ferramenta, da peça, condições operacionais do processo e outros fatores relevantes para análise dos mesmos, as limitações para seu emprego tornam-se significativas, no caso da busca de um parâmetro confiável para comparação com os valores obtidos na prática.

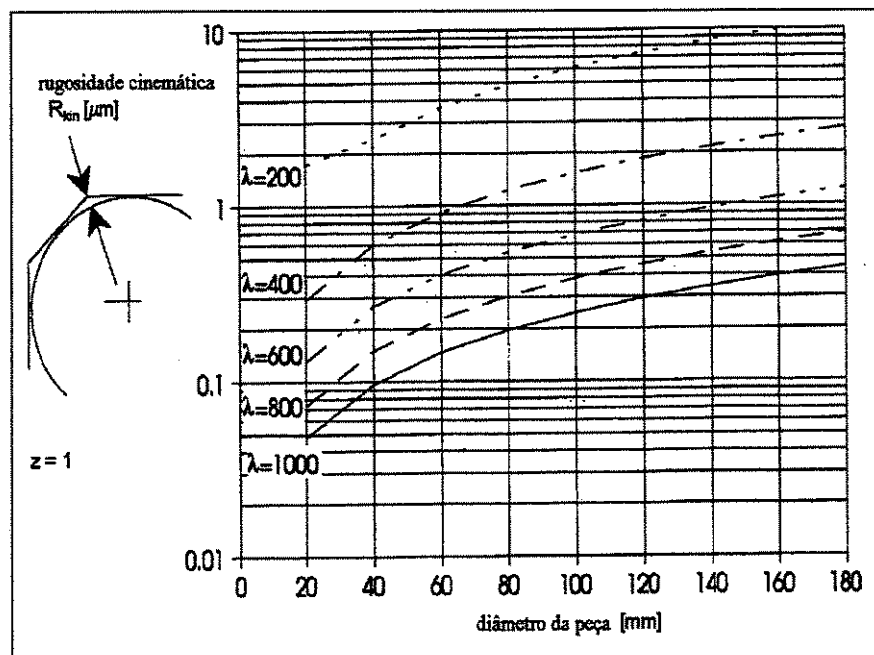


Figura 2.23 : Rugosidade Teórica no Fresotorneamento

2.3.5 - O Mecanismo de Formação de Cavacos :

Os cavacos, formados no processo de fresotorneamento ortogonal, diferenciam-se daqueles formados por outros processos, uma vez que são gerados tanto pelas arestas principais de corte, como pelas arestas secundárias de corte [Wand, 1985], [Schulz, 1993] (Figura 2.24).

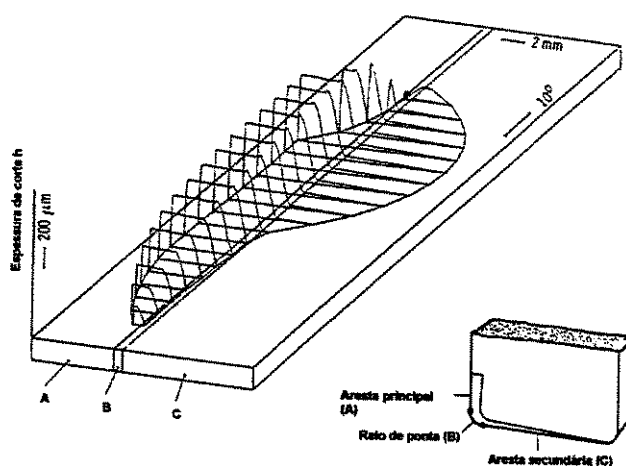


Figura 2.24 : Cavacos formados pelas arestas principal e secundária de corte

No torneamento os cavacos apresentam largura e espessura constantes e no fresamento, mesmo em HSC [Spiewak, 1999], apresentam a forma de vírgula com largura constante e espessura variável [Wertheim, 1994].

Entretanto, no fresotorneamento ortogonal os cavacos formados, tanto pelas arestas principais, como pelas arestas secundárias, apresentam larguras e espessuras variáveis.

O volume de material usinado por ambas as arestas (principal e secundária) é dependente dos parâmetros de usinagem, tais como excentricidade, número de dentes, velocidade de avanço, velocidade de corte, etc.

Para se determinar a secção de corte, desenvolveu-se na TU Aachen [König, 1985], [Wand, 1985], [König, 1986] um programa para simulação do processo, que determina a espessura e a largura do cavaco, em função do ângulo de rotação da fresa.

Wedeniowski [1984] descreve em sua tese de doutorado, o processo de formação do cavaco. De acordo com ele, a espessura aumenta até um máximo, para diminuir no final.

Para a largura, há um comportamento semelhante. Além disto, ele apresenta a influência dos vários parâmetros de usinagem, na formação do cavaco.

A formulação proposta por Wedeniowski, pode ser melhor compreendida se adotada em conjunto com o modelo geométrico proposto por Lehmann [Lehmann, 1991], onde duas abordagens são necessárias, uma para os cavacos formados pela aresta secundária de corte e outra para a aresta principal de corte.

Devido a complexidade do modelo geométrico (praticamente responsável por grande parte do trabalho apresentado por Lehmann), apresenta-se resumidamente aqui, uma visão parcial das variáveis envolvidas nos cálculos da espessura dos cavacos e resumidamente o modelamento necessário à compreensão dos mecanismos de formação do cavaco pela aresta secundária de corte.

Apresenta-se também, considerações genéricas sobre a formação dos cavacos na aresta principal de corte, conforme pode-se observar, a seguir, na Figura 2.25.

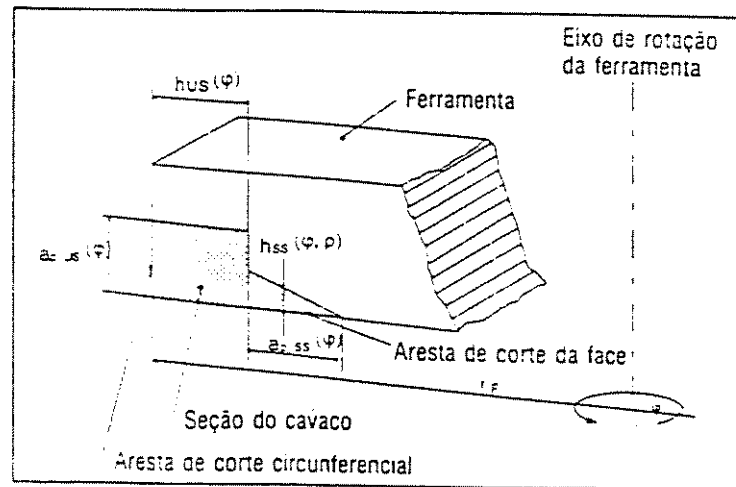


Figura 2.25 : Formação do cavaco nas arestas da ferramenta

2.3.5.1 – Formação do Cavaco pela Aresta de Corte Secundária

A formação do cavaco, no fresotorneamento, pela aresta secundária de corte sofre a influência de alguns fatores geométricos e operacionais, como a excentricidade de posicionamento da fresa, a profundidade de corte, a altura dos dentes, e o avanço empregado, respectivamente [Lehmann, 1991].

A aresta secundária de corte ao entrar em contato com a peça de trabalho é forçada de encontro à superfície já usinada pela aresta principal. Durante esta fase ocorrem três movimentos que se sobrepõem entre si, pois, a peça gira com uma rotação ω_w , a ferramenta com uma rotação ω_f e adicionalmente a estes dois movimentos pode ser adicionado um avanço constante, de velocidade v_f , quando existir deslocamento longitudinalmente ao eixo da peça de trabalho.

Em função deste fato a espessura de corte (h_{us}) pode ser expressa em função do avanço, do ângulo de direção de avanço circular (φ) e do diâmetro da fresa.

Lehmann trata a geometria observada no detalhe da figura 2.26, e propõe o desenvolvimeto teórico das expressões implicando na seguinte expressão, para a espessura média de corte :

$$h_{us}(\varphi) = -f_z \cos \varphi + r_F - [(r_F^2 - (f_z \sin \varphi)^2)^{1/2}] \quad (2.16)$$

onde :

r_F = raio da ferramenta;

φ = ângulo da direção de avanço circular;

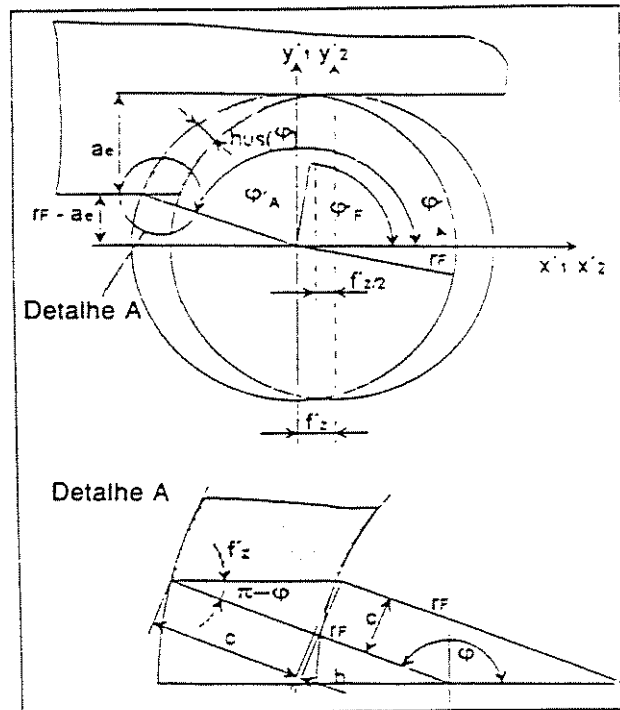


Figura 2.26 : Espessura do cavaco na aresta secundária

2.3.5.2 – Formação do Cavaco pela Aresta de Corte Principal

Sorge [1983] também descreve a geometria do cavaco (figura 2.28), de maneira qualitativa, e despreza o volume formado pelas arestas secundárias, dizendo ser o mesmo correspondente a menos de 10% do volume total do cavaco, ao contrário de Lehman.

Ele ainda apresenta uma fórmula para a determinação do comprimento do cavaco, em função do número de dentes da ferramenta e da relação de rotações entre a ferramenta e a superfície fresotorneada.

Entretanto mais uma vez a abordagem de Lehmann [Lehman, 1991] é a que se mostra mais consistente. A expressão de cálculo da espessura pode ser então obtida :

$$h_m = \{ [360 f_z (a_{ez} + \Delta a_e)] / \pi d_F \omega_p \} \sin \chi_r \quad (2.17)$$

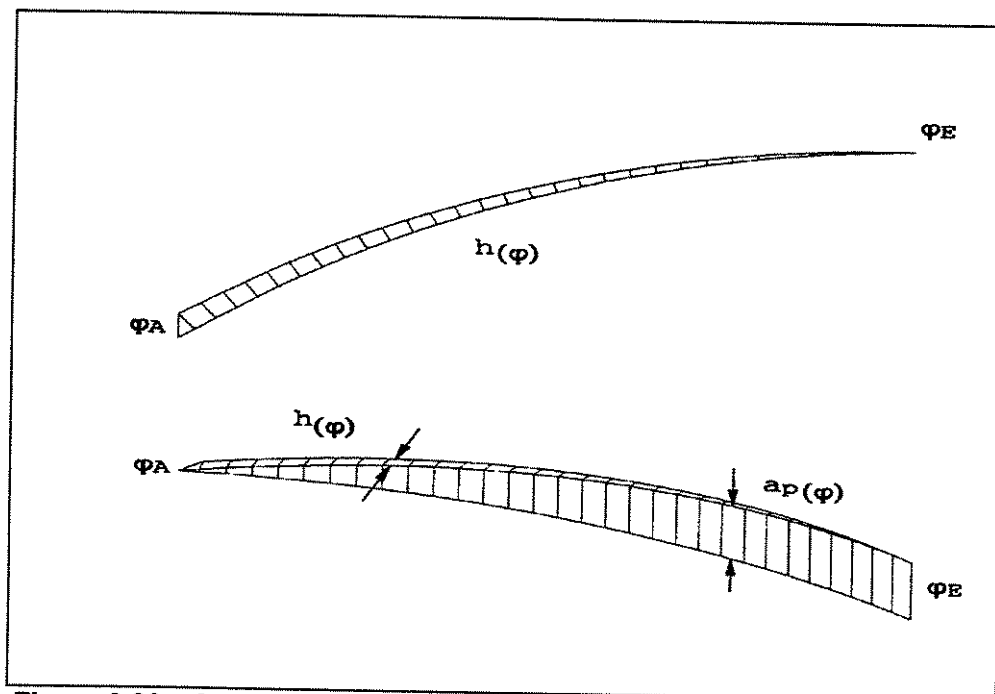


Figura 2.28 : Geometria do cavaco formado pela aresta principal de corte

2.3.6 - A Influência do desvio axial na qualidade da superfície

Normalmente, as arestas de uma fresa possuem tolerância de posicionamento das pastilhas nos seus respectivos alojamentos. Assim, ocorrem irregularidades na estrutura das superfícies.

A geometria da superfície é gerada somente pela aresta de corte mais próxima da peça (Figura 2.29).

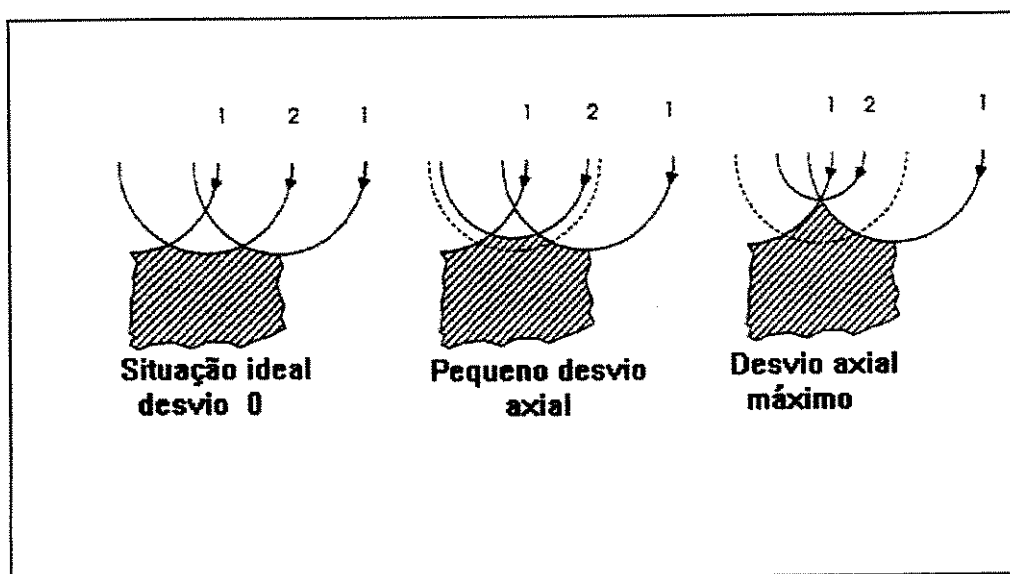


Figura 2.29 : Possíveis posições axiais das fresas [Daniel, 1994]

Em ensaios realizados por Daniel (1994) com fresas de dois dentes, o desvio de posicionamento axial relativo de um dente a outro influenciou a rugosidade, conforme mostra a Figura 2.30.

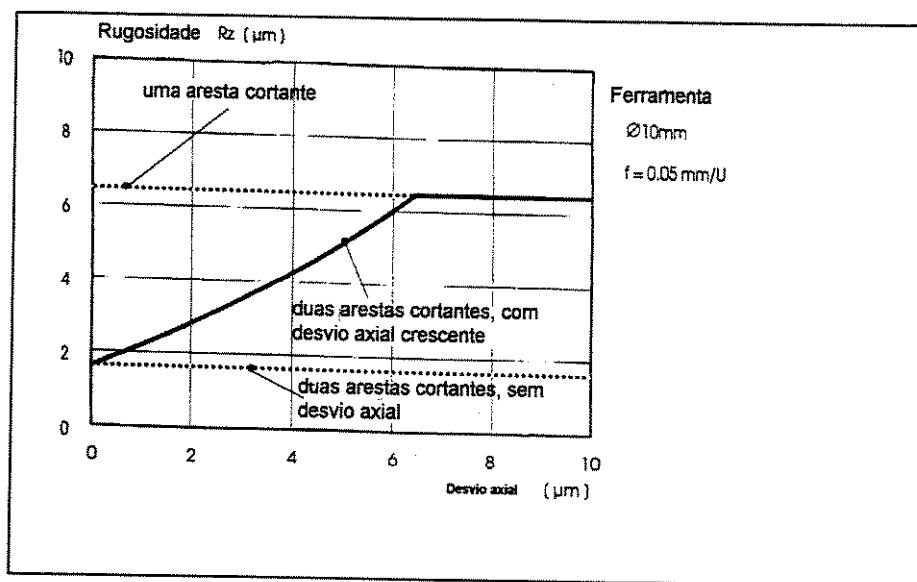


Figura 2.30 : Influência do desvio axial entre dois dentes na qualidade de superfície

Percebe-se da figura 2.30, que se bem posicionados os dentes da fresa, uma ferramenta com duas arestas cortantes proporciona um melhor nível de rugosidade do que uma fresa de apenas um dente. Na pior das hipóteses, proporciona uma rugosidade semelhante à uma fresa de apenas um dente. Isso deve-se ao fato da geometria da superfície gerada ser obtida através da aresta de corte mais próxima da peça, ocasionando desvios caso não exista este alinhamento.

A seguir estão colocados os procedimentos experimentais utilizados nos ensaios.

CAPÍTULO 3 :

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Introdução

Os ensaios experimentais desenvolvidos procuraram atender às premissas básicas propostas neste projeto de pesquisa, quais sejam, estudar e compreender melhor o processo de usinagem denominado fresotorneamento ortogonal, estudando também as características inerentes aos processos que se utilizam da tecnologia da altíssima velocidade de corte.

Para tanto, a eficácia do mesmo pôde ser testada em corpos de prova com materiais e geometria similares a virabrequins (Figura 3.1), onde usualmente se empregam a retificação e o “turnbroaching” (processo de usinagem onde são utilizadas fresas caracóis com pastilhas não alinhadas no corte, para a usinagem dos munhões não excêntricos dos virabrequins), para obtenção de resultados finais de acabamento. Desta forma procurou-se verificar, então, a viabilidade técnica do fresotorneamento na usinagem de aços endurecidos, analisando os resultados de acabamento e tolerâncias geométricas encontradas.

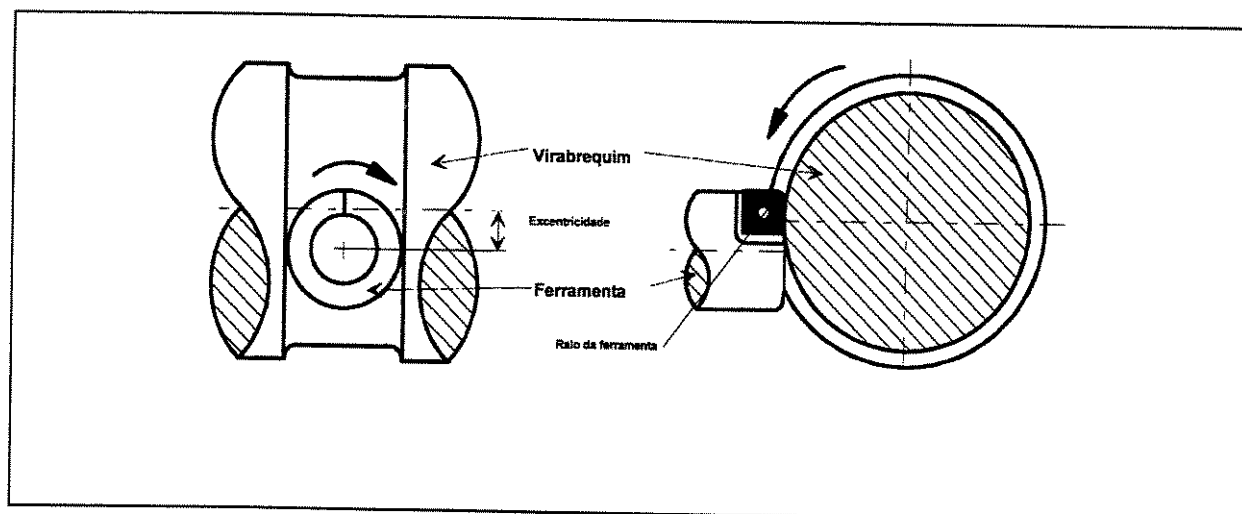


Figura 3.1 – O Fresotorneamento em virabrequins

3.2 - Máquinas e Laboratórios Utilizados

Dentre as demandas específicas de uma máquina utilizada para o fresotorneamento, a rigidez e a precisão geométrica estão entre fatores preponderantes para garantir a acuracidade dos resultados obtidos, tanto dimensionalmente, quanto aos aspectos de qualidade de trabalho final. Além deste fatores, a dissipação de calor é de grande importância, pois a minimização das influências térmicas no resultado do trabalho, mais que desejável, é imprescindível.

Em função destas considerações, nos laboratórios do PTW, encontravam-se disponíveis à escolha, uma máquina dedicada (Figura 3.2), com algumas opções de motores para ferramenta principal, construídos ambos (a máquina e os motores) no próprio instituto, sob os critérios rigorosos das normas DIN e às exigências necessárias a uma máquina para usinagem em HSC, e também, uma máquina disponível comercialmente, de construção bastante rígida e própria à aplicação do fresotorneamento ortogonal : um centro de usinagem com 5 eixos programáveis, DECKEL FP4HT (Figura 3.3).

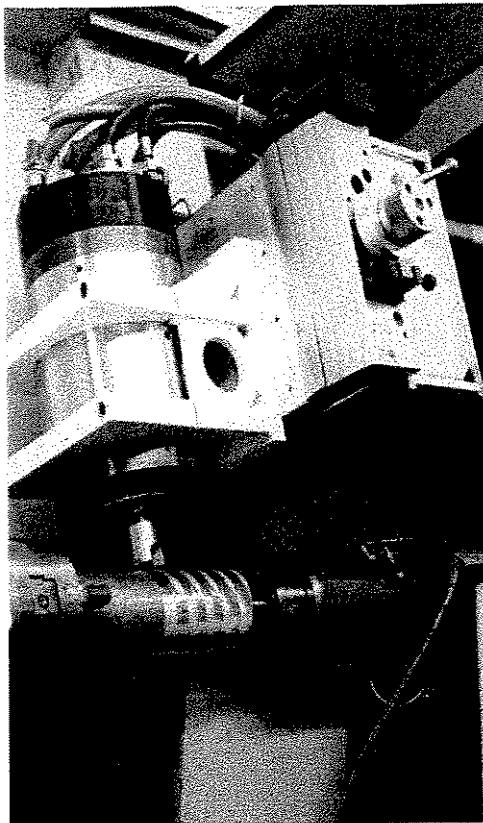


Figura 3.2 : Máquina protótipo de fresotorneamento



Figura 3.3 : Centro de Usinagem DECKEL 5 eixos

Neste centro de usinagem (Figura 3.3) é possível a aplicação de processos de fresotorneamento ortogonal - com ou sem excentricidade - (Figura 3.4) ou coaxial (Figura 3.5).

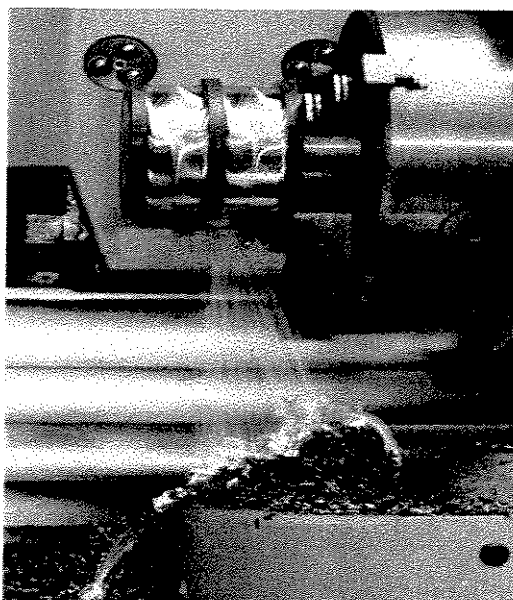


Figura 3.4 : Fresotorneamento ortogonal

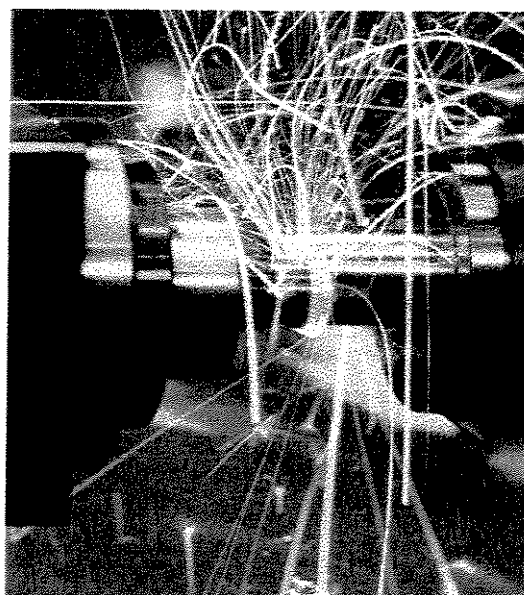


Figura 3.5 : Fresotorneamento coaxial

Em função destas possibilidades e dado o caráter bastante flexível da máquina, mais adaptada à realidade fabril, prática, optou-se pelo uso desta. O centro Deckel escolhido tem as seguintes características técnicas :

☐ Áreas de Trabalho (Eixos lineares e rotativos):

- x: 600 mm
- y: 500 mm
- z: 500 mm
- B: $\pm 95^\circ$
- C: $\pm 360^\circ$ (curso final)

☐ Máximas Velocidades de Movimento :

deslocamento rápido : 20 m/min

eixos lineares : 15 m/min

☐ eixos rotativos : 15 rot/min

☐ Base da Máquina : Ferro Fundido + Concreto Polimérico

☐ Comando CNC : Deckel Dialog 12 (tempo de resposta 3ms)

☐ Sistema de Lubrificação das Guias : Hidrodinâmico de alta pressão

☐ Mecanismo de Avanço : AC - motor síncrono

☐ Erro dimensional da Máquina : 1,0 μm

☐ Motor Principal : Assíncrono

☐ Máxima frequência de giro : $n_{\text{max}} = 25.000 \text{ min}^{-1}$

☐ Potência Disponível = 14 KW

3.3 - Corpos de Prova

Utilizaram-se 100 corpos de prova com geometria e características de material e tratamento térmico similares a virabrequins de caminhões, anterior as operações de acabamento (retificação e turnbroaching).

O material empregado na confecção dos corpos de prova foi o aço 42CrMo4, similar ao aço ABNT 4140, apresentando a seguinte composição principal :

- ☐ 0,4 % C
- ☐ 1,1% Cr
- ☐ 0,2% Mo

Nota-se a ausência de Ni, V e W nesta liga, o que deve reduzir de forma considerável a formação de carbonetos, contribuindo desta forma com uma possível menor abrasão da superfície da ferramenta, quando da usinagem da peça.

Ainda, buscando-se intensificar a severidade das condições de usinagem e a aproximação às condições reais encontradas na prática, durante a usinagem dos virabrequins, submeteu-se os corpos de prova ao tratamento térmico de têmpera por indução, elevando, desta maneira, sua dureza superficial a 60 HRC, numa camada testada de até 5,0 mm de profundidade a partir da superfície do material.

A seguir (Figura 3.6) pode ser observada a geometria utilizada na confecção do corpo de prova. Convém comentar, que o mesmo foi reproduzido também em isopor para os testes de adaptação e estratégia do programa empregado na usinagem. Todas as dimensões com tolerâncias H7.

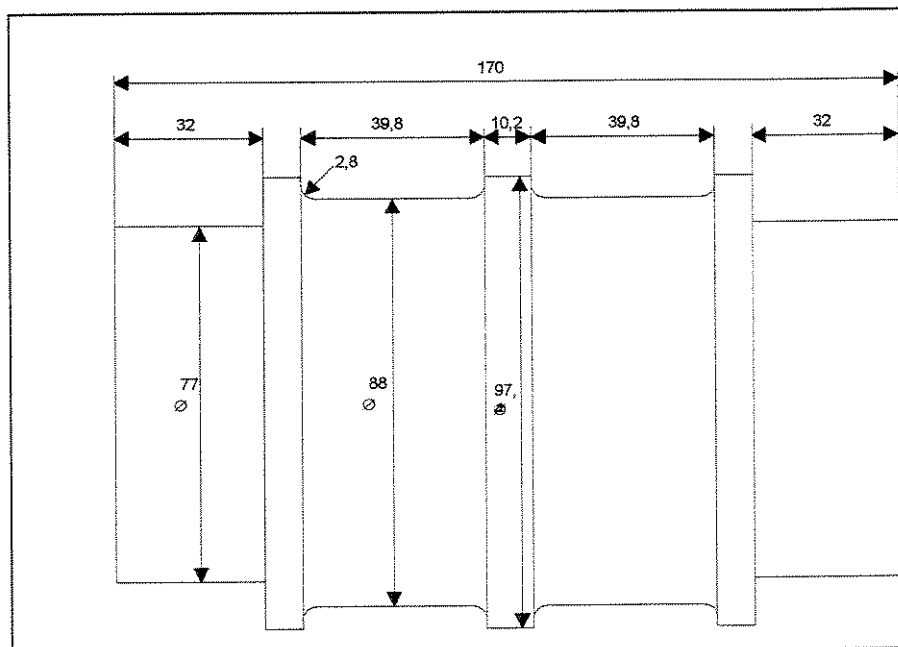


Figura 3.6 : Corpo de Prova

3.4 - Ferramentas:

3.4.1 - Fresa

Foi utilizada somente uma fresa, para os ensaios. A mesma comportava dois inserts e seu diâmetro era de 40 mm. A sua geometria apresenta o ângulo de saída (γ) equivalente de -17° . A ferramenta foi empregada com somente um inserto de corte, sendo o outro alojamento preenchido por um inserto de balanceamento para minimização dos desvios geométricos, face aos possíveis erros de posicionamento da segunda pastilha.

Esta fresa utiliza sistema de fixação conforme a norma DIN69893 (Figura 3.7), minimizando as forças axiais durante o corte, sendo, portanto, adequada ao uso para usinagem em altíssimas velocidades de corte.

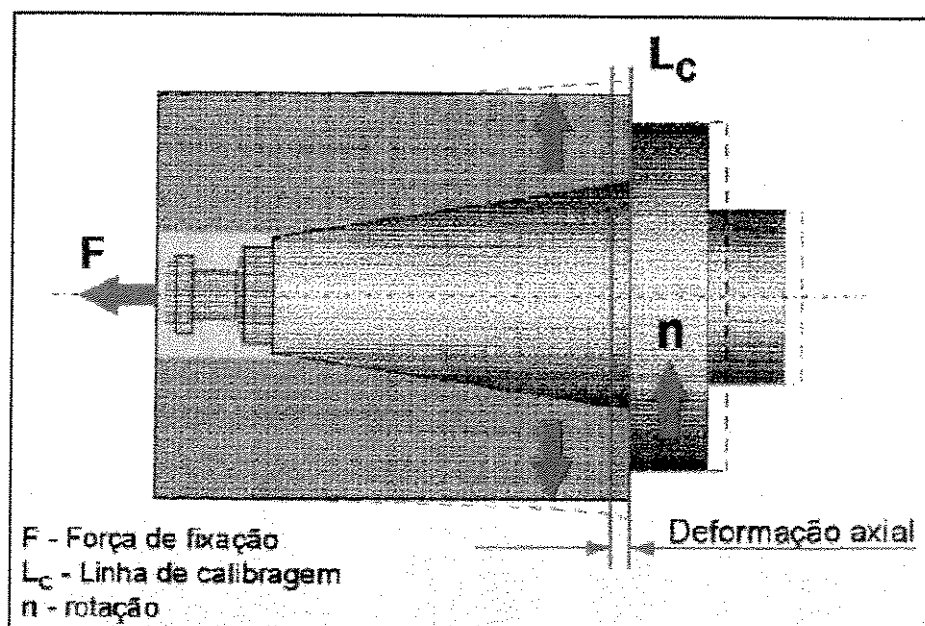


Figura 3.7 : Sistema de fixação utilizado

Observa-se na figura 3.8 a fresa utilizada.

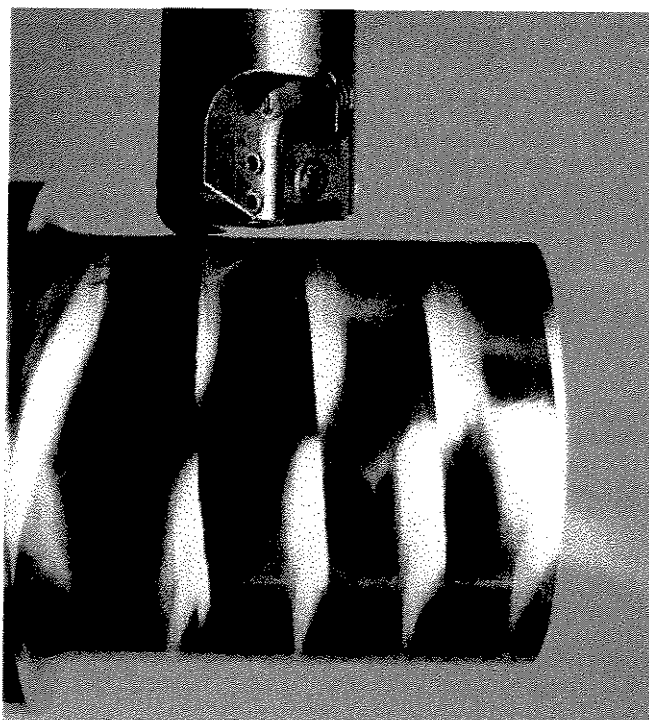


Figura 3.8 : Fresa utilizada

3.4.2 - Insertos

Empregou-se pastilhas de CBN e metal duro com cobertura PVD, à época dos ensaios ainda inéditas comercialmente. A escolha do CBN, se deve as características deste material, próprias ao emprego em aços endurecidos [Diniz, 2000] e usinagem HSC [Lisboa, 1995].

Os insertos de metal duro foram utilizados em ensaios de estratégia de usinagem, aprimoramento do programa e acerto das condições de corte, todavia, optou-se por apresentar os resultados alcançados com os mesmos, para efeitos de comparação. A possibilidade de se utilizar cerâmica foi descartada em função de resultados anteriormente produzidos em ensaios com as mesmas [Lisboa, 1995].

As dimensões das pastilhas utilizadas podem ser observadas na Figura 3.9 :

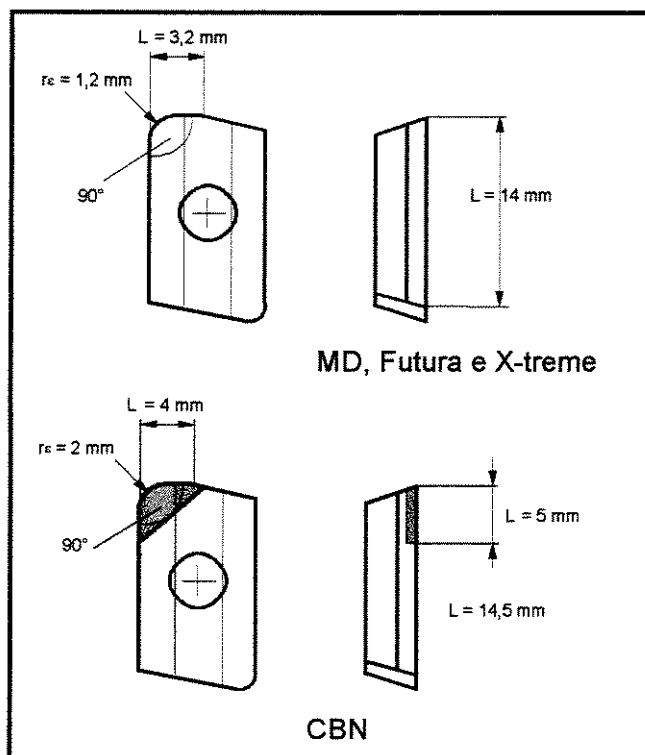


Figura 3.9 : Geometria dos insertos utilizados

Observa-se que o ângulo entre a aresta de corte principal e aresta secundária destas pastilhas deve ser obrigatoriamente de noventa graus (90°), para possibilitar que a aresta principal de corte esteja perfeitamente ortogonal à superfície da peça, caso contrário não está garantida [Finzer, 1997] a integridade macrogeométrica da superfície da peça, gerando possíveis ondulações na superfície usinada, como observa-se na Figura 3.10 :

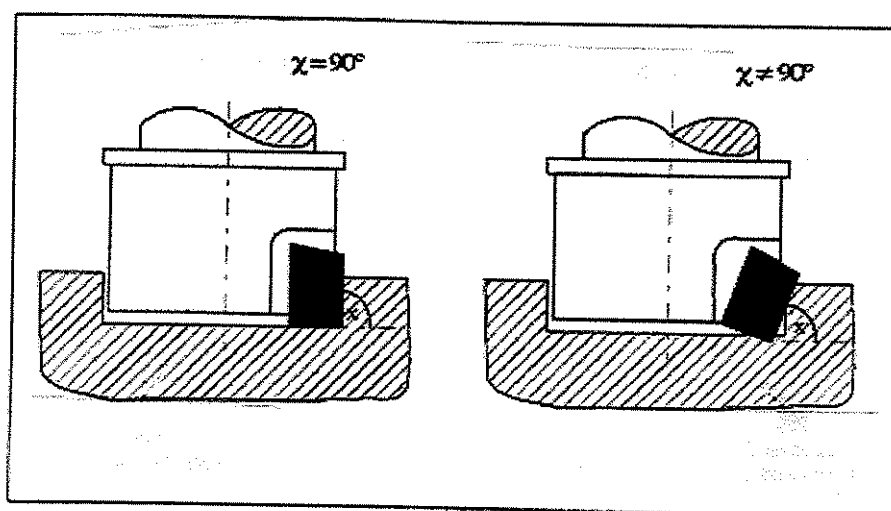


Figura 3.10 : Posicionamento dos insertos

Ainda em relação às pastilhas, a cobertura empregada foi o TiAlNi, com dois tipos diferentes, sendo uma multicamada, com oito níveis de recobrimento (X-treme) e a outra com cinco níveis (Futura), cujas propriedades podem ser observadas na tabela 3.1, a seguir.

Tipo de Pastilha	Microdureza (HV 0,05)	Espessura da Camada (μm)	Temperatura Máxima
FUTURA	3000	1-5	800
X-TREME	3500	1-4	900

Tabela 3.1 : Propriedades das coberturas

3.5 – Equipamentos de Medição

Os equipamentos utilizados na medição e análise foram: rugosímetro Perthometer modelo S8P (Figura 3.11), auxiliado por computador, quando da medição do acabamento final das superfícies usinadas. Além disso, utilizou-se a máquina de medição por coordenadas, computadorizada, Zeiss modelo PMM 864, para as medições dos colos dos corpos de prova e verificação dos desvios dimensionais dos mesmos. Na análise da cilindricidade, contudo, preferiu-se utilizar um equipamento dedicado Taylor Hobson, modelo A112/1170E que possibilitou uma melhor precisão nos resultados encontrados.



Figura 3.11 : Rugosímetro

3.6 - Condições Operacionais e Amostras Obtidas

O fresotorneamento ortogonal, por tratar-se de processo relativamente novo e com bases teóricas ainda em desenvolvimento, não permite assegurar com certeza qual o melhor método para definir a estratégia de usinagem. Mesmo os grandes fabricantes de ferramentas, ainda não dispõem de dados de referência para usinagem em

fresotorneamento, limitando-se inclusive a um único fabricante, o fornecimento comercial de insertos e ferramentas para o mesmo (Seco Tools), sem contudo apresentar os valores recomendados para a utilização dos mesmos na usinagem. Pode-se antever então a dificuldade encontrada na busca dos parâmetros otimizados para a condução dos ensaios.

Em sua totalidade, as pesquisas conduzidas nesta área até o presente instante, partem de uma base investigativa prática obtida com ensaios preliminares, que se constituem rudimentarmente como o delineamento de experimentos possível de se aplicar ao fresotorneamento.

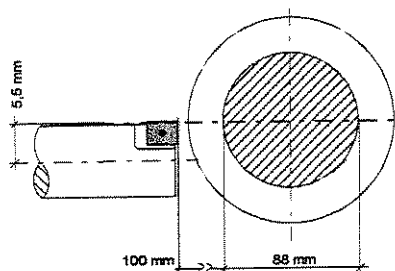
Todavia, nestes ensaios, além da definição dos parâmetros que influenciam o processo, bem como seus níveis, procurou-se essencialmente acertar a estratégia de usinagem a ser empregada para a viabilização do mesmo.

No caso deste projeto, as condições operacionais dos ensaios e os parâmetros de variação dos mesmos foram estabelecidos após testes preliminares, onde foi possível se estabelecer a estratégia de usinagem a ser utilizada, bem como o nível de intensidade em módulo dos parâmetros variados.

Deve-se ressaltar, que estes ensaios preliminares procuraram estabelecer as condições mínimas necessárias à usinagem das peças, com a máxima exigência das ferramentas disponíveis, bem como adequar o processo às características da usinagem em altíssima velocidade de corte em aços endurecidos [Nakayama, 1988].

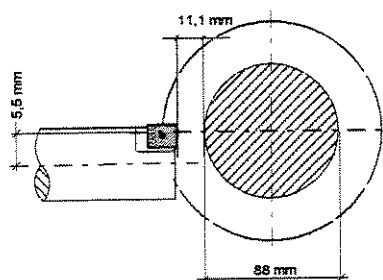
Os problemas para a determinação da melhor estratégia de usinagem concentraram-se principalmente em resolver os grandes esforços incidentes sobre os insertos, quando da usinagem inicial do raio de concordância no colo do corpo de prova, além de outros esforços presentes em cortes ortogonais [Altan, 1997], bem como observar, quais fatores se mostravam significantes na influência da rugosidade do material, sua tolerância dimensional e cilindricidade.

O estabelecimento da estratégia e dos parâmetros de influência, somente deu-se após a realização de mais de quarenta testes de usinagem. A seguir (Figura 3.12) têm-se uma breve descrição da estratégia utilizada nos testes definitivos.



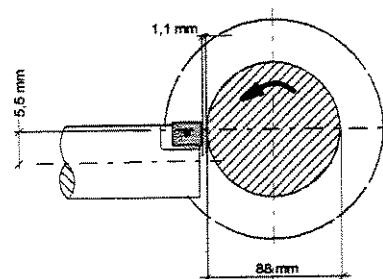
1. Aproximação da Ferramenta :

Aproximou-se a ferramenta, excentricamente, com movimento rápido (20 m/min) com a peça sem movimento. Para efeitos de segurança, optou-se por se manter uma distância de 22 mm da peça a ser posteriormente percorrida em avanço de usinagem.



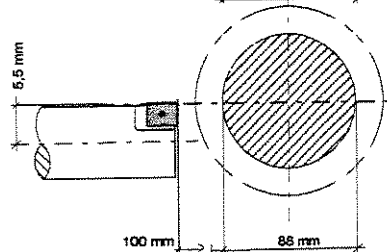
2. Usinagem dos Colares :

Prosseguiu-se a usinagem dos colares com avanço de usinagem. Na entrada da ferramenta foi observada uma pequena vibração, que desaparecia após o contato total da ferramenta com a peça e início de movimento desta em sentido anti-horário.



3. Usinagem do Colo :

A usinagem do colo foi realizada em uma só passada com a penetração de trabalho de 0,5 mm.



4. Afastamento da Ferramenta :

Em movimento rápido procedeu-se o afastamento da ferramenta.

Figura 3.12 : Estratégia de Usinagem

Os ensaios definitivos variaram os parâmetros excentricidade, velocidade de corte, tipo de material de recobrimento das pastilhas de metal duro, tipo de inserto (CBN ou MD) e relação λ a empregada. Os valores utilizados nos ensaios e seu arranjo experimental, foram:

- **Velocidade de Corte** : foram testadas três velocidades de corte distintas para cada tipo de inserto de MD, e cinco velocidades para pastilhas de CBN (tabela 3.2).

Velocidade de Corte	Metal Duro (FUTURA)	Metal Duro (X-TREME)	CBN
V_{c1} [m/min]	200	200	550
V_{c2} [m/min]	300	300	650
V_{c3} [m/min]	400	400	750
V_{c4} [m/min]	-	-	850
V_{c5} [m/min]	-	-	950

Tabela 3.2 : Velocidades de corte para pastilhas

Estas velocidades de corte foram escolhidas partindo-se de valores de referência de catálogo para o fresamento do aço utilizado, incrementando-se gradualmente seus valores em 100,00 m/min superiores para ambos os casos, objetivando desta maneira estudar o comportamento da usinagem e seus resultados finais (rugosidade, cilindridade e dimensional) sem, contudo, efetivamente se chegar ao final da vida das ferramentas.

Além disso, empregou-se dois tipos de excentricidade diferentes, em função dos valores mais adequados ao comprimento das arestas de corte (conforme descrito no *cap 2*)

$$e_1 = 5,5 \text{ mm e } e_2 = 6,0 \text{ mm}$$

A esta combinação de excentricidades e velocidades de corte em associação ao material da pastilha e tipo de cobertura utilizado, somou-se ainda a variação da relação λ ,

com cinco níveis diferentes, permitindo-se desta forma verificar o comportamento do processo em função do avanço empregado também. Os valores arbitrados, em função de ensaios preliminares, para os testes de CBN e metal duro foram os seguintes :

$$\lambda_1 = 3500, \lambda_2 = 4000, \lambda_3 = 4500, \lambda_4 = 5000, \lambda_5 = 5500$$

A combinação total destes fatores conduziu a um número de 150 ensaios de CBN, ou seja, 50 colos usinados repetidamente por três vezes, visando-se também se assegurar minimamente a relevância e variabilidade dos resultados encontrados e compatibilizando os mesmos a um custo acessível à pesquisa.

Em cada ensaio, sempre foi utilizada uma nova pastilha de CBN. Em todos os ensaios utilizou-se a mesma penetração de trabalho ($a_e = 0,5$ mm). A escolha desta penetração deve-se ao tipo de inserto de CBN empregado (com mais de 93% de CBN em sua composição), que permitiu a utilização em condições “severas de acabamento”.

Como dito acima os fatores de relevância investigados nestes ensaios, os quais foram objetos de medições e análise, foram :

- ☐ Cilindricidade da superfície usinada : será analisada ao longo do colo, através de percurso descrito longitudinalmente ao eixo da peça, pelo cabeçote apalpador.
- ☐ Rugosidade do corpo de prova ensaiado : foi avaliado R_z em três pontos distintos do material (no colo), repetindo-se a mesma medição em intervalos de 120 graus, perfazendo um total de 9 pontos por colo analisado, conforme pode ser observado esquematicamente na Figura 3.13. Deve-se ressaltar que estas medições foram posteriormente ao término de todos os ensaios :

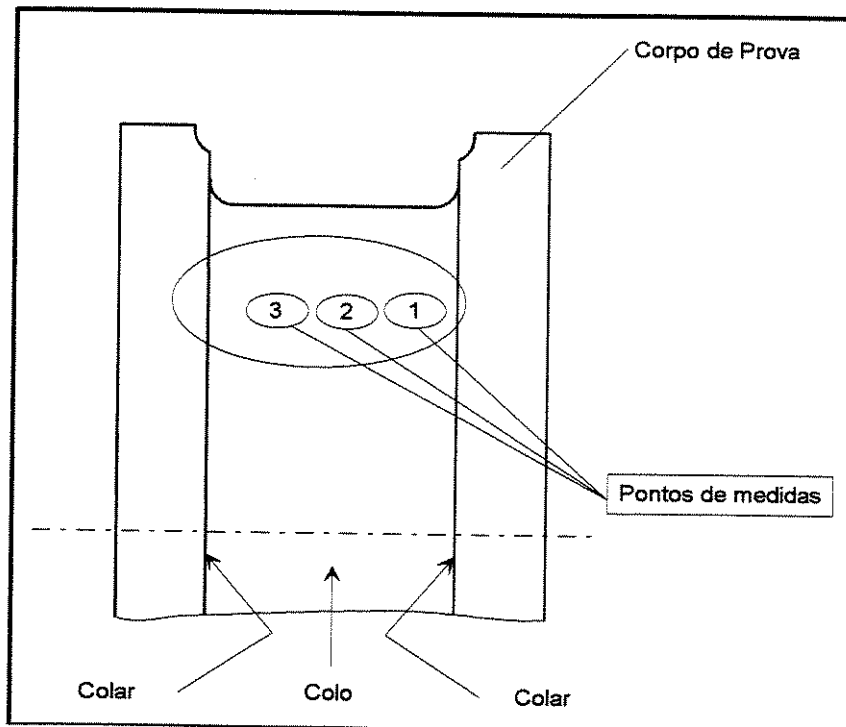


Figura 3.13 : Pontos de medições

A tolerância dimensional dos corpos de prova foi analisada para efeitos de checagem de setup da máquina e apresentou diferenças desprezíveis ao processo.

Discute-se a seguir os resultados alcançados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Introdução

Aqui estão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios conduzidos com as pastilhas de CBN, e também os resultados obtidos através dos ensaios conduzidos com as pastilhas de metal duro. Optou-se pela análise, também, dos ensaios conduzidos com pastilhas de metal duro, apesar dos mesmos serem empregados, em princípio, apenas para a análise da estratégia de usinagem e o pré-acerto dos programas. Entretanto, como os testes com os insertos de metal duro apresentaram uma consistência de resultados, optou-se por mostrá-los e discuti-los no corpo da tese, bem como os resultados dos ensaios com pastilhas de CBN, objeto primeiro deste projeto de pesquisa.

4.2 Resultados de Rugosidade com Pastilhas de Metal Duro

Nestes ensaios buscou-se variar os parâmetros operacionais do processo de fresotorneamento ortogonal. Desta forma, variaram-se o avanço total, que particularmente na situação apresentada equivale ao avanço por dente, porque a fresa utilizada usina apenas com um único dente (pastilha); a excentricidade da fresa em relação ao eixo de simetria longitudinal da peça; a relação de frequência e conseqüentemente as velocidades de corte e rotação da peça.

A penetração de trabalho para todos os ensaios foi mantida constante com seu valor (a_e) equivalente a 0,5 mm. A justificativa para não se variar este parâmetro é baseada em trabalhos prévios [Lisboa, 1996], onde se observou, que para pequenas variações (inferiores a 0,5 mm) a alteração dos valores de rugosidade é praticamente insignificante.

Lisboa [Lisboa, 1996] narrou a relevância deste fator, observando que o mesmo somente torna-se relevante em patamares superiores ao já mencionado, todavia muito provavelmente mais em função da elevação das forças de usinagem envolvidas no processo, que afetam a rigidez do conjunto cabeçote-ferramenta-peça, do que propriamente como consequência de uma característica da usinagem do mesmo.

Além disso, os ensaios buscaram limitar-se às condições operacionais próprias e inerentes ao acabamento em processos de usinagem. Observou-se ainda se as coberturas utilizadas (TiNAl – FUTURA e X-TREME) influenciaram de alguma maneira nos resultados de rugosidade e cilindricidade.

Para todos os ensaios mediram-se as rugosidades (R_z) das peças usinadas, com as condições operacionais já mencionadas no capítulo anterior.

As figuras mostradas a seguir apresentam os resultados médios dos três pontos medidos equidistantes, em três regiões diferentes do colo da peça, para os valores das rugosidades em cada situação testada.

O motivo da utilização primária do parâmetro R_z , e a discussão do mesmo, deve-se às possíveis comparações com os ensaios feitos no Instituto (PTW), na literatura disponível, e, por ser este parâmetro o mais utilizado na Alemanha (local do surgimento e principal usuário do processo de fresotorneamento, até então), para a caracterização do perfil da rugosidade média.

Observando-se a Figura 4.1, tem-se os resultados encontrados para a rugosidade em função da relação de frequência, para as duas excentricidades empregadas no processo, no caso de utilização da cobertura de TiAl (FUTURA).

Pode-se notar, que os valores da rugosidade variaram em função da posição da excentricidade empregada, apresentando uma tendência à redução dos valores, proporcionalmente ao acréscimo da relação de frequência.

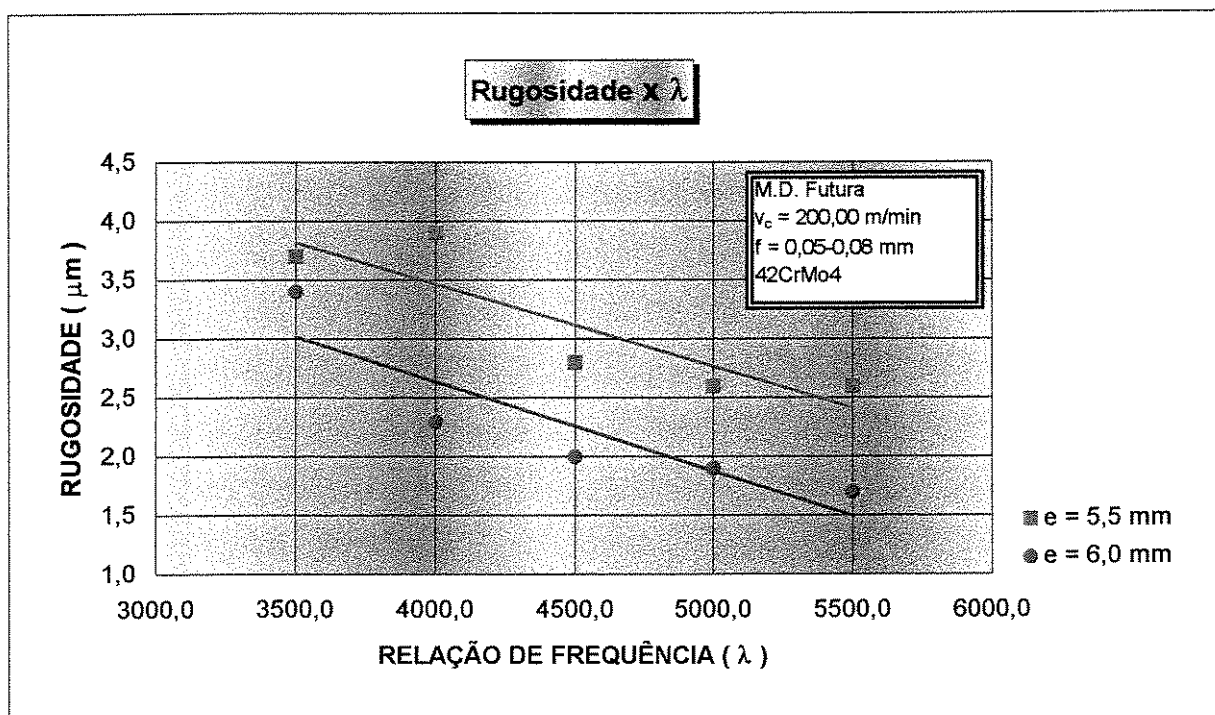


Figura 4.1 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD FUTURA - vc200

O mesmo comportamento é observado, quando da usinagem nas mesmas condições operacionais, com a utilização da cobertura de TiAl (X-TREME), conforme verifica-se na Figura 4.2, apresentada a seguir.

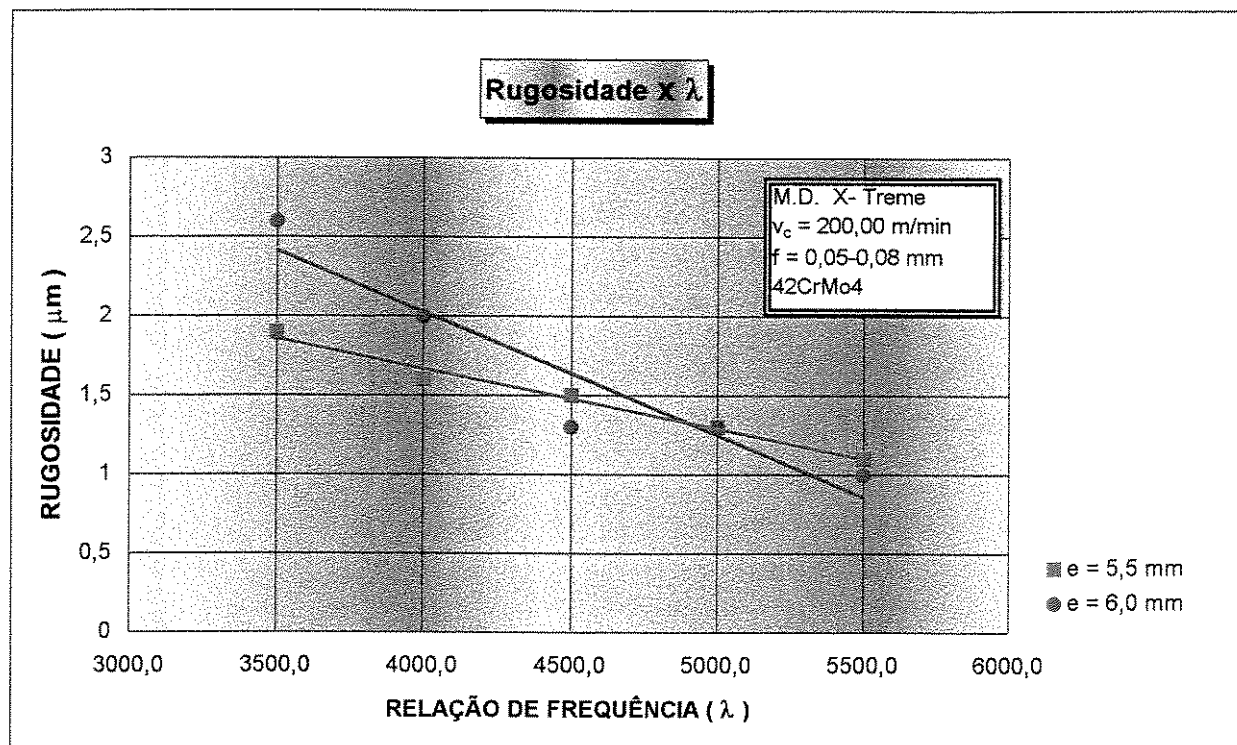


Figura 4.2 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD X-TREME - vc200

Uma possível explicação para este comportamento (a redução dos valores da rugosidade em função do aumento dos valores da relação de frequência), deve-se ao fato, que, apesar da manutenção da velocidade de corte constante, em todas as relações de frequências empregadas, o aumento das mesmas é conseguido através da redução dos valores de rotação da peça, ou seja, a ferramenta de corte, permanece com a sua aresta secundária em contato com a superfície usinada durante uma maior fração de tempo.

Quanto maior a relação de frequência empregada menor a rotação da peça, potencializando o efeito de alisamento e corte que esta aresta (secundária) exerce sobre a superfície usinada, aumentando desta maneira a qualidade de trabalho obtida.

Observa-se ainda, ao analisar-se as tendências apresentadas, para a velocidade de 200,00 m/min, que a pastilha com cobertura FUTURA apresentou valores de rugosidade ligeiramente inferiores para a excentricidade de 6,0 mm se comparados à excentricidade de

$e = 5,5$ mm. Deve-se aqui, lembrar que o corte ocorre em condição otimizada, para as ferramentas escolhidas, no valor de excentricidade de 6,0 mm para as pastilhas de metal duro, dado que as arestas de corte principais da mesma têm 14 mm de comprimento.

Entretanto, o desempenho obtido com a cobertura X-TREME foi, aparentemente, melhor quando do emprego das condições não otimizadas de excentricidade, pois, os valores da rugosidade obtidos até a relação de frequência de 4500, foram menores para a excentricidade de 5,5 mm. Esta tendência somente inverte-se a partir da relação de frequência de 5000 quando, então, apresenta o mesmo comportamento da pastilha com cobertura FUTURA. Uma possível explicação para este fato independe das características do processo de fresotorneamento, em si próprio. Infere-se que, a aresta secundária de corte não exerceu a sua função de maneira adequada, não ocorrendo provavelmente o corte na totalidade de seu comprimento, devido a algum desvio de posicionamento.

Observa-se a seguir as Figuras 4.3 e 4.4 onde estão colocados os resultados para a velocidade de 300,00 m/min.

O comportamento observado, para as duas coberturas (FUTURA e X-TREME), segue uma tendência de redução dos valores médios de rugosidade, proporcionalmente ao aumento da relação de frequência utilizada no processo. Pode-se portanto afirmar que, neste caso, as mesmas não influenciaram o comportamento das curvas de rugosidade encontradas. Em relação à excentricidade, os melhores resultados foram encontrados para 6,0 mm, ou seja, no corte otimizado.

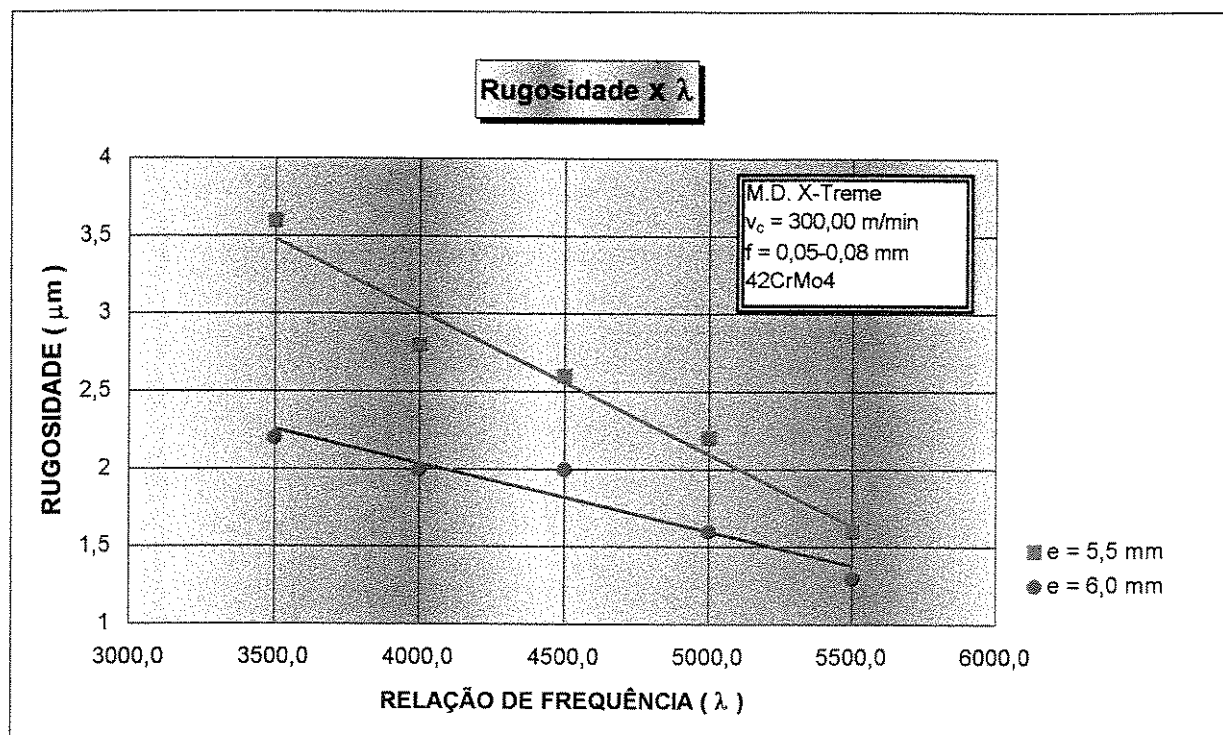


Figura 4.3 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD X-TREME – vc300

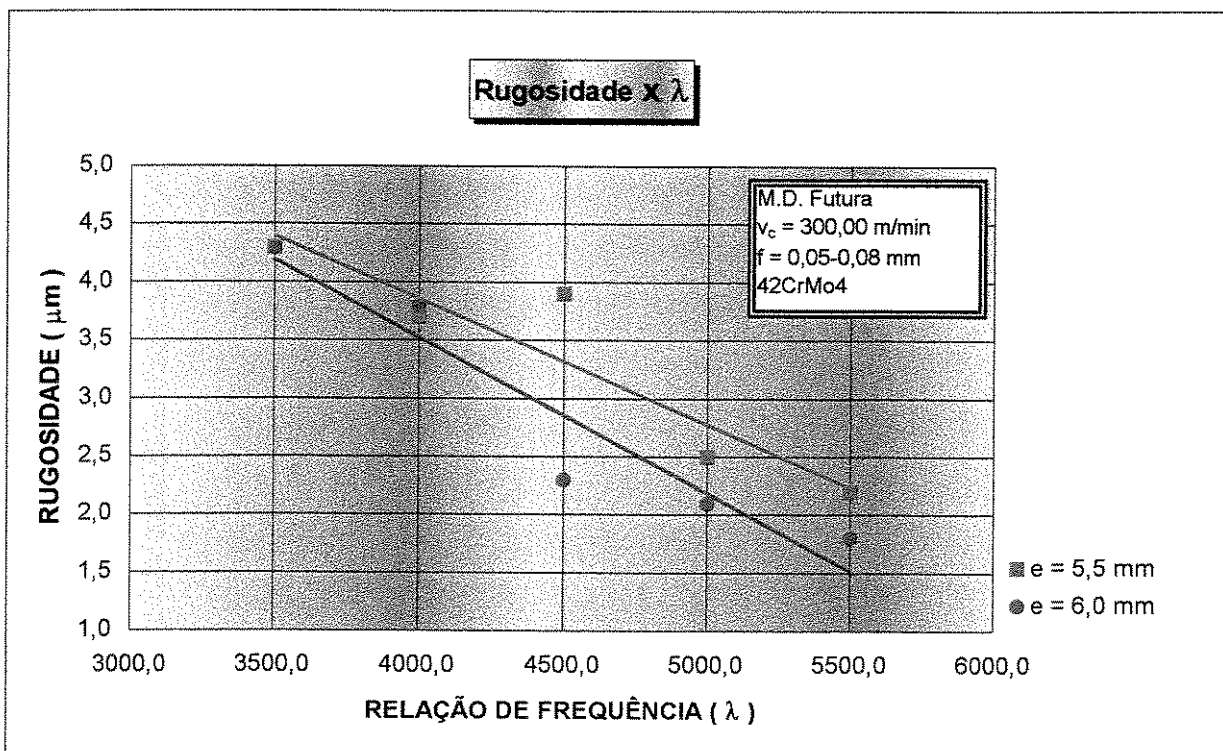


Figura 4.4 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD FUTURA – vc300

A seguir, tem-se as Figuras 4.5 e 4.6, para a velocidade de corte de 400,00 m/min.

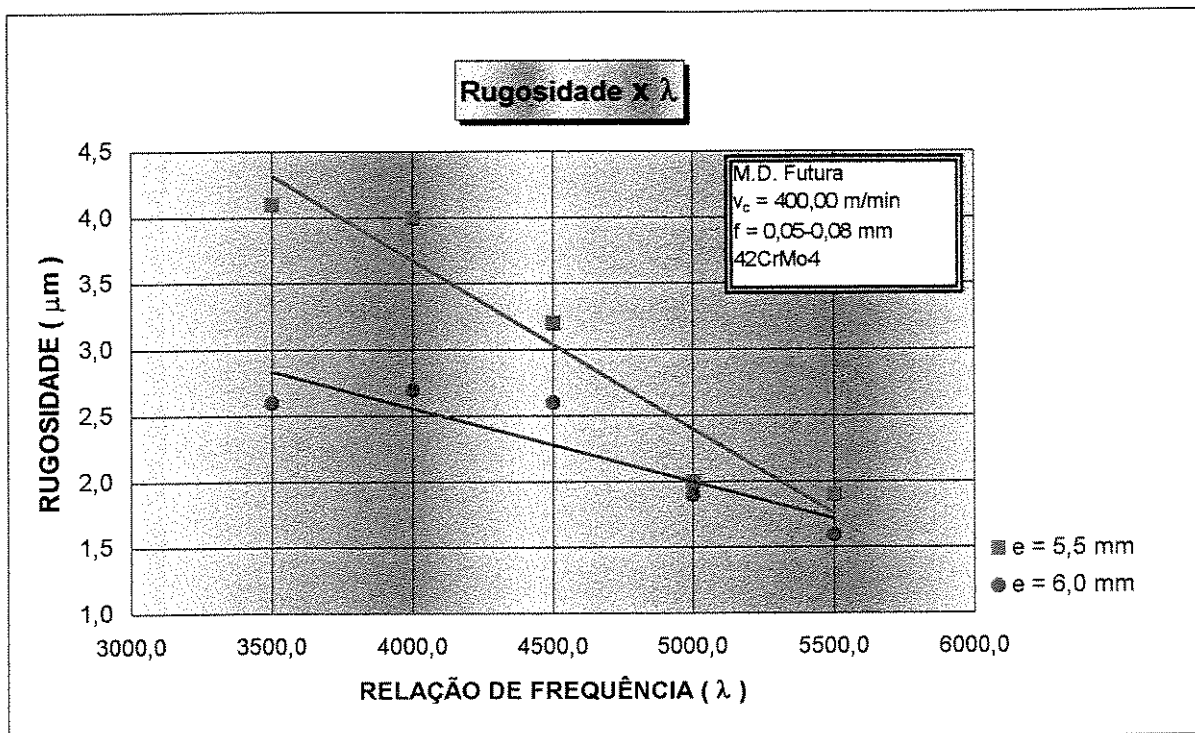


Figura 4.5 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD FUTURA – vc400

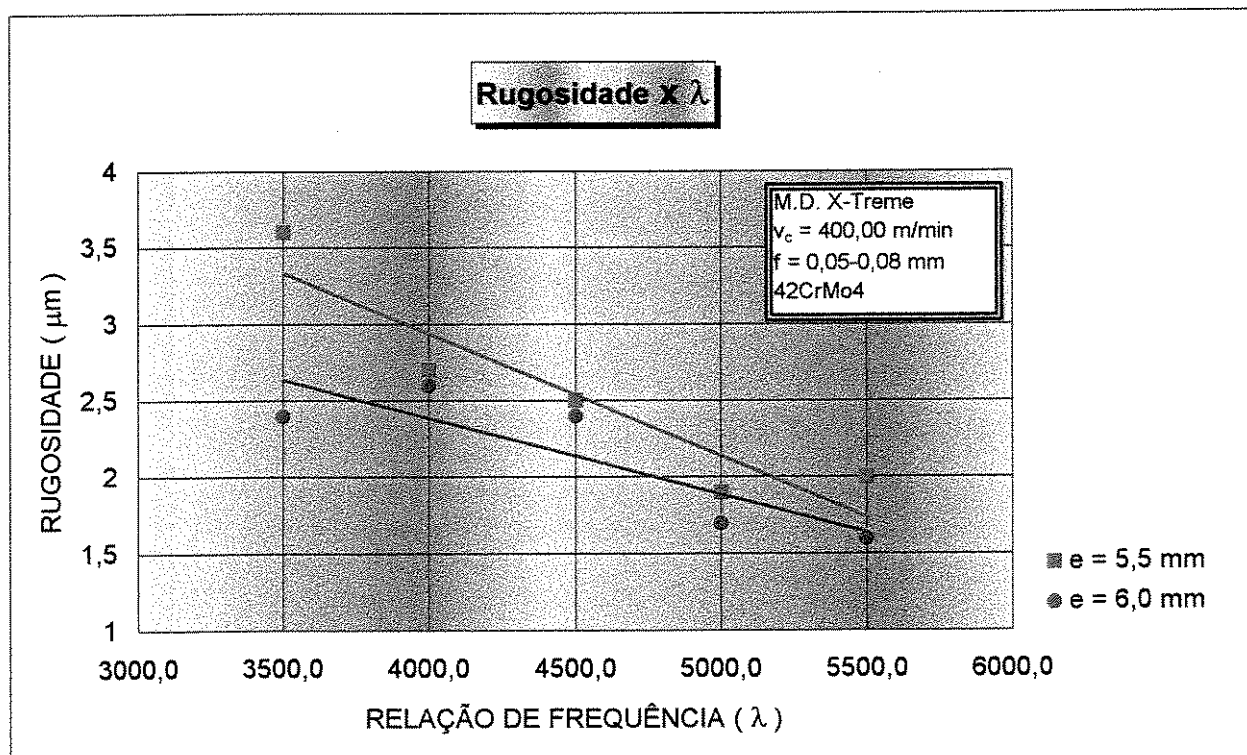


Figura 4.6 – Rugosidade x Relação de Frequência – MD X-TREME – vc400

Verificando os valores e as tendências encontradas, nota-se que o comportamento apresentado pelas curvas ratifica a influência observada da excentricidade e da relação de frequência, nos mesmos aspectos já analisados para as velocidades de corte de 200,00 m/min e 300,00 m/min

Vê-se ainda, que ao aumentar-se a velocidade de corte do processo, os valores de rugosidade apresentaram uma ligeira tendência à elevação. Este fato, entretanto, será analisado a seguir.

A verificação do comportamento da rugosidade, em função da variação da velocidade de corte utilizada, para as duas excentricidades na cobertura X-TREME, estão colocadas nas Figuras 4.7 e 4.8.

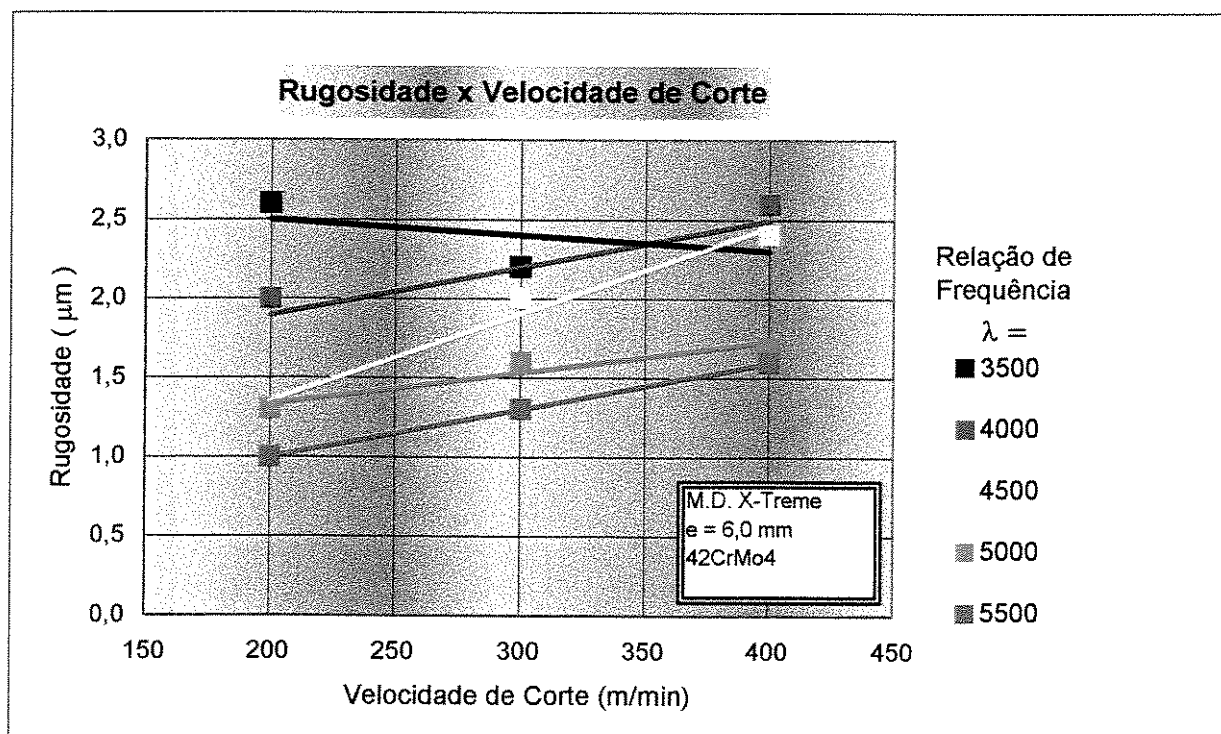


Figura 4.7 – Velocidade de Corte x Rugosidade – MD X-TREME – e6.0

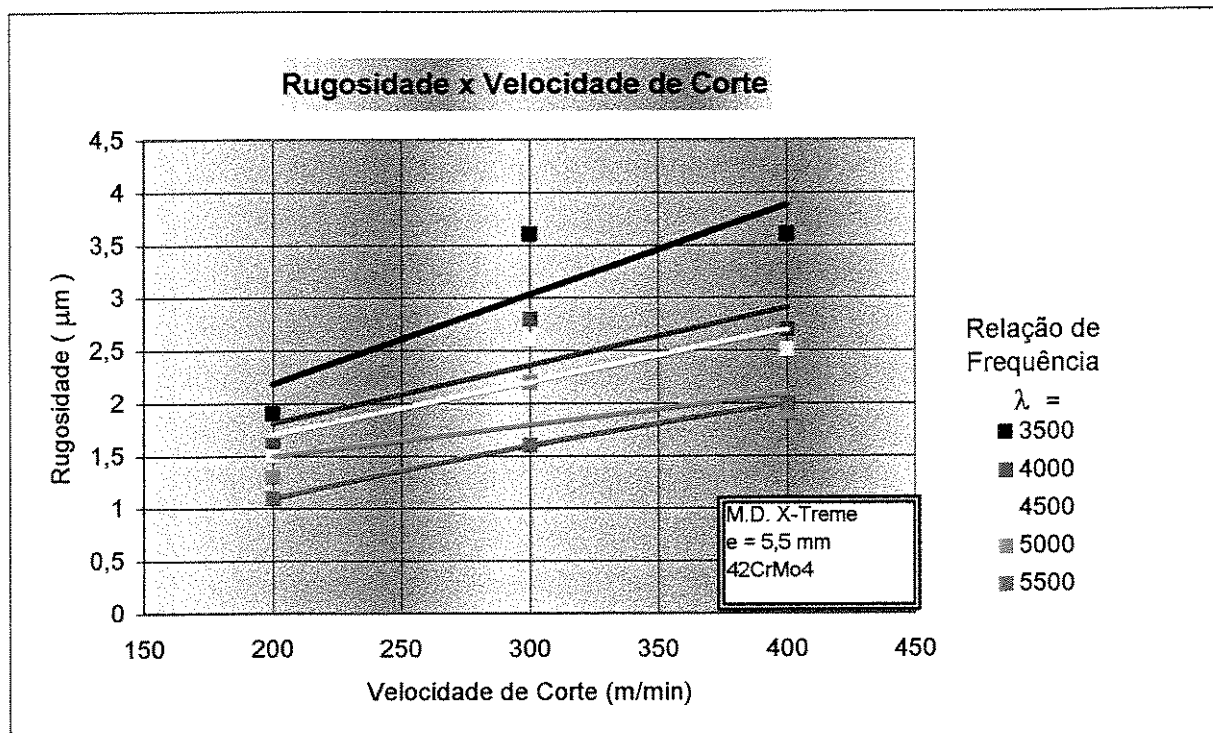


Figura 4.8 – Velocidade de Corte x Rugosidade – MD X-TREME – e5.5

Observando-se os gráficos, verifica-se uma ligeira tendência à elevação dos valores de rugosidade à medida em que a velocidade de corte aumenta.

Uma possível explicação para este fato pode estar relacionada aos mecanismos de desgaste das arestas de corte das ferramentas. Em altíssimas velocidades de corte de 300,00 m/min e 400,00 m/min, por exemplo, para pastilhas de metal duro, os desgastes costumam ocorrer pela intensificação da abrasão e fadiga térmica, conforme relata Chandrasekaran [Chandrasekaran, 1985].

Em função deste fato, infere-se que o aumento da velocidade de corte tende a aumentar os valores dos gradientes de temperatura envolvidos, de maneira progressiva e contínua [Schulz, 1990], elevando desta maneira os mecanismos que fazem surgir a abrasão e a fadiga térmica, influenciando diretamente na integridade das arestas de corte das ferramentas, que neste caso, suportam entre 800° C (cobertura FUTURA) e 900° C

(X-TREME) . Esta possível deterioração das arestas, pode ter ocasionado esta elevação dos valores das rugosidades encontrados.

Entretanto, esta tendência de elevação proporcional ao aumento da temperatura, não foi observada para as pastilhas FUTURA (Figuras 4.9 e 4.10), onde inexistiu uma variação significativa dos valores de rugosidade. As variações existentes para estes casos não ultrapassaram a ordem de $1,0 \mu\text{m}$.

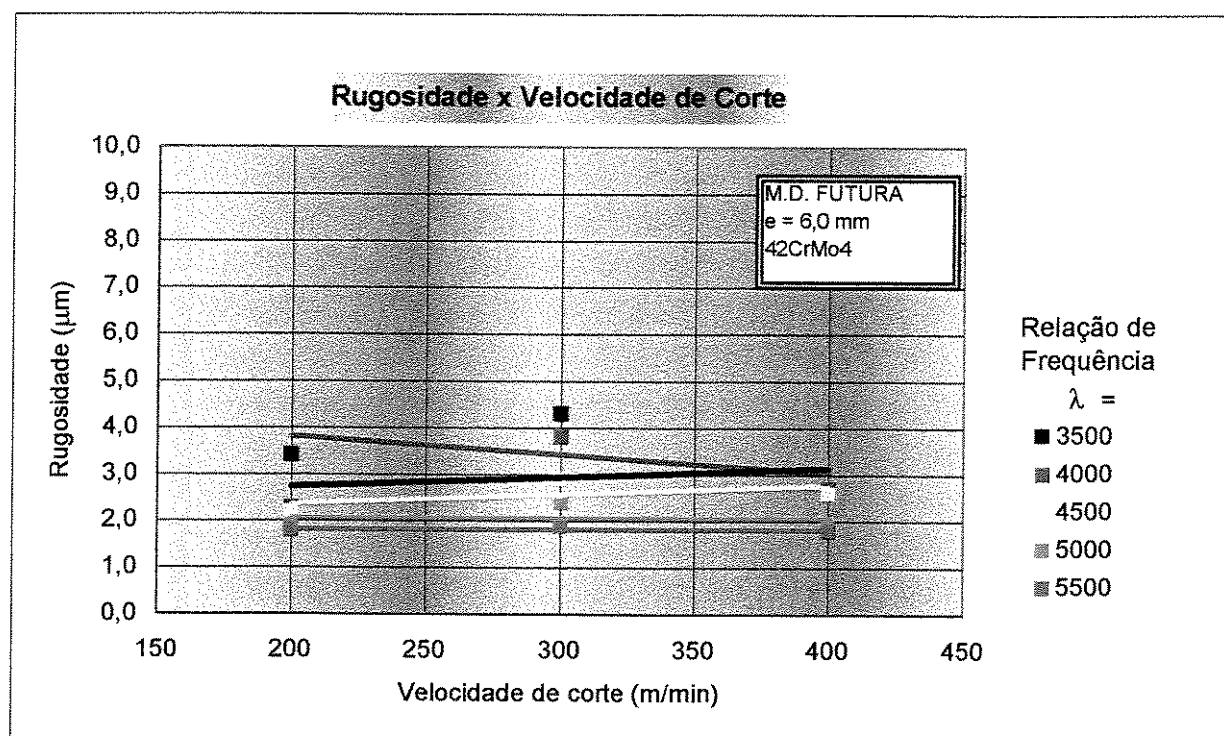


Figura 4.9 – Velocidade de Corte x Rugosidade – MD FUTURA – e6.0

Observa-se na Figura 4.9, que a influência da velocidade de corte é extremamente pequena (inferior a $0,5 \mu\text{m}$), para a excentricidade de 6,0 mm, não parecendo contribuir de forma significativa para os resultados de rugosidade encontrados na superfície usinada da peça.

Tendência semelhante, no comportamento da rugosidade é observada, a seguir, para a excentricidade de 5,5 mm (Figura 4.10).

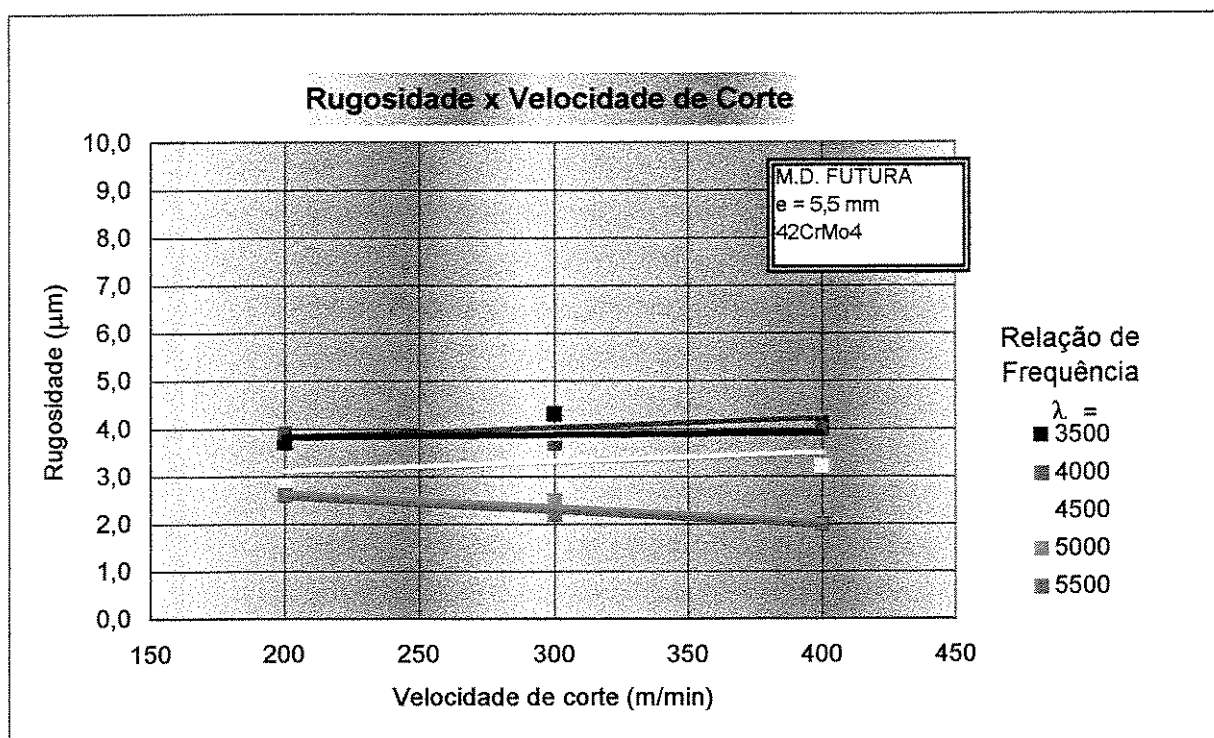


Figura 4.10 – Velocidade de Corte x Rugosidade – MD FUTURA – e6.0

Finalizando, observa-se que apesar de existir uma tendência da pastilha com cobertura X-TREME obter resultados de rugosidade maiores, quando da elevação da velocidade de corte, quando comparados aos resultados da pastilha com cobertura FUTURA, a abrangência dos ensaios não permite afirmar com segurança que este fato será uma característica desta cobertura, pois, as diferenças de rugosidades encontradas quase sempre se situaram em patamares inferiores a $1,0 \mu\text{m}$.

4.3 Resultados de Desvios de Cilindricidade com Pastilhas de Metal Duro

Estão aqui apresentados os resultados de cilindridade obtidos nas diferentes condições operacionais empregadas nos ensaios. Deve-se ressaltar, que o sistema de fixação da peça é de grande importância para se alcançar bons resultados em desvios de forma. O mesmo exerce influência antes mesmo de iniciar-se a usinagem dos corpos de prova, principalmente caso não esteja satisfatoriamente instalado.

Em função deste fato, tomou-se a precaução de se verificar, de maneira aleatória, as condições de desvio de batimento de um padrão, fixado previamente na placa do centro de usinagem, quando da realização dos ensaios. Além disso, este procedimento assegurou, que os resultados aqui apresentados estejam isentos quanto a possível influência de uma má fixação da peça na placa ou qualquer outro possível defeito decorrente deste problema bastante usual.

As medidas foram obtidas através de um equipamento Taylor Hobson dedicado, modelo A112/1170 E com incerteza de medição de $0,05 \mu\text{m}$. Os procedimentos de ajuste e medição de cilindridade de cada peça exigiram uma alta dose de paciência, tendo em vista que o ajuste fino para se iniciar a medição da cilindridade tomou grande parte do tempo de trabalho.

As figuras mostradas a seguir apresentam uma única medida de cilindridade, para cada condição ensaiada, medida longitudinalmente ao longo do eixo da peça, em sentido ascendente de apalpação do cabeçote do Taylor Hobson utilizado. Como durante este percurso de medição do apalpador a peça gira, efeitos de influências localizadas na superfície são minimizados. Todavia, deve-se ressaltar que nas primeiras peças, por questão de segurança, foram tomadas várias medidas de cilindridade e pôde-se observar, experimentalmente, que o resultado encontrado está de acordo com a percepção prática do procedimento.

Observando-se as figuras 4.11 à 4.20, nota-se que os valores da cilindridade variaram em função da velocidade de corte empregada, do material da cobertura da ferramenta, da excentricidade e da relação de frequência empregada.

À semelhança do comportamento observado nas medidas de rugosidade, observou-se que os menores valores ocorrem na condição de corte otimizada para excentricidade do processo, ou seja, $e = 6,0$ mm. No caso da Figura 4.11 foi medida a cilindridade de $4,0 \mu\text{m}$ para a cobertura X-TREME, em $200,00$ m/min, na excentricidade de $6,0$ mm, para a relação de frequência de 4500 .

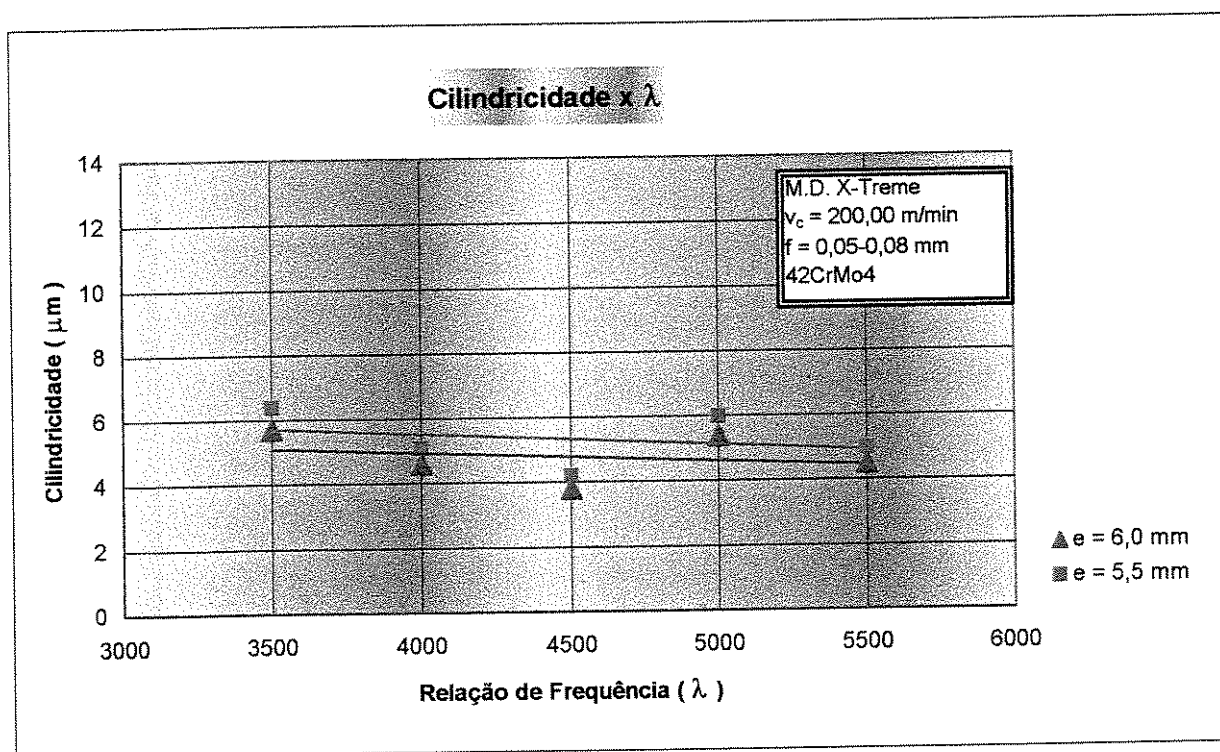


Figura 4.11– Cilindridade x Relação de Frequência – X-TREME – $vc200$

A mesma tendência de queda dos valores de cilindridade, à medida em que aumentam-se os valores de relação de frequência é observado para os ensaios com as pastilhas de cobertura FUTURA, apresentados a seguir na figura 4.12. Nota-se também, que a variação dos

valores ao longo do aumento da relação de frequência tem uma tendência parecida com a obtida na Figura 4.11.

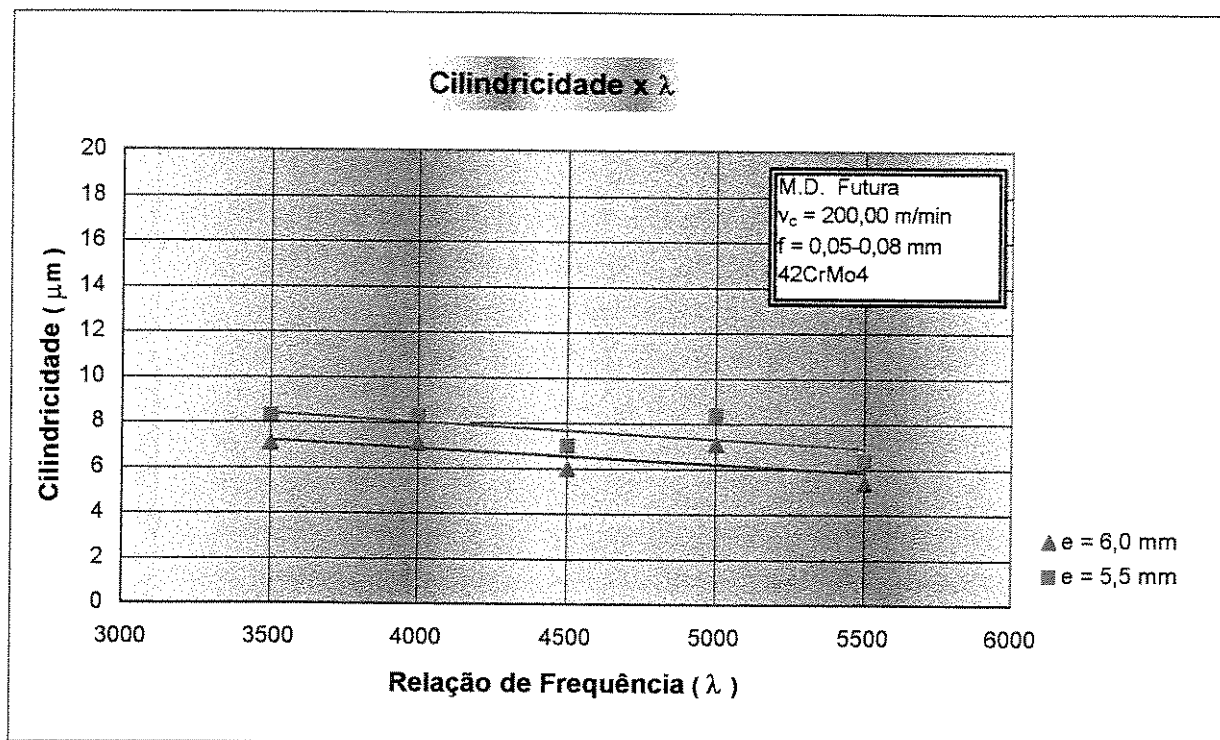


Figura 4.12– Cilindricidade x Relação de Frequência – FUTURA – vc200

Analisando-se o comportamento dos valores de cilindridade, pode-se inferir que a variação da relação de frequência, interfere nos valores dos desvios de cilindridade obtidos pelo fresotorneamento, ou seja, o tempo de contato da ferramenta, com a peça, durante a usinagem, parece ser fator determinante para a melhora ou piora dos valores de cilindridade obtidos.

Quando do aumento da relação de frequência, independentemente da velocidade de corte empregada, as arestas de corte secundárias da ferramenta permanecem mais tempo em contato com a peça, e como o perfeito alinhamento das mesmas é maior quanto maior este tempo de contato, isto favorece o corte resultando em valores menores de

cilindricidade à medida que se aumentam as relações de frequência. Além disso, notou-se através da observação visual do processo de fresotorneamento, que as possíveis vibrações existentes durante a usinagem das peças, aparentemente, se reduzem à medida que aumentam-se as velocidades de corte associadas às relações de frequência.

Entretanto, o valor de excentricidade exerceu a influência similar à encontrada para as medidas de rugosidade, sugerindo que o corte ortogonal otimizado ($e = 6,0$ mm) posiciona melhor a aresta secundária de corte durante a usinagem, resultando em melhores valores para a cilindridade, conforme, observa-se nas Figuras a seguir (4.13, 4.14, 4.15 e 4.16).

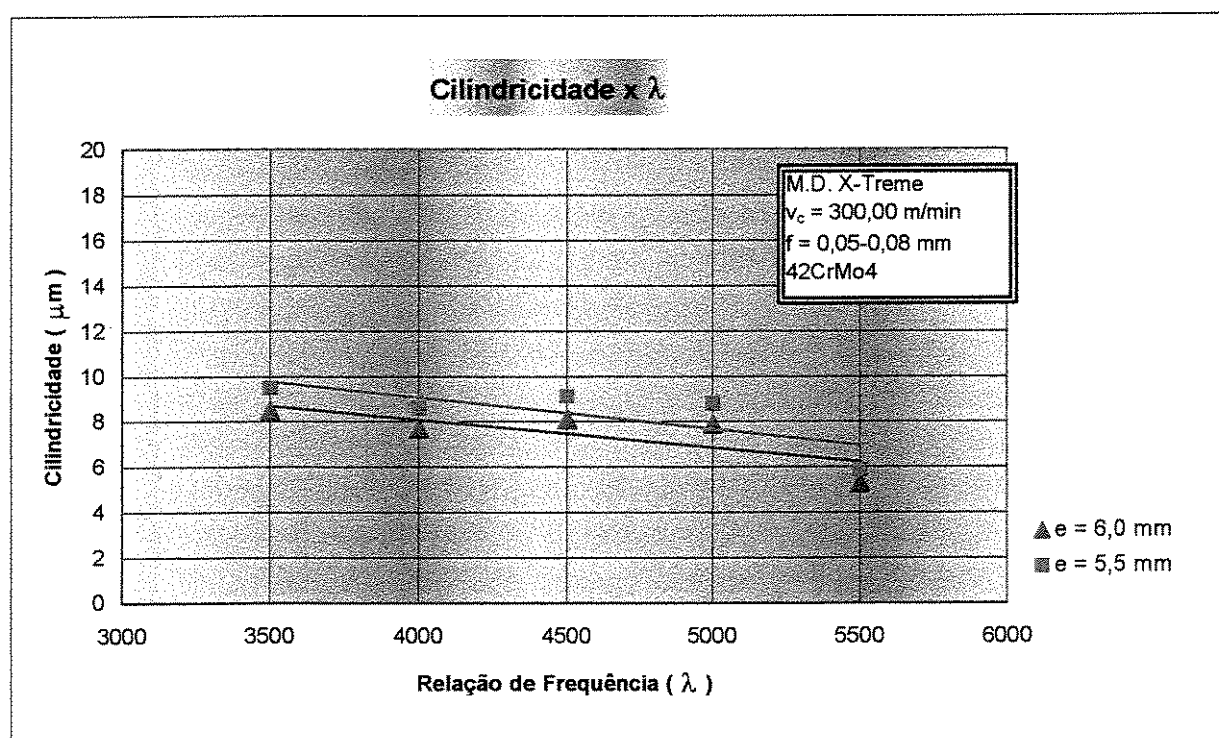


Figura 4.13– Cilindricidade x Relação de Frequência – X-TREME – $vc300$

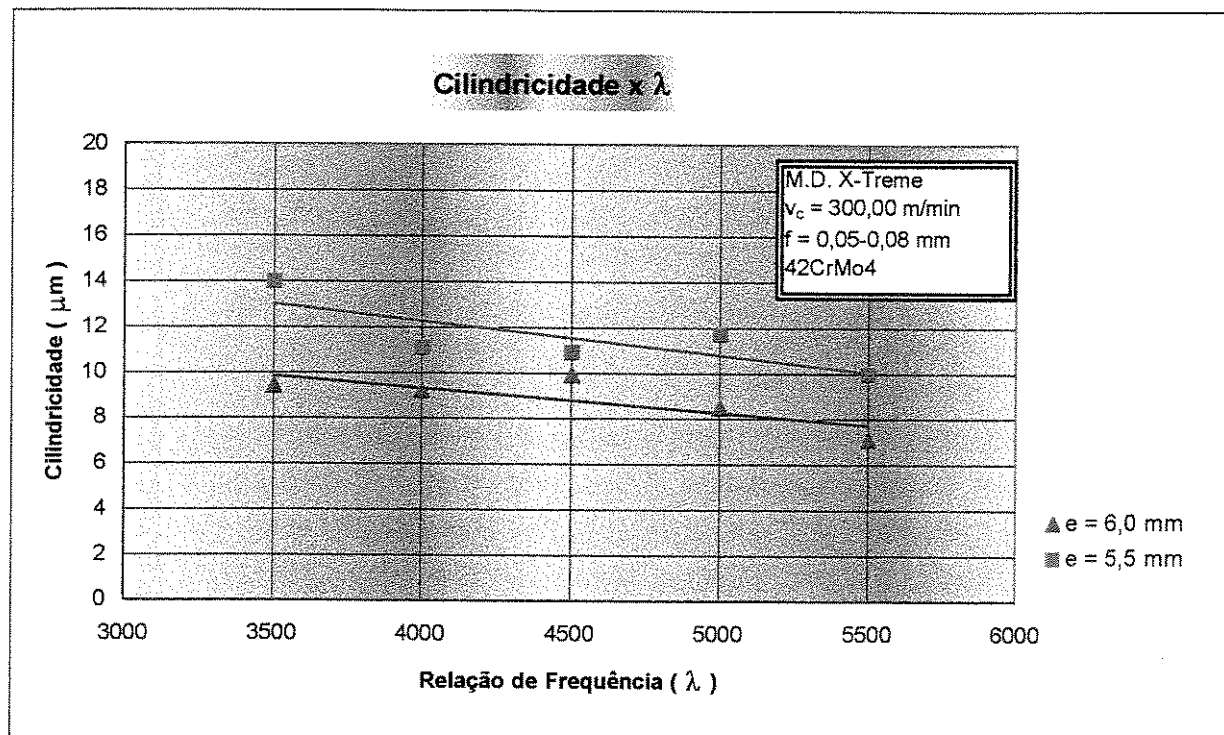


Figura 4.14 – Cilindricidade x Relação de Frequência – FUTURA – vc300

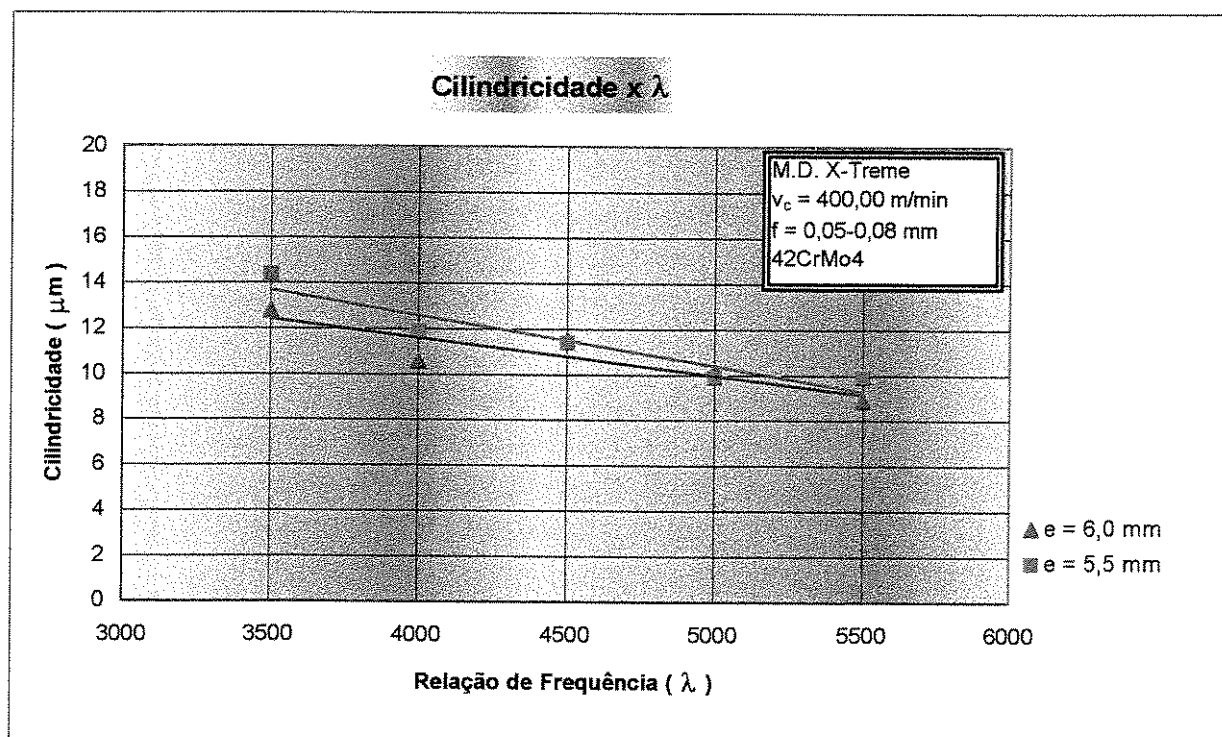


Figura 4.15 – Cilindricidade x Relação de Frequência – X-TREME – vc400

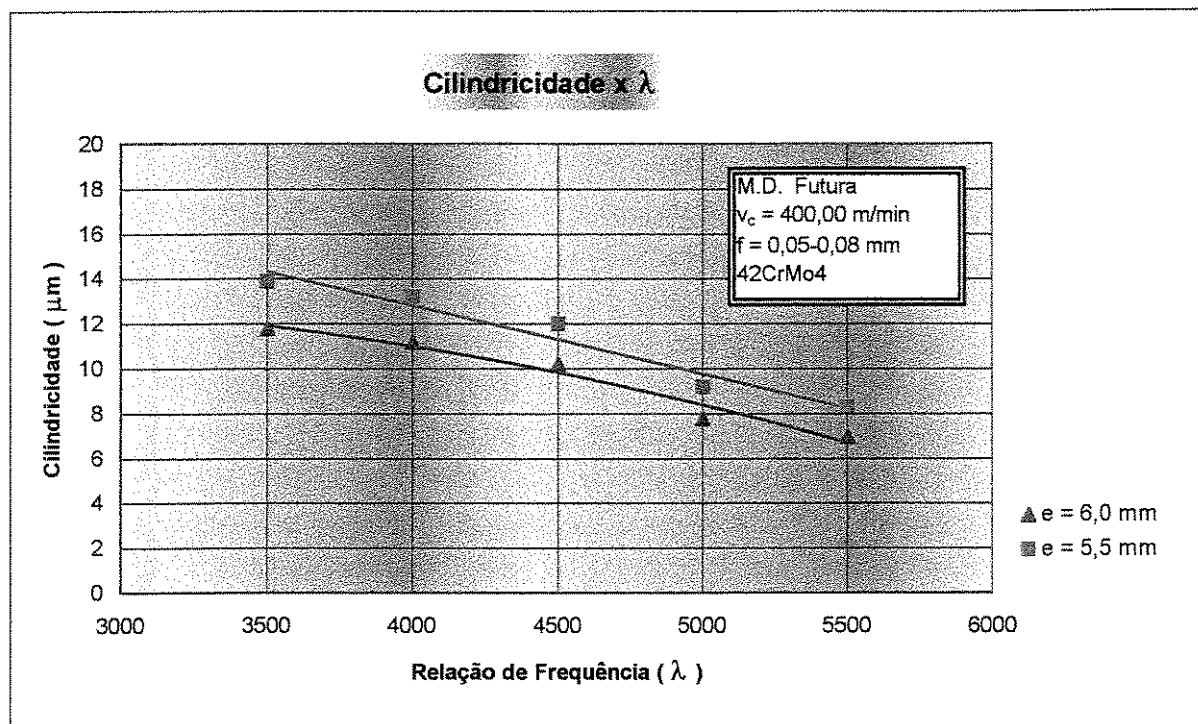


Figura 4.16 – Cilindricidade x Relação de Frequência – FUTURA – vc400

Analisando-se a variação dos valores de cilindridade para a variação da velocidade de corte, para a excentricidade de 5,5 mm (Figura 4.17), vê-se nitidamente, que o aumento da velocidade de corte leva a piora dos resultados de cilindridade encontrados, de forma constante e contínua.

Uma única exceção ocorreu com a cobertura FUTURA (Figura 4.18), quando as relações de frequência empregadas foram 3500 e 4000. Em tal situação, observou-se que a tendência dos valores de cilindridade apresentaram pouca variação.

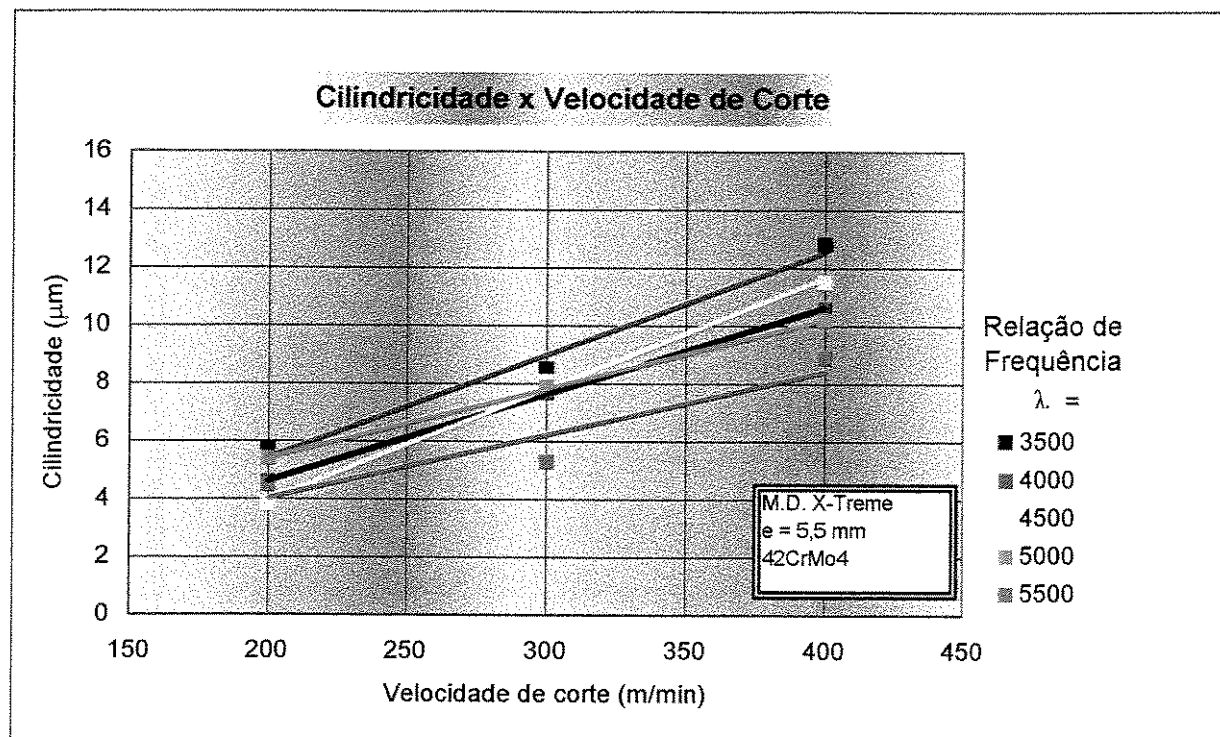


Figura 4.17 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – X-TREME – e5.5

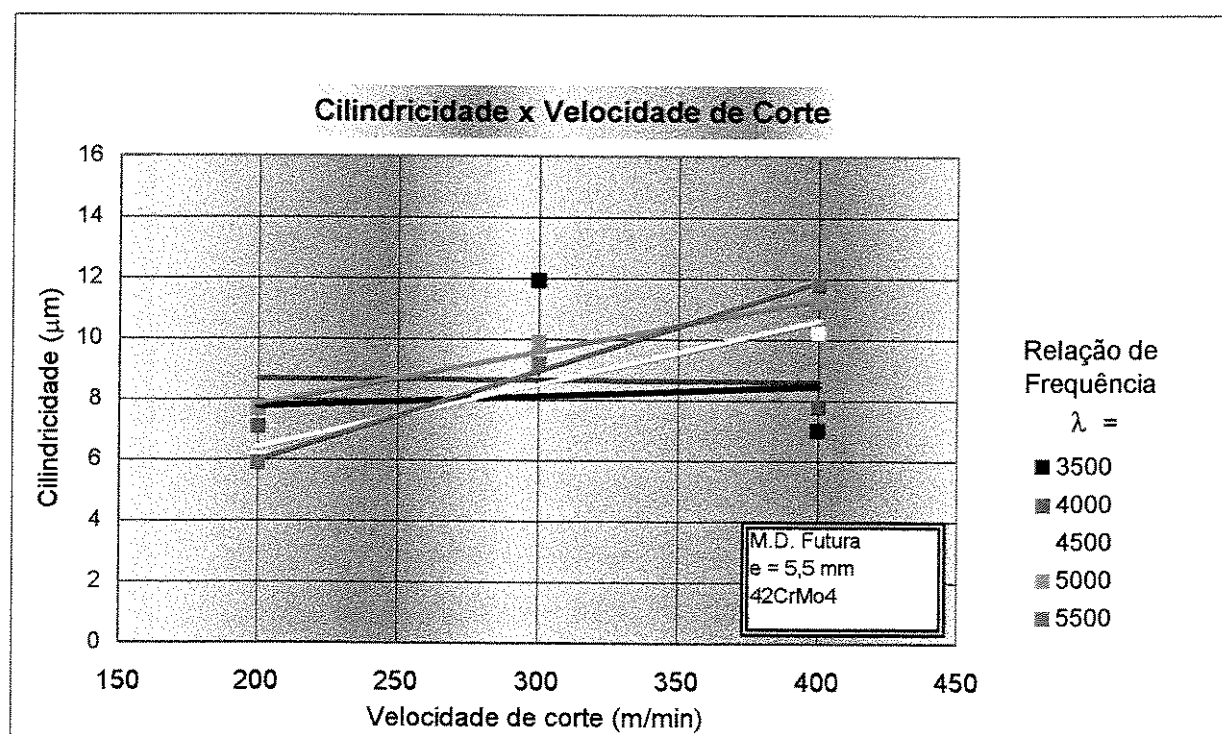


Figura 4.18 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – FUTURA – e5.5

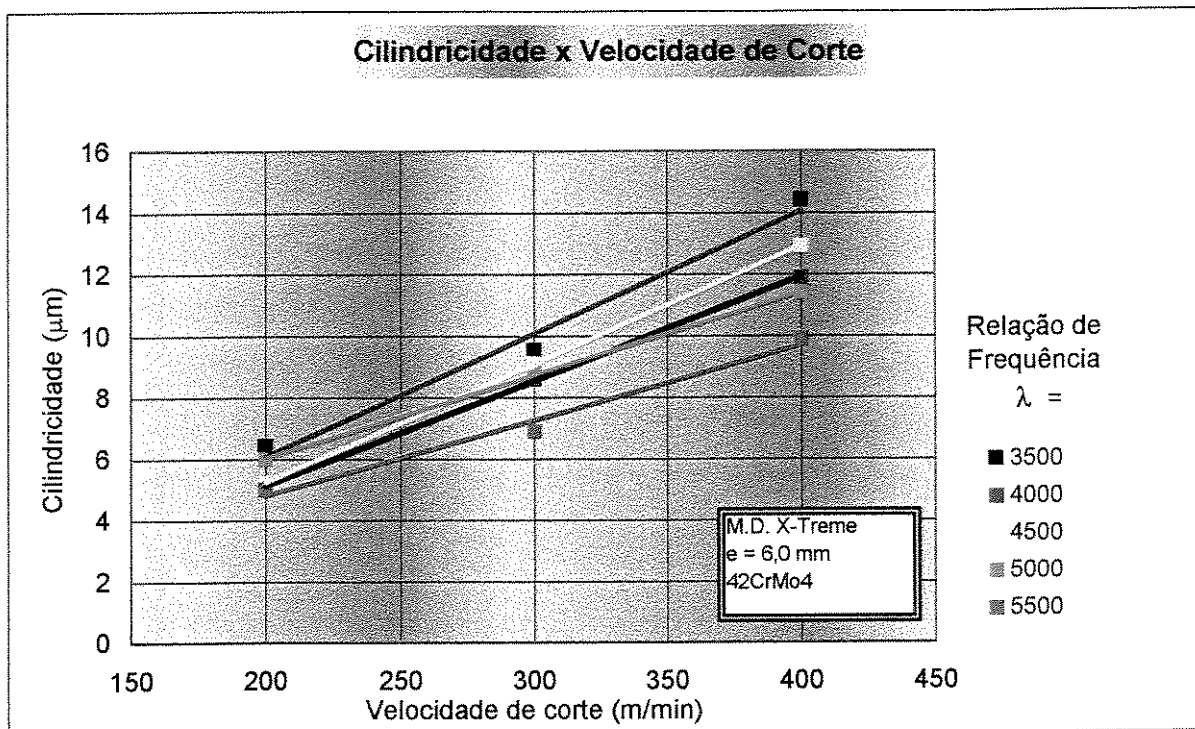


Figura 4.19 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – X-TREME – e6.0

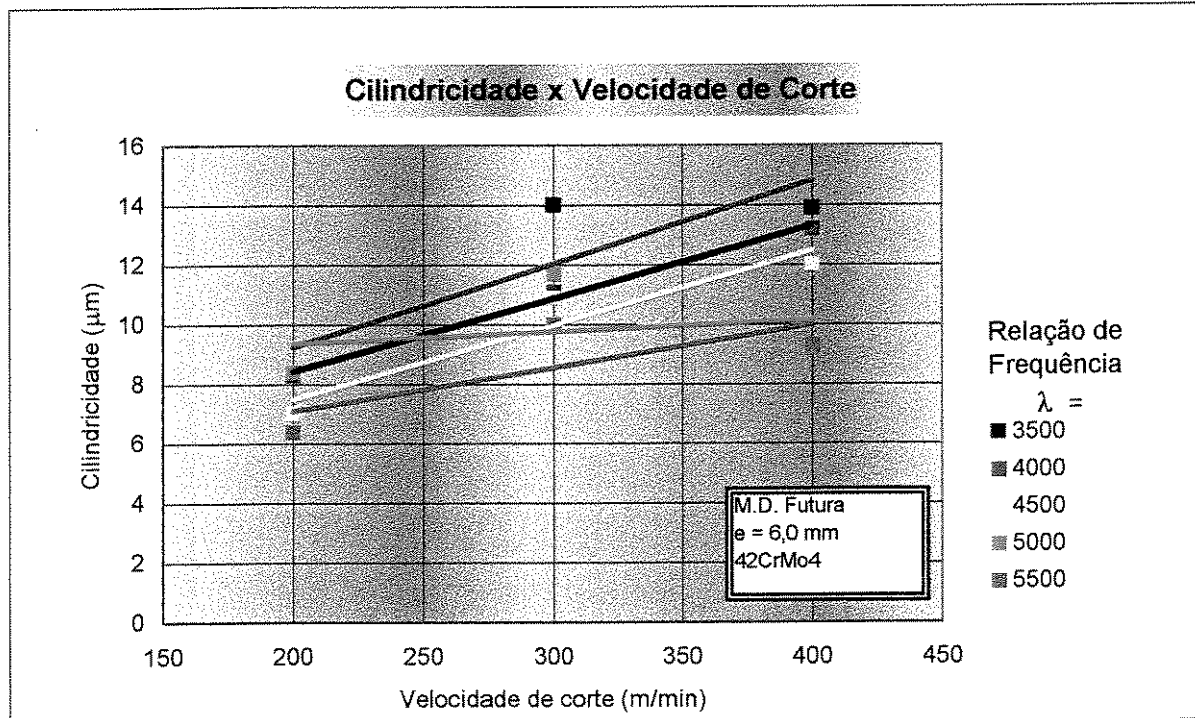


Figura 4.20 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – FUTURA – e6.0

Não se pode também descartar as possíveis contribuições metalúrgicas do processo de desgaste e a eficiência, no corte com as coberturas das pastilhas, durante a usinagem em HSC, que influenciam a distribuição de tensão na zona de cisalhamento do cavaco no plano secundário do mesmo.

Segundo Schulz [Schulz, 1994], o cavaco em processos de fresotorneamento, em altíssima velocidade de corte (HSC), por possuir quase sempre uma estrutura martensítica e lamelar simples, de material não deformado tende a apresentar uma redução das forças de corte, proporcionalmente ao aumento da relação frequência da rotação, o que pode explicar, em parte, o comportamento observado nas Figuras 4.11 à 4.20.

4.4 Resultados de Rugosidade com Pastilhas de CBN

A seguir, encontram-se os resultados das rugosidades e dos desvios de cilíndricidade medidos dos corpos de prova usinados com pastilhas de CBN.

A utilização do CBN permitiu que a usinagem dos corpos de prova fosse conduzida com velocidades de corte ainda maiores que as utilizadas com metal duro, possibilitando o estudo das variáveis de influência no processo de fresotorneamento radial, em aços endurecidos, para condições de usinagem HSC com pastilhas de CBN.

Os ensaios para as pastilhas de CBN foram conduzidos com duas excentricidades, uma otimizada, $e = 5,5$ mm (a aresta de corte da pastilhas de CBN tinha 15,5 mm de comprimento) e outra não, no caso, $e = 6,0$ mm. Além disso variou-se os valores de avanço total das ferramentas ($f = 0,05$ mm à 0,09 mm) e as relações de frequência empregadas no processo ($\lambda = 3500$ à 5500).

Em função destes ensaios também pôde-se traçar uma análise de quais foram os principais parâmetros de influência para o processo.

Analisando-se a Figura 4.21, a seguir, nota-se que as rugosidades encontradas iniciam-se em valores próximos a $2,0 \mu\text{m}$, para uma relação de frequência de 3500, caindo gradativamente de forma constante, seguindo uma clara tendência, até valores próximos a $0,9 \mu\text{m}$ para a relação de frequência de 5500.

Nestes ensaios um único valor foi observado, afastando-se da tendência apresentada, de diminuição dos valores de rugosidade em função do aumento da relação de frequência. Este valor, pode estar relacionado a alguma vibração no processo de usinagem na entrada da ferramenta na peça.

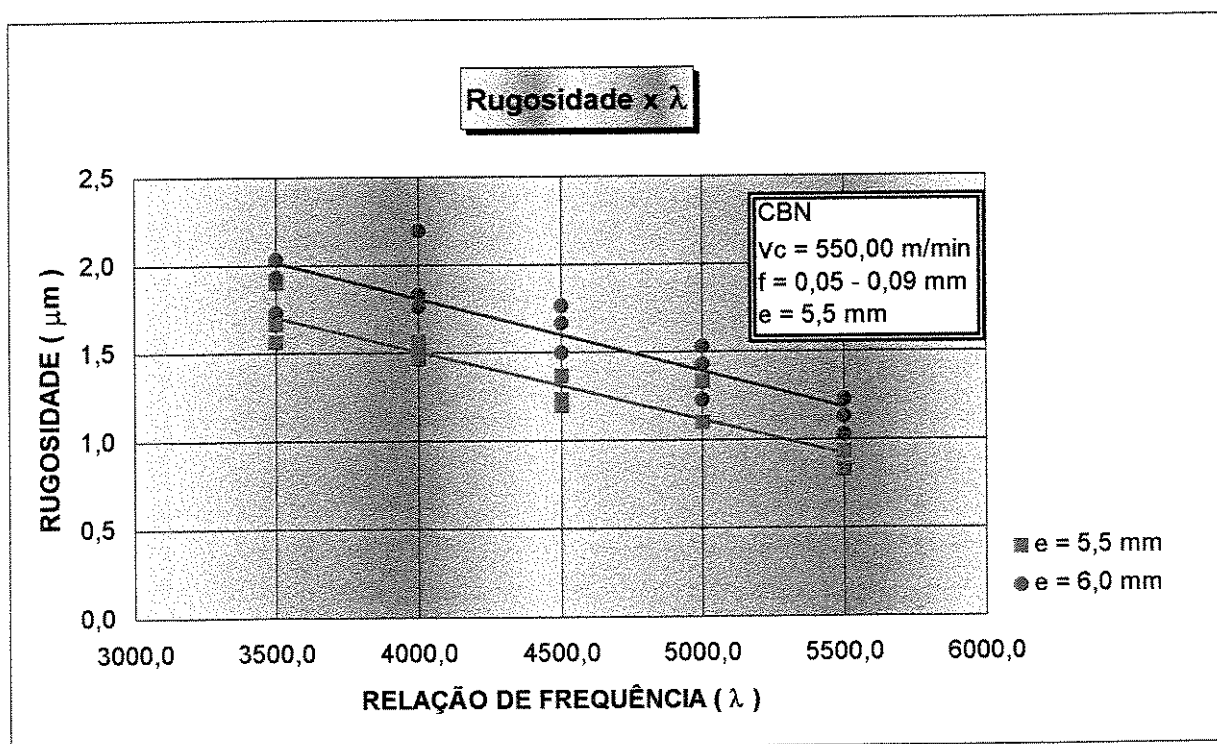


Figura 4.21 – Rugosidade x Relação de Frequência – CBN – vc500

A mesma tendência de comportamento dos valores de rugosidade em função do aumento da relação de frequência pode ser observada na Figura 4.22, onde ainda,

empreendeu-se um aumento da velocidade de corte, para 650,00 m/min. Os valores de rugosidade encontrados, demonstram comportamento análogo aos encontrados para a velocidade de 550,00 m/min, ou seja, decaem com o aumento da relação de frequência.

Também neste caso, uma única exceção foi encontrada, para a relação de frequência de 5000, porém, também, para a excentricidade de 6,0 mm. Nesta condição operacional, o processo demonstrou gerar um pequeno aumento dos valores de rugosidade, todavia, inferiores a $1,0 \mu\text{m}$, o que pode sugerir, que alguma perturbação no processo relacionada a vibrações ocorridas durante o corte possa ter influenciado de maneira a provocar este pequeno desvio, de forma repentina.

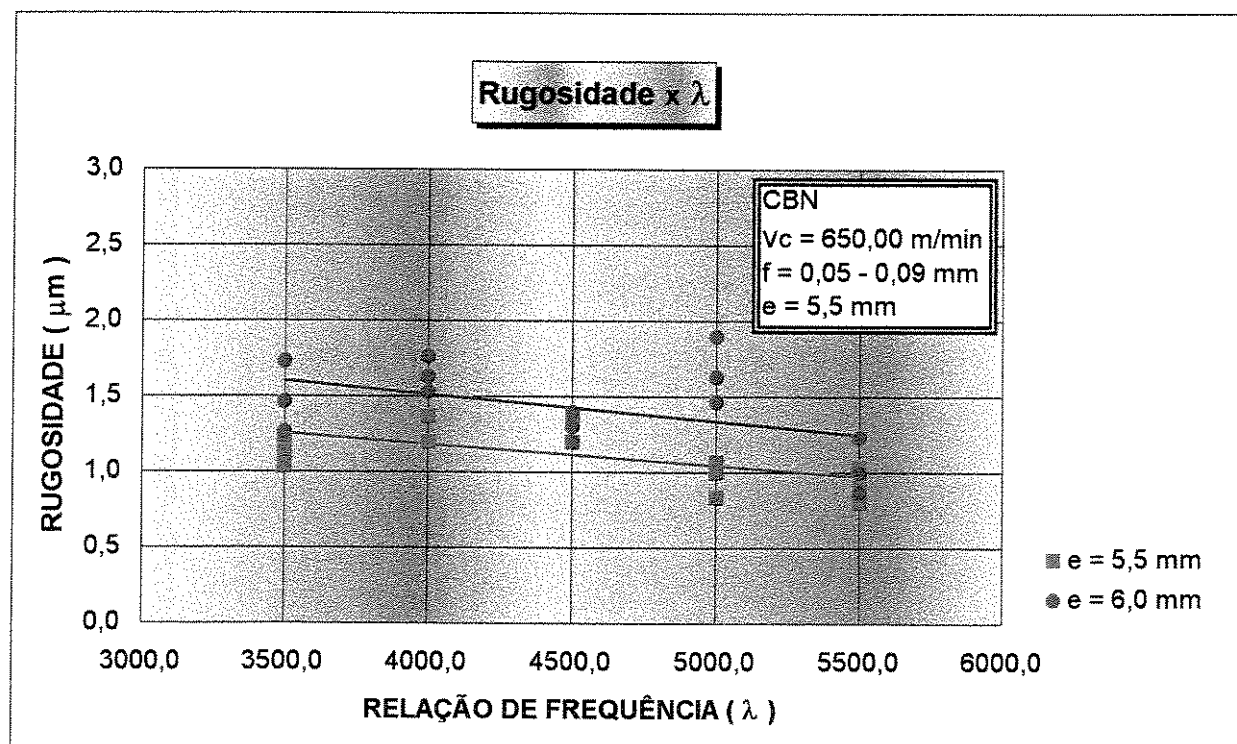


Figura 4.22 – Rugosidade x Relação de Frequência – CBN – vc600

Para as Figuras 4.23 e 4.24, aumentou-se a velocidade de corte para 750,00 m/min e 850,00 m/min, respectivamente, e pode ser observado que para elevadas relações de frequência ($\lambda = 5000$ e $\lambda = 5500$) a excentricidade parece não exercer mais nenhuma influência significativa no processo

Uma possível explicação deste fato sugere a hipótese, que o aumento da relação de frequência do processo permite, que a aresta de corte secundária de corte permaneça mais tempo atuando na peça, usinando-a de maneira mais uniforme, reduzindo os efeitos da excentricidade não otimizada. Esta influência possibilitaria minimizar os efeitos dos problemas ocasionados pelo acréscimo no valor da excentricidade do processo.

Em baixas relações de frequência, os resultados sugerem que a aresta de corte secundária não desempenha sua função de forma plena, reduzindo assim a eficiência do que seria um “polimento” da superfície, e conseqüentemente aumentando o perfil de rugosidade encontrado.

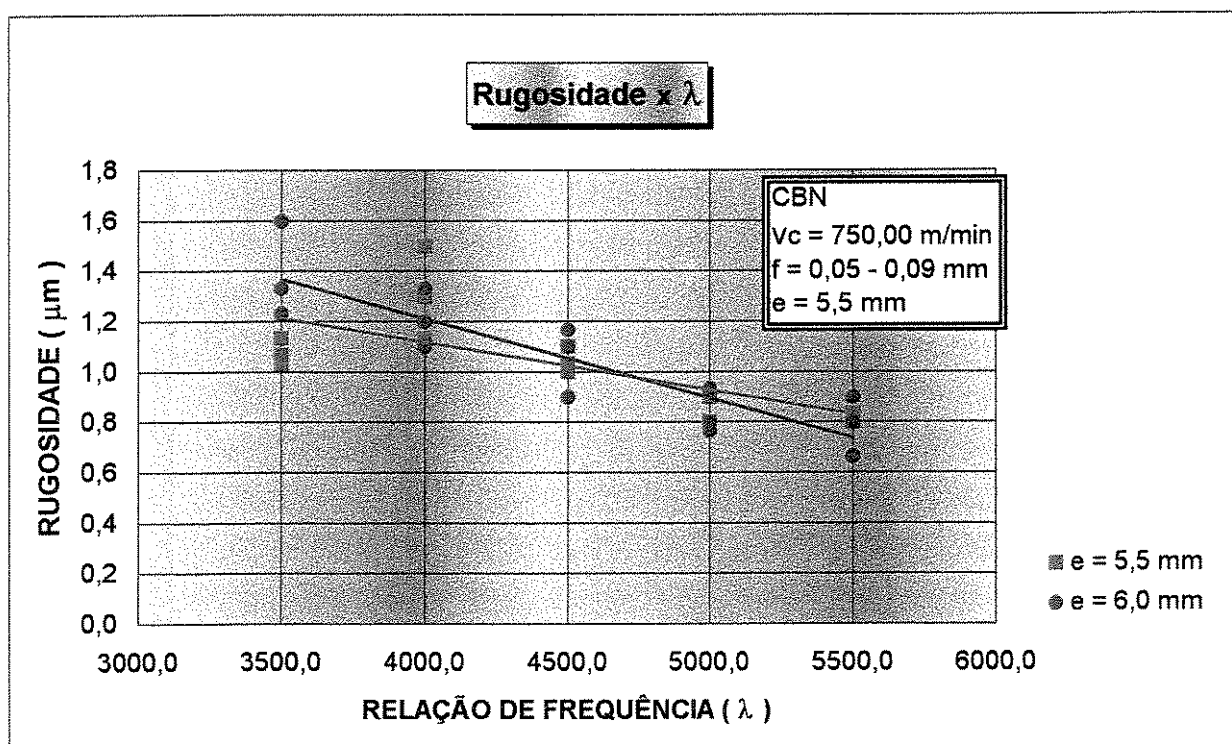


Figura 4.23 – Rugosidade x Relação de Frequência – CBN – vc750

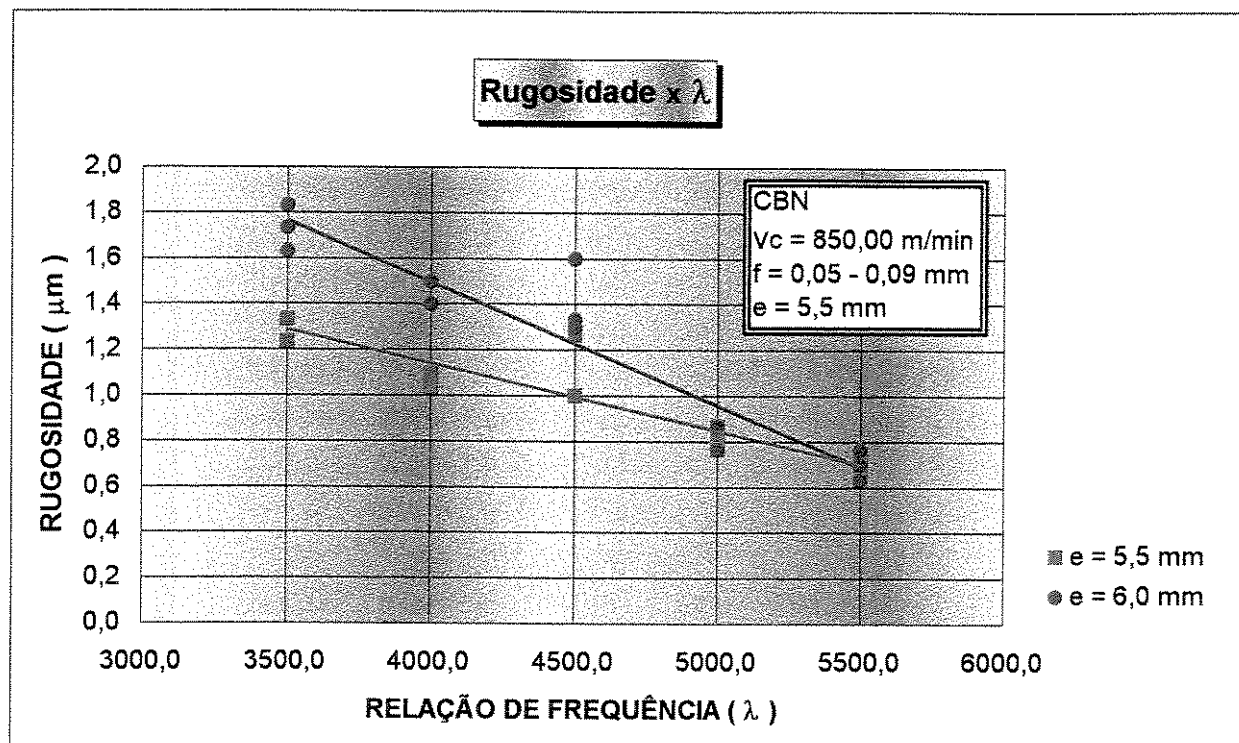


Figura 4.24 – Rugosidade x Relação de Frequência – CBN – vc850

O alto grau de acabamento superficial obtido pelo processo de fresotorneamento, pode ser verificado plenamente na Figura 4.25, onde verifica-se valores de rugosidade muito baixos, comparáveis, ou mesmo superiores, em alguns casos, aos processos de retificação.

Grande parte desta situação deve-se ao fato dos ensaios serem conduzidos com condições operacionais, onde existem altíssimas velocidades associadas a baixos avanços de corte, que contribuíram de forma substancial para estas qualidades encontradas.

Além disso, apesar das velocidades empregadas se situarem dentro da faixa de HSC, as mesmas ainda se encontram em níveis inferiores aos patamares (15 a 20 vezes o valor convencional) de risco, onde poderiam, ocorrer o aparecimento das forças de D'Alembert [Komanduri, 1985], que interferem fortemente no processo.

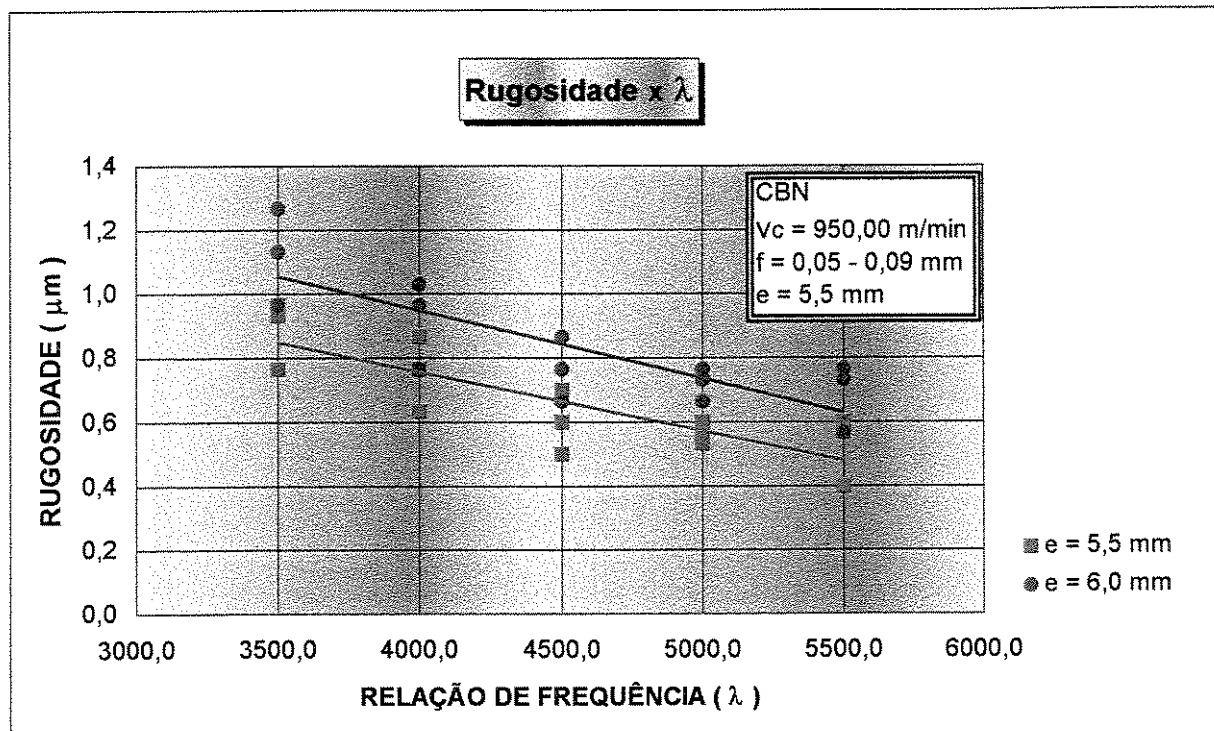


Figura 4.25 – Rugosidade x Relação de Frequência – CBN – vc950

Nas Figuras apresentadas a seguir (4.26 a 4.27) estão mostrados os comportamentos da rugosidade em função da velocidade de corte ensaiada, para usinagem com CBN.

Em praticamente todas as relações de frequência observadas, notou-se uma nítida tendência de queda dos valores de rugosidade, proporcional ao aumento da velocidade de corte.

Ao se comparar as Figuras 4.26 e 4.27, nota-se também a influência da excentricidade nos valores absolutos das rugosidades obtidas.

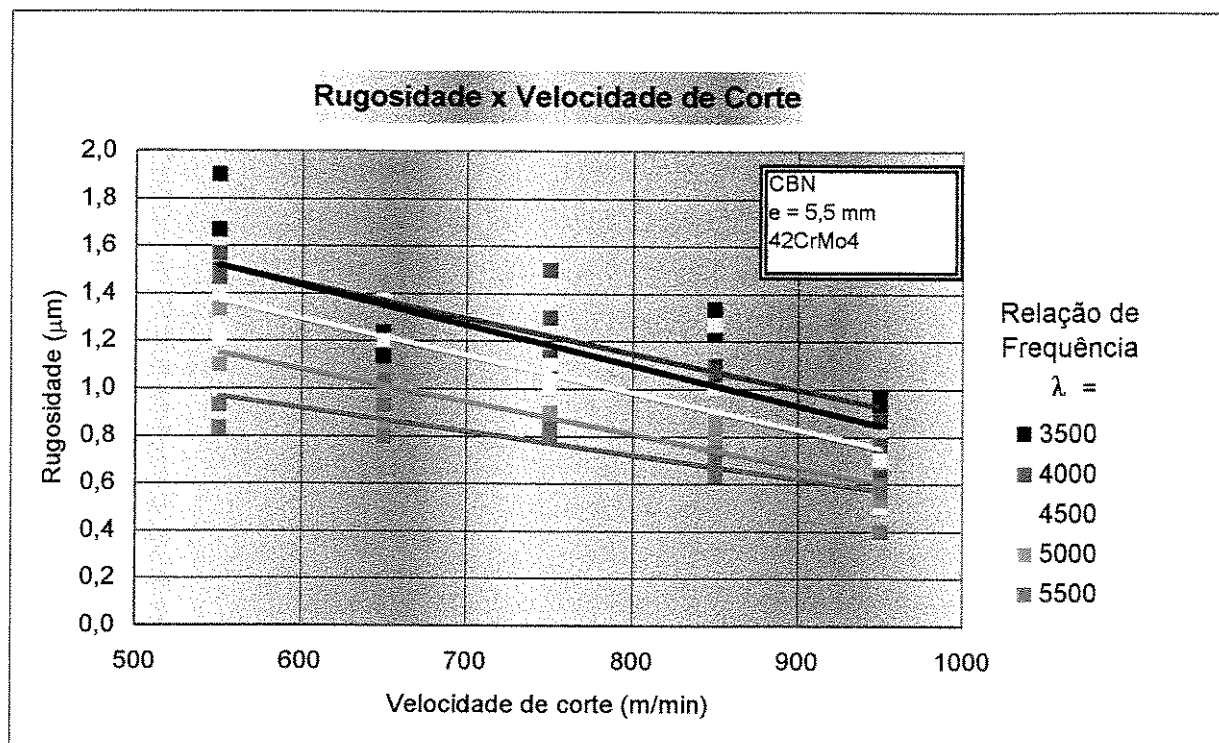


Figura 4.26 – Rugosidade x Velocidade de corte – CBN – e5.5

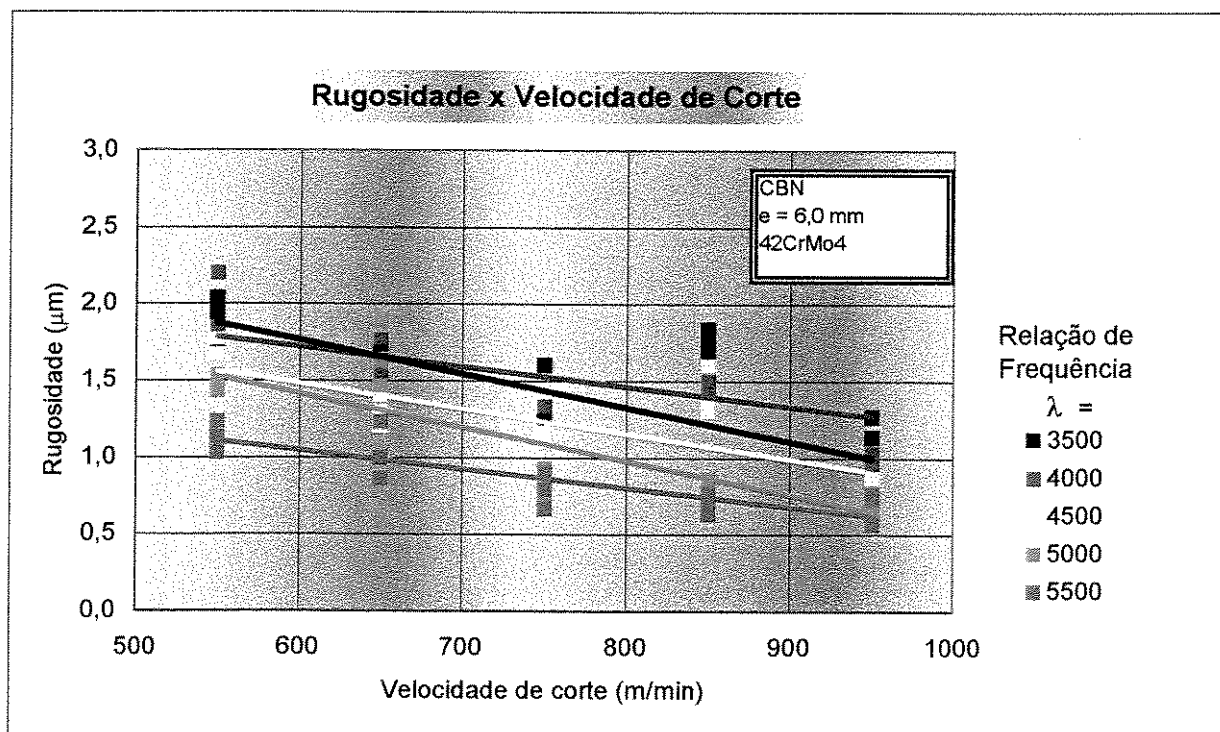


Figura 4.27 – Rugosidade x Velocidade de corte - CBN – e6.0

Cabe contudo, ressaltar que apesar desta tendência de redução dos valores de rugosidade ao aumentar-se as velocidades de corte, o salto qualitativo não é de uma grandeza expressiva, pois, se situou em torno de no máximo 1,0 μm . Portanto, o fator de variação isolada da velocidade de corte tão somente é relevante se comparados internamente entre as diferentes excentricidades, sendo seus efeitos minimizados se comparados entre si.

4.5 Resultados de Desvios de Cilindricidade com Pastilhas de CBN

Aqui estão colocados os resultados de cilindridade obtidos na usinagem com pastilhas de CBN, para os diferentes parâmetros empregados nos ensaios. As figuras mostradas a seguir apresentam uma série de três medidas do desvio de cilindridade, para cada peça usinada.

O sistema de fixação da peça utilizado foi o mesmo dos ensaios com pastilhas de metal duro, e, da mesma forma que anteriormente, utilizou-se de um Talyrond modelo A112/1170E, com cabeçote de apalpação vertical, disposto longitudinalmente ao longo do eixo da peça, em sentido ascendente.

Este procedimento de medida garante a varredura completa do colo da peça ensaiada, neutralizando possíveis interferências pontuais na superfície da mesma.

Observa-se na Figura 4.28 um decréscimo dos patamares de valores dos desvios de cilindridade proporcionalmente ao aumento da relação de frequência.

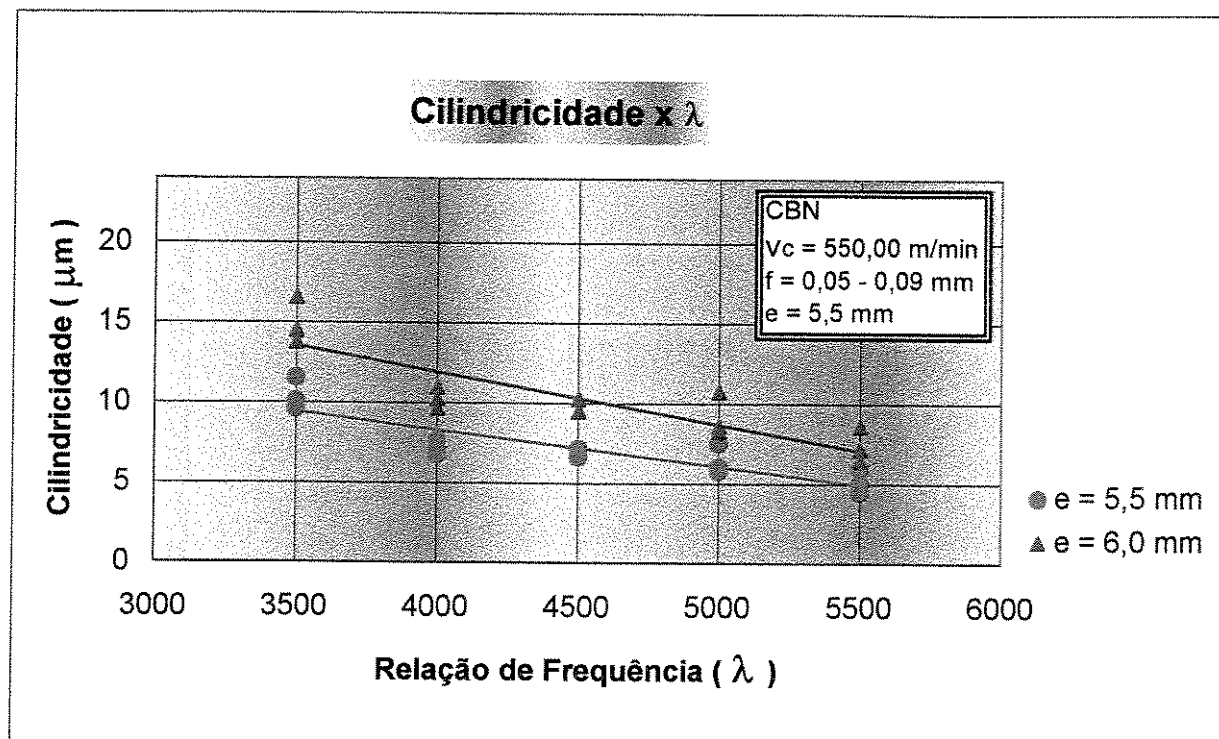


Figura 4.28 – Cilindricidade x Relação de Frequência – CBN – $v_c 550$

Tal comportamento, observado na Figura 4.28, é semelhante ao encontrado para as distribuições dos valores de rugosidades, e a possível explicação para o mesmo pode se basear nas mesmas razões, ou seja, baixos avanços associados a velocidades de corte elevadas provocam redução das forças de usinagem, o que possibilitam menores vibrações no processo, favorecendo desta forma valores baixos para os desvios de cilindridade.

No entanto, para a Figura 4.29, onde foi utilizada a velocidade de $650,00 \text{ m/min}$, os valores apresentaram-se mais coesos, todavia, apresentando uma leve tendência de queda ao aumento da velocidade de corte, seguindo o comportamento observado anteriormente.

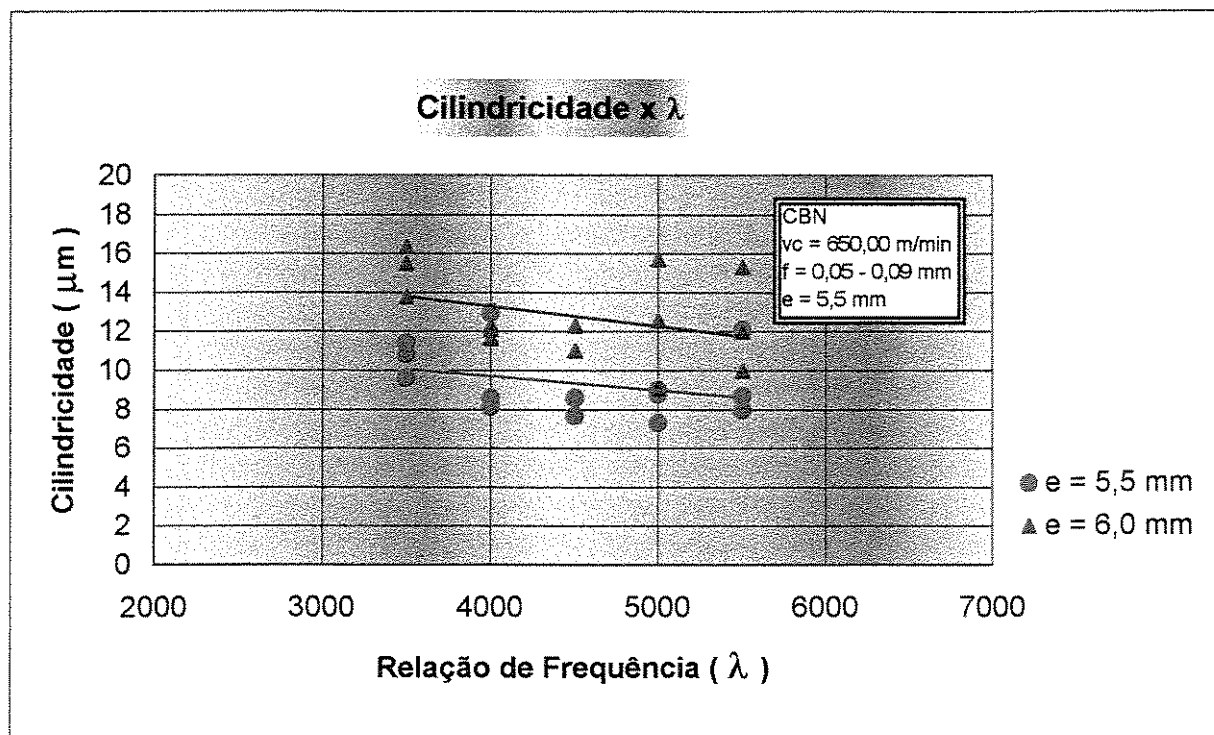


Figura 4.29 – Cilindricidade x Relação de Frequência – CBN – vc650

Deve ser observado também, que um maior tempo de contato entre a aresta de corte e a superfície da peça favorece a correção de possíveis imperfeições ocasionadas pelo desvio de posicionamento das pastilhas, que ocorre com maior intensidade na excentricidade de 5,5 mm.

As Figuras 4.30 e 4.31 apresentam comportamentos semelhantes, para os desvios de cilindridade, inclusive em relação às diferenças entre as duas excentricidades envolvidas, onde pode-se notar uma melhoria no processo, no que tange aos desvios geométricos, quando aumenta-se o valor da relação de frequência λ .

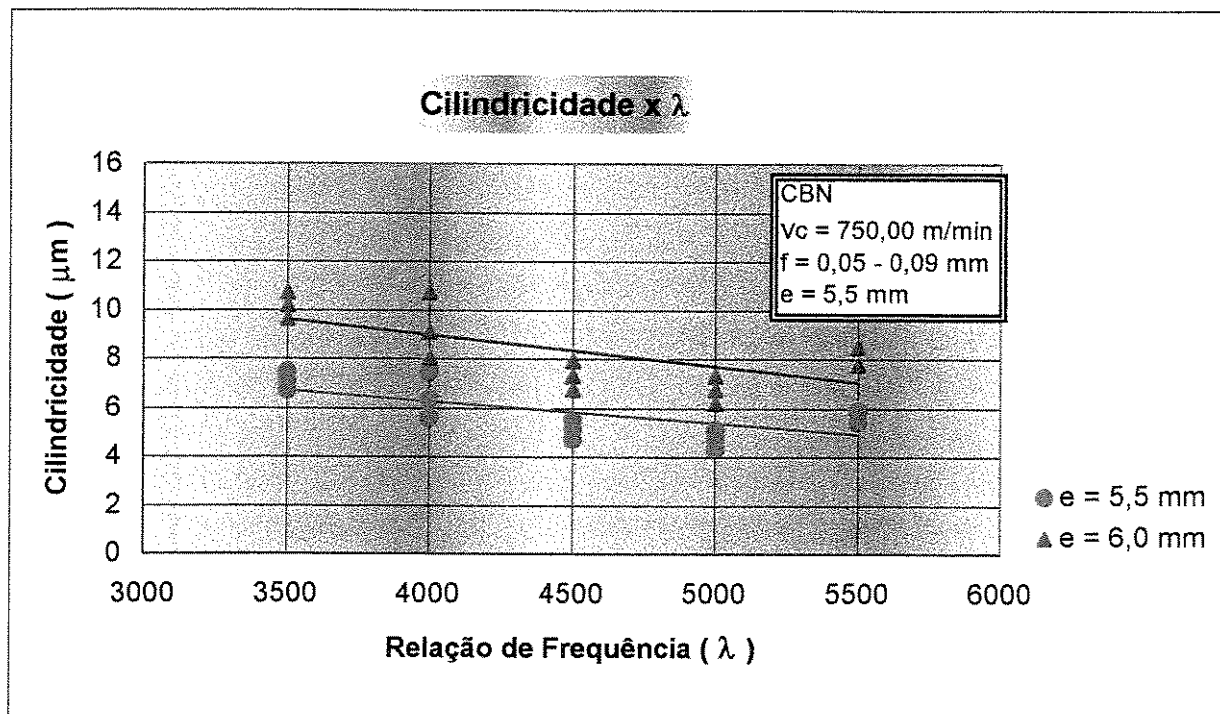


Figura 4.30 – Cilindricidade x Relação de Frequência – CBN – v_{c750}

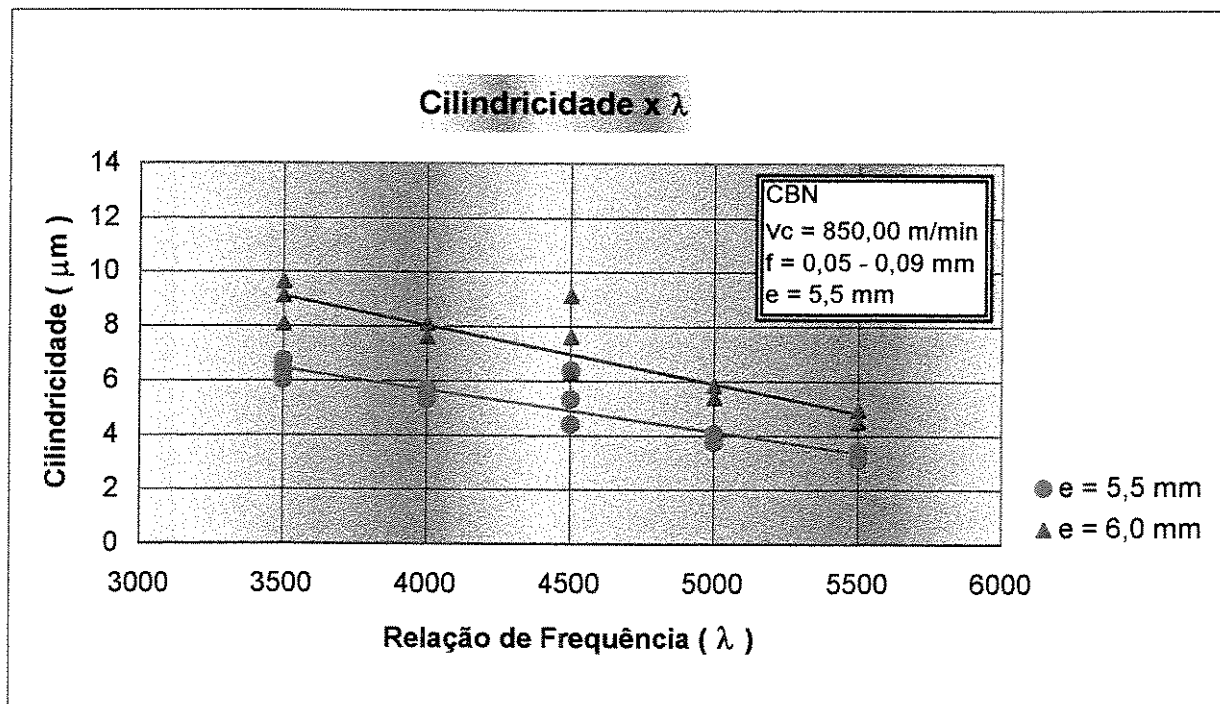


Figura 4.31 – Cilindricidade x Relação de Frequência – CBN – v_{c850}

Finalizando a análise dos desvios de cilindridade, observa-se que ao empregar-se a velocidade de corte de 950,00 m/min (Figura 4.32) os resultados seguiram comportamento semelhante aos anteriores, ou seja, existe uma tendência de redução dos valores de cilindridade proporcionalmente ao aumento dos valores da relação de frequência.

Todavia, os patamares dos valores neste caso, são significativos, comparados aos até então observados, sugerindo ser este um fator importante nesta condição de corte.

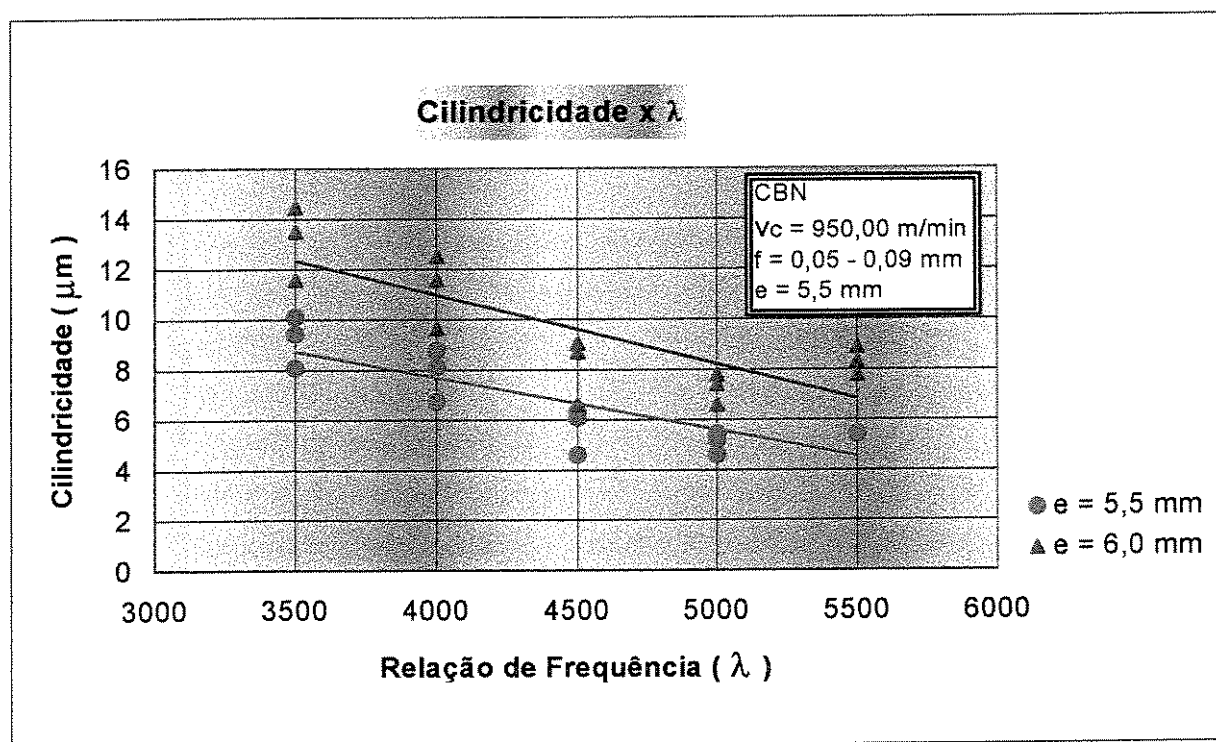


Figura 4.32 – Cilindridade x Relação de Frequência – CBN – $vc950$

Para as condições de corte com a relação de frequência (λ) variando desde 4000 a 5000, com avanços da ordem de 0,07 mm à 0,09 mm, obtiveram-se excepcionais resultados de desvios de forma de cilindridade, chegando a ordem de 5 μm .

A seguir, nas Figuras 4.33 e 4.34, tem-se o comportamento dos valores das cilindridades em função das velocidades de corte empregadas.

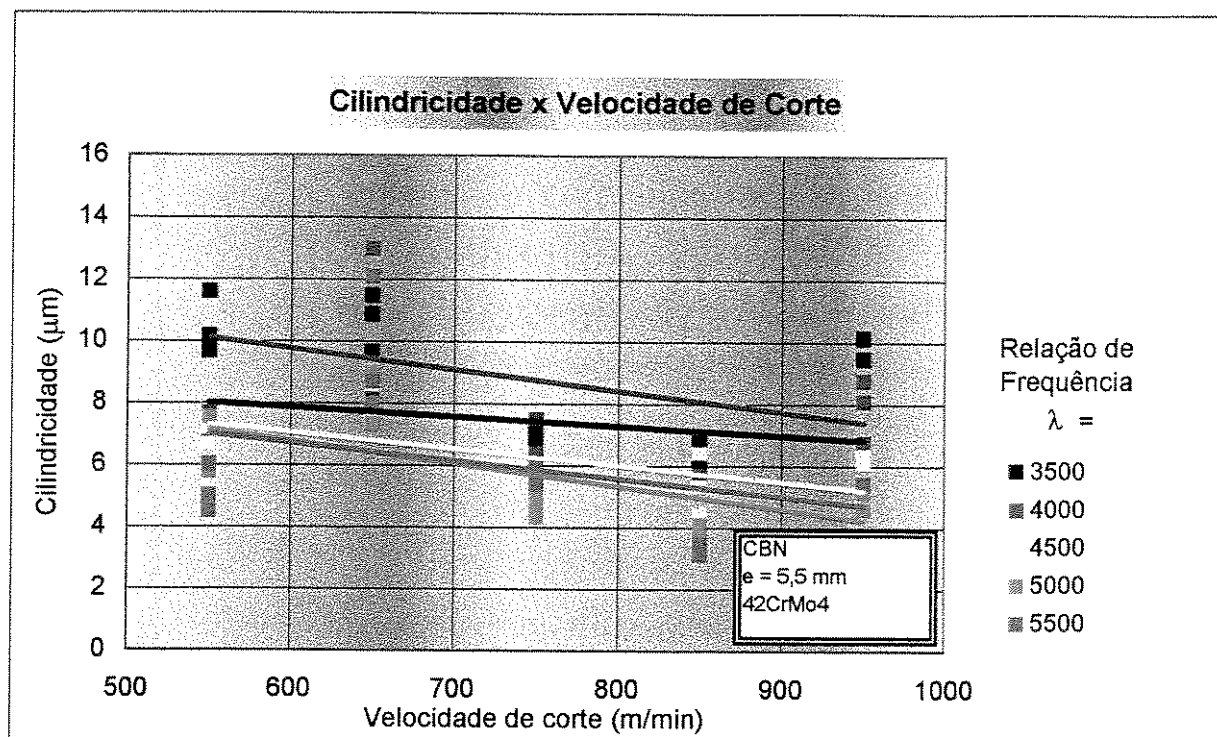


Figura 4.33 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – CBN – e5.5

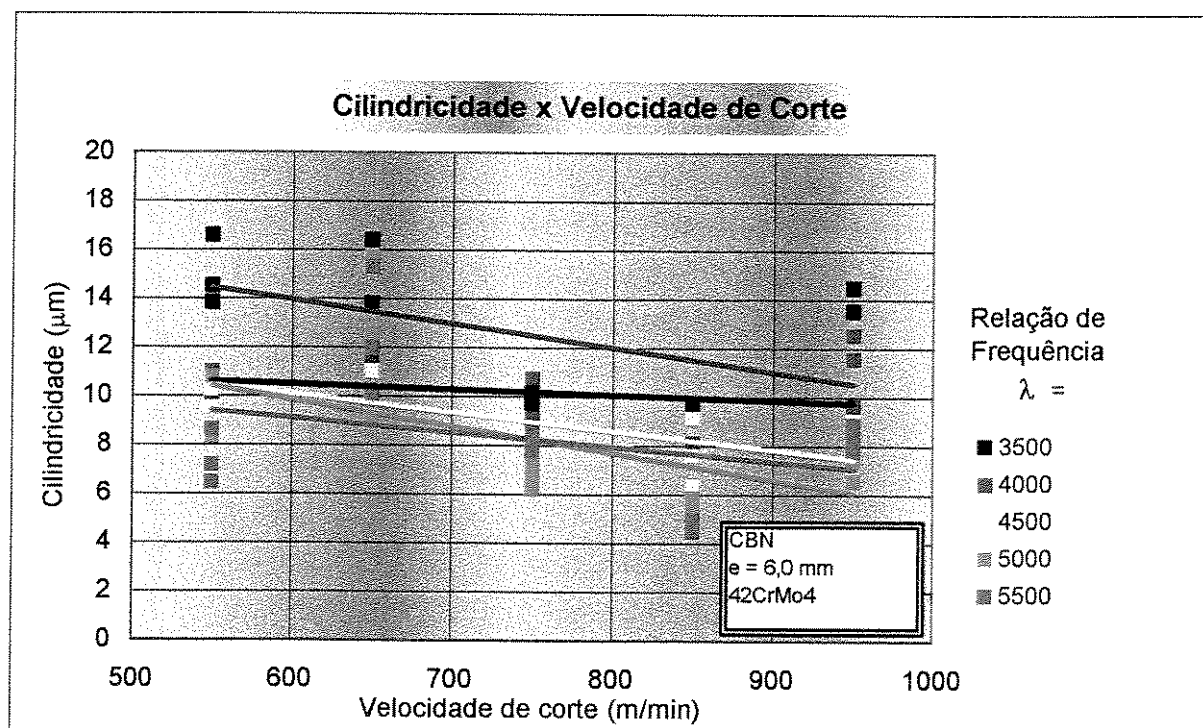


Figura 4.34 – Cilindricidade x Velocidade de Corte – CBN – e6.0

Pode-se notar que para as cilindridades as tendências observadas são semelhantes as encontradas para as rugosidades, decaindo proporcionalmente ao aumento das velocidades utilizadas nos ensaios, em parte estes resultados podem ser consequência dos efeitos de não amortecimento relatados por Tlustý [Tlustý, 1993].

Estes ótimos resultados em CBN podem, em parte, ser explicados por uma constatação de Kukino [Kukino, 1999]. A hipótese de Kukino, propõe que o avanço de corte ao variar continuamente no processo de fresotorneamento, associada as altas velocidades de corte, produz um menor desgaste nas pastilhas de CBN, melhorando as condições de acabamento final das superfícies e desvios geométricos.

Finalizando, observou-se nitidamente que os resultados obtidos com as pastilhas de CBN apresentaram excelentes resultados, com rugosidades inferiores aos conseguidos com pastilhas de metal duro, entretanto, os valores dos desvios de cilindridade não demonstraram ser significativamente melhores se comparados a estas pastilhas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

Em função dos resultados alcançados e após a análise dos mesmos, respeitando-se as particularidades das condições operacionais, máquinas e ferramentas utilizadas, e material da peça ensaiada, pode-se chegar às seguintes conclusões :

⇒ A variação da relação de frequência (λ) traz profundas conseqüências nos resultados finais da rugosidade da superfície usinada, reduzindo seus valores proporcionalmente ao aumento da mesma (λ);

⇒ O aumento da relação de frequência reduz os desvios de cilindridade na superfície usinada;

⇒ O aumento da relação de frequência (λ) influencia de maneira semelhante o comportamento dos desvios microgeométricos (rugosidade) e macrogeométricos (cilindridade) independente do tipo de inserto utilizado

⇒ O tipo de cobertura utilizado nos insertos de metal duro não influenciou de forma significativa os valores de rugosidade e cilindridade encontrados;

⇒ O aumento da velocidade de corte, para as pastilhas de metal duro, com cobertura de TiNAl FUTURA, não provocou a elevação, de forma relevante, dos valores de rugosidade e cilindridade obtidos;

⇒ O aumento da velocidade de corte para as pastilhas de metal duro com cobertura de TiNAl X-TREME provocou a elevação dos valores de rugosidade e cilindridade obtidos;

⇒ A excentricidade do processo fresa na usinagem influi diretamente no desempenho de rugosidade e cilindridade obtidos;

⇒ A excentricidade otimizada para cada caso, sempre produziu o melhor resultado em rugosidade e cilindridade

⇒ O aumento da velocidade de corte, de forma isolada, produz uma tendência de queda nos valores de rugosidade obtidos na usinagem com pastilhas de CBN;

⇒ O aumento da relação de frequência associada ao aumento da velocidade de corte reduz os valores de rugosidade nas peças usinadas com CBN;

⇒ O aumento da relação de frequência reduz os valores de cilindridade para as pastilhas usinadas com CBN;

⇒ O Aumento da velocidade de corte para as pastilhas de CBN influencia os valores dos desvios de cilindridade encontrados;

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentre várias sugestões para continuidade das pesquisas no campo de estudo do processo de fresotorneamento em altíssima velocidade de corte, pode-se destacar :

- ⇒ O estudo de integridade superficial das peças usinadas pelo fretorneamento;
- ⇒ O estudo da influência da variação de rotação contínua da peça, durante a usinagem e sua influência nos desvios macros e microgeométricos ;
- ⇒ O estudo da variação da excentricidade durante a usinagem e sua influência nos desvios macros e micro geométricos
- ⇒ Levantar as curvas de desgastes de ferramenta para cada variável de influência envolvida no processo;
- ⇒ Estudar qual a influência da variação da frequência nos esforços de corte do processo;
- ⇒ Estudar qual a influência da utilização de máquinas dedicadas em comparação aos centros de usinagem nos resultados finais de rugosidade de peças fresotorneadas

Referências Bibliográficas

- Agapiou, J. et all** - Toolholder/spindle interfaces for CNC machine tools - Annals of the CIRP, vol. 44, págs 383-388, 1995
- Altan, T. et alli** - Advanced techniques for die and mold manufacturing - Annals of the CIRP, vol. 42, págs. 707-711, 1993
- Altan, T. et all** - Simulation of metal flow and fracture applications in orthogonal cutting, blanking and cold extrusion - Annals of the CIRP, vol. 42, págs 187-189, 1997
- Arndt, G.** - The development of high machining speeds part 1 - The production Engineer, nov 1970; págs 470 - 477; 1970
- Arndt, G.** - The development of high machining speeds part 2 - The production Engineer, dez 1970; págs 517 - 528; 1970
- Arnold, W. et all** - Zerspanung : Neue Technologie oder Schlagwort ? - Werkstatt und Betrieb, 114, 1981
- Batocchio, A** - Notas de aulas do Curso de Pós Graduação Tópicos em Mecânica III - Administração Estratégica - FEM/DEF ; Unicamp, 1997
- Ber, A. et all** - The influence of temperature gradient on cutting tool's life - Annals of the CIRP, vol. 38, págs. 69-73, 1989
- Bianchi, E. C. et alli** - Estudo do comportamento de discos abrasivos, em operações do tipo "cut-off" por mergulho basculante, submetidos a diversas condições de corte - Anais do XIV COBEM, 1997
- Blawit, C.** - High speed machining - University of Hannover - Lecture, 1996
-

-
- Charteen, D. M.** – High speed machining implementation : A user's point of view – Aerospace and Defense Company Vought Aero Prod. Division Internal Report; págs 459 – 464; 1989
- Chubb, J.P.** - Coated cutting tools - a study of wear mechanisms in high speed machining - Wear, vol. 61, págs 43-48, 1980
- Colding, B.N.** - A tool-temperature/tool-life relationship covering a wide range of cutting data - Annals of the CIRP, vol. 40, págs 35-40, 1991
- Cruz, C.** – Notas de aulas do curso de Pós Graduação Processos de Usinagem Não Convencionais; UFU; 1995
- Daniel, A.** - Hochpräzisionszerspanen mit geometrisch bestimmter schneide. Band II : Drehfräsen. Forschungsbericht - KfK - PFT, 1994
- De Groat, G.** – Ultra high speed machining – American Machinist, nr. 484; págs 111 - 115, 1960
- Derstroff, B.** - Hochgeschwindigkeitsdrehfräsenmaschinen - Hanser - págs 136 - 141, 1997
- Destefani, J. et all** - Spindles key to high speed machining - Journal of Manufacturing Engineering, vol. 119, págs 57-62, 1997
- Diniz, A. E. et alli** – Tecnologia da Usinagem dos Materiais – 2ed. ArtLieber ed. -, SP; 2000
- Distler, H.** - CNC Systems that master HSC - Anais do 1º- Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte - Brasil, 1996
- Dumur, D. et alli** – New predective solutions to very high speed machining – Annals of the CIRP vol 43; págs 363 – 366; 1994
- Drucker, P.** – Post-Capitalist Society; Harper Collins, NY; 1999
- Ferraresi, D.** - Fundamentos da usinagem dos metais; Editora Edgard Blücher, 1989
- Flow, W.** – High speed machining – GE Research Special report – Schnectady, NY; págs 417-439; 1984
- Finzer, T** - The HSC Technology - Palestra UNICAMP, 1997
-

-
- Giebner, E.** - Spindelssysteme für Hochgeschwindigkeitsfräsenmaschinen - Werkstatt und Betrieb, vol. 120, 1987
- Glantschnig, F.** - Zukunft und Wirtschaftlichkeit für Konstruktion und Herstellung komplexer Formen und werkzeug durch CAD-CNC Kopplung - Werkstatt und Betrieb, vol. 123, 1990
- Grönn, G.** - Schnellfrequenz - Wälzlaerspindeln - Technische Mitteilungen, vol. 81, págs 244-258, 1988
- Gunsser, O.:** Innovation beim Runddrehfräsen, TZ für die Metallbearbeitung 74, 1980
- Heisel, U. et all** - Machine tool design requirements for high speed machining - Annals of the CIRP; vol 45; págs 389 - 392; 1996
- Hock, L. et all** - NC programming for high speed machining - Modern Machine Shop, vol 69, págs 88-94, 1996
- Iwata, K. et all** - Basic study of high speed micro depp drilling - Annals of the CIRP, vol. 30, págs. 27-30, 1981
- Komandúri, R. et alli** - On a methodology for establishing the machine tool requirements for high speed/high-throughput machining - Transactions of ASME, vol. 107, págs. 316-324, 1985
- Komanduri, R.** - High speed machining - Mechanical Engineering; págs 64 -76; 1985
- Komanduri, R.** - Status of high speed machining - Carbide and Tool Journal, vol. 18, págs. 6-34, 1986
- König W., et al;** - Machining of Hard Materials; Annals of the CIRP; vol.33/2, págs. 417-427, 1984
- König, W; Wand, Th.** - Optmierung des Drehfraesens. Abschlussbericht der RWTH Aachen an das KfK - Karlsruhe (Projektträger), 1985.
- König, W; Wand, Th.** - Fräsen statt Drehen : Drehfräsen - Industrieanzeiger, 108, págs 25-28, 1986.
- Koontz, J.L.** - Ultra high speed machining - American Machines, juni 77, págs. 135-139, 1977
-

-
- Kramer, B.M. et all** - Tool wear by solution : a quantitative understanding - Journal of Engineering for Industrie, vol. 102, 1985
- Kukino, S. et alli** - High speed and precision cutting technology of hardened steel with PCBN tool; 2nd International German and French Conference, págs 217 - 222, PTW; 1999
- Lehmann, Th.** - Orthogonales Drehfräsen, Spanbildung und Leistungsbedarf, Dissertation TH Darmstadt, 1991
- Lewis, H.W.** - Neue Werkzeugmaschinen für besondere Fertigungsaufgaben, Werkstatt und Betrieb, Nr 126, 1993
- Lima, F. et alli** - Erros de forma e acabamento superficial de peças temperadas e usinadas pelo processo de torneamento, Anais COBEF; 2001
- Lin, J. et alli** - Estimation of cutting temperature in high speed machining - Journal of Engineering Materials and technology, vol. 114, págs. 289-296, 1992
- Loladze, T.N.** - The scientific background of cutting tool materials selection - Annals of the CIRP, vol. 27, 1978.
- Mathew, P. et all** - Predicting the effects of very high cutting speeds on cutting forces, etc - Annals of the CIRP, vol. 31, págs. 49-52, 1982
- Mc Gee, J. F.** - An assessment of high speed machining - Society of Mechanical Engineering, technical paper, Nr. 78-648, págs 1-22, 1978.
- Nakayama, K. et all.** - Machining characteristics of hard materials, Annals of the CIRP, vol. 37/I, pag. 89-92, 1988
- Niemayer, W.H.** - Schnell-Motorspindeln für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung - AGT vol.2, págs 23-27, 1991.
- Noaker, M.P:** - CNC's fast moves - Journal of Manufacturing Engineering, vol. 114, 1995
- Novaski, O.** - O fresotorneamento em altíssima velocidade de corte - Palestra ITA - SJ Campos, SP; 1997
- Novaski, O.** - O fresotorneamento em altíssima velocidade de corte - Palestra Seminário Mazak - Sta Bárbara D'Oeste, SP; 1999
-

-
- Paiha, W.** - Magnetlager- Spindeln zum Hochgeschwindigkeitsfräsen - Der Stahlumformer, vol. 5, págs 79-84, 1989
- Palleau, M.** - High speed milling of cast irons and steel with ceramics, silicon nitride and CBN tools - Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux, vol. 16, págs. 1-21, 1992
- Porter, M.** - Competitive Advantage, Macmillan Inc, 1990
- Rao, I.V. et all** - Tool life at high cutting speeds - International Journal of Machine Tool and Design Research, vol. 17, págs. 197- 201, 1977.
- Rondé, U.** - Untersuchung von Systemen zum Spannen von Zylinderschaftwerkzeugen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Eignung für die Hochgeschwindigkeitszerspanung, Dr. Ing. Tesis - T.H. Darmstadt, 1994
- Sahm, D.:** Oberflächenbeschaffenheit und Produktivität beim orthogonalen Hochgeschwindigkeitsdrehfräsen, Dissertation TH Darmstadt, 1996
- Salomon, C.** - Verfahren zur Bearbeitung von Metallen oder bei einer Bearbeitung durch schneidende Werkzeug sich ähnlich verhaltender Werkstoffe, Deutsches Reichspatent 523/594, 1925.
- Schmitt, T.** - High Speed Milling Machines - Anais do 1º- Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, Brasil, 1996.
- Schulz, H et all** - Hochgeschwindigkeitszerspanung : Neue Technologie oder Schlagwort? - Werkstatt und Betrieb, vol.114, 1981.
- Schulz, H.** - Schnellaufspindelhalbiert Ferigungszeit - VDI Zeitschrift, 36, 1982
- Schulz, H.** - High speed milling of aluminium alloys - The Winter Annual Meeting of ASME, New Orleans, USA, 1984
- Schulz, H et all** - Bearbeiten von Werkstücken aus kahlefaserverstärkten Kunststoffen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten - Werkstatt und Betrieb, vol. 119, 1986
- Schulz, H et alli** - Hochgeschwindigkeitsfräsen von Kupferknetlegierungen - Metall, vol. 40, 1986
- Schulz, H et all** -Aluminium und Magnesium - Gußlegierungen bei extremen Schnittgeschwindigkeiten bearbeiten - Werkstatt und Betrieb, vol. 119, 1986
-

-
- Schulz, H et all** - Hochgeschwindigkeitsfräsen dünnwandiger Werkstücke aus Aluminium und Magnesiumlegierungen - Werkstatt und Betrieb, vol. 120, 1987
- Schulz, H et all** - Aktueller Stand des Verbundforschungsprojektes Hochgeschwindigkeitsfräsen - Die Maschine, vol. 41, 1987
- Schulz, H. et all** - Hochgeschwindigkeitsfräsen von Leichtmetallguß, Kräfte Spanbildung, Leistungsbedarf und spezifisches - Werkstatt und Betrieb, vol. 121, 1988
- Schulz, H et all** - Aspects on cutting mechanism in high speed cutting - Annals of the CIRP, vol. 38, págs. 51-55, 1989
- Schulz, H.** - High speed turn-milling - A new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces. Annals of the CIRP, vol.39/1, pag,107-109, 1990.
- Schulz, H.** - Werkzeug mit Plananlage Alternative bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung? - Werkstatt und Betrieb, vol. 124, 1991
- Schulz H. et all** - High-Speed Machining . Annals of the CIRP, vol. 41/2 - pag. 637-643, 1992.
- Schulz H. et all** - Chip formation mechanism in orthogonal turnmilling process, WGP (Wissenschaftliche Gessellschaft für Produktionstechnik) Annals vol. 1/1 págs 9-12, 1993.
- ~~**Schulz, H. et all**~~ - Turn milling of hardened steel: an alternative to turning. Annals of the CIRP, vol. 43/I - pag. 93-96, 1994.
- ~~**Schulz, H. et all**~~ - High speed milling of dies and molds. Cutting conditions and technology - Annals of the CIRP, vol. 44, págs 35-38, 1995.
- Schulz, H.** - High Speed Machining - Anais do 1º- Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, Brasil, 1996.
- Schulz, H.** - Hochgeschwindigkeitsbearbeitung - Carl Hanser Verlag München Wien, 1996.
- Schulz, H. et all** - Integration of operator's experience into NC manufacturing - Annals of the CIRP, vol. 46, págs 415-419, 1997
- Schulz, H.** - Sichere HSC Werkzeuge - Werkstatt und Betrieb, vol 130, 1997.
-

-
- Schulz, H.** - Sicherheitsanforderungen an Werkzeuge für das Hochgeschwindigkeitsfräsen - Maschinenmarkt, vol. 104, págs. 22-25, 1998
- Sentuko, E. et all** - Research on the cutting mechanism of hardenend steel by CBN tool - Journal of Japan Society of Metal, vol. 36, 1989
- Siegwart, R.** - Wirtschaftlichen Einsatzeines Dreh-Fräs-Zentrum - VDI, nr. 127; págs 622-666; 1985
- Smith, S.** - Current trends in high speed machining - Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 119, págs. 664-666, 1997
- Sorge, K.P.:** Die Technologie des Drehfräsens, Dissertation TH Darmstadt, 1983
- Spiewak, S.** - An improved model of the chip thickness in milling - Annals of the CIRP, vol 44, págs 39 - 42; 1995
- Strate, H.** - Drehfräsen Grosser Werkstücke, VDI 126 Nr 15/16, págs 562-565, 1984
- Tilmann, W.** - Experience in High Speed Machines with Direct Drives, Seminário Usinagem HSC, Piracicaba, 1996
- Tlusty, J.** - High speed machining - Annals of the CIRP, vol. 42, págs. 309-313, 1993.
- Tlusty, J. et alli** - High speed high poxer spindles with roller bearings - Annals of the CIRP, vol. 36, págs. 267-272, 1987
- Tönshoff, H. K. et alli** - Design and simulation of two coupled high dynamic axes with linear drives and linear magnetic guides - Annals of 2nd International German and French Conference in HSM, págs. 263-268; 1999
- Voll, H.** - Stand der Technik bei schnellaufenden Motorspindeln - Proceedings 6 ~~Darmstädter~~ Fertigungstechnisches Symposium, 1991
- Voll, H.** - Performance capabilities of HSC spindle units with rolling bearings, Weiss GmbH Spindletechnologie, 1996
- Voll, H.** - On the way to a new generation of spindles - Annals of 2nd International German and French Conference in HSM, págs. 93-102; 1999
- Walz, T.** - Experience in High Speed Machines with Direct Drives - Anais do 1^o-Seminário de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, Brasil, 1996.
-

Wand, T. - Simulation des exzentrischen Drehfräsen, Industrieanzeiger Nr 107, págs. 28-29, 1985

Weck, E.H.M. et alli - Spindel-Bearing systems for high speed applications in machine tools - Annals of the CIRP, vol. 42, págs 445-448, 1993.

Weck, E.H.M. et alli - Optimization of machine tool performance and accuracy - Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, USA, págs. 895-908, 1994

Weck, E.H.M. - New interface machine-tool, hollow shank - Annals of the CIRP, vol. 43, págs. 345-348, 1994

Weck, E.H.M. et all - Kinematics of spindles bearings with rigid or spring pre-load - Annals of 2nd International German and French Conference in HSM, págs. 85 -92; 1999

Wedeniowski, H. - Makrogeometrische Formabweichungen beim Stirndrehfräsen mit Längsvorschub, Dr. Ing tesis, T.H. Aachen, 1984

Wertheim, R. et all - Modifications of the cutting edge geometry and Chip Formation in milling - Annals of the CIRP; págs 63 - 68; 1994

Bibliografia Complementar

Bandyopadhyay, B. P. et all – Application of factorial design of experiment in high speed turning – Proc. Mec. Eng. Dep. University of North Dakota; págs 3 – 8; 1991

Bouzakis, K. D. et alli – NC Code preparation with optimum cutting conditions in 3 axis milling – Annals of the CIRP, vol 41; págs 513 – 516 ; 1992

Byrne, . et all – Tool life scatter when milling with TiN coated HSS indexable inserts - Annals of the CIRP, vol. 40, págs 45 - 48, 1991

Boulger, F.W. - Machining Characteristics of Steels, Metals Handbook, vol 1, 9th ed, 1978

Cook, N.H. - Tool Wear and Tool Life; Journal of Engineering for Industry, págs 931-938; 1973

DIN 8589 – Fertigungsverfahren Übersicht; Deutsche Institut für Normung; Berlin; 1985

Diniz, A.E. - A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento : Critério de Fim de Vida e Fatores de Influência, Tese de Doutorado, UNICAMP; 1989

Eckle, O. – Notwendigkeit für einen neuen Genormeten Werkzeug-Anschluss bei Leistungsstarken Werkzeugmaschinen; Werkstatt und Betrieb, vol 118; págs 21-25; 1985

-
- Ferraresi, D.** - Fundamentos da Usinagem dos Metais, 7 ed; 1977
- Fiedler, U.** - Drehfräsen von Extruderschnecken –Studienarbeit; PTW; 1993
- Götz, T.** - Bearbeitung von PKW – Bremsscheiben durch Drehfräsen; Diplomarbeit, PTW; 1993
- Gühring, J. et all** – Reinheitsgebot; Maschinenmarkt 95, vol 40; págs 62-6; 1989
- Hamann, J. C. et alli** – Selective transfer built-up edge layer displacement in high speed machining – consequences on tool wear and cutting forces – Annals of the CIRP, vol 43; págs 69 – 72 ; 1994
- Holm, C.** - Drehfräsen – Eine Herausforderung für erhöhte Leistung in Der Fertigung, Seco Tools Vortrag, PTW; 1983
- Ippolito, R. et alli** – High speed machining – Tool performance and surface finish in steel turning - Annals of the CIRP, vol. 37, págs. 105 - 108, 1988
- Jawahir, I. S.** - On the controllability of chip breaking cycles and modes of chip breaking in metal machining - Annals of the CIRP, vol. 39, págs 49 - 51, 1990
- Johannsen, P.** - Beschichtete HSS und Hartmetallwerkzeuge in Der Grosserienfertigung; 2nd International Conference PVD, Berlin, 1986
- Johannsen, P.** - Beschichtete Werkzeuge in einer Grossereinfertigung – VDI nr 127, págs 837 – 844; 1985
- Kronenberg, M.** -Machining Science and Application, 1ra ed; 1966
- NBR 6162** – Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais; ABNT; 1989
- Shaw, M..C.** - Metal Cutting Principles; 1986
- Trent, E.M.** - Metal Cutting; 1977
-