

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

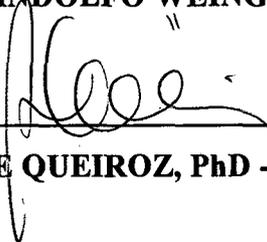
USINAGEM A VERDE DE CERÂMICA AVANÇADA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

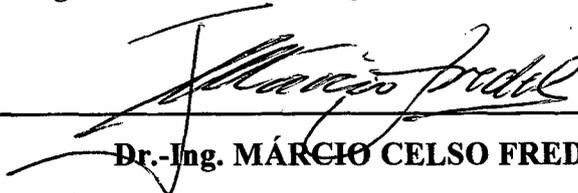
FLÁVIA ANDRÉA MODESTO

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1997.

USINAGEM A VERDE DE CERÂMICA AVANÇADA**FLÁVIA ANDRÉA MODESTO****ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE****MESTRE EM ENGENHARIA****ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Dr.-Ing. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER - ORIENTADOR

ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, PhD - COORDENADOR DO CURSO**BANCA EXAMINADORA**

Dr. Eng. CARLOS HENRIQUE AHRENS - PRESIDENTE

Dr.-Ing. MÁRCIO CELSO FREDEL

Dr. Eng. ROLF BERTRAND SCHROETER

Ao meu avô

Guilherme Natel de Paula Xavier

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial meus pais e meus avós, por estarem sempre presentes em todos os momentos importantes da minha vida.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Departamento de Engenharia de Materiais por terem me liberado das minhas atividades docentes para que eu pudesse realizar este trabalho de mestrado em Florianópolis.

A Eliane Refratários (Grupo Maximiliano Gaidzinski) por ter doado os corpos de prova cerâmicos, e também a Winter do Brasil, a Sommer Präzisionstechnik e a Heckler & Koch Präzisionstechnik por terem doado as ferramentas para a realização da parte experimental da dissertação.

Ao Walter pela orientação, confiança e amizade. E também pelas festas em Rancho Queimado.

Aos meus estagiários por terem me ajudado na execução deste trabalho, pois sem eles tudo teria sido muito mais difícil, demorado e trabalhoso. Valeu equipe do USICERVA: Ariovaldo (obrigada por me agüentar), Artur, César e Oliver.

A galera LMPana pela amizade e pela ajuda no desenvolvimento do trabalho. Obrigada Ira (conselheiro de todas as horas), Durval (belesma), Miltoninho (desculpe pela bagunça na lapidadora), Jeff (obrigada pela casa), Samantha (minha cúmplice predileta), Cló (altas festas), Peres, Sérgio, Cleiton, César, Hélio, seu Hamilton (obrigada tanto pelas dicas quanto pelos xingos), Rodrigo (meu primeiro amigo, desde Dallas), Eliene (que espero que não esqueça nunca da sua amiga poderosa e

nem dos meus pães de queijo), Júlio (que parava o seu trabalho só para me ajudar com a Beta), Gilva (que é do LHW, mas que virou agregada do LMP), Kleber, Eduardo, Duracell, Gilberto (excelente pintor), Guigo, Sena, Rolf (que mesmo antes de eu conhecê-lo pessoalmente, eu já o perturbava através de e-mails), Ana Cláudia, Walter Carlos, Vítor, Animal, Marco Paulo, Klaus, Wolfgang e todos os demais que fizeram parte da minha família neste últimos 2 anos.

Ao pessoal do LABMAT, em especial o Daniel (obrigada pelas informações), O Rubens (valeu as sinterizações e as dicas), o Márcio e o Orestes.

Aos meus amigos, que mesmo longe de Floripa, estavam sempre torcendo por mim: Giana (a melhor amiga que alguém poderia ter), César, Raul (coisinha linda), Adriana, Adilson, Mateus (o bochechudo) Bobby, Magda (minha mais fiel correspondente), Márcia, Sílvia, Arnaldo, Ana Paula (pedreira Napa!), Lavínia (a enganada), Ana, Medely, Cristina, Joel, Cláudia e tantos outros que sempre me deram a maior força.

Aos amigos que fiz aqui em Florianópolis e que pretendo conservar mesmo estando longe daqui: Liz (valeu amiga!), Rita, Diana (a nordestina que é paranaense de coração), Gersina (e seu reator), Akiko (não só por ser uma baiana japonesa, o que é chique, mas por ser uma baiana japonesa que sabe fazer sushi e vatapá, o que é mais chique ainda!), Adilson (o amigo da Mônica), Sandra (e aí guria), Roberta, Débora (vizinha), Merlin, Sandro(s), Fernando (e o quindim), Júlio (desculpe o fora) e todos os outros que tornaram os meus dias em Floripa mais alegres.

Ao meu amigo Luís Maurício que poderia ter entrado em algum outro parágrafo acima, mas que eu achei que merecia um parágrafo só dele. Obrigada Maurício pela amizade, pelo carinho, pela paciência, pela ajuda, pela força e por tudo mais. E se prepare para me agüentar até a aposentadoria!

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Sumário.....	vi
Figuras.....	viii
Tabelas.....	xi
Simbologia.....	xii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
1 - Introdução.....	01
2 - Estado da Arte.....	04
2.1 - Cerâmica avançada.....	04
2.1.1 - Matérias-primas.....	04
2.1.2 - Vantagens na utilização de cerâmicas avançadas.....	05
2.1.3 - Exemplos de aplicação das cerâmicas avançadas.....	06
2.1.4 - Mercado das cerâmicas avançadas.....	07
2.2 - Fabricação de componentes de cerâmica avançada.....	09
2.3 - Usinagem a verde.....	12
2.3.1 - Aspectos gerais.....	12
2.3.2 - Características da usinagem a verde.....	15
2.4 - Usinagem com ferramentas de corte de geometria não-definida.....	17
2.4.1 - Generalidades.....	17
2.4.2 - Processo de usinagem de cerâmicas.....	19
3 - Desenvolvimento Experimental.....	22
3.1 - Equipamentos de corte com ferramentas filiformes diamantadas.....	24
3.2 - Material para os ensaios: alumina.....	31
3.2.1 - Introdução.....	31
3.2.2 - Alumina utilizada nos ensaios.....	33
3.3 - Ferramentas de corte.....	36

3.3.1 - Materiais para ferramentas de corte abrasivas.....	37
3.3.2 - Ligantes.....	41
3.3.3 - Ferramentas ligadas galvanicamente.....	46
3.4- Mecanismo de formação de cavacos.....	56
4 - Ensaios.....	59
4.1 - Introdução.....	59
4.2 - Primeira etapa de ensaios.....	59
4.2.1 - Ensaios com ferramentas distintas.....	59
4.2.2 - Ensaios com materiais cerâmicos distintos.....	62
4.3 - Segunda etapa de ensaios.....	64
4.3.1 - Adequação da máquina-ferramenta.....	64
4.3.2 - Corpos de prova.....	65
4.3.3 - Metodologia de ensaio.....	66
4.3.4 - Resultados.....	67
5 - Conclusões e sugestões.....	73
6 - Referências bibliográficas.....	75
7 - Anexos.....	81

FIGURAS

Figura 1 - Passos na produção de componentes de cerâmica avançada.....	9
Figura 2 - Representação esquemática do início do corte no processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida.....	18
Figura 3 - Equipamento de corte com fio diamantado.....	25
Figura 4 - Esquema de um equipamento utilizando fio com inversão intermitente.....	26
Figura 5 - Esquema de um equipamento utilizando fio contínuo de corte unidirecional.....	27
Figura 6 - Esquema de funcionamento de um equipamento de corte com fio diamantado com movimento alternante.....	28
Figura 7 - Máquina Beta.....	29
Figura 8 - Sistema de proteção do eixo da Máquina Beta.....	29
Figura 9 - Sistema de avanço da Máquina Beta.....	30
Figura 10 - Variador de frequência adaptado à Máquina Beta.....	31
Figura 11 - Aplicação da carga de 60 kN sobre os blocos de alumina.....	34
Figura 12 - Ciclo de queima dos corpos de prova pré-sinterizados a 1100 °C (azul) e a 1325 °C (vermelho).....	35
Figura 13 - Comparação da dureza de diversos materiais superduros.....	39
Figura 14 - Grãos de diamante no ligante de uma ferramenta nova.....	43
Figura 15 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com escolha correta do ligante.....	43
Figura 16 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com ligante muito mole.....	44
Figura 17 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com ligante muito duro.....	45

Figura 18 - Esquema do processo de galvanização.....	48
Figura 19 - Grão de diamante depositado galvanicamente sobre um substrato de aço.....	49
Figura 20 - Fio diamantado de 0,5 mm de diâmetro, D46, fabricado pela Sommer Präzisionstechnik (MEV).....	51
Figura 21 - Fio diamantado de 0,7 mm de diâmetro, D126, fabricado pela Heckler & Koch (MEV).....	52
Figura 22 - Fio diamantado de 1,1 mm de diâmetro, D126, fabricado pela Winter do Brasil (MEV).....	53
Figura 23 - Análise dos principais componentes do fio diamantado de 0,5 mm de diâmetro (MEV).....	55
Figura 24 - Análise dos principais componentes do fio diamantado de 0,7 mm de diâmetro (MEV).....	55
Figura 25 - Análise dos principais componentes do fio diamantado de 1,1 mm de diâmetro, fio contaminado com alumínio (MEV).....	56
Figura 26 - Mecanismo de arrancamento das partículas no corte de cerâmica pré-sinterizada com fio diamantado.....	58
Figura 27 - Comparação entre fios diamantados de 0,5 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 10 minutos nas mesmas condições de corte (MEV).....	60
Figura 28 - Comparação entre fios diamantados de 0,7 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 10 minutos nas mesmas condições de corte (MEV).....	61

Figura 29 - Comparação entre fios diamantados de 1,1 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 1 hora nas mesmas condições de corte (MEV).....	62
Figura 30 - Peças usinadas manualmente na Máquina Beta.....	64
Figura 31 - Variação da velocidade de avanço.....	65
Figura 32 - Sistema para movimentação dos corpos de prova.....	66

TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de aplicações das cerâmicas avançadas de acordo com as suas funções.....	6
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas cerâmicas, alguns metais e um polímero.....	20
Tabela 3 - Formulação utilizada na produção de alta alumina.....	33
Tabela 4 - Análise química e física da Alumina ALCOA APC 3017.....	33
Tabela 5 - Diâmetro das partículas que compõem o pó da alumina.....	34
Tabela 6 - Distribuição de tamanho de partícula após atomização.....	34
Tabela 7 - Escala Mohs.....	38
Tabela 8 - Fios utilizados nos ensaios na Máquina Beta.....	50
Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios.....	69

SIMBOLOGIA

F_{ts} = Força de usinagem no sentido do corte.

F_{ns} = Força de usinagem normal a F_{ts} .

V_e = Velocidade de ação.

η = Ângulo de ação.

T_μ = Profundidade.

$h_{cu\ eff}$ = Espessura efetiva de corte.

h_{cu} = Espessura de corte.

z = Altura de protusão.

V_c = Velocidade de corte.

RESUMO

As operações classificadas como usinagem a verde de cerâmica são aquelas que ocorrem após a compactação inicial do corpo cerâmico, até aquelas anteriores à sinterização da peça. A usinagem a verde é uma solução para contornar as dificuldades encontradas na usinagem de materiais cerâmicos sinterizados, onde os altos custos de usinagem são responsáveis pela maior parte dos custos de produção. As propriedades que tornam os materiais cerâmicos avançados atrativos, como, por exemplo, sua dureza e a estabilidade a altas temperaturas e sob condições corrosivas, excluem a maioria das técnicas tradicionais de usinagem. Neste trabalho é apresentada uma tecnologia inovadora de corte de corpos cerâmicos de alumina verde com uma nova ferramenta, o fio diamantado com movimento alternante. É mostrada a viabilidade técnica do recorte de componentes de geometria complexa e analisado o limite tecnológico do processo para cortes retilíneos com movimento de avanço automatizado da peça para diversas espessuras de fio e corpos de alumina pré-sinterizados a diferentes temperaturas, variando-se a altura da peça e as velocidades de corte e de avanço.

ABSTRACT

The operations classified as green machining are any of those that occur following the initial compaction of the ceramic body yet prior to the part being fully sintered. Green machining is the solution to shorten the high time consumption and costly finish-machining operations after sintering. Development of the new ceramics has emphasized only improvement of the characteristics of ceramic materials, almost no thought has been given to improve their machinability. This work shows a new green machining technology with a new tool: the diamond wire with alternate movement. It is shown the technical viability of complex geometries machining. Process technological limits are analyzed for rectilinear saws with piece automatized feed mechanism for different wire diameters and alumina bodies partially sintered at different temperatures, changing the piece height and the feed and the cutting speeds.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em quase todos os campos técnicos é estudada a utilização de novos materiais e suas aplicações práticas. Estes novos materiais, normalmente, colocam o fabricante de componentes frente a novos problemas de fabricação. Entre os novos materiais estão as cerâmicas avançadas, que ganham cada vez mais importância na engenharia. Embora os materiais cerâmicos sejam claramente superiores aos metais quando se trata de resistência à corrosão e à oxidação, como também propriedades de atrito e desgaste, eles apresentam um grande problema: a sua fragilidade. Esta característica, associada à elevada dureza, leva a enormes problemas na obtenção de formas por remoção de material.

A maior parte do custo de produção dos componentes cerâmicos de elevada precisão é atribuída ao custo de usinagem [21; 24; 34]. Uma peça cerâmica sinterizada é muito dura e, ao ser usinada, leva a um alto desgaste da ferramenta, além de um tempo de usinagem enorme. Uma forma de redução dos custos de usinagem é garantida pela diminuição do volume a ser removido na usinagem. Em peças fabricadas em massa isto pode ser garantido pela otimização da forma e dimensões das matrizes e condução adequada do processo de sinterização. No entanto, peças com geometria complexa ou peças isoladas, normalmente, requerem volumes de usinagem grandes e, conseqüentemente, custos de fabricação elevados. A melhor solução encontrada para este problema até agora, é usinar as peças antes da sinterização, ou seja, usiná-las no estado a verde. As peças que ainda não foram sinterizadas ou que sofreram uma sinterização parcial (pré-sinterizadas) apresentam uma resistência aproximada a de um giz.

A usinagem a verde, quando conduzida de forma correta, apresenta inúmeras vantagens, mas a principal delas é a econômica. Peças impossíveis de serem moldadas pelos métodos tradicionais, ou peças que devem sofrer uma usinagem posterior devido a defeitos geométricos decorrentes dos processos de moldagem ou ainda, peças cuja fabricação do molde é economicamente inviável devido à pequena quantidade de peças, encontram na usinagem a verde a melhor e mais barata solução para a sua fabricação.

Devemos considerar, no entanto, que os métodos de usinagem convencionais podem ser aplicados apenas de forma restrita à usinagem de cerâmicas no estado a verde. Isto torna necessário o reestudo, bem como o desenvolvimento de processos específicos para a usinagem a verde de cerâmicas. A usinagem com fio diamantado com movimento alternante é um exemplo disto. Neste processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida, a remoção de material se dá através do arrancamento de partículas e grupos de partículas do componente cerâmico, visto não haver nenhuma possibilidade de deformação plástica do mesmo e a resistência de ligação entre eles ainda ser muito pequena.

A máquina-ferramenta empregada neste processo foi especialmente desenvolvida, no Laboratório de Mecânica de Precisão, para o corte com movimento alternante utilizando fio diamantado como ferramenta de corte e se assemelha a uma serra tico-tico, classicamente empregada em maquetarias, “batizada” pela equipe de trabalho de Máquina Beta. A ferramenta se constitui de um fio de aço muito duro revestido com grãos de diamante ligados por uma camada de níquel obtida por deposição galvânica.

Como matéria-prima para os ensaios foi empregada uma cerâmica refratária de alta alumina com tamanho de grão máximo de 20 μm , no estado verde e pré-sinterizada à temperatura de 1100 e 1325 $^{\circ}\text{C}$, sendo que a temperatura de sinterização desta cerâmica foi de 1637 $^{\circ}\text{C}$, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

Embora as cerâmicas difiram bastante entre si após sinterizadas, no estado a verde e pré-sinterizado, estas se assemelham bastante, de forma que os resultados obtidos para um tipo de material cerâmico podem ser estendidos aos demais tipos.

O objetivo deste trabalho é o de determinar taxas de corte factíveis para o processo de corte de cerâmica pré-sinterizada com fio diamantado de movimento alternante. Para conseguir alcançar este objetivo, foi necessário que fosse desenvolvido o protótipo da máquina-ferramenta mencionado acima, que realizasse os cortes com fio diamantado com movimento alternante. Outro objetivo deste estudo foi o de fazer ensaios de usinagem comparativos entre cerâmicas a verde e pré-sinterizadas a diferentes temperaturas para que se pudesse avaliar a usinabilidade destas. Um outro objetivo foi o de através de todos os ensaios viabilizar, ou não, um novo método de corte de materiais, que é o corte com fio diamantado com movimento alternante.

Este trabalho também se prestapara a abertura de uma nova linha de pesquisa no Laboratório de Mecânica de Precisão, que é a usinagem de materiais cerâmicos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 - CERÂMICA AVANÇADA

A palavra cerâmica vem do grego κεραμος (keramos) e significa argila, telha e vaso de barro.

O termo “cerâmica” engloba uma ampla variedade de produtos, sendo que todos eles têm em comum o fato de serem materiais inorgânicos e não-metálicos, que são moldados através de pressão e/ou calor, e em seguida são sinterizados. Em decorrência de apresentarem um ponto de fusão muito alto, a grande maioria dos componentes cerâmicos é produzida por sinterização de pós ao invés da solidificação de um líquido [12; 48].

Embora a cerâmica já venha sendo usada há mais de 3000 anos para produtos tradicionais tais como tijolos, telhas, porcelanas, vasos artísticos, louças sanitárias, pisos cerâmicos, cimentos, etc, somente nos últimos 50 anos o desenvolvimento da tecnologia permitiu um conhecimento muito melhor dos materiais cerâmicos e do seu processamento. Descobriu-se que os minerais naturais poderiam ser refinados e que novas composições poderiam ser sintetizadas para que fossem obtidas cerâmicas com propriedades únicas [33; 36]. Este novo tipo de cerâmica ficou conhecido como cerâmica avançada, cerâmica de engenharia, cerâmica estrutural ou ainda, cerâmica técnica de alto desempenho.

2.1.1 - MATÉRIAS-PRIMAS

Como exemplos das matérias-primas utilizadas para a fabricação de cerâmicas avançadas podemos citar: alumina, zircônia, carbetos de silício, nitreto de silício, titanato de bário, titanato de

estrôncio, titanato de chumbo, zirconato de chumbo, óxido de zinco, titânia, dióxido de estanho, etc. As cerâmicas avançadas requerem matérias-primas cujas composições sejam cuidadosamente controladas em relação à pureza e à granulometria. O custo destas matérias-primas também é função do seu grau de pureza: quanto mais elevado o seu grau de pureza, mais elevado o seu custo [12; 48].

2.1.2 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES NA UTILIZAÇÃO DE CERÂMICAS AVANÇADAS

Nos últimos anos tem-se verificado a substituição de um material por outro em muitas aplicações gerais de engenharia. A cerâmica avançada apresenta como vantagens na sua utilização uma quantidade ilimitada da matéria-prima, uma menor dependência de matérias-primas estratégicas sempre requeridas para ligas de alta temperatura, uma compatibilidade ambiental na obtenção da matéria-prima e, para uma condução adequada do processo de fabricação, uma economia de custos. Devido a suas propriedades únicas, a cerâmica avançada apresenta na sua utilização um melhor desempenho quando comparada a outros tipos de materiais. Dentre as vantagens do seu uso podemos citar: melhor resistência ao desgaste, melhor resistência à corrosão, melhor resposta dinâmica, alta resistência mecânica, alta dureza, inércia química, estabilidade dimensional, resistência e estabilidade a altas temperaturas, baixa densidade, baixo coeficiente de atrito, módulo de elasticidade alto, refratariedade e propriedades elétricas e eletromagnéticas únicas [4; 13; 14; 38; 43; 46; 50; 52; 56].

Pelo fato de apresentarem propriedades tão específicas, as cerâmicas respondem melhor aos requisitos impostos para o projeto de peças quando comparadas com os metais e os polímeros. Isto se deve às peculiaridades dos tipos de ligações presentes nos materiais cerâmicos: ligações covalentes e iônicas. No entanto, também em função dos tipos de ligações presentes, as

dificuldades de conformação dos materiais cerâmicos são bem maiores quando comparadas com os outros materiais [13].

O sucesso da aplicação da cerâmica depende muito da habilidade do engenheiro de projetos em desenvolver estruturas e componentes de forma a utilizar adequadamente as propriedades vantajosas da cerâmica e minimizar o impacto das características limitantes. A principal característica limitante da cerâmica, a qual afeta o projeto do componente, é a sua natureza frágil, ou seja, a cerâmica rompe-se drasticamente após ter sofrido pequena ou nenhuma deformação plástica [26; 47]. Embora, em geral, os produtos cerâmicos avançados sejam de dimensões reduzidas, eles constituem-se, na maioria das vezes, em componentes fundamentais para a viabilização de produtos e equipamentos de alta tecnologia [3].

2.1.3 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DAS CERÂMICAS AVANÇADAS

As cerâmicas avançadas vêm sendo empregadas, de acordo com suas funções, em diversos segmentos industriais. Alguns exemplos são citados na tabela 1.

Tabela 1 - Exemplos de aplicações das cerâmicas avançadas de acordo com as suas funções [1; 3; 4; 8; 32; 33; 48; 49].

Funções Térmicas	radiadores de infravermelho, refratários, isolantes térmicos para fornos industriais, resistores térmicos, condutores térmicos, materiais para escoamento de calor em componentes eletrônicos, eletrodos, absorvedores de calor, etc.
Funções Magnéticas	magnetos, cabeças magnéticas de gravação, memórias, fitas magnéticas, indutores, osciladores de baixa frequência, filtros divisores de frequência, transformadores de pulso, etc.
Funções Ópticas	tubos de descarga para lâmpadas de vapor de sódio, tubos de luz, transmissores de infravermelho, materiais para laser, polarizadores, memórias óticas, válvulas de luz, sistemas de memória e display, fibras óticas, transmissores TV, tubos de lâmpadas, diodos a laser, diodos emissores de luz, porcelana translúcida resistente ao calor, tubos fluorescentes, cabos para comunicação ótica, etc.

Funções Químicas	reatores de alta temperatura, elemento de controle de cozimento em forno de microondas, controle de combustão de veículos, suporte para enzimas, detectores de hidrocarbonetos, de flúor-carbonetos e de vazamento de gases, sensores para umidade e radiação, eletrodos para processos químicos e para produção de Cl ₂ , catalisadores para indústria química, tubulações, filtros para líquidos e gases, processo fotoquímico, suporte catalítico, etc.
Funções Elétricas	substratos de circuitos integrados, substratos de interconexão eletrônica, capacitores cerâmicos, capacitores multicamadas, sensores de temperatura e calor, elementos de aquecimento, sensores de infravermelho, células solares, eliminadores de ruídos e sobretensão, pára-raios, medidores de pH, eletrólito sólido, sensores de O ₂ e CO, vibradores, osciladores, filtros, transdutores, geradores de faísca, velas de ignição, resistores, varistores, dielétricos, etc.
Funções Mecânicas e Termotécnicas	ferramentas para usinagem, selos mecânicos, tesouras, esferas de rolamentos, componentes automotivos, guia-fios, sensores de pressão, componentes de motores cerâmicos, cadinhos, tubos, meios de moagem, revestimentos, abrasivos, peças para instrumentos de precisão, lubrificantes sólidos, etc.
Funções Biológicas	implantes, dentes artificiais, ossos e juntas, etc.
Funções Nucleares	combustíveis nucleares, materiais para blindagem, material moderador de nêutrons, material para revestimento, material de controle, absorvedores, refletores, etc.

2.1.4 - MERCADO DAS CERÂMICAS AVANÇADAS

O mercado de cerâmicas avançadas nos Estados Unidos foi estimado em pouco mais de 700 milhões de dólares em 1991, mas calcula-se que poderá se aproximar de 2 bilhões de dólares no ano 2000 [14]. Já o mercado brasileiro teve um faturamento anual de 250 milhões de dólares em 1995 [7].

A produção de cerâmicas avançadas no Brasil vem se alterando nos últimos anos em determinados segmentos. O seu crescimento na exportação de produtos de alta alumina, em termos de volume, é um exemplo disto, pois demonstra que estes produtos já apresentam

qualidade e preço competitivos internacionalmente. Mas embora o mercado nacional venha apresentando uma tendência de crescimento, o valor total ainda é muito restrito quando comparado com o mercado internacional [1;2].

As pessoas que trabalham com cerâmica avançada no Brasil, apesar dos desenvolvimentos tecnológicos e dos grandes investimentos realizados na pesquisa de novos materiais, enfrentam dois grandes problemas. O primeiro deles é o baixo nível de qualidade das matérias-primas. Como a cerâmica avançada possui especificações bastante rigorosas (o que exige um controle muito criterioso de matérias-primas como aluminas, argilas, caulim e ligantes orgânicos), o problema está no fato dos fornecedores de matéria-prima ainda não garantirem as especificações desta, além de também não garantirem uma consistência no crescimento de fornecimento em casos de crescimento da produção.

O outro problema grave é a inexistência de normas técnicas brasileiras, o que faz com que o mercado se apoie em normas importadas como ASTM, DIN, JIS e ISO, normas estas que apresentam divergências entre si. A criação de uma norma técnica no âmbito da ABNT contribuiria muito para facilitar as relações industriais e comerciais do setor, consolidando os avanços científicos e tecnológicos.

O aumento da demanda por cerâmicas avançadas no Brasil, bem como a alteração do perfil deste mercado, só virá com a modernização tecnológica da indústria nacional. A abertura do mercado tem exercido uma forte pressão nas empresas para a melhoria da qualidade de produtos e serviços, redução de custos e maior produtividade. Isto tem tornado as empresas mais competitivas. O grande número de empresas certificadas ou em busca da certificação pela ISO 9000 é uma evidência disto.

2.2 - FABRICAÇÃO DE COMPONENTES DE CERÂMICAS AVANÇADAS

A produção de peças cerâmicas segue, de forma simplificada, a seqüência de fabricação mostrada na figura 1, cujos itens serão especificados logo em seguida [24].

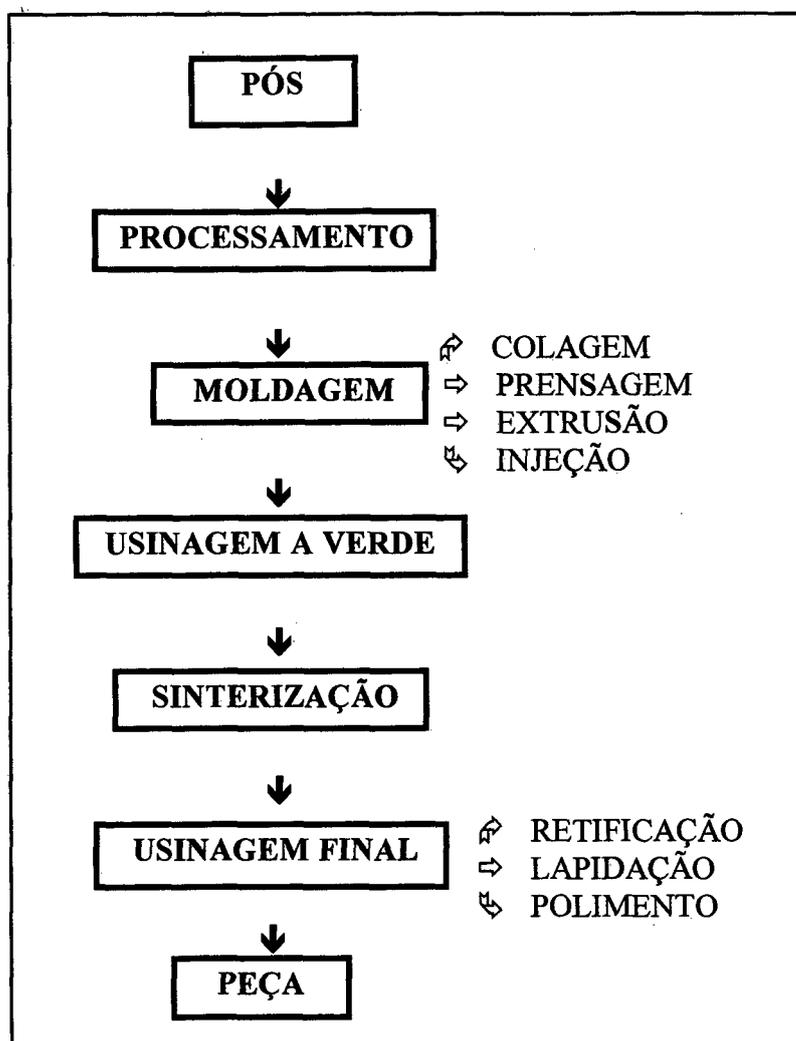


Figura 1 - Passos na produção de componentes de cerâmica avançada.

As matérias-primas de maior pureza, a partir das quais são produzidas as cerâmicas avançadas, são, normalmente, produzidas sinteticamente. O material que vai ser posteriormente moldado para a confecção das peças é preparado a partir de pós com partículas muito finas, que tem morfologia de partículas e distribuição de tamanho de grão ajustadas por rotas de

processamento definidas. A moldagem, independente do processo que se escolha para fazê-la, deve ser feita o mais perto possível do contorno desejado, pois assim consegue-se minimizar o alto custo da usinagem final em condições pós-sinterizadas.

Dependendo da geometria produzida, do grau de complexidade e do número de peças, estão à disposição diversos processos de moldagem. Os mais utilizados são os seguintes: colagem por barbotina, prensagem, extrusão e injeção [19].

O processo de fundição, também conhecido por colagem de barbotina (em inglês “slip casting”) é uma das mais velhas técnicas de conformação de cerâmica. Nesta técnica, uma suspensão coloidal (usualmente usando água como solvente) é vazada em um molde poroso. A peça é formada no interior do molde que pode ser oco ou sólido e dependendo da suspensão pode ser removido ou não.

A maioria das peças de cerâmica é feita pela técnica de prensagem, na qual pós aglomerados são usados para o enchimento dos moldes que são prensados, com uma determinada pressão, até se obter a razão de compressão e a densidade a verde desejada.

Extrusão é o processo pelo qual uma mistura plástica é comprimida através de uma matriz que possibilita a formação de geometrias muito complexas em duas dimensões. A mistura plástica consiste de pós inorgânicos, um ligante e um líquido (como por exemplo, a água). A principal limitação deste método é que a terceira dimensão não pode ser alterada. Barras, tubos e estruturas lineares são usualmente extrudados.

O processo de injeção consiste, basicamente, na injeção de pós cerâmicos com um veículo orgânico fundido para dentro da cavidade de um molde. Após a solidificação do polímero, tem-se a peça conformada a verde. O processo permite a execução de formas complexas, obtenção de espessuras relativamente finas e precisão dimensional melhores do que na colagem e na prensagem [16].

Para a ligação das partículas de pó umas às outras são adicionados ligantes. Existem diversas composições de ligantes: segundo a classe do material, geometria da peça e tipo de extração dos aditivos. Porém, em geral, os ligantes se compõem de: aglomerantes, plastificantes, agentes surfactantes, lubrificantes e agentes desmoldantes. O sistema ligante determina a viscosidade da massa plástica e a resistência a verde, facilita a coesão das partículas e aumenta a moldabilidade da massa. O ligante deve ser de fácil dispersão, ter baixo efeito de contaminação e ser compatível com o pó [30].

A usinagem a verde é realizada tanto em peças apenas modeladas ou compactadas quanto em peças pré-sinterizadas. Durante a pré-sinterização os ligantes são volatilizados através da ação do calor. A peça é aquecida, com velocidade controlada, até uma temperatura inferior à de sinterização havendo um ganho de resistência na peça. Devido à sua importância, as características e as vantagens da usinagem a verde serão vistas posteriormente.

A sinterização é um tratamento térmico que permite a união das partículas pelo aquecimento a uma temperatura inferior à da fusão do constituinte principal. A sinterização é uma operação delicada devido às altas temperaturas e aos grandes tempos de manutenção destas altas temperaturas. Uma condução não adequada da temperatura pode provocar deformações e trincas na peça. Durante a sinterização, as peças a verde com formato próximo ao formato final sofrem um aumento de densidade e de resistência, desenvolvendo as características desejadas do material [30].

O aumento da densidade leva a uma redução de volume que, às vezes, exige uma usinagem posterior em peças de precisão para garantir medidas exatas e qualidade superficial adequada dos componentes. Os mais importantes métodos de remoção de material para esta usinagem posterior são [23]:

- **Retificação:** basicamente é um processo de acabamento, no qual a remoção do material se dá na faixa de alguns micrometros. A remoção do material da peça é feita através dos gumes dos grãos dos rebolos ou fitas. Como resultado da retificação temos uma superfície com baixa rugosidade e com precisão de forma.
- **Lapidação:** é um processo de usinagem com grão abrasivo solto, suspenso em um líquido ou em uma pasta. É um processo fino ou ultra-fino com o qual pode-se obter uma qualidade superficial extremamente elevada, com precisão de forma e tolerância dimensional. As superfícies lapidadas apresentam ranhuras aleatórias e um brilho opaco.
- **Polimento:** em exigências excepcionais à qualidade da peça, é necessário o polimento, que é aplicado em superfícies previamente lapidadas, para melhorar o acabamento, reduzir a aspereza da superfície, remover os danos causados pela retificação ou pela lapidação e produzir uma superfície refletora.

2.3 - USINAGEM A VERDE DE CERÂMICA AVANÇADA

2.3.1 - ASPECTOS GERAIS

A moldagem de peças com formatos mais simples permite que se consigam bons níveis de homogeneidade e distribuição de densidade na peça verde [17]. Isto resulta numa peça de qualidade superior após a sinterização.

Quanto mais perto das especificações finais ficar a peça verde ou parcialmente sinterizada, menos tempo será gasto com a operação de usinagem e também menos ferramentas serão consumidas. Uma mesma quantidade de material poderá requerer mais de dez (10) vezes de tempo de usinagem depois de ser sinterizada do que no estado verde e também, poderá custar vinte (20) vezes mais devido ao desgaste de ferramenta [25].

As operações classificadas como usinagem a verde são aquelas que ocorrem desde logo após a compactação inicial do corpo cerâmico até aquelas anteriores à sinterização total da peça.

Os processos de usinagem que podem ser empregados na usinagem a verde de materiais cerâmicos englobam os processos de usinagem com ferramenta de corte de geometria definida e geometria não-definida. Apesar da grande abrangência destes processos e suas múltiplas aplicações na usinagem de metais, existem limitações na aplicação dos processos na usinagem de cerâmicas no estado a verde. Este assunto será abordado de forma mais detalhada no transcorrer do trabalho.

Peças cerâmicas com formatos mais simples já são moldadas no formato final e não requerem usinagem a verde. Logo após a moldagem elas são sinterizadas.

Peças cerâmicas com formatos mais complexos são inicialmente compactadas até um formato aproximado, depois são usinadas até o formato final, e somente então é que são sinterizadas. A peça que será usinada pode estar apenas compactada, porém, devido a algumas limitações impostas pelo sistema ligante utilizado em algumas formulações cerâmicas, pode ser que seja necessário sinterizar parcialmente a peça antes da usinagem. Embora estas peças estejam parcialmente sinterizadas, este método de usinagem também é considerado como usinagem a verde [25; 32; 33].

O objetivo de todas as operações de usinagem a verde é produzir um componente o mais próximo possível do formato final antes da sinterização plena. É muito mais fácil usinar uma cerâmica no estado verde do que uma depois de sinterizada, porque a peça se torna muito dura após a sinterização [18; 25; 33].

Com a usinagem a verde é possível a remoção das rebarbas formadas na borda de junções de moldes e a retirada dos canais de alimentação típicos do processo de colagem. A usinagem a verde amplia o campo de aplicação dos processos de colagem, prensagem e injeção, pois permite

a realização de geometrias difíceis de serem realizadas somente por estes processos. A usinagem a verde também é utilizada após os processos de extrusão para segmentar os perfis produzidos por este processo.

A usinagem a verde também é utilizada para a fabricação de peças complexas cujo molde, devido ao pequeno número de peças a serem produzidas, não é justificado economicamente. Existem muitas peças que precisam ser fabricadas nestas condições como é o caso, por exemplo, de implantes bio-cerâmicos e peças de reposição não mais fornecidas pelo fabricante. A usinagem a verde é um grande nicho de mercado que se corretamente explorado, abre novas perspectivas no campo da engenharia [27].

Muitos componentes permitem empregar várias soluções de usinagem para se chegar a um resultado adequado. O método de usinagem a verde utilizado nas indústrias baseia-se mais na experiência dos operadores do que no conhecimento tecnológico do processo [24].

Dentre as vantagens obtidas com a usinagem a verde, podemos citar como principais a economia e a flexibilidade [24; 25; 34].

As taxas de remoção de material na usinagem são altas e todas as partículas removidas podem ser recicladas. Já no caso das peças sinterizadas, as partículas removidas e os refugos só podem ser acrescentados novamente à massa em alguns casos especiais e em pequena quantidade percentual.

Os exemplos mostrados a seguir servem apenas para enriquecer o trabalho, mas não tem o intuito de mostrar toda a abrangência dos processos. Geometrias simétricas de revolução como, por exemplo, isoladores de alta tensão e isoladores de velas de ignição podem ser obtidos nos processos de torneamento e furação. Com algumas limitações também é possível torner roscas externas e internas. Geometrias prismáticas podem ser obtidas por fresamento. Formas livres,

como implantes bio-cerâmicos, muitas vezes ainda são executados de forma manual, utilizando recursos como raspadores e goivas [24; 32; 34].

Todos os processos de usinagem com ferramenta de corte de geometria definida apresentam limitações com respeito às seções de usinagem e à introdução de defeitos na camada superficial do componente [27]. O trabalho seguro se limita a seções de usinagem muito pequenas com ferramentas afiadas. As ferramentas que propiciam os melhores resultados são as ferramentas de diamante policristalino. Deve-se ainda levar em conta que os processos de usinagem com ferramenta de corte de geometria definida (como, por exemplo, o torneamento, a furação e o fresamento), quando utilizados para a usinagem de peças de cerâmica avançada, apresentam uma alta taxa de desgaste da ferramenta [20].

Técnicas de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida, em decorrência da ação simultânea de múltiplos gumes, permitem obter taxas de remoção e taxas de desgaste da ferramenta compatíveis com os processos anteriormente citados, no entanto, com uma menor introdução de defeitos na camada superficial [20]. Dentre estes processos, cita-se o lixamento como o mais simples e frequentemente utilizado. Devido à importância deste e dos demais processos de usinagem com ferramenta de geometria não-definida, eles serão detalhados adiante.

2.3.2 - CARACTERÍSTICAS DA USINAGEM A VERDE

Os mecanismos de formação de cavacos na usinagem a verde de cerâmicas não podem ser comparados com os da usinagem de metais. Em decorrência da indeformabilidade plástica deste material, os cavacos se resumem a grânulos que são constituídos de partículas isoladas ou agrupamentos de partículas. Quanto maior for a temperatura de pré-sinterização, mais forte será a ligação entre as partículas do pó original, aumentando em parte o tamanho dos grânulos removidos.

Os operadores e a máquina devem estar protegidos do pó abrasivo. As exigências de força para a usinagem a verde de cerâmicas são significativamente menores do que as para a usinagem de metais. A usinagem pode ocorrer tanto a seco como na presença de fluidos de corte [25; 32; 33].

Para a usinagem a verde podem ser utilizadas máquinas-ferramentas convencionais, desde que estas estejam bem protegidas contra o desgaste, pois o pó abrasivo da cerâmica penetra rapidamente nas vedações e destrói os mancais convencionais. Correções de máquinas que chegam a durar uma década quando utilizadas na usinagem de metais, irão degradar significativamente em apenas seis meses quando forem utilizadas para a usinagem de cerâmica verde ou pré-sinterizada, se as áreas de desgaste forem deixadas desprotegidas [25; 32; 35].

As velocidades de usinagem variam em função da rigidez e da porosidade do material no estado a verde e da profundidade de corte. Os requisitos da velocidade de corte irão variar como nas operações típicas da usinagem de metais, variando também de uma formulação cerâmica para outra. A velocidade de corte máxima é limitada àquela que ainda produz uma superfície aceitável, sem trincas. O parâmetro mais importante da peça que está sendo usinada é a sua resistência à fratura. A peça deve ser resistente o suficiente para agüentar as tensões do apoio e da usinagem sem quebra. A usinagem a verde também depende do tamanho das partículas, das propriedades termomecânicas do ligante na peça e da temperatura na superfície do material durante a usinagem [25; 32].

König e Wagemann [24] afirmam que as ferramentas e as máquinas-ferramentas não estão suficientemente adaptadas para as características exigidas pela usinagem a verde. Isto se deve ao fato do processo de usinagem a verde ainda não ser plenamente entendido. O processo de dar forma a uma peça cerâmica pode ganhar muito, tanto em termos de economia como em termos de flexibilidade, quando o processo de usinagem a verde for plenamente entendido e viabilizado.

Estes autores também afirmam que o principal potencial tecnológico disponível para futuros melhoramentos no campo da usinagem a verde está no desenvolvimento de métodos de usinagem inovadores.

2.4 - USINAGEM COM FERRAMENTAS DE CORTE DE GEOMETRIA NÃO-DEFINIDA

2.4.1 - GENERALIDADES

Na usinagem com ferramentas de corte de geometria não-definida, a remoção de material realiza-se através da ação de grãos abrasivos de alta dureza, que atuam soltos ou unidos por um ligante. Devido ao fato de termos um grande número de gumes atuando simultaneamente na peça, da estrutura geométrica aleatória destes grãos variar progressivamente com o desgaste, e a remoção de material ser dada pela soma de um grande número de fenômenos isolados de formação de cavacos, é praticamente impossível determinar uma forma geométrica definida para todos estes grãos [23].

Para que possam remover material, os grãos abrasivos devem [41]:

- ser muito duros, para que mantenham por muito tempo gumes vivos e afiados;
- apresentar uma dureza que seja superior a do material a ser usinado;
- ser termicamente estáveis para resistir às altas temperaturas originadas na usinagem;
- ser quimicamente estáveis diante das altas temperaturas e pressões geradas na usinagem, na presença de ar, fluido de corte e do material da peça.

Os grãos abrasivos são de materiais cristalinos duros, e estes, devido a suas características intrínsecas, são tão frágeis que os grãos no próprio processo de moagem racham e a forma geométrica aleatória dá origem a gumes afiados e cantos vivos, com partes de maior ou menor

protuberância. As partes mais protuberantes são as que realmente irão penetrar no material, de forma que estas é que formam o gume propriamente dito do grão abrasivo [23].

Os processos de fabricação com ferramenta de corte de geometria não-definida, no sentido próprio do termo, só enquadram os grupos de retificação, brunimento e lapidação. O corte com fio diamantado pode ser enquadrado dentro do grupo do brunimento. Uma representação esquemática do início do corte no processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida pode ser vista na figura 2.

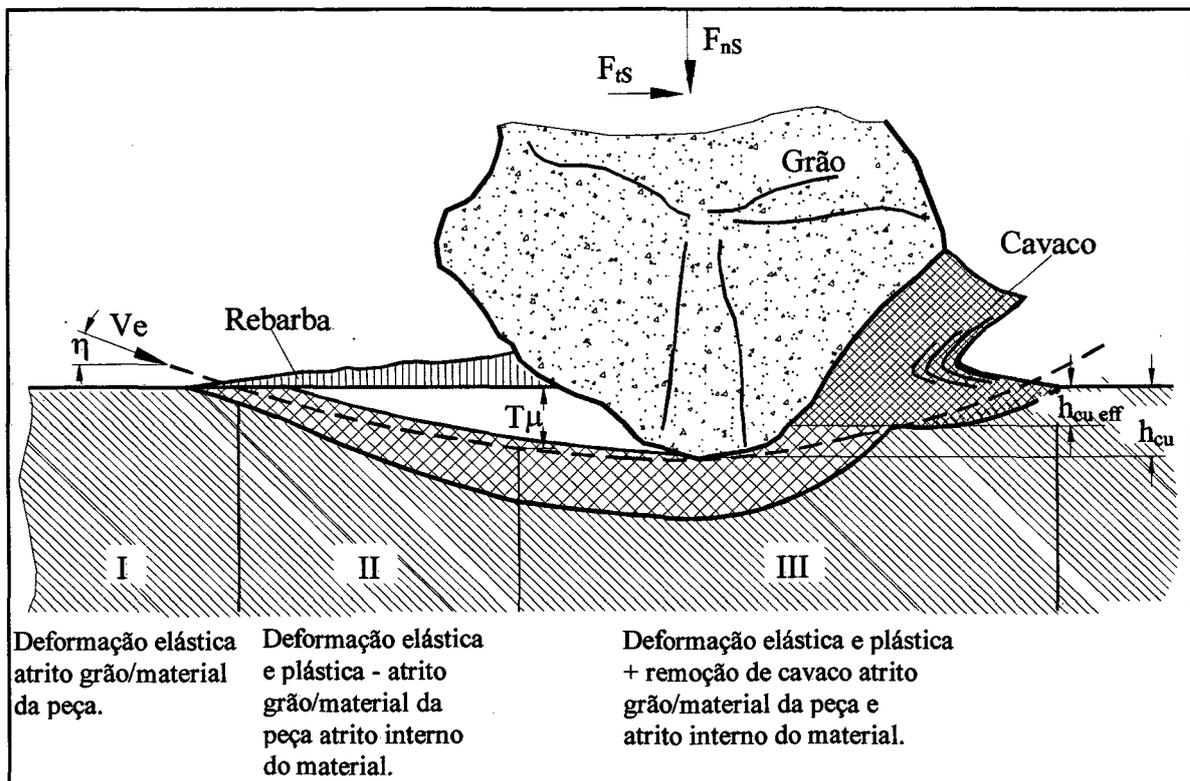


Figura 2 - Representação esquemática do início do corte no processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida [23].

O processo de corte de metais (materiais dúcteis) e, também, de cerâmicas é descrito em inúmeras fontes na literatura. Para espessuras de usinagem muito finas e sob condições de pressão

isostática elevada, os materiais cerâmicos se comportam como materiais dúcteis, de forma que podem ser trabalhados como tais sob estas condições [22; 51]. Mas, praticamente nada foi encontrado na literatura descrevendo o processo de corte de cerâmicas nos estados verde e pré-sinterizado. O mecanismo deste processo será explicado no decorrer do trabalho.

2.4.2 - PROCESSO DE USINAGEM DE CERÂMICAS

A tecnologia dos processos de usinagem, historicamente, se baseia na tecnologia da pedra lascada e da pedra polida. Na evolução dos processos, a usinagem de madeiras e metais teve a maior importância. Na usinagem de metais, os processos de corte com ferramenta de corte com geometria definida e não-definida dominam a literatura. Só nas últimas décadas a usinagem de materiais cerâmicos passou a ter uma maior importância.

Muitos dos processos e parâmetros de usinagem dos metais podem ser transferidos para a usinagem de materiais cerâmicos. Mas como a usinabilidade depende das propriedades mecânicas, das propriedades térmicas, do método de processamento, da microestrutura e da composição da peça a ser usinada, a usinabilidade das cerâmicas e dos metais difere em muitos aspectos [32; 43; 44; 45].

A tabela 2 compara propriedades típicas de alguns materiais cerâmicos selecionados com as propriedades de materiais metálicos e poliméricos. Levando-se em conta estas diferenças, muitos parâmetros da usinagem de materiais metálicos podem ser modificados para serem utilizados com sucesso na usinagem de materiais cerâmicos.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas cerâmicas, alguns metais e um polímero [43].

Material	Propriedades físicas				Propriedades mecânicas		
	Densidade g/cm ³	Ponto de fusão °C	Condutiv. térmica W/m . K	Coef. de Expansão térmica 10 ⁻⁶ / K	Resist. à flexão MPa	Módulo de elasticidade GPa	Tenacidade à fratura MPa . m ^{1/2}
Cerâmicas							
Óxido de alumínio	3,4-4,0	2050	27	8	205-550	385	2,0-3,0
Carbeto de silício	3,0-3,2	2500	63-155	4-5	415-550	420	2,5-3,5
Nítreto de silício	3,2-3,5	1900	9-30	3	620-1100	305	3,5-5,0
Óxido de zircônio	5,8	2500	2	9-10	965-1380	140	6,0-8,0
Ferrita	5,0-6,0	2000	8	7,5	140-170	205	1,0-1,3
Quartzo fundido	2,2	1670	1,4	0,55	110	77	1,0
Metais							
Inconel (Ni, Cr e Fe)	8,1	1400	12,4	7	1240-1405	215	24
Aço-ferramenta	7,84	1500	52	7	1405-2000	210	98
Aço suporte 52100	7,85	1500	30-40	11	415-550	210	56
Alumínio	2,7	660	204	13	275-550	70	36
Polímero							
Polietileno	0,9	120	0,32	167	7-20	3,5	0,25

A resistência dos materiais cerâmicos varia dentro de uma larga faixa. Mesmo para um determinado material cerâmico a resistência pode variar, pois depende do ligante utilizado e da técnica de conformação escolhida.

Geralmente os materiais cerâmicos possuem uma rigidez (módulo de elasticidade ou de Young) maior do que os materiais metálicos. Isto quer dizer que a deformação elástica dos materiais cerâmicos durante a usinagem, para a mesma força aplicada, será menor do que a dos metais. Por isso as cerâmicas podem ser usinadas com tolerâncias mais estreitas, com uma geometria mais precisa e com uma planicidade e um paralelismo melhores do que os obtidos com

os metais. Este é o princípio da base da escolha dos materiais cerâmicos ao invés dos metálicos em peças de instrumentos de precisão, suportes e guias de máquinas-ferramentas, assim como em blocos-padrão.

Os materiais cerâmicos, de uma maneira geral, são mais estáveis quimicamente do que os materiais metálicos.

A condutividade térmica dos materiais cerâmicos também varia amplamente. Esta propriedade é que determina a transferência de calor da área que está sendo usinada para as regiões vizinhas. Metais com baixa condutividade térmica como, por exemplo, o titânio e o Inconel, apresentam altas temperaturas e grande dificuldade na usinagem. Similarmente, é mais difícil usinar cerâmicas com baixa condutividade térmica. Quando nestes materiais tivermos gradientes de temperatura elevados, a dilatação térmica diferencial em torno da região aquecida provocará gradientes de tensão elevados. Para um resfriamento brusco superficial de um componente cerâmico aquecido, as tensões provocadas na superfície são de tração e quando estas ultrapassam o limite da resistência do material em questão, se formam trincas superficiais. Se o ciclo térmico se repetir, o componente sofrerá fadiga e romperá.

Uma característica que diferencia significativamente os materiais cerâmicos dos metálicos é a sua baixa resistência à tração. É importante ter em mente que processos que introduzem tensões residuais de tração não são os adequados para a usinagem de cerâmicas. Consegue-se melhor resultado com os processos que introduzem tensões residuais de compressão, pois eles minimizam a geração e a propagação de trincas durante o processo de usinagem, podendo-se chegar a uma usinagem de cerâmicas com sucesso [20].

Em decorrência deste fato, este trabalho irá se concentrar nos processos de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida, particularmente, com o processo de corte que emprega ferramentas filiformes revestidas galvanicamente com abrasivos diamantados.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

K. Subramanian e S. Ramanath [42; 43; 44; 45] da Norton Company, Worcester, MA, USA, propuseram um método para otimizar os resultados do processo de usinagem. Este método foi denominado pelos autores de “Sistema de Aproximação” e, através dele, foi possível gerar peças/superfícies cerâmicas até recentemente consideradas impossíveis de serem usinadas como, por exemplo, molas cerâmicas, cerâmicas com acabamento espelhado e tubulações com paredes muito finas. Estas diretrizes também podem ser aplicadas em uma variedade de componentes que incluem desde dispositivos eletrônicos para cerâmicas tradicionais até cerâmicas avançadas.

Para que se consiga que o início e a propagação da fratura frágil seja minimizados deve ser dada uma atenção especial a alguns parâmetros de entrada. Dentre os parâmetros de entrada se destacam:

- máquina-ferramenta;
- material de trabalho;
- escolha da ferramenta;
- fatores operacionais.

A influência destas variáveis de entrada somadas às variáveis do processo, das quais fazem parte a energia e as forças de usinagem, resultam nas variáveis de saída do processo de usinagem, que são geometria da peça, tolerâncias, acabamento, tensões residuais, qualidade da superfície, taxa de produção, custo por peça e desempenho do produto.

As características da máquina-ferramenta tem um papel importante nos processos de usinagem. Devem ser considerados alguns fatores pertinentes ao projeto, como por exemplo a

rigidez, a precisão, o nível de vibração e a estabilidade dinâmica, porque as forças de usinagem são diferentes para cerâmicas diferentes e nem sempre que se consegue uma boa estabilidade estática se consegue uma boa estabilidade dinâmica.

Algumas características da própria máquina também devem ser consideradas, principalmente em relação aos controles, à força e à velocidade, e aos movimentos dos cursos e dos eixos. Os materiais cerâmicos, devido à sua estabilidade térmica e dureza superiores, possuem aplicações onde devem apresentar tolerâncias muito mais estreitas do que aquelas exigidas para materiais metálicos. Inclusive o acabamento superficial de peças cerâmicas pode ser obtido com melhor qualidade de peças equivalentes feitas de materiais metálicos [43].

Algumas considerações também devem ser feitas em relação ao fluido refrigerante, como por exemplo, a pressão, a direção, o fluxo, o tipo e o sistema de filtração (se existe ou não e como funciona). Os cavacos do material cerâmico, devido ao seu pequeno tamanho e à flotação, podem ser carregados até as guias e corrediças da máquina-ferramenta mais facilmente do que os cavacos de um material metálico, e isto pode acarretar numa aceleração do processo de desgaste de certas partes da máquina-ferramenta que não estejam adequadamente protegidas.

A qualidade possível para a peça final, em termos de geometria e tolerâncias exigidas, depende das propriedades do material, tais como propriedades mecânicas, térmicas, químicas, resistência à abrasão e microestrutura. A geometria da peça bruta também tem influência no resultado final da usinagem, pois desta geometria dependem a adaptação da peça à ferramenta, o acesso do refrigerante à região de corte e o formato final exigido para a peça.

A escolha correta da ferramenta também irá influenciar no resultado da usinagem. Devem ser considerados alguns fatores com relação ao abrasivo, ao ligante e ao projeto da ferramenta. Com relação ao abrasivo, deve-se levar em conta o seu tipo, as suas propriedades, o tamanho e a distribuição das partículas e a sua concentração. Com relação ao ligante devem ser analisados o

seu tipo, a sua dureza, a sua tenacidade e a sua condutividade térmica. A influência do projeto da ferramenta se dá em relação ao seu formato, ao seu tamanho e ao material do qual é constituído o seu núcleo.

Alguns fatores operacionais também são decisivos na usinagem da peça para que possamos contar com um bom resultado. Dentre eles, podemos citar os dispositivos de fixação, o projeto do ciclo de usinagem, a aplicação do refrigerante e os métodos de inspeção.

3.1 - EQUIPAMENTOS DE CORTE COM FERRAMENTAS FILIFORMES DIAMANTADAS

Há alguns anos já está disponível na Europa um processo de corte com fios diamantados para o corte de materiais cerâmicos. Este processo é a solução para muitos casos, principalmente recortes bidimensionais. Equipamentos de corte utilizando fios diamantados estão sendo utilizados tanto na indústria como em pesquisas, apresentando vantagens na obtenção de cortes de precisão média em cerâmica no estado a verde e de precisão média a alta no corte de cerâmica sinterizada.

Os equipamentos que utilizam o fio diamantado permitem cortar tanto materiais frágeis, obtendo inclusive cantos vivos, como também materiais dúcteis como, por exemplo, a borracha, a qual é cortada sem grande elevação na temperatura e praticamente sem rebarbas. É importante citar que praticamente todos os materiais podem ser cortados, independente do fato de serem condutores de eletricidade ou não [5].

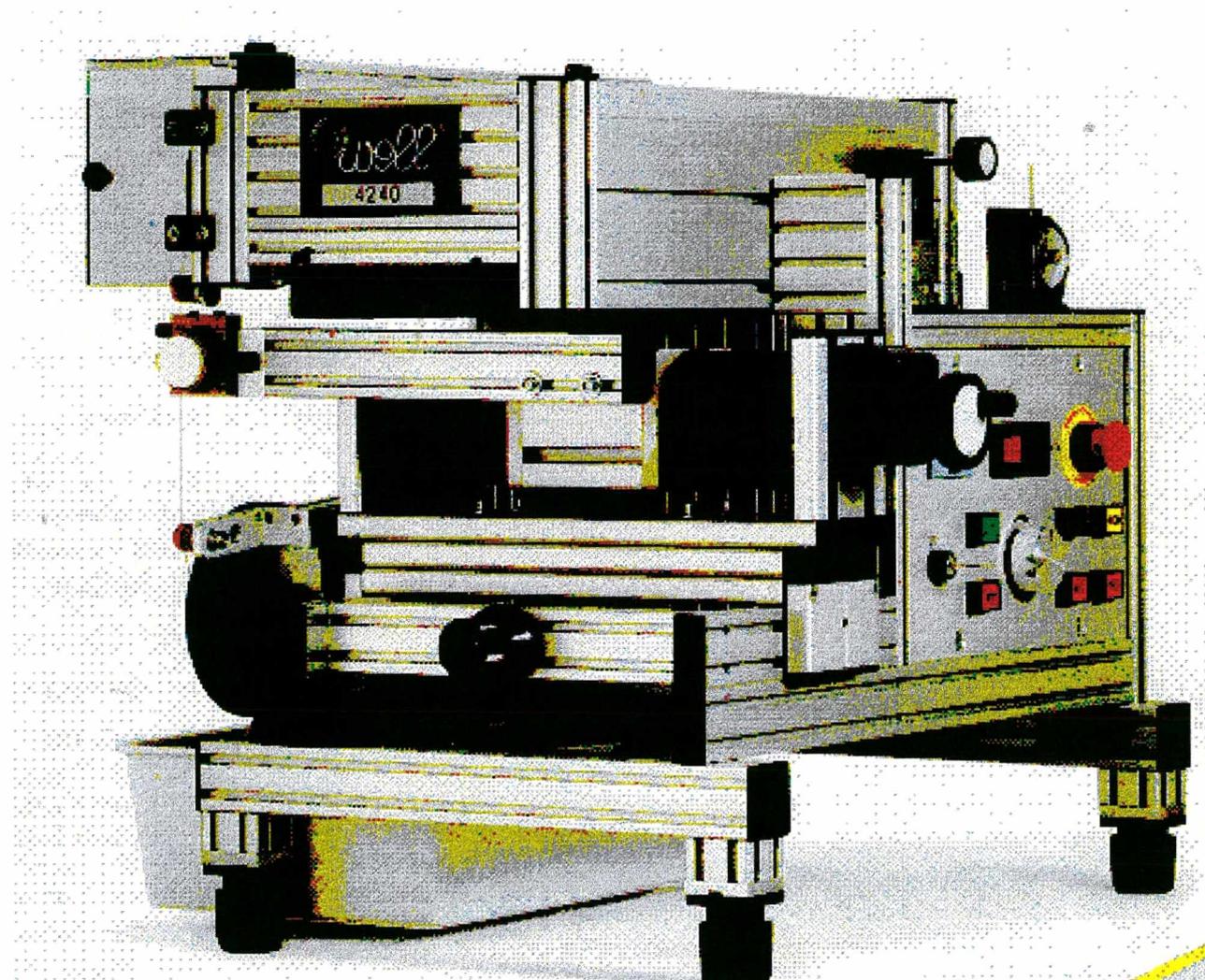


Figura 3 - Equipamento de corte com fio diamantado [53].

As máquinas de usinagem com fio diamantado trabalham com inversão intermitente ou com fio contínuo de corte unidirecional. No primeiro caso uma bobina superior transfere o fio para uma bobina inferior, como mostrado nas figuras 3 e 4, apresentando como desvantagem a necessidade de um grande comprimento de fio, cerca de 20 m ou mais, o que torna o trabalho desvantajoso economicamente no caso da ruptura do fio, quando se perde o comprimento total da bobina. Para garantir o posicionamento do fio em relação à peça, as bobinas devem apresentar um passo transversal igual ao passo de bobinamento do fio. Quaisquer imperfeições no

posicionamento do fio levam a erros geométricos do componente. Além disso, em decorrência do diâmetro grande das bobinas, o comprimento livre do fio é grande (no mínimo igual ao diâmetro de uma bobina, acrescido da altura da peça), tornando o fio deformável transversalmente, o que aumenta o erro geométrico do componente a ser fabricado. O tracionamento do fio é executado através do controle diferencial das rotações das bobinas, o que exige uma eletrônica sofisticada [5; 53].

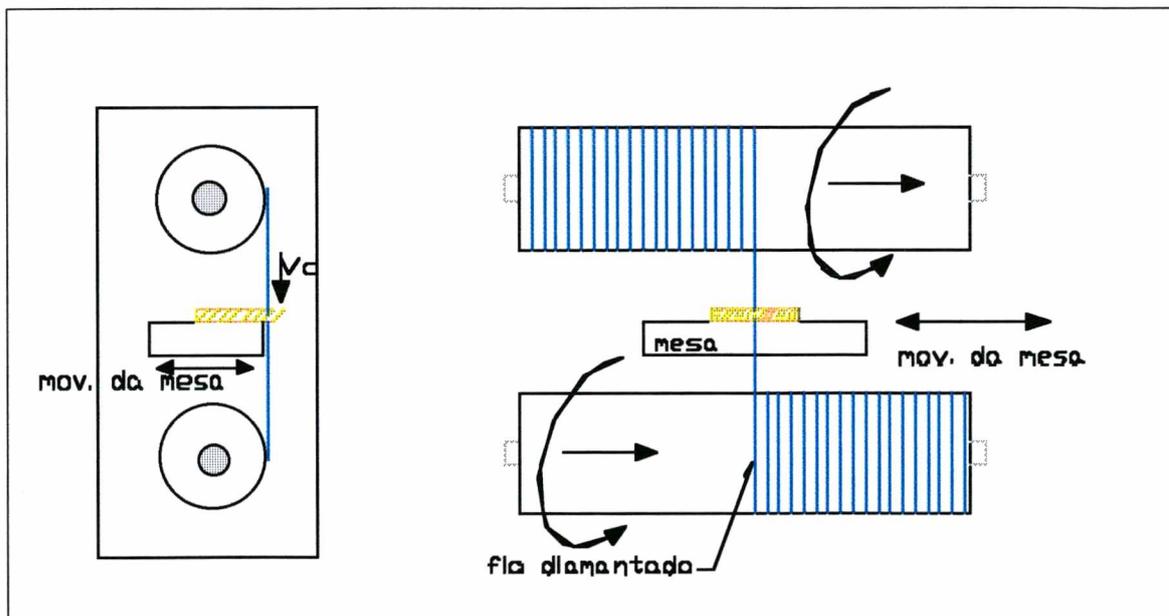


Figura 4 - Esquema de um equipamento utilizando fio com inversão intermitente.

As máquinas de movimento contínuo se assemelham a uma serra fita e requerem um fio com uma emenda, conforme figura 5. Esta emenda deve ser feita de tal forma que seja imperceptível ao corte. O fio com emenda é caro em consequência do custo da emenda que só pode ser executada no fio antes do revestimento galvânico. Este fato torna o fio diamantado contínuo irrecuperável no caso de uma ruptura, representando uma parcela de custo elevada no processo.

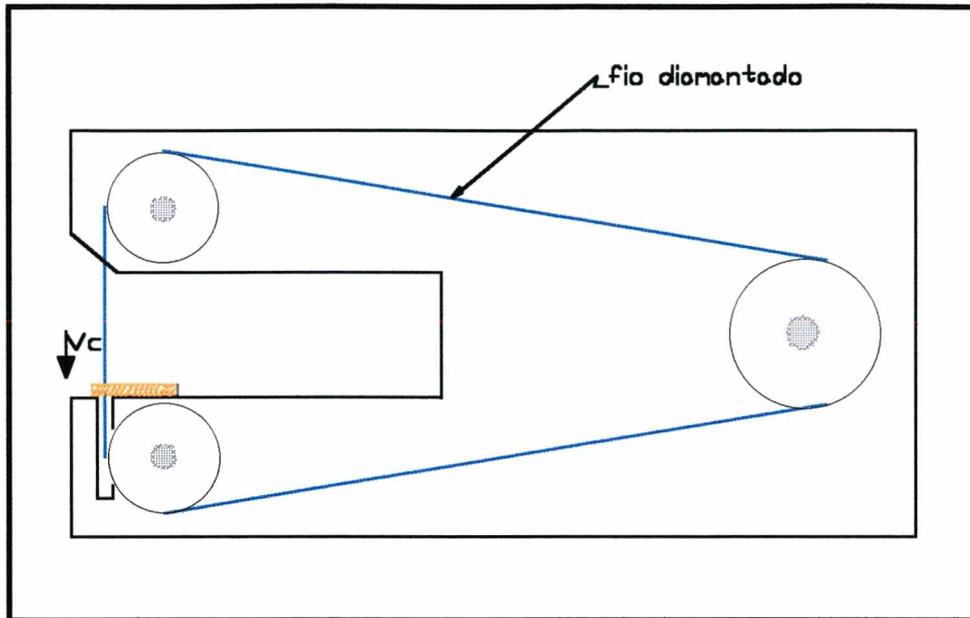


Figura 5 - Esquema de um equipamento utilizando fio contínuo de corte unidirecional.

Neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento de uma máquina onde o corte contínuo é substituído pelo corte alternante, típico de serras tico-tico empregadas em maquetarias. O corte alternante apresenta como vantagens o uso de fios com cerca de 200 mm de comprimento e a dispensa de equipamentos de bobinamento e tensionamento do fio. Este movimento alternante é obtido pela transformação do movimento rotativo de um excêntrico, em movimento linear através de uma biela, conforme o esquema mostrado na figura 6.

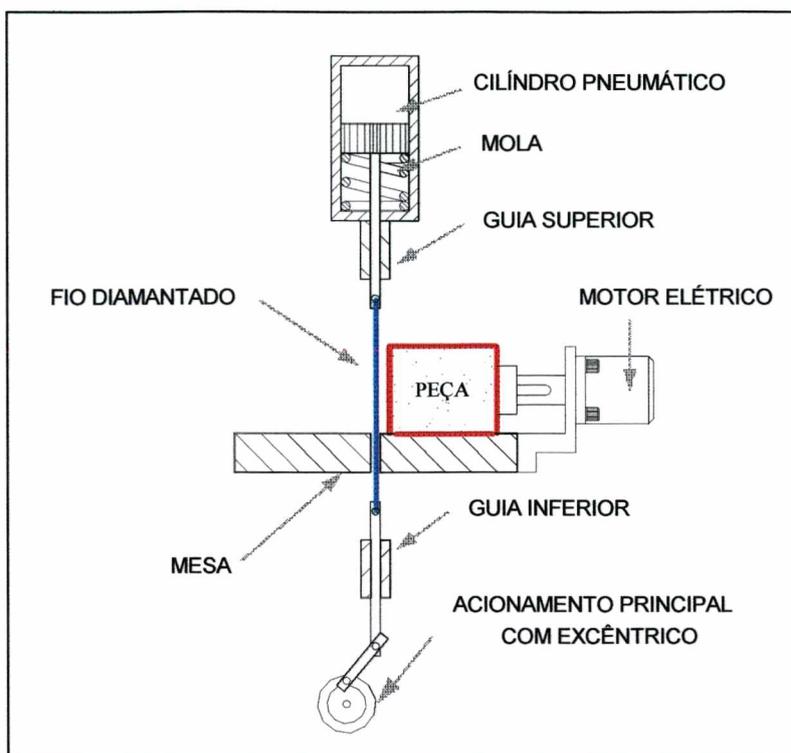


Figura 6 - Esquema de funcionamento de um equipamento de corte com fio diamantado com movimento alternante.

A implementação do processo com movimento alternante neste trabalho foi realizada através da adaptação de uma serra tico-tico, anteriormente utilizada para o corte de madeira. A figura 7 mostra este equipamento, que foi chamado pela equipe de trabalho de Máquina Beta. Devido à alta abrasividade do pó cerâmico resultante do processo de usinagem, fez-se necessária a adaptação de uma proteção para o acionamento e para as guias do sistema de movimentação do fio, conforme mostra a figura 8.

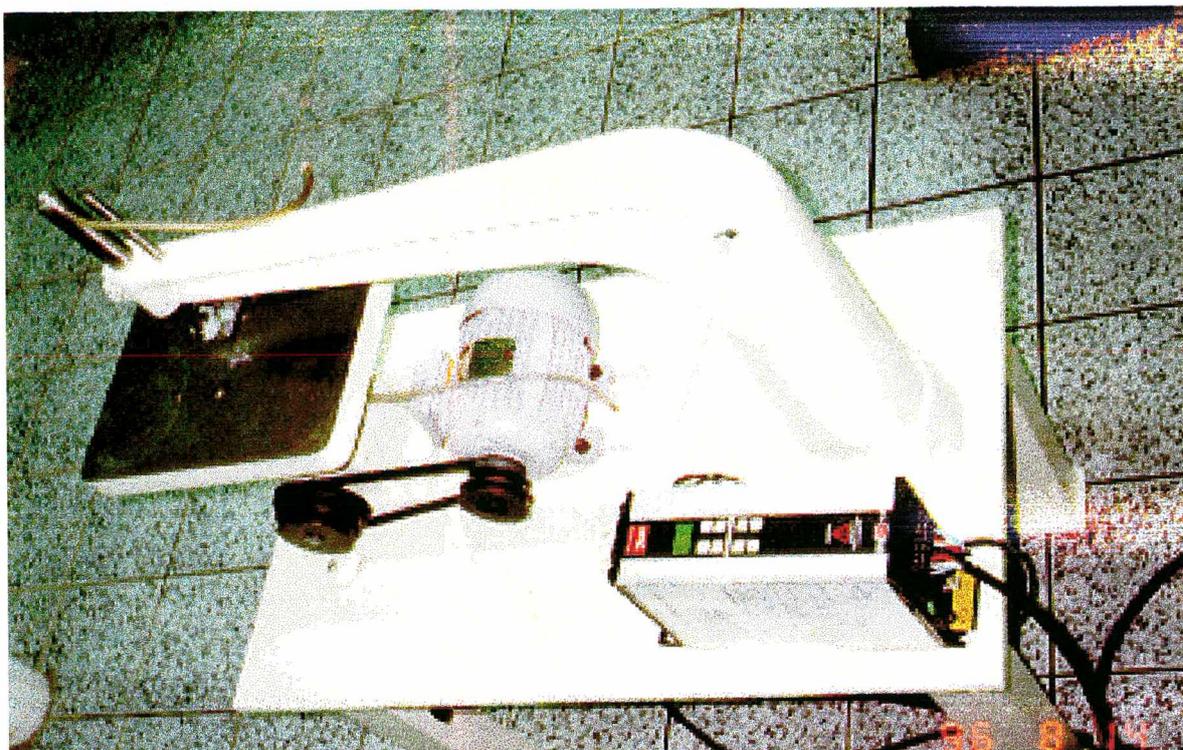


Figura 7 - Máquina Beta.

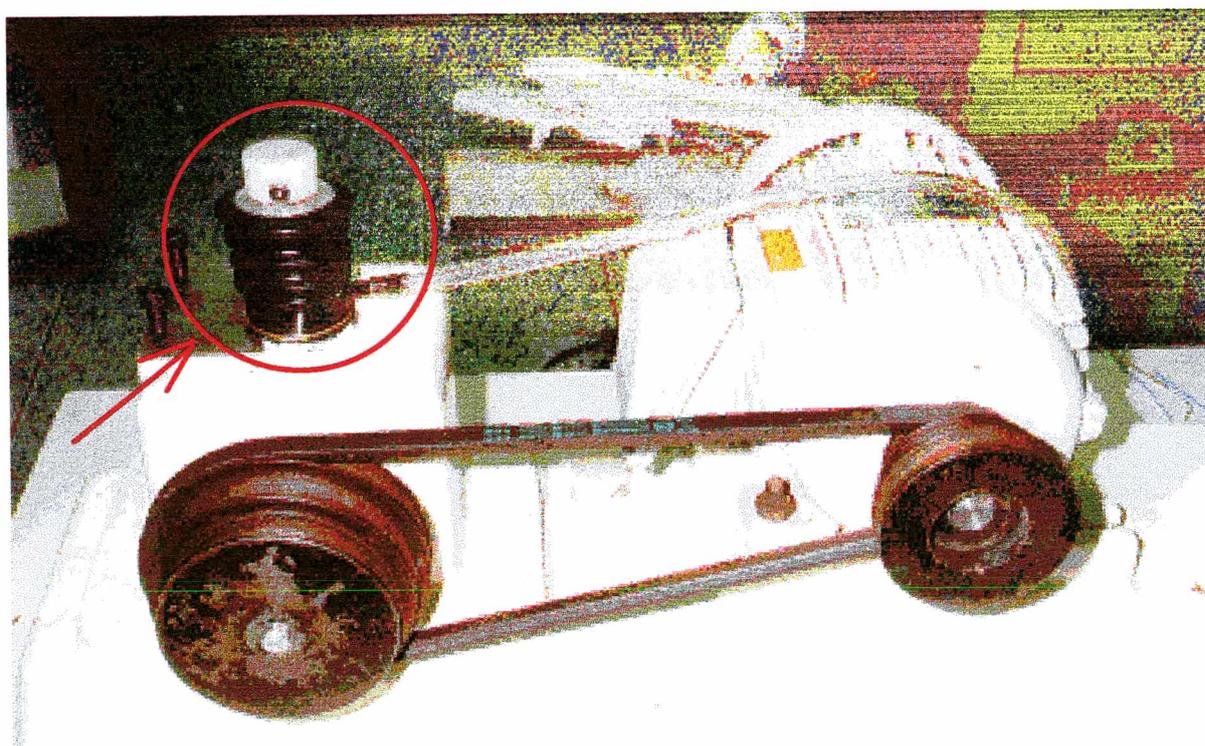


Figura 8 - Sistema de proteção do eixo da Máquina Beta.

O avanço é realizado por meio de um motor elétrico de corrente contínua, que permite um controle da velocidade de avanço. Juntamente com o sistema de avanço foram implementados um sistema de guias para fixação/movimentação das peças. Este sistema de avanço pode ser visto na figura 9.

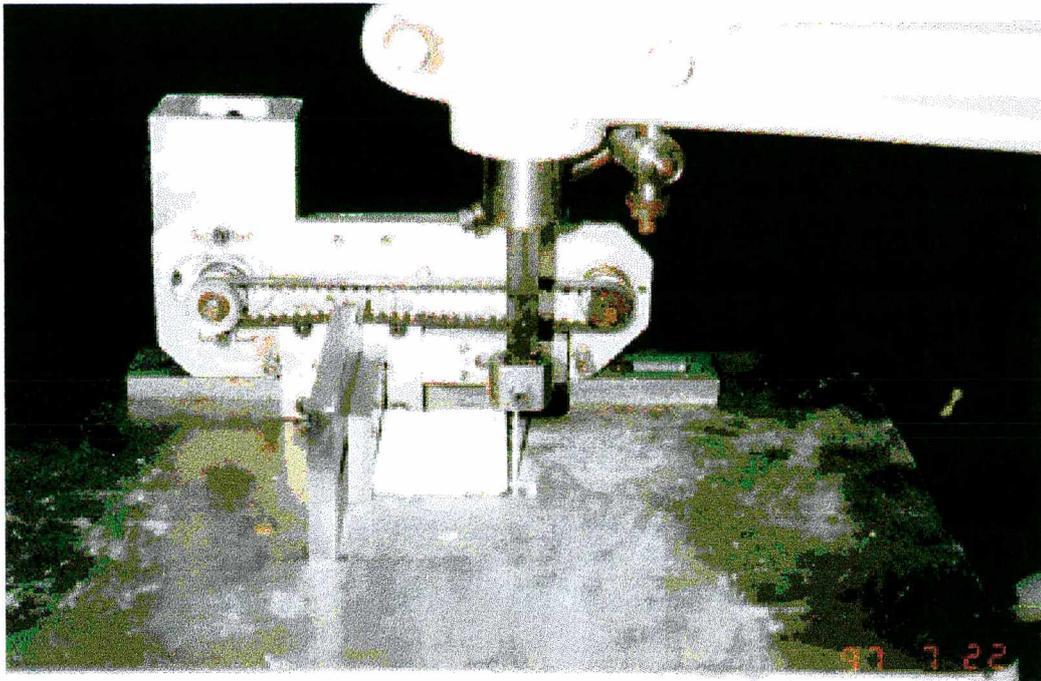
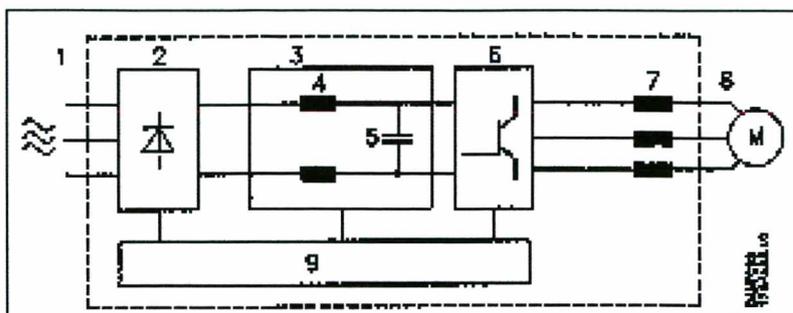


Figura 9 - Sistema de avanço da Máquina Beta.

A velocidade de corte depende das características do material como, por exemplo, dureza, densidade, composição, etc, e, também, da altura da peça e da forma a ser cortada. A velocidade de corte é definida em função da frequência e da amplitude de oscilação do cabeçote da máquina.

Para permitir uma variação contínua da velocidade de corte, foi adaptado à máquina um variador de frequência para a regulagem da rotação do motor principal, conforme mostra a figura 10. O conversor de frequência realiza esta função convertendo a tensão alternada em uma tensão contínua que logo se converte em uma tensão alternada com amplitude e frequência variáveis. A

tensão e a frequência variáveis aplicadas ao motor permitem controlar totalmente a velocidade dos motores assíncronos trifásicos [9; 10].



- 1 - Alimentador de rede
- 2 - Retificador
- 3 - Circuito intermediário
- 4 - Bobinas no circuito intermediário
- 5 - Condensadores no circuito
- 6 - Inversor
- 7 - Bobinas de saída
- 8 - Saída
- 9 - Controle

Figura 10 - Variador de frequência adaptado à Máquina Beta.

3.2 - MATERIAL PARA OS ENSAIOS: ALUMINA

3.2.1 - INTRODUÇÃO

O pó de Al_2O_3 , também conhecido por alumina, é produzido através do aquecimento de hidratos de óxido de alumínio [28]. A alumina se destaca entre as cerâmicas avançadas por ser o material cerâmico mais utilizado, ocupando cerca de 80%, em tonelagem, do mercado mundial de materiais cerâmicos avançados. O elevado consumo da alumina se deve ao fato de suas propriedades atenderem à maioria das especificações exigidas para os mais variados campos de aplicação dos materiais cerâmicos e por ser de baixo custo [8; 17].

A utilização das cerâmicas de alta alumina em larga escala iniciou-se a partir da terceira década do presente século, consolidando-se por volta da segunda guerra mundial, com o emprego em isoladores de velas de ignição em substituição à porcelana e em equipamentos de laboratório. O aumento da utilização da alumina está diretamente relacionado com o desenvolvimento da tecnologia de fornos de alta temperatura e das técnicas de conformação de pós cerâmicos [13]. A alumina é um dos materiais cerâmicos com o qual se tem mais experiência, é barata e fornecida por uma grande quantidade de fabricantes [17; 52].

A alumina tem excelente estabilidade física devido à forte força de ligação química existente entre o alumínio e o oxigênio. Isto resulta num alto ponto de fusão (2050°C), na maior dureza entre os óxidos e em uma alta resistência mecânica. A resistência mecânica é alta à temperatura ambiente, mas sofre uma grande queda a partir dos 1100°C . A condutividade térmica é relativamente alta entre os óxidos, entretanto, devido ao fato do coeficiente de expansão térmica ser alto, a resistência ao choque térmico é baixa. A alumina é um excelente material isolante elétrico. Os valores do módulo de elasticidade, da condutividade térmica e da resistividade elétrica aumentam muito com uma diminuição da pureza da alumina. A resistência mecânica e a resistência dielétrica aumentam com o aumento da pureza, mas são mais dependentes da densidade e da microestrutura da cerâmica. A alumina é, também, quimicamente estável e possui uma alta resistência à corrosão [28].

Existe uma grande variedade de cerâmicas de alta alumina que variam de 79% a 99,9% de quantidade de Al_2O_3 , em peso. As aluminas não tem só uma grande variação na composição química (e, por conseguinte, na quantidade e na composição das fases do contorno de grão), mas também no tamanho de grão e na porosidade. Pode-se esperar, por esta razão, um comportamento diferente dos vários tipos de cerâmica de alta alumina durante um serviço ou em uma junção [29].

3.2.2 - ALUMINA UTILIZADA NOS ENSAIOS

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram fornecidos por um fabricante da região, a Eliane Refratários, que produz mensalmente 150 toneladas de material em alta alumina. Os componentes de alumina de alta resistência ao desgaste por abrasão são fabricados, principalmente, na forma de esferas e tijolos, utilizados como elementos moedores e revestimentos de moinhos cerâmicos, respectivamente.

Estes corpos de prova contém 90% de Al_2O_3 com uma pureza mínima da alumina de 99,6%, conforme mostram as tabelas 3 e 4. O ligante utilizado nestas cerâmicas foi o álcool polivinílico (PVA) [40].

Tabela 3 - Formulação utilizada na produção de alta alumina [39].

Nome da Matéria Prima	Percentual (%)	Tipo
Alumina	90	MATERIAL BASE
Óxido de Magnésio	2	ADITIVOS DE SINTERIZAÇÃO
Caulim	4	
Carbonato de Cálcio	4	
Ligante: Álcool Polivinílico	1,5	ADITIVOS ORGÂNICOS (Sobrecarga)
Plastificante: Polietileno Glicol	0,7	
Anti-espumante	0,05	

Tabela 4 - Análise química e física da alumina ALCOA APC 3017 [39].

ANÁLISE QUÍMICA	
Al_2O_3 (%)	99,6
SiO_2 (%)	0,03
Fe_2O_3 (%)	0,03
Na_2O (%) (total)	0,17

ANÁLISE FÍSICA	
Dens. pó solto (g/cm^3)	0.9
Área superficial (m^2/g)	0.8
Porosidade	50% volume

O diâmetro das partículas que compõem o pó da alumina está apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Diâmetro das partículas que compõem o pó da alumina.

porcentagem das partículas que está abaixo desta granulometria (em %)	granulometria (em μm)
100	20
90	10
50	4
10	1,9

O diâmetro do pó atomizado encontrado após uma análise granulométrica é apresentado na tabela 6.

Tabela 6 : Distribuição de tamanho de partícula após atomização.

Malha (mesh)	48	60	100	150	250	finos
Massa	4%	6%	55%	20%	10%	5%

A pressão de compactação da cerâmica utilizada nos ensaios é de 50 MPa. Ela é obtida através da aplicação de uma carga de 60 kN sobre os blocos de alumina, conforme mostra a figura 11.

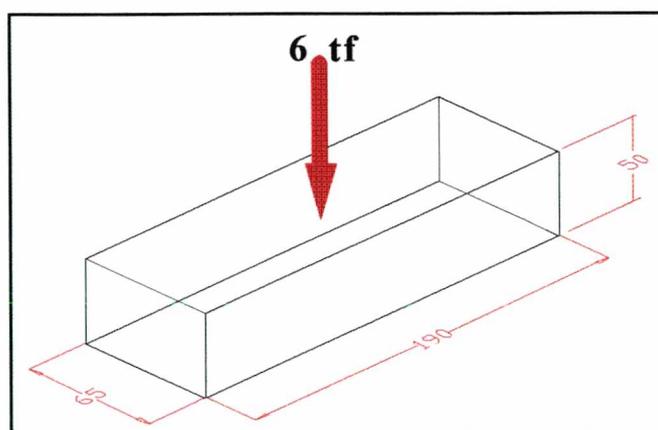


Figura 11 - Aplicação da carga de 60 kN sobre os blocos de alumina.

O valor da densidade a verde dos corpos de prova com pressão de compactação de 50 kgf/cm² para um tempo de moagem de 24 horas é de 2 g/cm³ [39].

Para os ensaios de corte foram utilizados 3 grupos de corpos de prova verdes. O primeiro grupo era de corpos de prova totalmente verdes, ou seja, apenas compactados. O segundo grupo era de corpos de prova pré-sinterizados a 1100 °C conforme mostra o ciclo térmico da figura 12. O terceiro grupo foi sinterizado até 1325 °C e o seu ciclo de queima também está esquematizado na figura 12.

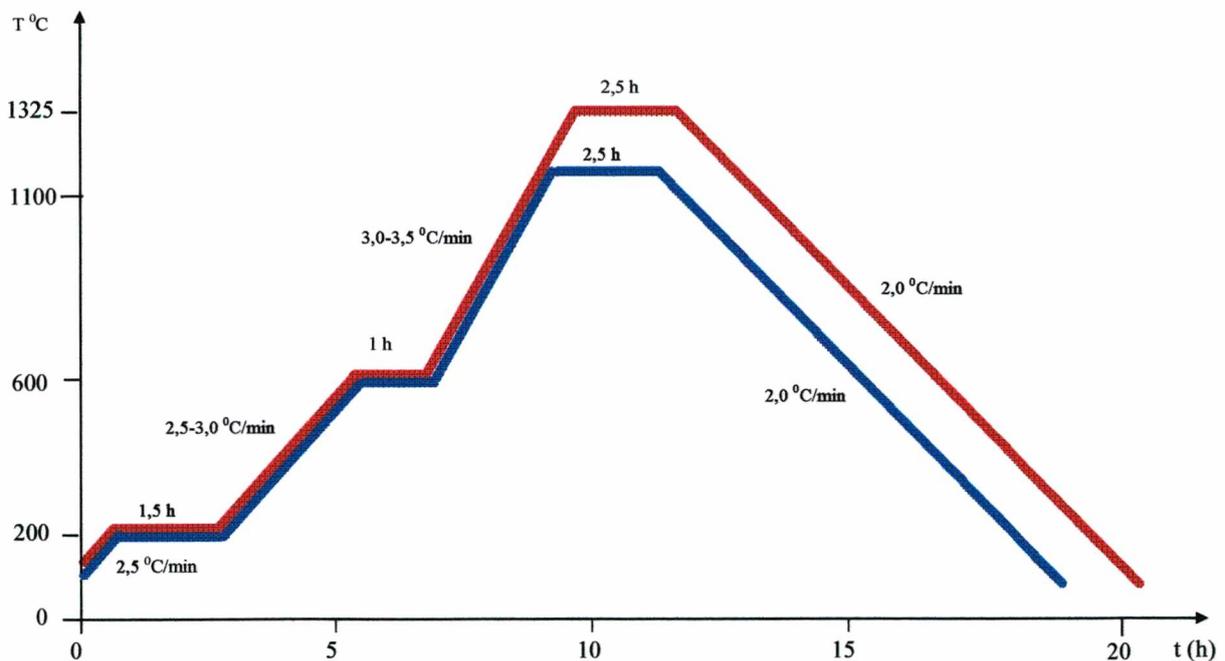


Figura 12 - Ciclo de queima dos corpos de prova pré-sinterizados a 1100 °C (azul) e a 1325 °C (vermelho).

Os corpos de prova são elevados da temperatura ambiente (ou, então, da temperatura de abertura do forno que, normalmente, está em torno de 100 °C) a uma taxa de 2,5 °C/min até a

temperatura de 200 °C. Na temperatura de 200 °C ocorre um patamar de 1,5 h para que todo PVA possa evaporar. De 200 até 600 °C eles sofrem uma taxa de aquecimento entre 2,5 e 3,0 °C/min. Na temperatura de 600 °C eles são submetidos a mais um patamar de 1 h para garantir a homogeneização da temperatura em todo o corpo de prova. Da temperatura de 600 °C até a temperatura final de pré-sinterização (1100 °C para o segundo grupo de corpos de prova e 1325 °C para o terceiro), a temperatura é elevada a uma taxa entre 3,0 e 3,5 °C/min. Os corpos de prova são ainda submetidos a mais um patamar de, no mínimo, 2,5 h na temperatura de pré-sinterização escolhida. O resfriamento ocorre naturalmente: desliga-se o forno após o término do tempo de patamar e espera-se que os corpos esfriem até a temperatura de abertura do forno, que é de 100 °C.

A temperatura final de sinterização da alumina utilizada é de 1637 °C, apresentando daí uma retração linear de 18,5%.

Neste trabalho, apenas foi executada a sinterização plena de componentes cortados a verde a título informativo.

3.3 - FERRAMENTAS DE CORTE

As propriedades básicas exigidas de um material para que este seja utilizado como ferramenta de corte são:

- Elevada dureza a frio, bem superior à da peça a ser usinada;
- Elevada dureza a quente;
- Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Nenhum dos inúmeros materiais de corte disponíveis hoje em dia satisfaz todas estas exigências plenamente. Pelo contrário, aquele que é melhor sob alguns aspectos, se apresenta inferior em relação a outros. Assim, em cada trabalho específico deve-se verificar quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a se poder escolher o material mais adequado ao caso [23; 40].

3.3.1 - MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE ABRASIVAS

Dentre os diversos materiais abrasivos o único que apresenta características como ferramenta para o corte de alumina é o diamante.

O diamante é composto quimicamente por carbono puro, que na forma de um produto natural se formou em condições de pressões extremas e temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais não podem ser empregados como diamantes de joalheria em decorrência de falhas internas e inexistência de uma pureza suficientemente elevada, caracterizada por uma cor não adequada. Esses diamantes estão à disposição da indústria como diamantes industriais [23].

O diamante é o material mais duro conhecido e tem dureza 10 na escala Mohs (que vai de 1 a 10). A escala Mohs é utilizada como auxiliar na identificação de minerais. O método que classifica a dureza do material é o seguinte: o material mais duro risca todos os materiais que o antecedem na escala mas não é riscado por nenhum deles. A escala Mohs é mostrada na tabela 7.

Tabela 7 - Escala Mohs [41].

Dureza	Mineral	Composição Química
1	Talco	$Mg_3 (Si_4 O_{10}) (OH)_2$
2	Gesso	$CaSO_4, 2H_2O$
3	Calcita	$CaCO_3$
4	Fluorita	CaF_2
5	Apatita	$CA_5 (F, Cl, OH) (PO_4)_3$
6	Feldspato	$K Al Si_3 O_8$
7	Quartzo	SiO_2
8	Topázio	$Al_2 (SiO_4) (F, OH)_2$
9	Corindon	$Al_2 O_3$
10	Diamante	C

É importante citar que a extrema dureza do diamante não é atingida por nenhum outro material, como está ilustrado na figura 13. A dureza Knoop do diamante (K_{100}) varia de 5000 a 7000, dependendo da orientação do cristal; isto é, aproximadamente, duas vezes maior que a dureza dos materiais abrasivos Corindon e carbetto de silício [23; 41].

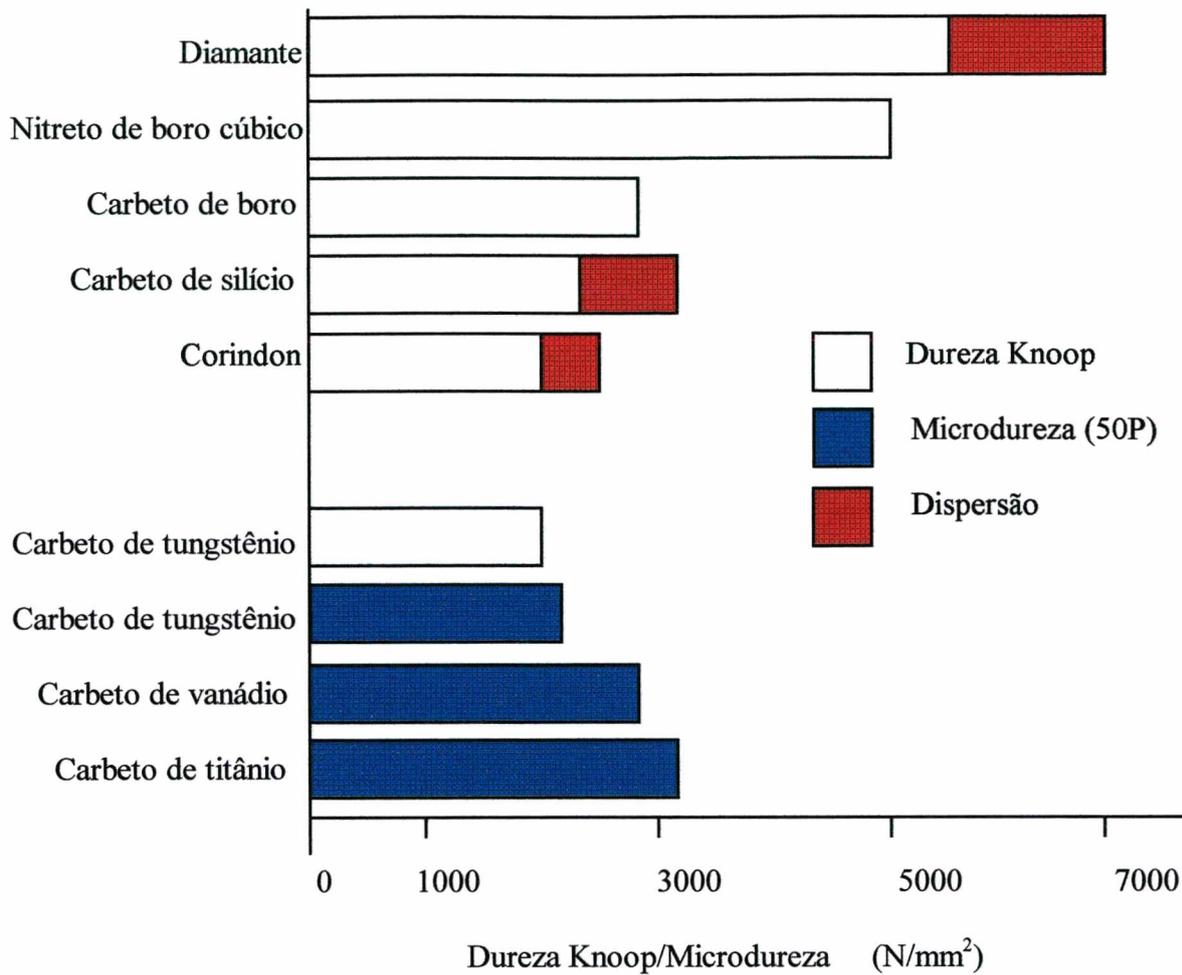


Figura 13 - Comparação da dureza de diversos materiais superduros [23].

O diamante é o abrasivo mais versátil disponível atualmente. Ele é utilizado para a usinagem de carboneto de tungstênio, vidros, cerâmica, plásticos, borracha, pedras, concreto e metais [15; 31].

As propriedades físicas do diamante, tais como a sua excepcional dureza e a sua alta condutividade térmica, tornam-no um abrasivo indispensável para a indústria. Uma das vantagens técnicas em se usar o diamante em ferramentas é a sua taxa de desgaste baixa em comparação com os abrasivos convencionais. Esta resistência ao desgaste torna possível que sejam usinadas peças em formatos mais exatos e que se mantenham tolerâncias mais estreitas. O uso de

ferramentas de diamante resulta algumas vezes em melhoramentos nas propriedades mecânicas das peças usinadas como, por exemplo, a deformação superficial. Uma outra vantagem da usinagem com ferramentas de diamante é que as temperaturas geradas são muito mais baixas do que aquelas geradas com abrasivos convencionais (Al_2O_3 ou SiC), o que reduz muito o risco de micro-trincas e fraturas se desenvolverem nas superfícies retificadas ou de surgirem na peça tensões residuais prejudiciais [15].

Uma das principais vantagens econômicas na utilização de ferramentas de diamante na usinagem de peças cerâmicas está na certeza de se remover uma quantidade precisa de material. Isto não ocorre sempre com ferramentas de outros abrasivos, que podem apresentar uma baixa resistência ao desgaste ou tornarem-se empastadas, cegando rapidamente os gumes cortantes durante a operação de usinagem, o que requer um perfilamento ou uma afiação muito freqüente da ferramenta [15].

As granulações disponíveis no mercado mundial de granulados diamantados abrangem atualmente mais de 20 tipos especiais. Na fabricação de ferramentas diamantadas, tanto na linha de diamantes sintéticos como naturais, estas podem ser feitas “sob medida”, adequadas às necessidades pela escolha do tamanho, da qualidade e do tipo de granulação.

As granulações são definidas pelo tamanho e tipo dos grãos. O tamanho do grão tem a maior influência sobre o acabamento superficial da peça e define, também, a preparação da ferramenta. As especificações da granulação dos diamantes são dadas de forma simplificada pelo tamanho dos grãos.

A classificação dos grãos é feita por peneiramento, sendo que o seu tamanho não é definido por suas dimensões reais, mas pela respectiva abertura da malha da peneira. As malhas são quadradas, sendo suas dimensões definidas pelos seus lados. Os tamanhos reais dos grãos podem ser maiores que as respectivas aberturas das malhas, o que se explica pelas seguintes

condições: a medida diagonal da malha é $(2)^{1/2}$ vezes maior que o lado. Como os grãos apresentam formas irregulares podem passar por uma mesma malha, grãos mais compridos ou mais achatados, que são maiores que a própria malha. Além destas propriedades, as malhas podem apresentar tolerâncias nas suas dimensões, já previstas e permitidas por normas.

3.3.2 - LIGANTES

Na fabricação de ferramentas abrasivas, a liga, ligante ou aglutinante tem a função de unir os grãos de abrasivo entre si e também, se for o caso, com o suporte. Em ferramentas diamantadas apenas a parte externa da ferramenta é composta de material abrasivo. Liga e granulação diamantada, juntas, formam o revestimento de uma ferramenta diamantada. O ligante é de real importância para a determinação do comportamento de uma ferramenta, pois um acerto na sua composição, em combinação com os mais variados tipos de granulações que existem, formam um tipo específico de ferramenta, que resulta num produto de qualidade [41; 55].

O ligante define as condições de trabalho de um rebolo. Ligantes moles tornam a ferramenta mais agressiva e exigem uma pressão de contato pequena para ter um rendimento de corte satisfatório. A preparação da ferramenta é rápida e a temperatura do processo é baixa. A resistência de quina da ferramenta, no entanto, é baixa [6]. Ligantes duros por sua vez levam a um menor desgaste de quina, porém a ferramenta se torna menos agressiva e exige pressão de contato maior.

Os ligantes moles são empregados para:

- rebolos largos;
- granulações de diamantes finos;
- baixa concentração de diamantes;
- peças sensíveis à temperatura;

- retificação a seco.

Os ligantes duros são empregados para:

- rebolos estreitos;
- granulações de diamantes mais grosseiras;
- necessidade de duração dos perfis;
- retificação com fluido de corte.

A avaliação de um processo abrasivo é feita pela taxa de abrasão. A taxa de abrasão é igual ao volume do material usinado por unidade de tempo e largura unitária da ferramenta. A relação de desgaste da ferramenta (relação G) é definida pela relação entre o volume removido na peça e o volume removido na ferramenta. A usinagem racional é usualmente associada com altas taxas de abrasão e pequenos desgastes da ferramenta, ou seja, altas relações G. Em muitos casos, desconsidera-se a influência da qualidade da peça e a confiabilidade do processo [54].

O ligante otimizado não é aquele com o menor desgaste, porém o que apresenta a melhor relação de desgaste. Com o desgaste dos grãos abrasivos, estes se tornam menos protusos e o processo abrasivo com ferramenta ligada se torna menos eficiente pela diminuição do volume disponível para armazenar os cavacos. Por esta razão o ligante deve apresentar um desgaste proporcional ao dos grãos abrasivos, de forma a manter constante o volume de cavacos. Caso o desgaste do ligante seja menor que o dos grãos abrasivos, a ferramenta deve ser afiada em um processo específico. Sem um desgaste do ligante não pode haver uma remoção de material adequada. Devido à importância deste mecanismo para o entendimento do processo empregado neste trabalho, ele é descrito de forma mais detalhada a seguir.

A figura 14 mostra diamantes embutidos no ligante de uma ferramenta nova, como é fornecida pelo fabricante. Os grãos de diamantes sobressaem na superfície do ligante, numa altura

“z”. Somente assim é possível a penetração no material a ser trabalhado, proporcionando a sua devida remoção. Nas áreas rebaixadas entre os grãos, acumulam-se os cavacos.

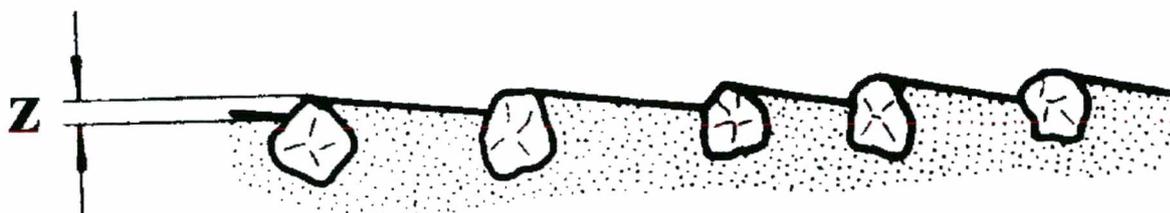


Figura 14 - Grãos de diamante no ligante de uma ferramenta nova.

O estado da ferramenta diamantada “amaciada” devido à correta escolha do ligante, é mostrada na figura 15. As pontas dos grãos dos diamantes apresentam um desgaste em parte plana, em parte com falhas por lascamento de grãos (efeito de auto-afiação). A ferramenta diamantada com o ligante corretamente escolhido, praticamente não apresenta diferença em relação a uma ferramenta nova. A altura de protusão “z” permanece constante, o desgaste da granulação e o do ligante estão na proporção correta.

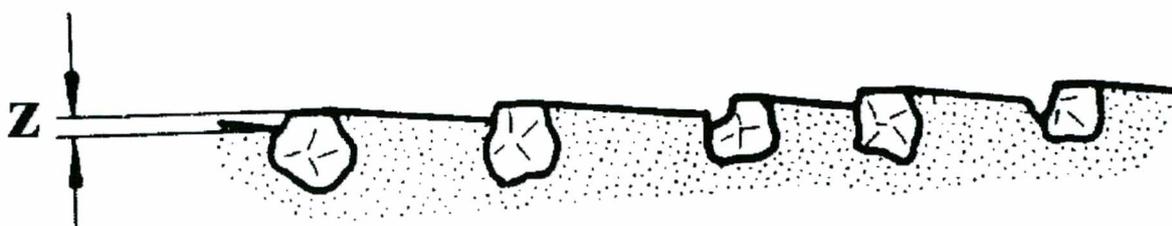


Figura 15 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com escolha correta do ligante.

A figura 16 mostra um exemplo com excessivo desgaste do ligante. As possíveis causas deste desgaste acentuado são: ligante muito mole, granulação muito fina, concentração muito baixa de diamantes. Os grãos de diamantes soltam-se do ligante prematuramente, sem que tenham sido aproveitados totalmente.

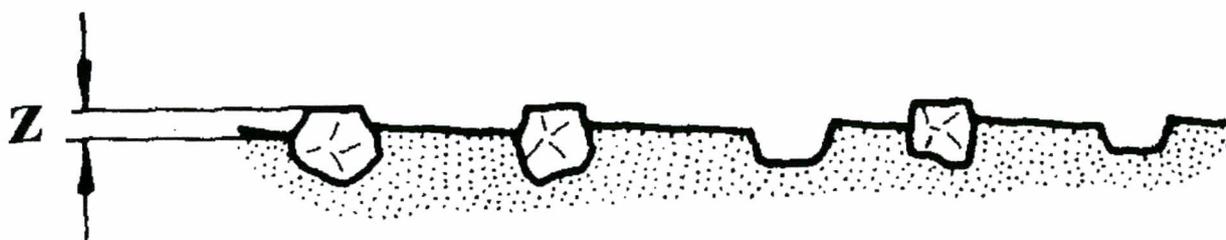


Figura 16 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com ligante muito mole.

A figura 17 mostra uma ferramenta diamantada com pouco desgaste do ligante. As possíveis causas para isto são: ligante muito duro, granulação muito grossa, excessiva concentração de diamantes. Neste estado a superfície abrasiva não pode produzir cavacos. Os grãos de diamantes, não sendo protusos na superfície do ligante, não tem a possibilidade de penetrar no material. Não se formam os volumes rebaixados para acúmulo dos cavacos. A retificação com um rebolo nestas condições, provoca uma pressão de trabalho e temperatura elevadas, cujas conseqüências são a destruição da camada de revestimento e a danificação da peça. Por meio de processos especiais (como limpeza, afiação, recolocação de revestimento diamantado) o estado da ferramenta poderá ser recuperado, como na figura 15, havendo, entretanto, prejuízo de tempo dispendido, assim como perda de muitos grãos de diamantes.



Figura 17 - Evolução do desgaste de uma ferramenta diamantada com ligante muito duro.

Para a escolha do ligante correto de uma ferramenta diamantada, deverão ser observados:

a) por parte da peça:

- o material da peça;
- as dimensões da peça a ser trabalhada;
- as condições de trabalho.

b) por parte da ferramenta:

- a taxa de remoção;
- as dimensões da camada de revestimento;
- o tamanho da granulação diamantada;
- a concentração dos diamantes.

Os ligantes se dividem em dois grandes grupos: os inorgânicos e os orgânicos. Estes dois grupos se subdividem, ainda, conforme o esquema abaixo [41]:

a) ligantes inorgânicos:

- ligante cerâmico ou vitrificado;
- ligante silicoso;
- ligante de magnesita;
- ligante metálico:

* sinterização de pó de bronze ou metais nobres;

- * deposição galvânica de metal sobre um suporte coberto de abrasivo;
- * infiltração do esqueleto poroso de abrasivo por um metal de baixo ponto de fusão.

b) ligantes orgânicos:

- goma-laca;
- borracha;
- resínóide.

A grande vantagem das ferramentas ligadas galvanicamente em relação às ferramentas resínóides é que uma ferramenta ligada galvanicamente pode ser 100% recoberta de diamantes e uma ferramenta resínóide pode apresentar um recobrimento máximo médio de cerca de 20% de diamantes. Na fabricação de fios diamantados só a fixação galvânica dos grãos diamantados sobre o fio pode ser empregada.

3.3.3 - FERRAMENTAS LIGADAS GALVANICAMENTE

O processo de galvanização constitui-se em uma operação de deposição de uma fina camada de um metal sobre outro metal, através da deposição eletrolítica, por uma fonte de corrente elétrica externa em um meio aquoso (banho químico) [11; 23; 37]. A corrente elétrica promove a dissolução do ânodo, e os íons são transferidos para o cátodo, passando pelo banho saturado de íons do mesmo metal. O banho químico consiste normalmente de uma solução aquosa de um sal do metal a ser depositado.

A galvanização efetua-se, normalmente, com a finalidade de se obter uma proteção contra agentes corrosivos ou como forma decorativa.

O processo galvânico de deposição metálica pode ser empregado para a fixação de abrasivos na superfície de corpos metálicos. Para que isto seja possível, os grãos abrasivos devem

ser condutores de eletricidade de forma a se fechar os contatos e garantir uma deposição regular metálica, tanto sobre a superfície de base, como também sobre os grãos. No entanto, nem os abrasivos normais, nem os superabrasivos são condutores de eletricidade e, conseqüentemente, para tornar possível a fixação galvânica dos grãos abrasivos sobre a superfície de base, estes devem ser previamente revestidos com uma fina camada de metal, tornando-os condutores de eletricidade.

Partindo-se de grãos abrasivos pré-revestidos, existem duas formas de proceder a fixação destes sobre o substrato. A primeira forma é um processo industrial que requer uma quantidade grande de grãos abrasivos depositados no fundo da cuba eletrolítica, de forma que a ferramenta a ser revestida possa ser parcial ou totalmente imersa e coberta pelos grãos abrasivos. Inicia-se a galvanização e o metal de sacrifício, normalmente o níquel, é depositado sobre os grãos e o substrato. Quando se atinge uma espessura de camada suficientemente espessa para garantir a fixação primária dos grãos abrasivos, o banho galvânico é continuado com a ferramenta suspensa acima do fundo da cuba (sem contato com os grãos remanescentes), até que se atinja uma espessura de camada suficientemente espessa para garantir a fixação dos grãos para o processo de retificação, brunimento ou corte. Este processo de galvanização está esquematizado na figura 18.

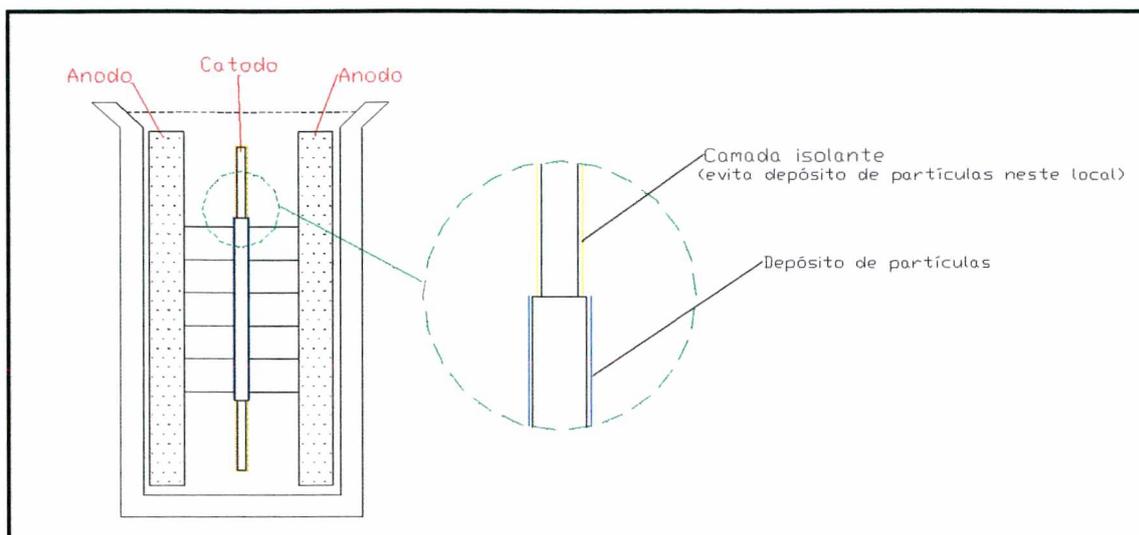


Figura 18 - Esquema do processo de galvanização.

O segundo processo de revestimento é mais artesanal, e permite revestir ferramentas dispondo-se apenas da quantidade de grãos necessários para uma ferramenta. Neste processo as ferramentas são revestidas com uma goma solúvel em água nas regiões a serem revestidas. Sobre a goma ainda molhada é pulverizado o abrasivo de diamante ou nitreto de boro cúbico pré-revestido. Em seguida a ferramenta é coberta por uma finíssima tela de seda natural ou sintética e a goma dissolvida e lavada em água. Os grãos abrasivos são mantidos na posição pela tela. A ferramenta em conjunto com a tela é colocada em um banho galvânico e se procede o revestimento até que se dê a fixação primária dos grãos. Em seguida a tela é removida e o banho galvânico continuado até a fixação total dos grãos. Embora se tenha uma perda de grãos apreciável durante a retirada da tela, este processo permite revestir ferramentas sem investimentos iniciais muito grandes.

Um dos metais mais utilizados como liga de deposição neste processo é o níquel. Isto se deve ao fato do níquel ser um metal com boas características de galvanização, proporcionando uma camada com excelente resistência, além de ser plasticamente deformável. Esta última

característica garante que grãos mais protusos possam se acomodar sobre a ferramenta sem serem arrancados para fora do ligante, garantindo assim uma maior vida da ferramenta abrasiva.

Embora o processo galvânico tenha algumas restrições econômicas, para alguns casos é o único processo disponível. Podemos citar como exemplo o fio diamantado, que só é obtido através de deposição galvânica [23]. A figura 19 mostra um grão de diamante depositado galvanicamente sobre um fio de aço.

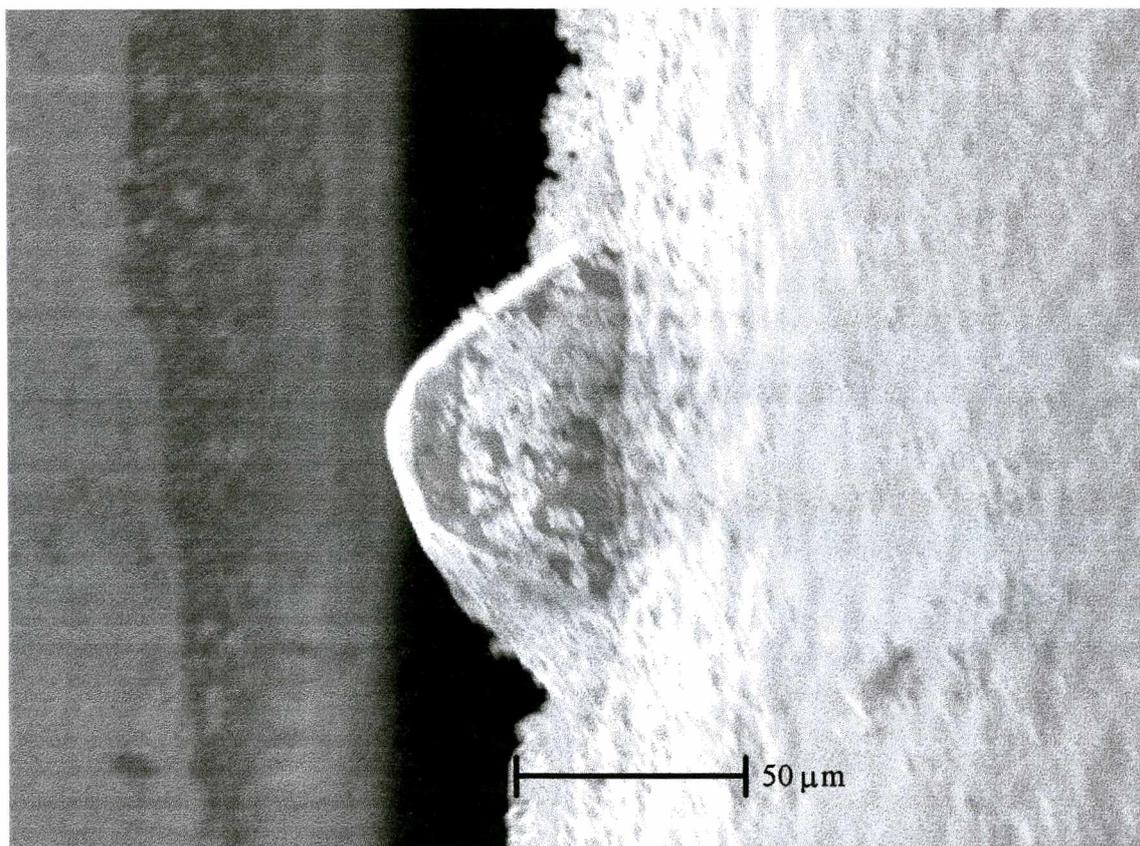


Figura 19 - Grão de diamante depositado galvanicamente sobre um substrato de aço.

Os fios diamantados empregados neste trabalho são obtidos por deposição galvânica conforme o primeiro processo descrito acima. Detalhes tecnológicos do processo de

revestimento, no entanto, não são conhecidos. A alma dos fios diamantados é de aço de alta resistência, tipo corda de piano.

A disponibilidade de fios diamantados no mercado é bastante limitada, devido às aplicações restritas destas ferramentas. Tanto a gama de diâmetros, como também as granulometrias e densidade de recobrimento dos fios é pequena. Alguns fabricantes se dispõem a fabricar ferramentas sob encomenda, atendendo a especificações determinadas pelo cliente. Não se encontram no mercado fios diamantados com uma grande gama de espessuras. Cada fabricante dispõe apenas de espessuras e densidades limitadas e específicas para um determinado objetivo.

Após uma criteriosa pesquisa de mercado desenvolvida com os fabricantes de fios diamantados, optou-se pela utilização de 3 tipos de fios, conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Fios utilizados nos ensaios na Máquina Beta.

ESPESSURA DO FIO	TAMANHO DE GRÃOS	FABRICANTE DO FIO
0,5 mm	D46	Sommer Präzisionstechnik
0,7 mm	D126	Heckler & Koch Präzisionstechnik
1,1 mm	D126	Winter do Brasil - Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid Ltda.

Embora os fabricantes não tenham fornecido especificação clara da densidade de recobrimento de diamantes, esta pode ser verificada com auxílio da microscopia eletrônica de varredura (equipamento especificado no Anexo 1), conforme as figuras 20, 21 e 22.

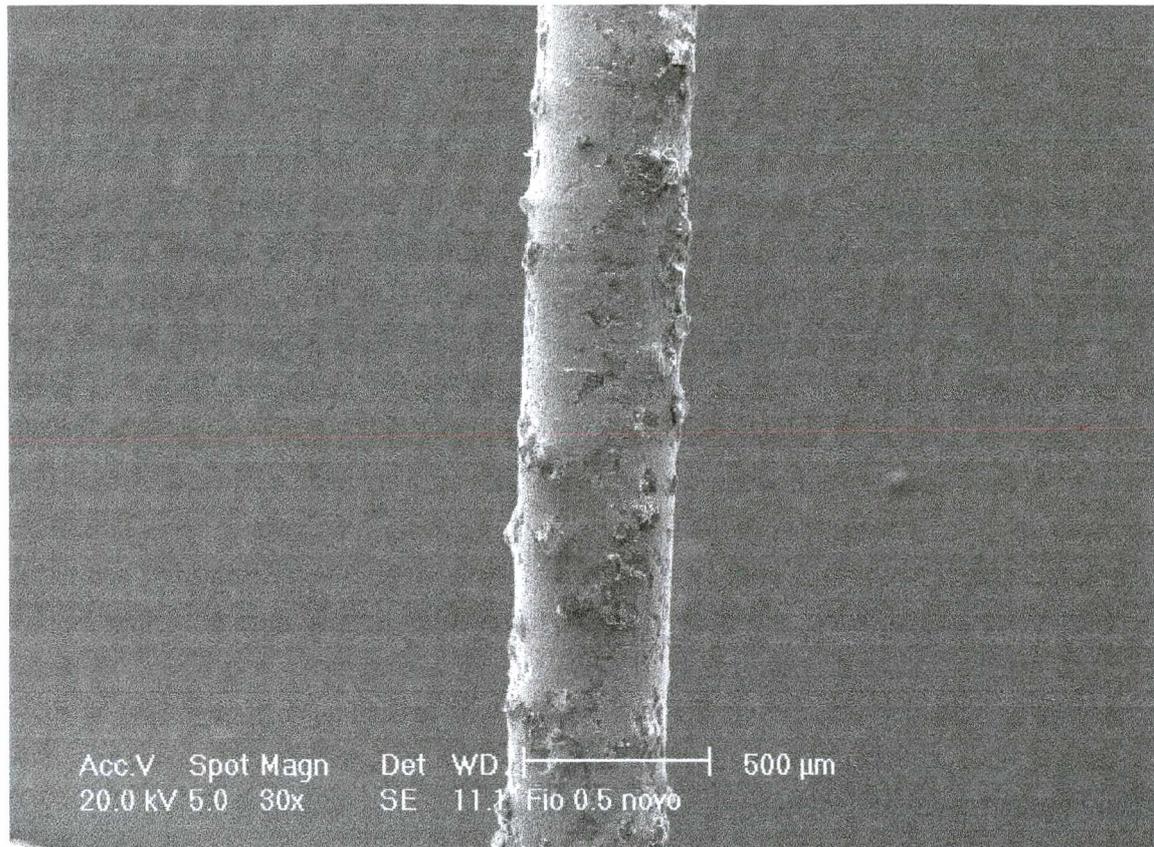


Figura 20 - Fio diamantado de 0,5 mm de diâmetro, D46, fabricado pela Sommer Präzisionstechnik (MEV).

A ferramenta mostrada na figura 20, além da granulometria menor entre as ferramentas analisadas, apresenta uma densidade de recobrimento pequena. A distância entre grãos adjacentes vai de 1 a 10 vezes o tamanho médio do grão (D46).

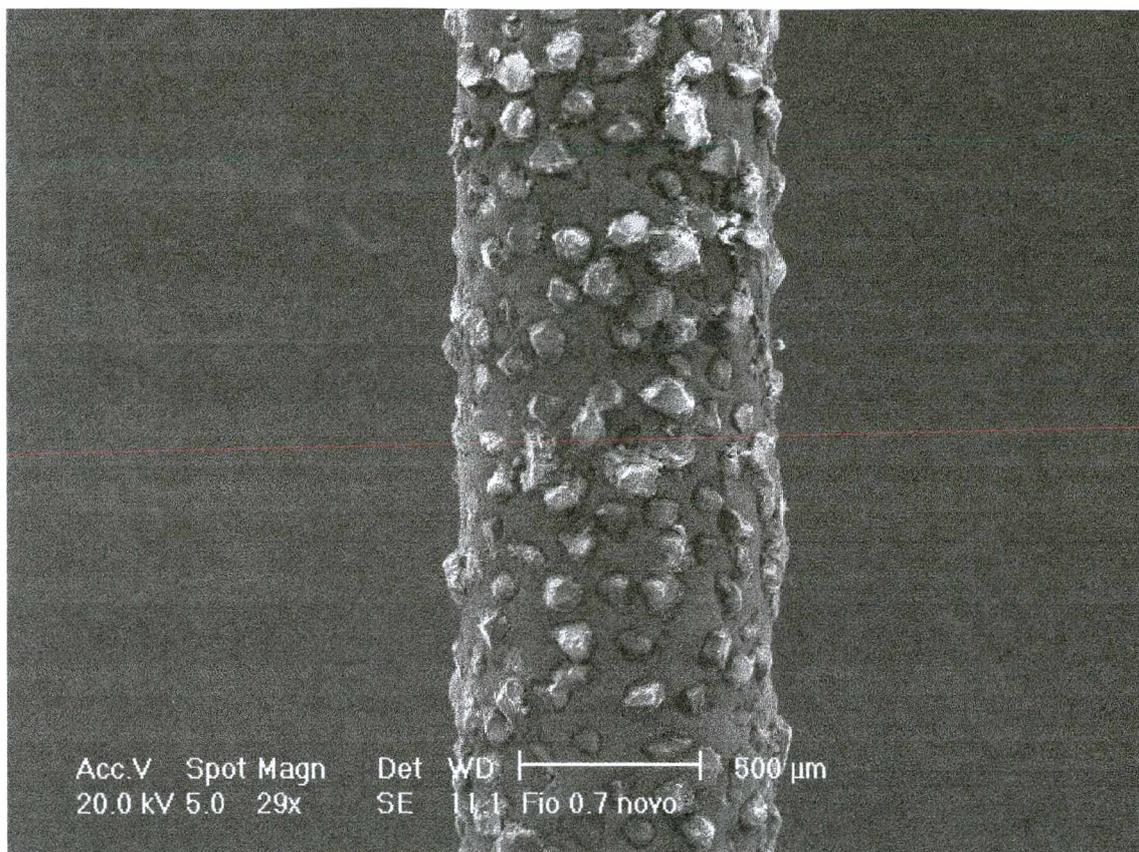


Figura 21 - Fio diamantado de 0,7 mm de diâmetro, D126, fabricado pela Heckler & Koch Präzisionstechnik (MEV).

A ferramenta mostrada na figura 21 apresenta uma densidade de recobrimento de grãos de diamante regular e maior que a ferramenta anterior. A distância média entre os grãos varia de 0,8 a 1,5 vezes o tamanho médio dos grãos (D126). O revestimento galvânico é dominante sobre o fio de aço e os grãos ainda apresentam boa nitidez de forma. A ancoragem dos grãos no revestimento não é elevada.

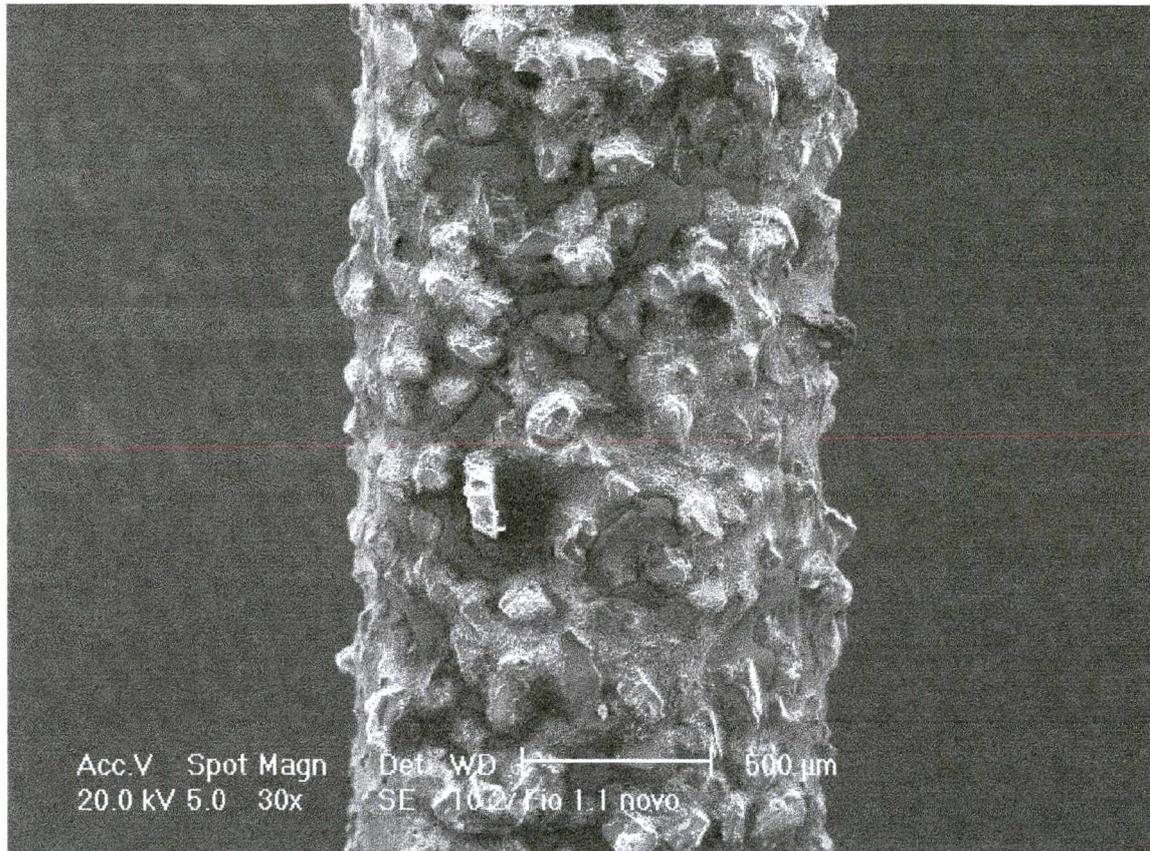


Figura 22 - Fio diamantado de 1,1 mm de diâmetro, D126, fabricado pela Winter do Brasil (MEV).

A ferramenta mostrada na figura 22 apresenta uma elevada densidade de recobrimento de grãos de diamante. A distância média entre os grãos é menor que 1 e, em muitos pontos, grãos adjacentes se tangenciam. O revestimento galvânico é de boa qualidade e tanto a alma de aço como os grãos são totalmente recobertos pelo revestimento de níquel. Apesar de quase não haver afastamento entre os grãos devido à fixação galvânica, o volume livre entre os grãos é ainda grande, o que permite trabalhar com taxas de remoção elevadas com todos os grãos ativos da ferramenta.

O microscópio eletrônico de varredura Philips XL30 empregado na análise dos fios está equipado com uma micro-sonda que também permite analisar a composição dos revestimentos

empregados nos fios diamantados. As amostras de fios empregadas para a análise foram cortadas das ferramentas disponíveis. Os primeiros dois fornecedores citados forneceram fio diamantado em metro, sendo plausível a retirada de pequenas amostras virgens das extremidades do fio. O terceiro forneceu ferramentas com comprimento de 200 mm, onde apenas a parte central era revestida com diamante. Em decorrência do número limitado de ferramentas disponíveis, optou-se pelo seccionamento desta ferramenta apenas após os ensaios. Os resultados obtidos, mostrados nas figuras 23, 24 e 25, mostram que a ferramenta com diâmetro 0,5 mm apresenta uma fixação galvânica muito fina, de forma que o ferro domina a análise. Já para a ferramenta com diâmetro 0,7 mm o elemento dominante é o níquel, e embora sobre os grãos a camada de níquel seja muito fina, o carbono não é detectado, confiavelmente, pela micro-sonda. Na terceira ferramenta, analisada após o uso, o elemento dominante detectado é o alumínio. Segundo o fornecedor, Winter do Brasil, o revestimento desta ferramenta foi efetuado exclusivamente com níquel. Disto se conclui que o alumínio detectado é originário das amostras das cerâmicas cortadas. Mesmo que se tenha procedido uma limpeza minuciosa da ferramenta, a contaminação com óxido de alumínio na superfície da ferramenta é suficiente para mascarar os resultados. O ferro e o níquel estão, aproximadamente, na mesma proporção.

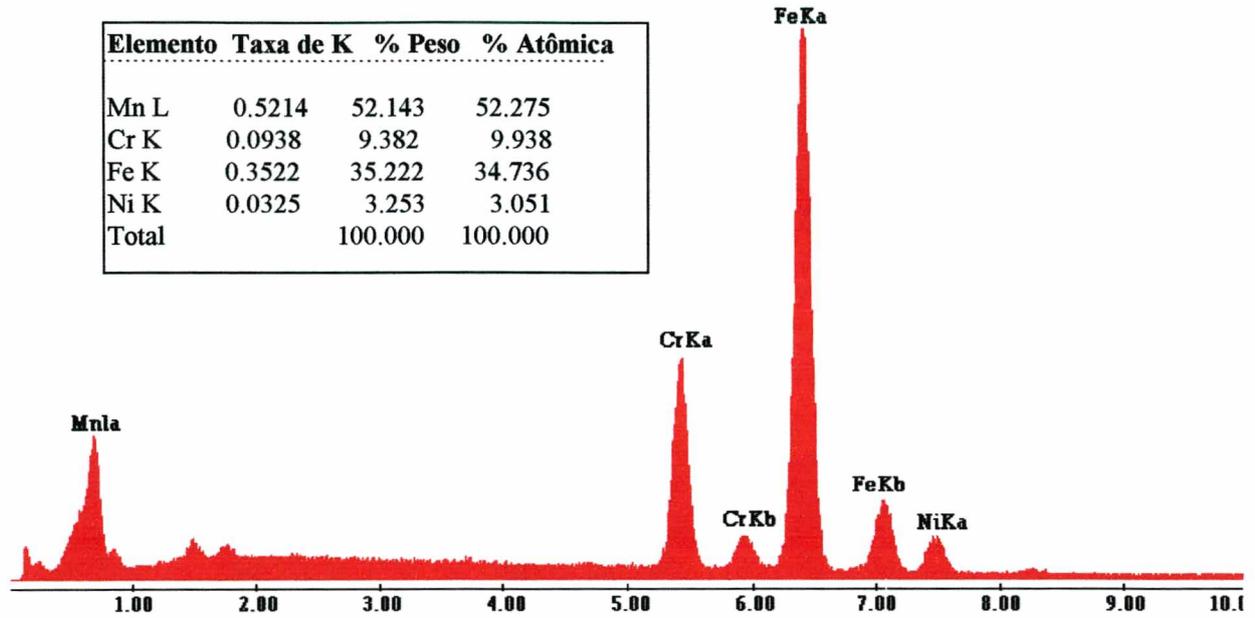


Figura 23 - Análise dos principais componentes do fio de 0,5 mm de diâmetro (MEV).

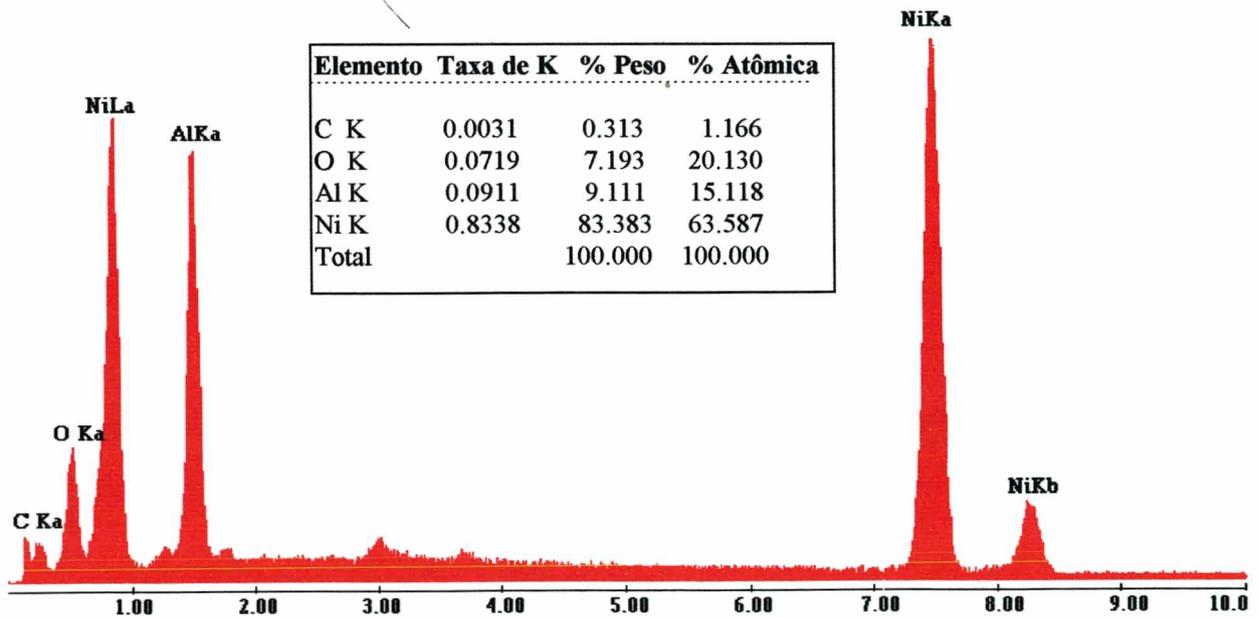


Figura 24 - Análise dos principais componentes do fio de 0,7 mm de diâmetro (MEV).

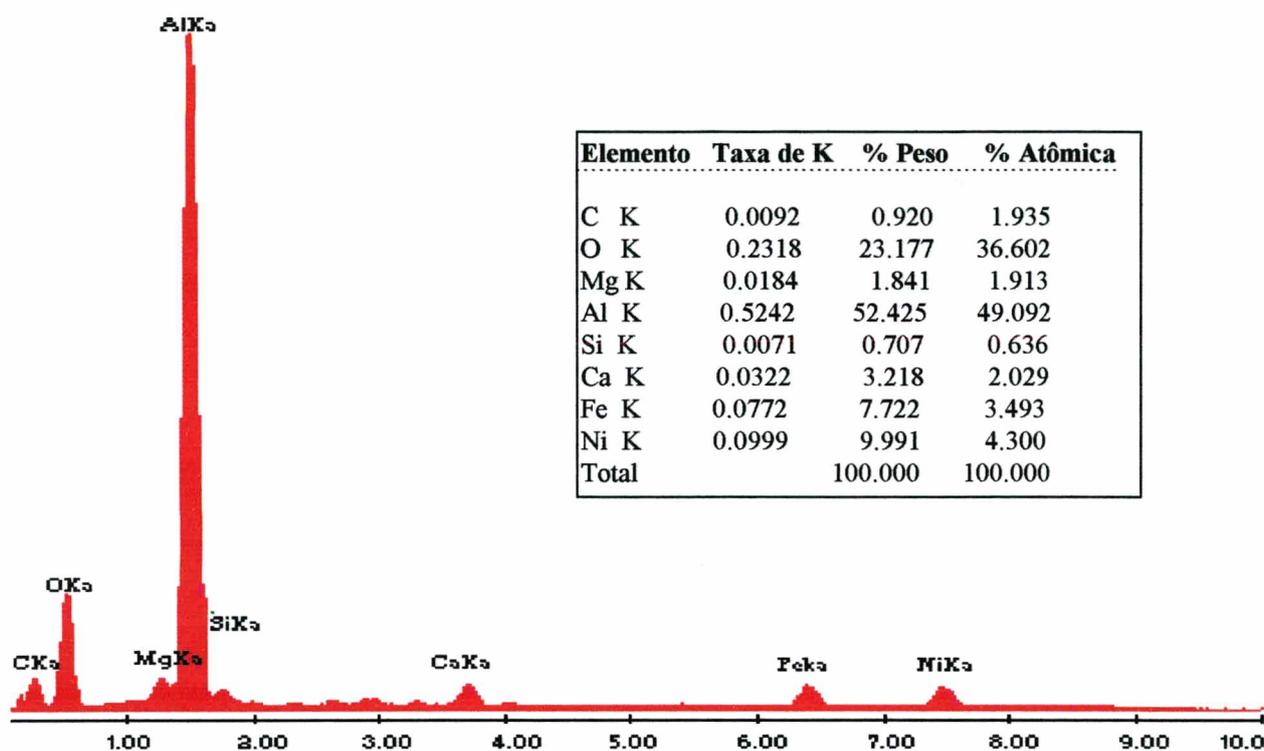


Figura 25 - Análise dos principais componentes do fio de 1,1 mm de diâmetro, fio contaminado com alumínio (MEV).

3.4 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACOS

O processo de corte com fio diamantado com movimento alternante é um processo de corte com ferramenta de geometria não-definida como já foi mencionado anteriormente. Este processo se presta tanto para o corte de materiais dúcteis como também para materiais frágeis. No corte de materiais dúcteis os mecanismos de formação de cavaco podem ser comparados aos mecanismos típicos do processo de brunimento. O grão abrasivo é pressionado com uma força constante contra a superfície a ser usinada. A penetração do grão na superfície se compõe de uma parcela de deformação elástica e outra de deformação plástica (lateral e no sentido da velocidade de corte). A partir de uma penetração mínima inicia a formação de cavacos. Nos materiais duro-frágeis, o mecanismo é distinto pois não temos praticamente nenhuma parcela de deformação

plástica. Após atingir o limite de ruptura (ao final da região de deformação elástica), as trincas se propagam e o material é removido na forma de pequenos fragmentos.

Neste trabalho é abordado o corte de materiais cerâmicos pré-sinterizados, que apresentam uma característica peculiar em sua estrutura. Nenhum mecanismo de formação de cavaco conhecido da literatura se enquadra para explicar a usinagem deste material com fio diamantado. O mecanismo dominante de remoção de material é o arrancamento de grãos isolados ou de grupos de grãos.

A ferramenta de corte, no caso um grão de diamante, aplica uma força de corte sobre um conjunto de grãos da peça. A pressão de contato promove uma deformação elástica da peça até atingir-se o limite de ruptura das uniões existentes entre as partículas de alumina, que é inferior ao limite de ruptura dos grãos de alumina. A medida que uma partícula de alumina é arrancado da estrutura da peça pré-sinterizada este passa a “rolar” entre o grão de diamante e a superfície da peça promovendo uma danificação complementar da estrutura do material da peça, consequência da carga concentrada dos esforços transmitidos da ferramenta de diamante para a peça de alumina através de grãos isolados ou grupos de grãos de alumina, como demonstrado esquematicamente na figura 26. Grãos subsequentes de diamante, ao entrarem em contato com a camada já enfraquecida pela passagem do grão anterior, removem uma parcela destes, bem como arrancam e soltam grãos ainda fixos na estrutura. Como todo este mecanismo ocorre sem nenhuma deformação plástica, o material removido se constitui apenas de grãos isolados ou grupos de grãos.

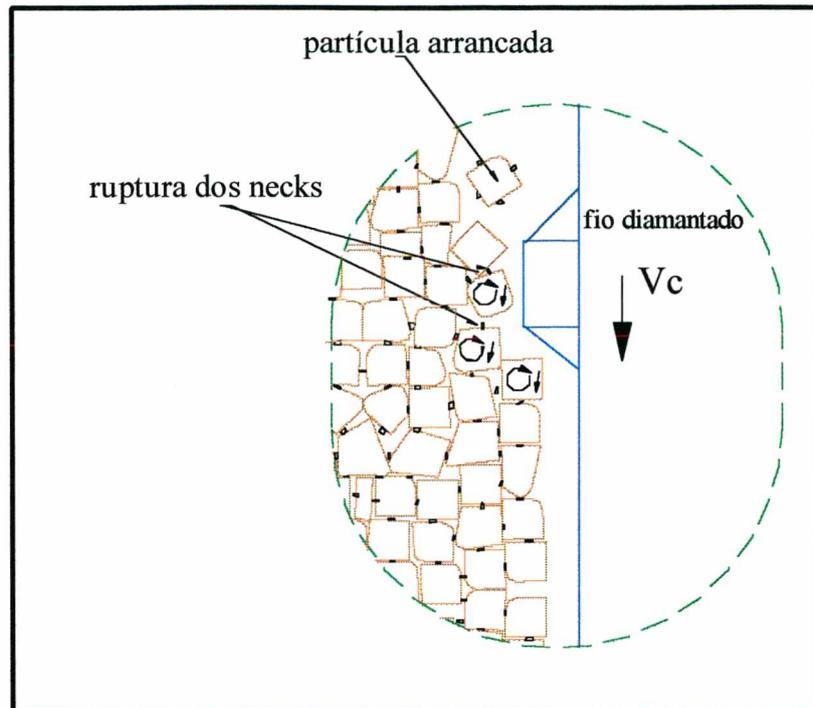


Figura 26 - Mecanismo de arrancamento das partículas no corte de cerâmica pré-sinterizada com fio diamantado.

O processo de corte com fio diamantado com movimento alternante permite obter cortes precisos e sem rebarbas, podendo inclusive ser utilizado em peças de formas complicadas. Como a velocidade de corte é baixa o aquecimento na região de corte é baixo e não significativo para as propriedades do material usinado, conseqüentemente, o processo é próprio para peças frágeis e sensíveis à temperatura e ao trincamento como, por exemplo, peças de metal duro, vidro, cerâmica (óxida ou não-óxida), materiais sintéticos e compósitos. O processo é flexível e aplicável universalmente.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa avaliou-se a viabilidade do processo e qual seria a ferramenta e o material cerâmico, dos disponíveis, mais adequados ao desenvolvimento deste trabalho. Na segunda etapa procurou-se determinar informações mais precisas sobre o processo, utilizando para isto somente a ferramenta e o material cerâmico escolhidos na primeira etapa.

4.2 - PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

Na primeira etapa de ensaios foram testadas 3 ferramentas: fio 0,5 mm de diâmetro da Sommer Präzisionstechnik, fio 0,7 mm de diâmetro da Heckler & Koch Präzisionstechnik e fio 1,1 mm da Winter do Brasil. Nesta etapa de ensaios o corte foi efetuado com avanço manual (corte livre).

4.2.1 - ENSAIOS COM FERRAMENTAS DISTINTAS

O objetivo desta etapa foi o de averiguar os limites do processo e adquirir sensibilidade com relação aos potenciais do processo. Os resultados desta etapa serviram para dimensionar tanto o sistema de corte (faixa de velocidades de corte) como também o sistema de avanço. Além disto, nesta etapa foi otimizado o sistema de fixação dos fios e otimizado o sistema pneumático de tracionamento da ferramenta.

A ferramenta com diâmetro de 0,5 mm revestida com grãos de diamante D46, em decorrência da pequena densidade de recobrimento de diamantes e a pequena protusão dos diamantes, apresenta uma taxa de corte muito pequena. Em consequência do diâmetro de 0,5 mm do fio, a resistência à flexão deste era limitada. Forças de avanço muito pequenas já levavam à deflexão do fio, dificultando o corte. Um problema complementar apresentado pela ferramenta de 0,5 mm de diâmetro foi o da perda de grãos de diamante no revestimento após poucos minutos de corte, consequência da fina camada de níquel do revestimento. A figura 27 faz uma comparação entre uma ferramenta nova de 0,5 mm de diâmetro com outra que foi utilizada, nas mesmas condições de corte (velocidade de 70 m/min, controlada pelo variador de frequência), por um período de 10 minutos. Verifica-se que o desgaste do fio foi provocado quase que exclusivamente por ruptura do ligante de níquel. Nos grãos remanescentes não se verifica um desgaste no grão de diamante.

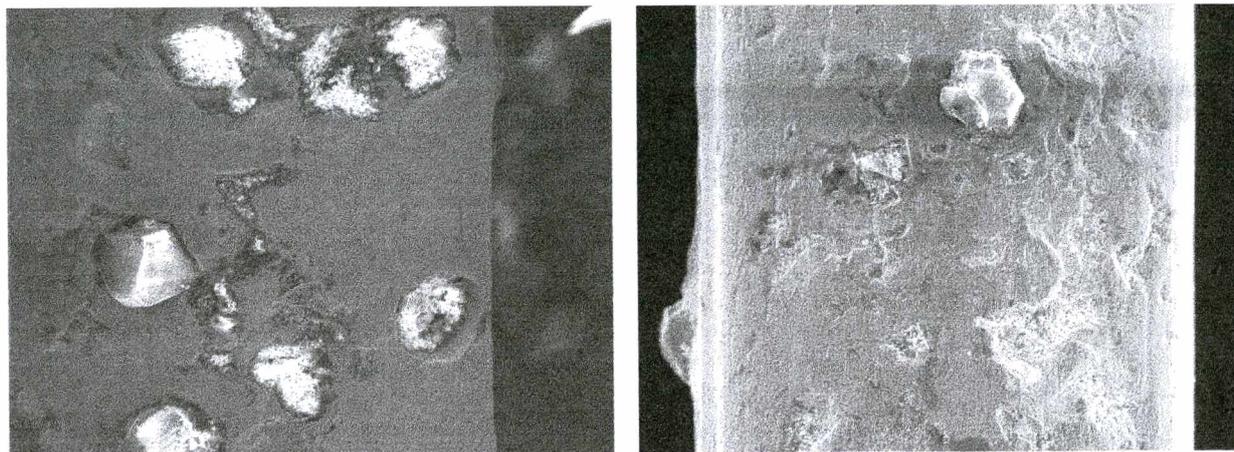


Figura 27 - Comparação entre fios diamantados de 0,5 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 10 minutos nas mesmas condições de corte (MEV).

O fio de 0,7 mm de diâmetro revestido com diamante D126 apresentou um resultado mais favorável em relação ao arrancamento de grãos. Apenas poucos grãos foram arrancados da superfície da ferramenta. A deflexão do fio para forças de avanço pequenas já é substancial, o que também aqui limita o processo. A figura 28 faz uma comparação entre uma ferramenta de 0,7 mm ainda não utilizada e outra já desgastada, após ter sido utilizada, nas mesmas condições de corte (velocidade de corte de 70m/min, controlada pelo variador de frequência), por um período de 10 minutos.

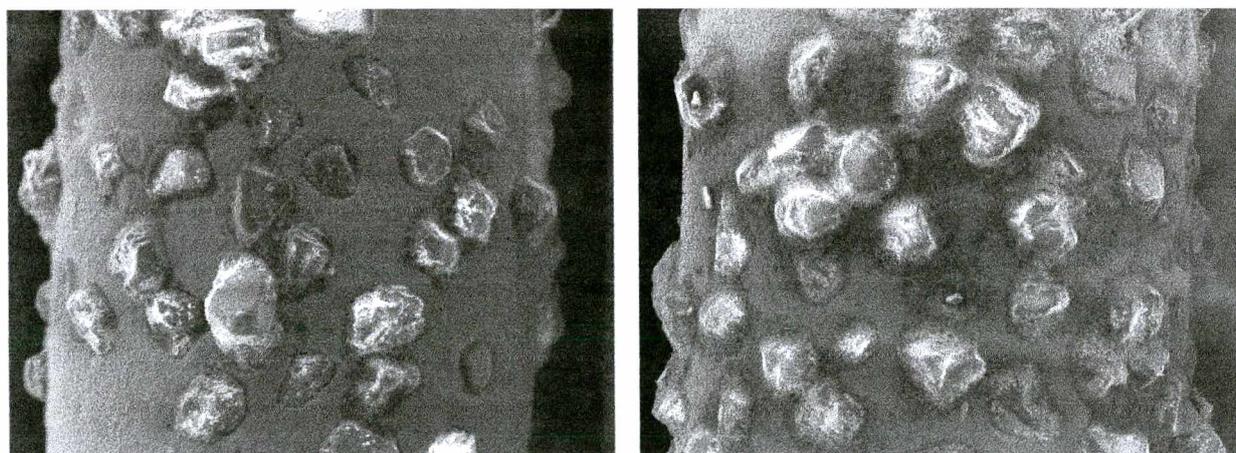


Figura 28 - Comparação entre fios diamantados de 0,7 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 10 minutos nas mesmas condições de corte (MEV).

A ferramenta com um diâmetro de 1,1 mm revestida com diamante D126 apresenta os menores problemas com relação ao desgaste e à deflexão do fio em decorrência da força de avanço. Para o corte com avanço manual, a deflexão sofrida por este fio foi mínima e quanto ao desgaste, após ter sido utilizado em cortes (nas mesmas condições: velocidade de corte de 70m/min, controlada pelo variador de frequência), por um período de 1 hora, não apresentava os

problemas com a perda de grãos apresentado pelas ferramentas mais finas. Apenas se observou uma diminuição da protusão dos grãos mais destacados. Este desgaste sofrido pela ferramenta pode ser visto na figura 29.

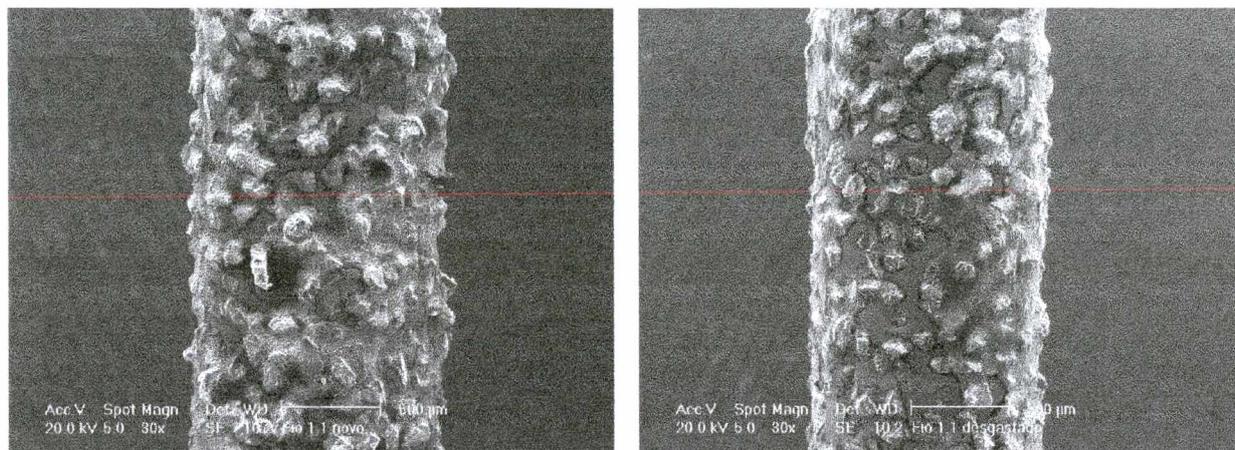


Figura 29 - Comparação entre fios diamantados de 1,1 mm de diâmetro, à esquerda, uma ferramenta nova, e à direita, uma ferramenta utilizada por 1 hora nas mesmas condições de corte (MEV).

4.2.2 - ENSAIOS COM MATERIAIS CERÂMICOS DISTINTOS

Nesta etapa de ensaios também foram testadas cerâmicas com a mesma composição química, mas pré-sinterizadas a diferentes temperaturas. Foram testadas cerâmicas no estado a verde, cerâmicas pré-sinterizadas a 1100 °C e cerâmicas pré-sinterizadas a 1325 °C.

Na cerâmica apenas compactada, a ligação entre as partículas é função dos aditivos orgânicos (ligantes). Estes tornam o material pegajoso e na temperatura de trabalho levam ao empastamento dos fios, de forma a diminuir a protusão dos grãos diamantados. Como consequência a capacidade de corte é diminuída, a força de avanço aumenta e os fios apresentam uma deflexão excessiva.

Com o aumento da temperatura de pré-sinterização, a ligação entre as partículas constituintes da cerâmica passa a ser efeito da sinterização. Já a 200 °C todos os aditivos de ligação auxiliares volatilizam. Em torno de 1100 °C a resistência da cerâmica pré-sinterizada é suficientemente elevada para permitir um manuseio melhor, além de já se encontrar com uma usinabilidade boa. A contração é ainda imperceptível (em torno de 1 %). O corte com fio diamantado é possível e apresenta um bom rendimento, tanto em termos de taxa de remoção como também em termos de desgaste do fio.

Para a temperatura de pré-sinterização de 1325 °C, a resistência da cerâmica aumenta ainda mais. A contração linear de sinterização é neste caso de 9,5 %. No corte, o rendimento é consideravelmente menor do que para o caso dos componentes pré-sinterizados a 1100 °C. A taxa de corte é pequena e o desgaste por arrancamento dos grãos de diamante muito grande.

A viabilidade do corte com fio diamantado com movimento alternante se mostrou realizável apenas para a combinação do fio com diâmetro de 1,1 mm com a cerâmica pré-sinterizada a 1100 °C.

Para comprovar a viabilidade bem como avaliar o efeito do corte sobre a cerâmica, foram recortadas várias peças de formato livre e, posteriormente, sinterizadas na Eliane Refratários a 1637 °C (temperatura fornecida pela empresa). Foram executadas peças com os mais diversos formatos para mostrar as potencialidades do processo. A figura 30 mostra alguns exemplos de peças usinadas manualmente pelo processo de usinagem com fio diamantado com movimento alternante obtidas no equipamento desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão.

Em nenhum componente foi verificado a existência de trincas ou a quebra durante a sinterização. Como o processo de corte a verde deve ser entendido como um processo de desbaste, eventuais defeitos superficiais críticos deverão ser removidos na etapa final de usinagem, após a sinterização plena.

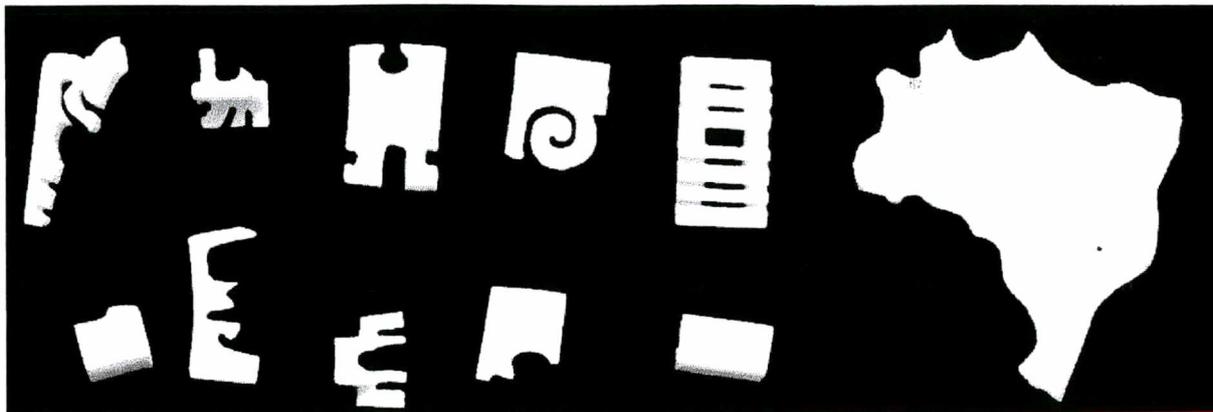


Figura 30 - Peças usinadas manualmente na Máquina Beta.

Como a cerâmica pré-sinterizada a $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresenta apenas uma contração linear de 1 %, durante a sinterização final ocorre a maior parcela da contração.

Componentes de geometria simétrica ou simples apresentam uma contração regular, mantendo a característica geométrica do componente a verde. Componentes com geometria assimétrica apresentam deformações significativas durante a sinterização. Estas deformações podem ser contornadas por um projeto mais adequado dos componentes ou por um recorte verde deformado, com o objetivo de corrigir as deformações futuras da sinterização plena. Isto, no entanto, só será possível em máquinas CNC, após o modelamento dos fenômenos inerentes à sinterização, o que não é tema deste trabalho.

4.3 - SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS

4.3.1 - ADEQUAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

Para a segunda etapa deste trabalho, a máquina de corte com fio diamantado com movimento alternante foi equipada com um sistema de avanço motorizado (Anexo 1) que permite variar a velocidade de avanço linear de 0,2 m/min a 0,984 m/min, conforme a figura 31. A

velocidade de corte pode ser regulada através de um variador de frequência. Para o curso de 32 mm do cabeçote da máquina e frequências do movimento de corte de 500 a 800 min^{-1} a velocidade de corte máxima varia entre 50 e 80 m/min (0,84 a 1,33 m/s). Para frequências de corte mais elevadas, a máquina se mostrou instável.

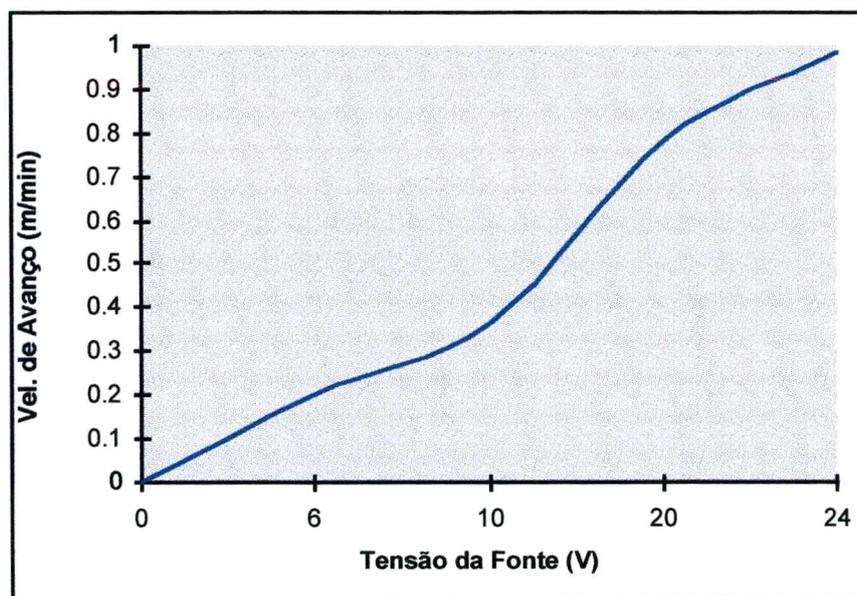


Figura 31 - Variação da velocidade de avanço.

4.3.2 - CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova empregados nos ensaios finais foram obtidos a partir de tijolos de alumina pré-sinterizados à temperatura de 1100 $^{\circ}\text{C}$. Por corte manual, estes foram segmentados em componentes de 10, 20 e 30 mm de espessura. As dimensões de base dos corpos de prova era de 50x65 mm^2 .

Para os ensaios os corpos de prova foram colados com resina (Araldite) em um suporte metálico, o qual podia ser adequadamente aparafusado no dispositivo de avanço da Máquina Beta (figura 32). A fixação dos corpos de prova cerâmicos através de parafusos ou presilhas provocou tensões e trincamento das peças.



Figura 32 - Sistema para movimentação dos corpos de prova.

4.3.3 - METODOLOGIA DE ENSAIO

Um ensaio de corte consta de uma seqüência de cortes realizados com o fio diamantado com movimento alternante em um corpo de prova com uma altura fixa e uma velocidade de avanço pré-estabelecida. O percurso de corte em cada ensaio somou sempre 40 mm. A largura da fatia cortada era sempre de 4mm. A largura da fenda de corte era estabelecida pelo fio diamantado empregado e as folgas do sistema de corte se situavam em torno de 1,5 mm. A taxa de corte é definida como sendo o produto da velocidade de avanço pela altura do componente

cortado. Como limites para o processo foram estabelecidas a deflexão do fio (máxima de 2 mm), empastamento crescente do fio, bem como vibrações excessivas da peça. A qualidade da superfície cortada também foi considerada. O valor de 2 mm para a deflexão máxima foi escolhido porque para uma deflexão de 2 mm, o fio diamantado entrava em contato com a estrutura de ferro fundido da mesa da máquina, e este contato podia ser detectado visualmente.

As velocidades de corte do movimento alternante de 0,963 e 1,122 m/s referem-se à velocidade máxima de deslocamento linear do fio diamantado para o curso de 32 mm e foram obtidas com frequências de 60 e 70 Hz no variador de frequência, respectivamente. Testes preliminares também foram feitos com as frequências de 50 e 80 Hz, mas estas se mostraram inadequadas para o processo em questão. A de 50 Hz foi descartada por ser muito lenta, o que aumentaria demasiadamente o tempo de corte dos corpos de prova. A frequência de 80 Hz também foi considerada inadequada por provocar vibrações demasiadas ao processo de corte.

A velocidade de avanço pode ser variada pela tensão da fonte do micromotor de corrente contínua do sistema de avanço. A tensão máxima que este micromotor suporta é de 24 V. Para tensões inferiores a 6 V, o micromotor não possui força suficiente para movimentar o sistema de avanço, apresentando instabilidade de velocidade de avanço. As tensões utilizadas nos ensaios foram de 10 e 20 V, as quais correspondem a velocidades de avanço de 0,365 e 0,782 m/min, respectivamente.

4.3.4 - RESULTADOS

Foram analisadas 3 alturas diferentes de corpos de prova: 30 mm, 20 mm e 10 mm. Os corpos de prova com altura de 30 mm, limite físico para o comprimento do fio empregado, demonstraram-se inadequados para o sistema desenvolvido. A deflexão do fio era tão grande que o corpo de prova se desprendia da base metálica à qual estava preso com resina, mesmo para o fio

de 1,1 mm de diâmetro, a menor velocidade de avanço de 0,365 m/min e a maior frequência de movimento alternante. O empastamento do fio era tão grande que a protusão dos grãos de diamante não permitia a continuidade do corte. Este fato também levava a um aumento substancial da força de avanço, fazendo com que o sistema de avanço não tivesse força suficiente para dar continuidade ao ensaio. Como causa destes problemas foi levantada a hipótese de que com o curso de 32 mm do sistema de movimento de corte garantir-se-ia uma saída completa de todas as partes usadas do fio no corte, no entanto, a trajetória máxima de um grão de diamante para a ferramenta alternante no corte de uma peça com 30 mm de espessura é de 60 mm. Nesta trajetória, o volume removido para a menor velocidade de avanço é maior que o volume de poros que existe entre os grãos de diamante na ferramenta. Como um grão que descreveu 60 mm na fenda de corte, para o curso alternante de 32 mm, apenas apresenta uma trajetória exposta de duas vezes 2 mm, esta não é suficiente para promover a limpeza dos poros por aspiração simples. Devido às limitações de recursos e de tempo para desenvolver um sistema de avanço para velocidades menores e um sistema de movimento alternante com curso maior, optou-se por descartar estes resultados e utilizar somente os obtidos com os corpos de prova de 20 e 10 mm de altura.

O número de ensaios realizados na fase conclusiva deste trabalho foi definido através de um experimento estatístico 2^k , no caso 2^3 , ou seja, 3 parâmetros analisados em 2 níveis cada (2 alturas, 2 velocidades de avanço e 2 velocidades de corte) combinados entre si. Os resultados obtidos estão explicitados na tabela do Anexo 2.

Estabeleceram-se níveis de pontuação para o processo. Uma deflexão até 2 mm foi considerada um resultado bom (nível 2). Uma deflexão superior à 2 mm foi considerada um resultado ruim (nível 1). Um empastamento crescente do fio ao longo do uso foi considerado ruim (nível 1), ao passo que um empastamento pequeno (não crescente) foi considerado bom (nível 2).

por não comprometer o processo. Vibrações na peça, provocadas pelo travamento do fio na fenda de corte, foram consideradas ruins (nível 1). O corte livre, tanto no movimento descendente como também ascendente do fio foi considerado bom (nível 2). A qualidade do corte foi considerada boa (nível 2) quando não se observavam marcas de avanço no componente e ruim (nível 1) quando estas podiam ser facilmente identificadas (inspeção visual). Quando mais de uma característica era observada, os níveis eram multiplicados. Desta forma um resultado 16 era excelente, ao passo que 1 era péssimo.

Os resultados dos ensaios estão resumidos na tabela 9, na seguinte ordem: análise das deflexões, análise do empastamento, análise das vibrações, análise visual da qualidade do corte e resultado final.

Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios.

CONDIÇÃO	DADOS	corpo de prova nº 1	corpo de prova nº 2	corpo de prova nº 3
1	Altura = 10 mm Vel. corte = 0,963 m/s Vel.avanço = 0,365 m/min Taxa corte = 60,8 mm ² /s	2x2x2x2=16	2x2x2x1=8	2x2x2x2=16
2	Altura = 20 mm Vel. corte = 0,963 m/s Vel.avanço = 0,365 m/min Taxa corte = 121,7 mm ² /s	2x1x2x1=4	2x2x2x1=8	2x2x2x1=8
3	Altura = 10 mm Vel. corte = 1,122 m/s Vel.avanço = 0,365 m/min Taxa corte = 60,8 mm ² /s	2x2x1x2=8	2x2x2x2=16	2x2x2x2=16
4	Altura = 20 mm Vel. corte = 1,122 m/s Vel.avanço = 0,365 m/min Taxa corte = 121,7 mm ² /s	1x1x2x2=4	1x1x2x2=4	2x1x2x1=4
5	Altura = 10 mm Vel. corte = 0,963 m/s Vel.avanço = 0,782 m/min Taxa corte = 130,3 mm ² /s	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4	2x2x2x2=16
6	Altura = 20 mm Vel. corte = 0,963 m/s Vel.avanço = 0,782 m/min Taxa corte = 260,7 mm ² /s	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4
7	Altura = 10 mm Vel. corte = 1,122 m/s Vel.avanço = 0,782 m/min Taxa corte = 130,3 mm ² /s	2x2x2x2=16	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4
8	Altura = 20 mm Vel. corte = 1,122 m/s Vel.avanço = 0,782 m/min Taxa corte = 260,7 mm ² /s	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4	2x1x2x1=4

A primeira variação de parâmetros estudada foi a variação da altura do corpo de prova, mantendo-se a velocidade de avanço e a velocidade de corte (tabela 9 - condição 1x2). A duplicação da altura da peça teve como consequência a duplicação da taxa de corte. Embora com o aumento da altura da peça um maior número de grãos execute o corte, o volume dos poros da ferramenta é mantido e o empastamento do fio foi considerado como problemático em apenas um dos ensaios. Um outro problema foi constatado com o aumento da força de avanço, quando o movimento de avanço apresentava oscilações levando a defeitos visuais das superfícies cortadas. Não foram observados problemas inerentes à deflexão do fio e a vibrações da peça.

Na segunda variante foi estudada a influência da velocidade de corte mantendo-se a altura da peça e a velocidade de avanço (tabela 9 - condição 1x3). O aumento da velocidade de corte de 0,983 m/s para 1,122 m/s representa um aumento percentual de 16,5 % em relação ao primeiro ensaio. Como a taxa de corte foi mantida igual, e um mesmo número de grãos abrasivos executa o trabalho de corte, a quantidade de material removido por grão de diamante é reduzida na mesma proporção do aumento da velocidade de corte. Os poros do fio são suficientes para armazenar o material removido. Em apenas um dos corpos de prova uma vibração mais acentuada prejudicou o resultado, no mais a avaliação do resultado foi considerada excelente.

A terceira combinação estudada foi a variação da altura (de 10 para 20 mm) e da velocidade de corte (de 0,963 para 1,122 mm/s), mantendo-se a velocidade de avanço constante (tabela 9 - condição 2x4). Foram observados problemas de deflexão e de empastamento do fio.

A quarta combinação estuda a influência da variação da velocidade de avanço, mantendo-se a altura de 10 mm do corpo de prova e velocidade de corte de 0,963 m/s (Tabela 9 - condição 1x5). O aumento da velocidade de avanço de 0,365 m/min para 0,782 m/min representa um aumento percentual de 214 %. Como esta taxa de corte aumentada foi obtida com um número

igual de grãos abrasivos, o volume de material removido por cada grão aumenta na mesma proporção. Conseqüentemente, a ocupação dos poros do fio é mais intensa. Os resultados confirmam este fato, principalmente, através de um empastamento mais acentuado e, conseqüentemente, em uma piora no aspecto visual do corte. A deflexão se manteve inferior ao limite pré-estabelecido.

Na quinta combinação é variada a velocidade de avanço e a altura do corpo de prova em relação ao primeiro ensaio (tabela 9 - condição 1x6). A taxa de corte aumenta de 60,8 mm²/s para 260,7 mm²/s, representando um aumento de aproximadamente duas vezes do volume removido por grão, uma vez que o número de grãos ativos é o dobro para o dobro de altura da peça. Foram observados problemas de empastamento do fio e uma piora na qualidade final da peça.

Na sexta combinação é comparada a variação da velocidade de corte e da velocidade de avanço, mantendo-se a altura de 10 mm do corpo de prova, em relação ao primeiro ensaio (tabela 9 - condição 1x7). O aumento da velocidade de avanço leva a um aumento da taxa de corte, e o aumento da velocidade de corte tem como conseqüência a diminuição da espessura usinada por grão. Embora em um dos ensaios o resultado se apresentasse favorável, nas repetições o empastamento do fio e a qualidade da peça tornaram o resultado menos atrativo.

A última combinação efetua uma variação da velocidade de corte, da velocidade de avanço e da altura da peça em relação ao primeiro ensaio (tabela 9 - condição 1x8). Um aumento da taxa de corte de aproximadamente quatro vezes, para um aumento de apenas duas vezes no número de grãos de diamante ativos e uma redução percentual de 16,5 % da quantidade de material removida por grão pelo aumento da velocidade de corte, domina o resultado, o que provoca resultados negativos no que se refere ao empastamento e à qualidade visual do corte.

Comparando-se o segundo e o quarto ensaios (tabela 9 - condição 2x4), ou seja, a variação da velocidade de corte de 0,963 para 1,122 m/s, mantendo-se a altura de 20 mm e a

velocidade de avanço de 0,365 m/min constantes, foi observado que o empastamento do fio piorou, mas em compensação a qualidade visual do corpo de prova melhorou. O fato mais estranho observado foi que, com o aumento da velocidade de corte, a ferramenta apresentou problemas de deflexão, contrariando todas as expectativas.

Analisando-se somente a variação da velocidade de avanço de 0,365 para 0,782 m/min e mantendo-se a altura de 20 mm constante e a velocidade de corte também constante em 0,963 m/s (tabela 9 - condição 2x6), verificou-se uma piora no empastamento do fio. Mas quando variou-se a velocidade de avanço de 0,365 para 0,782 m/min, manteve-se a altura de 20 mm constante e a velocidade de corte também constante, só que agora em 1,122 m/s (tabela 9 - condição 4x8), verificou-se que o problema de deflexão do fio, apresentado em 2 ensaios da condição 4, não ocorreu em nenhum ensaio na condição 8, mas que em compensação a qualidade visual dos corpos de prova piorou; o empastamento do fio, que já era ruim, não apresentou alterações.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo deste trabalho foi o de determinar taxas de corte factíveis para o processo de corte de cerâmica pré-sinterizada com fio diamantado de movimento alternante. O processo mostrou ser tecnicamente viável para a faixa de parâmetros ensaiados. Para poder estender os resultados a uma abrangência de peças com maior complexidade geométrica se faz necessário o desenvolvimento de um equipamento com até 5 eixos comandados numericamente (semelhante a uma máquina de eletroerosão por fio), bem como criar uma base tecnológica de dados em conjunto com técnicas da área de projeto e sinterização de componentes de cerâmica avançada, que permita prever distorções geométricas dos componentes durante a sinterização, de forma que estas possam ser previstas e corrigidas no recorte dos componentes a verde. Além disto, deve ser desenvolvido um software de programação de trajetória específico para o processo, que preveja a deflexão do fio. Numa mudança de direção deve, inicialmente, ser reduzida a velocidade de avanço (para reduzir a força de avanço e, com isto, a deflexão do fio), para só então promover a mudança de direção. Uma outra alternativa é a programação de mudanças de direção com um raio de curvatura da peça mínimo, de forma que a deflexão do fio não interfira no resultado. O equipamento no qual foram realizados os ensaios possui ainda limites que impediram que fossem feitos estudos com uma gama maior de alturas de corte e de velocidades de corte e de avanço.

A análise de componentes de materiais cerâmicos recortados pelo processo de corte utilizando fio diamantado como ferramenta e, posteriormente, sinterizados, demonstrou ser bastante viável, principalmente pelo fato de não ter introduzido defeitos nos corpos de prova que resultassem no macro-trincamento das peças na etapa final do processo de sinterização.

Sugere-se que o desenvolvimento do processo continue testando-se outros materiais cerâmicos. Alguns testes iniciais foram feitos com grés porcelanato e os resultados obtidos foram considerados satisfatórios para as condições de ensaio.

Alguns melhoramentos também poderiam ser efetuados no equipamento para que pudéssemos fazer uma análise melhor do processo. Um equipamento para a medição de forças acoplado ao equipamento seria um exemplo disto, pois evitaria erros de medição de deflexão do fio , e além de permitir um conhecimento melhor do processo, também permitiria a obtenção de valores quantitativos da força de corte. Mas para o trabalho em questão, a medição de forças foi considerada inviável.

Os resultados do trabalho foram considerados bons pois comprovaram as vantagens da usinagem a verde de cerâmica, viabilizaram o método de corte com fio diamantado com movimento alternante, além de abrirem uma nova linha de pesquisa no Laboratório de Mecânica de Precisão, que é a usinagem de materiais cerâmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Anuário Brasileiro de Cerâmica 1996.**
São Paulo, 1996. 154 p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Anuário Brasileiro de Cerâmica 1994.**
São Paulo, 1994. 186 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA / COMISSÃO DE CERÂMICA
AVANÇADA. **Cerâmicas Avançadas - Proposta de Programa para o
Desenvolvimento no Brasil.** São Paulo, jul. 1990. 18 p.
- [4] BAUMGARTEN, J. F. **Aplicação e Desenvolvimento da Cerâmica Avançada. Máquinas e
Metais,** São Paulo, p. 51-56, jan./fev. 1988.
- [5] BEERSTECHEER, U. **Mechanisches Formenschneiden mit Diamantdraht. Industrie
Diamanten Rundschau,** n. 2, p. 85-86, 1995.
- [6] BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-
Ferramentas Convencionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
Florianópolis, 1997. 209 p.
- [7] BOSCHI, A. O. **Tecnologia de Cerâmicas Avançadas Aplicadas a Revestimentos
Cerâmicos.** In: FEIRA DE TECNOLOGIA CERÂMICA DO COLÉGIO
MAXIMILIANO GAIDZINSKI (4. : nov. 1995 : Cocal do Sul). **Anais...** Cocal do Sul -
SC : 1995.
- [8] CASTANHO, S. R. H. M. **Contribuição ao Estudo da Influência de Impurezas e
Distribuição do Tamanho de Partículas na Sinterização e Microestrutura da**

- Alumina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.
- [9] DANFOSS. **Manual de Instalação dos Conversores de Frequência VLT 2000**. 199-.
- [10] DANFOSS. **Manual de Instalação dos Conversores de Frequência VLT 3000**. 199-.
- [11] DIFER DIAMANTES INDUSTRIAIS LTDA.. **Catálogo de Ferramentas**. São Paulo, 1996. 10 p.
- [12] DREXLER, O.; LOOSJES, R.; DE ROOY, A. J. **Ceramics**. In: **Handbook of Precision Engineering**. Mc Graw-Hill Book Company. p. 265-285. 198-.
- [13] DUAULIBI FILHO, J. **Cerâmicas Especiais para Fins Estruturais**. **Cerâmica**, v. 34, n. 227, p.189-191, dez. 1988.
- [14] FERBER, M. K.; TENNERY, V. J. **Structural Applications for Technical, Engineering, and Advanced Ceramics - Introduction**. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : **Ceramics and Glasses**, 1991.
- [15] FIELD, J. E.. **The Properties of Diamond**. London : Academic Press Inc. Ltd., 1979.
- [16] FORTULAN, C. A.; PURQUÉRIO, B. M. **O Processo de Injeção de Cerâmica**. **Cerâmica**, v. 41, n. 270, p. 77-80, jul./ago. 1995.
- [17] GUGEL, E.; LEIMER, G. **Anwendungen keramischer Hochleistungswerkstoffe im konstruktiven Einsatz**. . In: WARNECKE, G. **Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes Schleifen von Hochleistungskeramik**. Vortragsband zum Symposium... Kaiserslautern : Okt. 1994.
- [18] HORIO, K.; TERABAYASHI, T. **Beam Defocus Effect in Electron Beam Machining of Green Ceramic Sheet**. In: CIRP. **Annals...** v. 36, n.1, p. 95-98, 1987.
- [19] JASCHINSKI, W.; JUD, H.; NAGEL, A. **Engineering keramischer Werkstoffe**. In: WARNECKE, G. **Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes Schleifen**

- von Hochleistungskeramik. Vortragsband zum Symposium... Kaiserslautern : Okt. 1994.**
- [20] KLOCKE, F. Modern Approaches for the Production of Ceramic Components. **Journal of the European Ceramic Society**, n.17, p. 457-565, 1997.
- [21] KOBAYASHI, A. Precision Machining Methods for Ceramics. In: **Advanced Technical Ceramics**, 1989.
- [22] KOMANDURI, R. On Material Removal Mechanisms in Finishing of Advanced Ceramics and Glasses. In: **CIRP. Annals...** v. 45, n.1, p. 509-513, 1996.
- [23] KÖNIG, W. **Tecnologia da Fabricação 2 - Retificação, Brunimento e Lapidação.** Tradução de Walter L. Weingaertner, v. 2, fev. 1980. 345 p.
- [24] KÖNIG, W.; WAGEMANN, A. Machining of Ceramic Components: Process-Technological Potentials. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS. Proceedings...** Gaithersburg, MD : National Institut of Standars and Technology (NIST), p. 3-16, jun. 1993.
- [25] LARSON, D. Green Machining. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, p. 181-185, 1991.
- [26] LEHMAN, R. L. Overview of Ceramic Design and Process Engineering. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, 1991.
- [27] MEYER, H. -R., KOCH, N. Schleifen keramischer Werkstoffe mit Diamantwerkzeugen. In: **WARNECKE, G. Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes Schleifen von Hochleistungskeramik. Vortragsband zum Symposium... Kaiserslautern : Okt. 1994.**

- [28] MIYAYAMA, M.; KOUMOTO, K.; YANAGIDA, H. Engineering Properties of Single Oxides. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, p. 748-757, 1991.
- [29] MOORHEAD, A. J.; KIM, H. Joining Oxide Ceramics. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, p. 511-522, 1991.
- [30] ODRIOZOLA, A.; OCHOA, I.; GUTIERREZ, M. Moldeo por Inyección de Cerámicas. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 33, n. 5, p. 267-271, set./oct. 1994.
- [31] RATTERMAN, E.; CASSIDY, R. Abrasives. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, 1991.
- [32] REED, J. S. **Principles of Ceramics Processing**. 2. ed.. A. Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., p. 6-15 e p. 625-637, 1995.
- [33] RICHERSON, D. W. **Modern Ceramic Engineering - Properties, Processing, and Use in Design**. New York and Basel : Marcel Dekker Inc., p. 150-153 e p.210-215, 1982.
- [34] SHEPPARD, L. M. The Challenges of Ceramic Machining. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 71, n. 11, p.1590-1610, nov. 1992.
- [35] SLOCUM, A. H.; SCAGNETTI, P. A.; KANE, N. R.; BRUNNER, C. Design of Self-Compensated, Water-Hydrostatic Bearings. **Precision Engineering**, v. 17, n. 3, p. 173-185, jul. 1995.
- [36] SOMIYA, S. **Advanced Technical Ceramics**. Academic Press Inc., p. 3-25, 1989.
- [37] SORENSEN INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Catálogo de ferramentas**. Barueri, 1996.

- [38] SPUR, G.; CARTSBURG, H. Grinding Reinforced Aluminium Oxide. **Industrial Diamond Review**, n. 2, p.92-97, 1993.
- [39] STAINER, D. **Avaliação da Sinterabilidade e Propriedades da Alumina através de Parâmetros Físicos**. Florianópolis, 1997. Relatório de Atividades Desenvolvidas - Labmat, UFSC. Trabalho não-publicado.
- [40] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 3 ed. Florianópolis : Editora da UFSC, mar. 1993.
- [41] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**. Florianópolis : Editora da UFSC, mar. 1992.
- [42] SUBRAMANIAN, K.; RAMANATH, S.; MATSUDA, Y. O. Precision Production Grinding of Fine Ceramics. **Industrial Diamond Review**, n. 5, p. 254-257, 1990.
- [43] SUBRAMANIAN, K.; RAMANATH, S.; Principles of Abrasive Machining. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, p. 315-328, 1991.
- [44] SUBRAMANIAN, K.; REDINGTON, P. D.; RAMANATH, S. A System Approach for Grinding of Ceramics. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 73, n. 3, p. 61-66, mar. 1994.
- [45] SUBRAMANIAN, K.; REDINGTON, P. D.; RAMANATH, S. A System Approach for Grinding of Ceramics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS. **Proceedings...** Gaithersburg, MD : National Institut of Standars and Technology (NIST), p. 43-53, jun. 1993.
- [46] TUERSLEY, I. P.; JAWAID, A.; PASHBY, I. R. Review: Various Methods of Machining Advanced Ceramic Materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 42, p. 377-390, 1994.

- [47] UEDA, K.; SUGITA, T.; HIRAGA, H. A J-Integral Approach to Material Removal Mechanisms in Microcutting of Ceramics. In: CIRP. *Annals...* v. 40, n.1, p. 61-64, 1991.
- [48] VARELA, J. A. **Cerâmica de Alta Tecnologia no Brasil**. Brasília : Ministério da Ciência e Tecnologia, 1988. 31 p.
- [49] VEIGA, M. M.; SOARES, P. S. M.; DA SILVA, A. P.; ALVARINHO, S. B. Estudo do Mercado Brasileiro de Cerâmicas Avançadas. *Cerâmica*, v. 35, n. 239, p. 6A-18A, dez. 1989.
- [50] WARNECKE, G.; HOLLSTEIN, T.; KÖNIG, W.; SPUR, G.; TÖNSHOFF, H. K. **Schleifen von Hochleistungskeramik - Werkstoff / Anwendung / Bearbeitung / Qualität**. Rheinland : Verlag TÜV, 1994. 274 p.
- [51] WARNECKE, G.; ROSENBERGER, U. Basics of Process Parameter Selection in Grinding of Advanced Ceramics. In: CIRP. *Annals...* v. 44, n.1, p. 283-286, 1995.
- [52] WEINSTEIN, J. Mineral Processing. In: **Engineered Materials Handbook**, v. 4 : Ceramics and Glasses, 1991.
- [53] WELL DIAMANTDRAHTSÄGEN GMBH. **Katalog**. Usingen, 199-. 4 p.
- [54] WESTKÄMPER, E., HOFFMEISTER, H. -W., JÜTTING, Y.. Rationelle Feinbearbeitung von Hochleistungskeramik. . In: WARNECKE, G.. **Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes Schleifen von Hochleistungskeramik**. Vortragsband zum Symposium... Kaiserslautern : Okt. 1994.
- [55] WINTER DO BRASIL. **Catálogo Winter de Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid**. Jundiaí, 199-. 58 p.
- [56] WOLF, K. Diamond Machining of Engineering Ceramics. **Industrial Diamond Review**, n. 1, p. 7-10, 1995.

ANEXOS

Anexo 1 - Equipamentos utilizados.

Anexo 2 - Análise estatística.

ANEXO 1

- MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

- Philips XL 30.
- Resolução do aparelho: 35 Å.
- Faixa de ampliação: 20 a 200000 vezes.
- Computador acoplado: 486 DX 3.
- Ano de fabricação: 1994.
- A energia do raio-X emitido é medida por energia dispersiva.
- Detecta oxigênio bem, mas não detecta bem o carbono.

- VARIADOR DE FREQUÊNCIA

- Danfoss - Variable Speed Drive.
- VLT® tipo 3006.
- 175H7264.
- 380-415 V.
- 190712G375.
- Fabricado na Dinamarca.

- MOTOR DO SISTEMA DE AVANÇO

- Micromotor Bosch AXF 24 V 0,16 W.
- Tensão nominal: 24 VCC.
- Potência nominal: 0,16 W.
- Consumo nominal: 0,08 A.
- Consumo máximo: 0,15 A.
- Rotação nominal: 7 rpm.
- Torque permanente: 20 Ncm.
- Torque de arranque: 30 Ncm.
- Desmultiplicação: 1:244.
- Sentido de rotação: esquerda/direita.
- Tipo de serviço: S1.
- Proteção / grau: IP 50.
- Peso: 0,188 kg.
- Código: 0 390 727 004.

ANEXO 2

RESULTADOS DOS ENSAIOS (Utilizando o experimento fatorial)

2^k com k=3 K = Altura, veloc. de corte e veloc. de avanço

CONDIÇÕES	NOTAS			SOMA	EFEITO			SQ	GDL	MQ	F	Resultado	
	i	8	16		60	112	184						
10 mm - 60 Hz - 10 V	4	8	16	40	52	72	-72	216	1	216	6	Significativo	
20 mm - 60 Hz - 10 V	8	16	16	40	36	-48	-8	2,6667	1	2,6667	13,5	Significativo	
10 mm - 70 Hz - 10 V	4	4	4	12	36	-24	-8	2,6667	1	2,6667	13,5	Significativo	
20 mm - 70 Hz - 10 V	4	4	16	24	-20	-8	-40	66,667	1	66,667	1,852	Não significativo	
10 mm - 60 Hz - 20 V	4	4	4	12	-28	0	24	24	1	24	1,500	Não significativo	
20 mm - 60 Hz - 20 V	16	4	4	24	-12	-8	8	2,6667	1	2,6667	13,5	Significativo	
10 mm - 70 Hz - 20 V	4	4	4	12	-12	0	8	2,667	1	2,6667	13,5	Significativo	
20 mm - 70 Hz - 20 V	4	4	4	12	-12	0	8	0,667	1	0,667	1	Significativo	
ERRO =								288,000	8	36	1		
TOTAL								605,333	15				

SQ = Soma dos quadrados

MQ = Quadrado médio

GDL = Graus de liberdade

F = valor da variável aleatória F que tem distribuição F

NOTAS

Deflexão do fio 1=Ruim 2=Bom

Empastamento do fio 1=Ruim 2=Bom

Vibração da peça 1=Ruim 2=Bom

Qualidade do corte 1=Ruim 2=Bom

NOTA FINAL = Multiplicação das quatro notas

F = 4,54 para nível de significância 0,05 e com 1 e 15 graus de liberdade

Significativo p/ F maior que 4.54

Não significativo p/ F menor que 4.54