**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO ZERODUR NO TORNEAMENTO
DE ULTRAPRECISÃO COM FERRAMENTA DE DIAMANTE DE
PONTA ÚNICA**

JOSÉ ANTONIO OTOBONI

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch

São Carlos

-2013-

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

- O88e Otoboni, José Antonio
Estudo da usinabilidade do ZERODUR® no torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única / José Antonio Otoboni ; orientador Jaime Gilberto Duduch. – São Carlos, 2013.
- Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Usinagem de Precisão -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.
1. ZERODUR®. 2. Torneamento de ultraprecisão. 3. Transição dúctil-frágil. 4. Riscamento. 5. Endentação.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ ANTONIO OTOBONI**.

Título da dissertação: "Estudo da usabilidade do ZERODUR® no torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única".

Data da defesa: 30/08/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Jaime Gilberto Duduch (orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Alessandro Roger Rodrigues**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Juan Carlos Campos Rubio**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

“Em nossas loucas tentativas, renunciamos ao que somos pelo que esperamos ser.”

William Shakespeare

DEDICATÓRIA

A toda minha família,

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela orientação, confiança, amizade e acreditar no meu trabalho.

Ao prof. Dr. Rentao Goulart Jasinevicius pela colaboração, sugestões, auxílio e discussões sobre o andamento do trabalho.

À minha esposa Juliana por acreditar, incentivar, me ajudar intensamente nos estudos e por toda paciência durante os momentos mais difíceis.

Às minhas filhas Gabriele e Camila pelo amor e compreensão durante toda esta jornada.

Ao meu irmão Luiz pela amizade, apoio e incentivo.

Ao meu amigo Paulo Berto pela ajuda, amizade e todo apoio desde o início nesta minha caminhada.

Ao meu amigo Andre Gonçalves da Motta pela amizade, sugestões, discussões e todo o tempo disponibilizado para este trabalho fosse realizado.

Aos meus pais Flávio e Aparecida pelo incentivo e apoio.

Aos meus sogros por Jorge e Ana pelo incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Pedro Oprime e Profa Fabiane pelas discussões e auxílio nos ensaios estatísticos.

Ao Prof. Dr. Rollo e o Técnico Pedro do Departamento de Engenharia dos Materiais pela assistência e uso do laboratório.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP.

RESUMO

OTOBONI, J. A. (2013). Estudo da usinabilidade do ZERODUR[®] no torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Alguns espelhos usados em câmeras de satélite devem apresentar qualidade superficial elevada. Eles são normalmente fabricados em ZERODUR[®], um material vitrocerâmico, por meio de processos abrasivos. Observou-se que a qualidade da superfície do material deteriora-se algum tempo após a usinagem, necessitando assim de retrabalho. A causa mais influente desse fenômeno é o crescimento de trincas devido à corrosão sob tensão. Estas trincas são geradas pelas condições impostas nos processos convencionais de lapidação e polimento. Este trabalho apresenta um estudo sobre a usinabilidade do ZERODUR[®] utilizando torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única como uma alternativa a estes métodos tradicionais. Amostras de ZERODUR[®] foram submetidas a testes de indentação e riscamento a fim de se estudar as propriedades mecânicas do material, a transição dúctil-frágil e os mecanismos de remoção de material. Com base nesses testes, foi delineado um experimento fatorial do tipo 2^3 para avaliar a influência das seguintes variáveis de usinagem: profundidade de corte, nos níveis 0,4 e 0,2 μm , taxa de avanço, nos níveis 0,3 e 0,1 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e ângulo de saída da ferramenta, nos níveis -5° e -20° . As amostras do experimento foram usinadas em um torno de ultraprecisão com a ferramenta de diamante de ponta única. A qualidade superficial de cada combinação foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura e perfilometria óptica interferométrica. Os resultados dos experimentos foram analisados estatisticamente, por meio de análise de variância (ANOVA). Para os intervalos das variáveis testadas verificou-se que o ângulo de inclinação da ferramenta é o que mais afeta a qualidade superficial. Ângulos com inclinações mais negativas (-20°) proporcionaram as melhores qualidades superficiais (em torno de 200 nm). Nos resultados não houve evidência de que o corte do material tenha ocorrido dentro do regime dúctil. Porém, a rugosidade superficial encontrada em algumas combinações de corte sugere que o torneamento de ultraprecisão pode ser uma alternativa ao processo lapidação que antecede o polimento. Este trabalho de caráter exploratório contribui com estimativas de alguns parâmetros ótimos para usinagem do ZERODUR[®], fornecendo subsídios para pesquisas futuras sobre este tema.

Palavras-chave: ZERODUR[®], Torneamento de Ultraprecisão, Transição dúctil-frágil, Riscamento, Indentação.

ABSTRACT

OTOBONI, J. A. (2013). Study of ZERODUR[®] machinability using single point diamond turning. 122 p. Dissertation (M. Sc.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Some mirrors used in satellite cameras must present a high surface quality. They are usually made of ZERODUR[®], a brittle glass ceramic, by means of abrasive processes. It was observed that the surface quality of the material deteriorates some time after the machining, thus requiring rework. The most influential cause of this phenomenon is the crack growth due to stress corrosion. These cracks are generated by the conventional machining processes of lapping and polishing. This work presents a study on the machinability of ZERODUR[®] using ultraprecision turning with single-point diamond tool as an alternative to these traditional methods. ZERODUR[®] samples were subjected to indentation and nano-scratching tests in order to study the ductile-brittle transition and material removal mechanisms. After that, a 2³ factorial experiment was designed in order to assess the influence of three machining parameters on the resulting surface roughness, which are: depth of cut (tested at levels 0,4 and 0,2 μm), feed rate (tested at levels 0,3 and 0,1 $\mu\text{m}/\text{rev}$) and rake angle of the cutting tool (tested at levels -5° e -20°). The samples were turned with single-point diamond tool using different combinations of the parameters at the levels described above. The surface quality of each sample was evaluated using an interferometric optical profiler and a scanning electron microscope (SEM). The results of the experiments were statistically evaluated by means of Analysis Of Variance (ANOVA). For the ranges tested, it was found that the rake angle of the tool was the most influential parameter. The angle of -20° provided the best values for surface quality, which were around 200 nm. There was no evidence that the cut of the material occurred in the ductile regime, however, the obtained surface roughness showed that the ultraprecision turning may be a feasible alternative for the lapping process of optical components. This exploratory research contributes to the existing knowledge by providing estimates for optimal parameters of ZERODUR[®] machining, furnishing empirical basis for future research in this field.

Key words: ZERODUR[®], Machinability, Ultraprecision Turning, Ductile-brittle Transition, Nano-scratching, Indentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Giroscópio a laser feito de ZERODUR®	30
Figura 1.2 - a) detalhe do espelho sendo usinado e no b) o espelho polido	31
Figura 1.3 - Curva de velocidade de fenda para vidros (velocidade da trinca x fator de intensidade de tensão K_{IC})	33
Figura 2.1 – a) Blank de ZERODUR® K20, b) peça de ZERODUR® manufaturada através de processos convencionais	38
Figura 2.2 – a) apresenta grande variedade de formas possíveis e, b) a funcionalidade do produto final.....	40
Figura 2.3 – a) detalhe de uma retifica cilíndrica e figura b) detalhe de uma cilíndrica plana.....	42
Figura 2-4 – As vistas a) e b) mostram ferramentas de lapidar com grãos de diamante aglutinados enquanto a vista c) apresenta uma foto de uma peça sendo lapidada com grãos suspensos.....	44
Figura 2.5 – As figuras a) e b) apresentam rodas de moagem para polimento utilizando revestimento de poliuretano sendo que a primeira é para polimento de superfícies planas e a segunda para superfícies côncavas. As figuras c) e d) trazem rodas de moagem para polimento que utilizam revestimento de piche, para polimento de superfícies planas e superfícies côncavas, respectivamente	46
Figura 2.6 – Influência do tamanho do grão na altura total do perfil da rugosidade (R_t)	47
Figura 2.7 – Esquemático do processo de aplicação das cargas. Na vista a) tem-se a aproximação do penetrador no corpo de prova, na vista b) é aplicado uma pré-carga, na vista c) é aplicada a carga de teste até que o ponteiro pare completamente. A carga é retirada é novamente é aplicada a pré-carga para que se possa fazer a leitura no mostrador	51
Figura 2.8 – Detalhe a) aplicação da carga para impressão e detalhe b) medida da impressão em duas direções	52
Figura 2.9 – Esquemático de um indentador Knoop e uma impressão deixada por ele	53

Figura 2.10 – Esquemático do indentador Vickers e uma impressão deixada por ele	55
Figura 2.11 – Esquemático da formação de trincas a partir de um ensaio Vickers. Em a) podemos observar o Sistema de Nucleação e em b) o Estado de Tensões durante o carregamento	57
Figura 2.12 – modelo de riscamento típico em materiais vítreos	60
Figura 2.13 – Grafico de Taniguchi (1983) modificado por outros autores para mostrar a precisão de usinagem alcançado para intervalos no começo da década de 1900	62
Figura 2.14 – Modelo de remoção do cavaco	64
Figura 2.15 – Modelo de remoção de cavaco com <i>size effect</i> em termos de distribuição de defeitos	65
Figura 2.16 – mecanismo de remoção do cavaco	66
Figura 2.17 – Modelo esquematizado da propagação de trincas no torneamento de materiais frágeis	69
Figura 2.18 – Modelo esquemático da influência da inclinação da aresta da ferramenta na superfície usinada.....	70
Figura 2.19 – Esquema dos modelos de usinagem do modelo de Blake. Em a) a espessura efetiva do cavaco é menor que a espessura crítica, ocorrendo o corte dúctil. Em b), mostra a transição frágil-dúctil onde a espessura efetiva é igual a crítica e em c) há grande danos na camada sub-superfície, porque a espessura efetiva é maior que a espessura crítica.....	73
Figura 2.20 – Representação esquemática dos componentes do MEV	76
Figura 3.1 – Detalhes do Microindentador Leica VMHT MOT	81
Figura 3.2 – Detalhe das amostras coladas no suporte para riscamento	83
Figura 3.3 – Esquemático do zeramento das amostras para o riscamento. Vista a) inclinação de $0,01146^\circ$ da amostra na mesa de seno no sentido transversal e, vista b) zeramento da amostra no sentido longitudinal.....	83
Figura 3.4 – detalhe do deslocamento da ferramenta no processo de riscamento.....	84

Figura 3.5 – Representação gráfica do modelo 2 ³	86
Figura 3.6 – Ferramenta de diamante monocristalino Mod. C020JG da Contour Fine Tooling Ltda.....	89
Figura 3.7 – Suporte com ângulo de fixação da ferramenta ajustável. Vista a) -5°, b) - 20° e c) vista isométrica do suporte	89
Figura 3.8 – Imagem da utilização do suporte durante a aproximação da ferramenta na amostra. Posição de 20° no suporte proporcionando 20° de ângulo de saída da ferramenta.....	90
Figura 3.9 – Torno de Ultraprecisão da Escola de Engenharia de São Carlos, localizado no Laboratório de Engenharia de Precisão	91
Figura 3-10 – Esquemático da fixação da Amostra no Suporte de Alumínio.	94
Figura 3-11 – Esquemático das faixas de usinagem das amostras.....	95
Figura 4.1 – EDS realizada em uma amostra de ZERODUR®.....	98
Figura 4.2 – Vista da face de uma amostra de ZERODUR® polida para os testes de indentação.....	99
Figura 4-3 – Curvas comparativas das durezas x cargas.....	101
Figura 4-4 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 5 g (ampliada em 1000x)	102
Figura 4-5 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 10 g (ampliada em 1000x)	102
Figura 4-6 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 25 g (ampliada em 1000x)	103
Figura 4-7 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 50 g (ampliada em 1000x)	103
Figura 4-8 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 100 g (ampliada em 1000x)	104
Figura 4-9 – detalhes da microindentação com carga de 5g.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química do ZERODUR® (MONTEDO, 2005; RUSSELL, 2011)	36
Tabela 2.2 – Propriedade do ZERODUR® (SCHOTT, 2011)	39
Tabela 2.3 – Escalas de Dureza Rockwell adaptado para ASTM E18-94	50
Tabela 2.4 – Influência da inclinação δ da aresta da ferramenta em relação à superfície usinada.....	71
Tabela 3.1 – Tabela com valores e ordem padrão gerada pelo programa statistic.....	87
Tabela 3.2 – Tabela com os valores padrões em ordem aleatória	87
Tabela 3.3 – Tabela com os valores reais de cada parâmetro	87
Tabela 3.4 – Variáveis de entrada	88
Tabela 3.5 – Características do eixo da máquina	92
Tabela 3.6 – Características do eixo da retífica.....	92
Tabela 3.7 – Características dos deslocamentos X e Z	93
Tabela 3.8 – Controle de realimentação	93
Tabela 3.9 – Capacidade de usinagem da peça de trabalho.....	93
Tabela 4.1 – Resultados de durezas obtidos na amostra 01 de ZERODUR®.....	99
Tabela 4.2 – Resultados de durezas obtidos na amostra 02 de ZERODUR®.....	99
Tabela 4.3 – Resultados de durezas obtidos na amostra 02 de ZERODUR®.....	100
Tabela 4.4 – Resultado médio das durezas por carga encontrada em cada amostra de ZERODUR®.....	100
Tabela 4-5 – Resultados obtidos nas usinagens da Amostra 01.....	115
Tabela 4-6 - Resultados obtidos nas usinagens da Amostra 02.....	116

Tabela 4-7 – Resultados experimentais do torneamento de ultraprecisão com diamante de ponta do ZERODUR®	120
Tabela 4-8 – Efeitos principais e efeitos de interação calculados.....	120
Tabela 4.9 – Análise de variância para o experimento fatorial com replicação.....	121

Lista de Símbolos e Abreviaturas

CET	Coeficiente de Expansão Térmico
R_t	Altura total do perfil da rugosidade
R_a	Rugosidade Média
H	Dureza
K_I	Fator de intensidade de tensão
K_c	Resistência a fratura
K_{IC}	Tenacidade à fratura
E	Módulo Elástico ou Módulo de Young
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectrômetro de raios-X por Dispersão de Energia
WDS	Espectrômetro de raios-X por Comprimento de Onda Dispersivo
ε	Aresta Cortante
γ	Ângulo de saída
α_1	Ângulo de folga
α_2	Ângulo de folga extra
ψ	Constante adimensional
HV	Hardness Vickers (dureza Vickers)
HK	Hardness Knoop (dureza Knoop)
HB	Hardness Brinell (dureza Brinell)
Y	Fator da geometria
σ	Tensão (Stress)
a	Profundidade da trinca

a_p	Profundidade nominal de corte
F	Força
A	Área
d_1	Distância da primeira diagonal
d_2	Distância da segunda diagonal
d	Média da distância horizontal e distância vertical
P	Valor crítico de carregamento
f	Avanço da ferramenta
t	Espessura do cavaco
L	Comprimento da impressão (mm)
C_{pF}	Fator de correção relacionado ao formato do penetrador (ideal = 0,070279).
ASTM	American Society for Testing and Materials
W_d	Limite de transição de danos
y_c	Profundidade crítica de corte
t_{ef}	Espessura do cavaco
t_c	Espessura crítica do cavaco
t_{max}	Espessura máxima do cavaco
R_p	Raio da ponta da ferramenta
USP	Universidade de São Paulo
n	Número de replicações
CNC	Controle Numérico Computadorizado
δ_r	Deslocamento correspondente à carga zero no descarregamento
δ_{max}	Deslocamento total do indentador
ANOVA	Análise de Variância
E_A	Efeito Principal do Ângulo de Saída da Ferramenta
E_B	Efeito Principal do Avanço da Ferramenta (Taxa de Alimentação)

E_C	Efeito Principal da Profundidade de Corte
E_{AB}	Efeito da Interação Ângulo de Saída da Ferramenta com Avanço
E_{AC}	Efeito da Interação Ângulo de Saída da Ferramenta com Profundidade de Corte.
E_{BC}	Efeito da Interação Profundidade de Corte com Avanço
E_{ABC}	Efeito da Interação do α_p , f , γ .

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. Considerações Iniciais	29
1.2. Formulação do Problema.....	29
1.3. Objetivo	31
1.4. Justificativa	31
1.5. Estrutura da Dissertação	34
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 Vitrocerâmico ou Vidro Cerâmico	35
2.2 O ZERODUR®	35
2.2.1 Propriedades do ZERODUR®	38
2.2.2 Aplicabilidade do ZERODUR®	39
2.3 Usinagem por Abrasão	41
2.3.1 Retificação.....	41
2.3.2 A Lapidação	43
2.3.3 Polimento	45
2.4 Indentação.....	48
2.4.1 Dureza Rockwell.....	49
2.4.2 Dureza Brinell	51
2.4.3 Dureza Knoop.....	52
2.4.4 Dureza Vickers	54
2.4.5 Microindentação Vickers.....	55
2.5 Riscamento.....	59

2.6	Usinagem de ultraprecisão	60
2.6.1	Torneamento de ultraprecisão	62
2.7	Fenômeno da transição dúctil-frágil em materiais denominados frágeis	63
2.8	Formação de cavaco	66
2.8.1	Formas de remoção do cavaco em materiais frágeis	67
2.9	Torneamento dúctil-frágil	67
2.9.1	Modelo de Duduch.....	68
2.9.2	Modelo de Blake	71
2.10	Microscopia Eletrônica de Varredura	74
3	METODOLOGIA.....	79
3.1	Introdução.....	79
3.2	Caracterização do material	79
3.2.1	Ensaio da dureza.....	79
3.2.2	Ensaio de Riscamento	82
3.3	Ensaio de usinagem.....	85
3.3.1	Delineamento do experimento	85
3.3.2	Ferramenta.....	88
3.3.3	Máquina-ferramenta	91
3.3.4	Preparação das amostras.....	94
3.3.5	Torneamento das amostras	95
4	RESULTADOS.....	97
4.1	Considerações Iniciais	97
4.2	Ensaio de raio-X	97
4.3	Ensaio de microindentação.....	98
4.3.1	Microdureza.....	98

4.3.2	Microscopia das endentações	101
4.3.3	Perfilometria das microendentações	104
4.3.4	Conclusão das análises das microindentações.....	108
4.4	Ensaio de riscamento	108
4.4.1	Preparação das amostras.....	108
4.4.2	Análise visual.....	109
4.4.3	Perfilometria dos riscamentos.....	110
4.4.4	Conclusão do resultado de riscamento	113
4.4.5	Análise comparativa entre indentação e riscamento	114
4.5	Usinagem de Ultraprecisão.....	115
4.5.1	Perfilômetria Óptica da superfície usinada.....	115
4.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura da Superfície Usinada	117
4.5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura do cavaco	119
4.6	Análise estatística dos resultados	119
5.1	Conclusões	125
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	126

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Com o constante crescimento da produção industrial mundial aliado à competitividade por preço e qualidade, é cada vez maior a busca por novos materiais que possibilitem produtos com melhor qualidade, com custos mais baixos e que mantenham propriedades importantes ao produto como: alta condutividade elétrica, resistência à corrosão, menor densidade, maior resistência mecânica, estabilidade mecânica, estabilidade térmica, entre outras.

Com esse avanço tecnológico cada vez mais acelerado, é evidente que algumas técnicas tradicionais se tornem ineficientes e, para que estes novos materiais possam gerar produtos em pequena, média e larga escala com baixo custo são necessárias novas técnicas de manufatura, a aquisição de novos maquinários, equipamentos para medição, mão de obra especializada, processo de produção etc.

Na área óptica esse avanço tecnológico também é constante. As indústrias ópticas têm necessidade de se manter competitivas e por isso devem estar em constante evolução tecnológica. A busca por novos maquinários que aumentem consideravelmente a produtividade melhorem a qualidade e exijam cada vez menos da experiência do operador, pode ser o diferencial em mantê-la no mercado.

1.2. Formulação do Problema

O ZERODUR[®], um vitrocerâmico da Schott com propriedades ópticas extraordinárias, é um exemplo desta evolução. Desenvolvido em 1968, marca uma

nova era em diversas aplicações ópticas. Livre de poros e com propriedades extraordinárias como, por exemplo, o coeficiente de expansão térmico (CTE) muito baixo e alta homogeneidade deste coeficiente ao longo de toda a peça (SCHOTT, 2006; DÖHRING et al., 2009) permite que o ZERODUR® possa ser utilizado desde um simples molde de processo a quente até aplicações bem mais nobres, como a produção de padrões de comparações, sistemas para laser de alta potência, espelhos de telescópios etc. Um bom exemplo desta diversidade de aplicações do ZERODUR® é o giroscópio a laser visto na Figura 1.1. A estabilidade mecânica em longo prazo faz dele o material ideal para esta aplicação (BACH; KRAUSE, 2005).

Figura 1.1 - Giroscópio a laser feito de ZERODUR®.

Fonte: BACH e KRAUSE (2005)

As empresas que detêm a tecnologia de produção de elementos com alta qualidade superficial utilizando o ZERODUR® não revelam as técnicas utilizadas em seus processos. Entender os parâmetros envolvidos na fabricação de elementos ópticos, adequar novas tecnologias com intuito de melhorar o processo, diminuir o tempo de usinagem e manter ou melhorar a qualidade superficial são os grandes desafios deste estudo.

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a usinabilidade do ZERODUR[®] por torneamento de ultraprecisão utilizando ferramenta de ponta única de diamante. Nos ensaios será observada a influência do avanço, profundidade de corte e ângulo de saída da ferramenta na geração de microtrincas, exatidão dimensional e rugosidade superficial. Indicar-se-á a melhor combinação das três variáveis que proporcionará a melhor qualidade superficial, podendo ser o ponto de partida na produção de elementos ópticos em ZERODUR[®] com alta qualidade superficial utilizando torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única.

1.4. Justificativa

Nos processos de usinagem de espelhos para câmeras de satélites, apresentado na Figura 1.2, realizados na empresa Opto Eletrônica SA, verificou-se que a qualidade superficial obtida após um longo processo de lapidação e polimento deteriora-se algum tempo após o término da usinagem, exigindo retrabalhos posteriores.

Figura 1.2 - a) detalhe do espelho sendo usinado e no b) o espelho polido

Um dos principais fatores desta degradação pode ser o crescimento de trinca por corrosão sobtensão. Isto ocorre quando um vidro ou vitrocerâmico é submetido a cargas de tensão em ambientes úmidos (SCHOTT, 2009b; KURT et al, 2012). Assim como em muitos materiais óxidos, o ZERODUR[®] está sujeito ao aumento do crescimento de trincas devido à ação da água acumulada nas microtrincas geradas durante o processo de usinagem. Este fenômeno só ocorrerá se houver cargas de tensão, caso contrário, não ocorrerá a propagação de trincas.

Na ausência de propagação lenta de trincas, a condição de fratura de um material frágil é dada por Kurt et al. como:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \geq K_{IC} \quad (1.1)$$

Onde:

K_I = fator de intensidade de tensão;

Y = fator da geometria;

σ = tensão (Stress);

a = profundidade da trinca;

K_{IC} = tenacidade à fratura (no ZERODUR[®] o K_{IC} é $\cong 1,0 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ (SCHOTT, 2009b)).

Na corrosão sobtensão, as trincas podem se propagar de forma rápida ou lenta. A combinação da tensão e do ataque químico a partir da água introduz ao histórico de carregamento do material uma memória que poderá resultar em fratura retardada, como pode ser visto no esquemático da Figura 1.3.

Na região A não ocorrerá o crescimento de trincas, pois a tensão aplicada e processo químico são muito pequenos para provocar alteração no material.

Na região B ocorre o crescimento de trincas denominadas de subcríticas e o aumento de tensão em ambiente úmido irá provocar a fratura retardada.

A região C desempenha um papel de pouca importância, uma vez que sua duração é muito curta e a água não consegue se mover rapidamente para

extremidades da trinca e promover o processo químico de corrosão. Sendo assim, o crescimento de trincas subcríticas vista na região B não ocorre.

Na região D há um crescimento rápido de trincas e a peça irá fraturar instantaneamente.

Figura 1.3 - Curva de velocidade de fenda para vidros (velocidade da trinca x fator de intensidade de tensão K_{Ic})

Fonte: KURT et al. (2012)

Nos processos convencionais existem vários fatores que podem contribuir no processo de corrosão sob tensão, como por exemplo, a necessidade de grande pressão da roda de moagem sobre a peça durante a lapidação ou polimento, a forma de fixação da peça, o uso de grãos suspensos em água, etc. contribuindo para formação de trincas pela ação do grão. Assim, a necessidade de se obter espelhos com alta qualidade superficial e estabilidade pós-usinagem mostrou que as tecnologias de usinagem óptica convencionais tornam-se inadequadas, pois expõem o componente às condições favoráveis à degradação superficial pós-usinagem.

Utilizar o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única como estratégia para redução substancial da quantidade de trincas superficiais e subsuperficiais e não expor a peça de trabalho a condições severas de

carregamento durante o processo de usinagem pode atenuar o histórico de carregamento e conseqüentemente a redução ou eliminação dos retrabalhos pós-usinagem.

1.5. Estrutura da Dissertação

Estruturada em capítulos, a dissertação traz como primeiro capítulo a introdução que apresenta um panorama geral da busca por novas tecnologias que melhorem o processo de manufatura, priorizando a qualidade e diminuindo o custo final do produto. Entender algumas das características envolvidas no processo de usinagem do ZERODUR® é um passo importante para melhorar o processo de fabricação de peças com finalidades mais nobres.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as características do ZERODUR® e algumas aplicações. Também são abordados temas como: usinagem óptica convencional por abrasão (processo de lapidação, retificação e polimento), Usinagem de precisão, torneamento de precisão, ferramenta de ponta única de diamante, fenômeno da transição dúctil-frágil, torneamento dúctil-frágil (Modelo de Duduch, Modelo de Blake), formas de remoção do cavaco em materiais frágeis e análise do material (microindentação e riscamento).

No capítulo 3 são apresentados os equipamentos, as montagens e todos os processos da metodologia empregada nos ensaios experimentais.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e as discussões que eles geraram.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões em função dos resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.

No capítulo 6 estão descritas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

O anexo I.

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre os conceitos do processo de Torneamento de Ultraprecisão e as características do vitrocerâmico ZERODUR[®]. Para tanto, a revisão bibliográfica versará sobre as tecnologias envolvidas nos processos que são relevantes para a compreensão do trabalho apresentado.

2.1 Vitrocerâmico ou Vidro Cerâmico

O vitrocerâmico vem do resultado de duas atividades de pesquisa independentes que foram combinadas por volta de 1952, dando origem a uma nova família de material com um alto potencial de aplicações na área industrial, residencial e principalmente na área óptica.

O compósito é o resultado da cristalização controlada de materiais vítreos com um agente nucleante dissolvido (óxido de titânio, óxido de fósforo, óxido de zircônio, prata, ouro etc) e submetido a temperatura máxima de 670°C. Se não for feito o uso de agentes nucleantes, a temperatura de nucleação fica em torno de 600°C e um pico de cristalização em torno de 860°C (MONTEDO, 2005). Diferente das cerâmicas que são cristalizadas, o vitrocerâmico não possui poros entre os cristais.

2.2 O ZERODUR[®]

O ZERODUR[®] é o nome comercial de um vitrocerâmico, desenvolvido pela SCHOTT AG em 1968, que tem como principal característica um Coeficiente de

Expansão Térmico (CET) muito baixo (DÖHRING et al, 2009; WESTERHOFF et al, 2010). Sua composição é dada por uma fase cristalina que compõe aproximadamente 70 a 78% do peso com elevada estrutura de quartzo (dióxido de silício = SiO_2 , óxido de alumínio = Al_2O_3 e óxido de lítio = Li_2O), e o restante composto por uma fase não cristalina (amorfa) de vidro residual. A fase cristalina (cristais em torno de 50 nm de diâmetro imerso no material amorfo) apresenta expansão térmica linear negativa, enquanto a fase não cristalina tem expansão térmica positiva. O equilíbrio destas fases é o que proporciona ao ZERODUR® grande estabilidade dimensional quando submetido a variações de temperatura. A composição química completa do ZERODUR® é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição química do ZERODUR® (MONTEDO, 2005; RUSSELL, 2011)

Material	Quantidade (%)
SiO_2	57,2
Al_2O_3	25,3
P_2O_5	6,5
Li_2O	3,4
TiO_2	2,3
ZrO_2	1,8
ZnO	1,4
MgO	1,0
As_2O_3	0,5
K_2O	0,4
Na_2O	0,2

Em setembro de 2006, a SCHOTT obteve a patente de uma nova fórmula do ZERODUR® denominado de K20, sendo este mais estável e bem menos poroso que o anterior.

O novo compósito tem 90% de fase cristalina composta por Keatite¹. Este novo vitrocerâmico possui um CET $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ em uma faixa de temperatura de 20°C a 700°C e $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ se mantido em temperatura ambiente. Outra característica interessante deste material é a transmitância no Infravermelho na faixa de 3,5 a 5 μm .

O método de produção do ZERODUR[®] é semelhante aos utilizados na produção de cristais ópticos, onde os cristais e vidro são fundidos, refinados, homogeneizados e por fim recebem o formato desejado. Em seguida a pressão é reduzida para que seja possível o tratamento do centro cristalino. Na sequência, inicia-se a fase chamada de ceramização onde o vidro é temperado continuamente por vários meses (DÖHRING et al., 2008).

Com características químicas e dureza semelhante à do vidro, o ZERODUR[®] pode ser manufaturado com as mesmas máquinas e procedimentos utilizados no vidro óptico (SCHOTT, 2009). Na Figura 2.1 é apresentado um blank e uma peça de ZERODUR[®].

¹ É uma forma cristalina poliamorfa do silício obtida com aquecimento de microssílica pura aquecida entre 400 a 500°C na presença de água e sob pressões que variam de $0,08 \times 10^9$ a $0,13 \times 10^9$ (OLDENDORF, 1988; MATEUS, 2008).

Figura 2.1 – a) Blank de ZERODUR® K20, b) peça de ZERODUR® manufaturada através de processos convencionais

2.2.1 Propriedades do ZERODUR®

O ZERODUR® por possuir características semelhantes às do vidro, pode ser utilizado na produção de pequenas peças até peças com várias toneladas, mas com a grande vantagem de manter elevada homogeneidade em toda sua extensão.

Como mencionado anteriormente, o ZERODUR® apresenta uma alta estabilidade térmica, e também outras propriedades de extrema relevância como:

- Alta qualidade interna;
- Baixa permeabilidade ao Hélio (proporcionando maior tempo de vida útil aos componentes);
- Obtenção de alta qualidade superficial;
- Boa aceitação a revestimentos;
- Fácil processamento;
- Boa estabilidade química.

As principais propriedades químicas apresentadas pelo ZERODUR[®] estão descritas na Tabela 2.2 apresentada abaixo.

Tabela 2.2 – Propriedade do ZERODUR[®] (SCHOTT, 2011)

Descrição	Valor	Unidade
Coeficiente de expansão Térmica (de 20°C a 700°C)	2,0x10 ⁻⁶	K ⁻¹
Densidade	2,53	g/cm ³
Condutibilidade Térmica a 20°C	1,46	W/(mx K)
Difusividade Térmica a 20°C	0,72x10 ⁻⁶	m ² /s
Capacidade Térmica	0,8	J/(gx K)
Módulo de Young a 20°C	90,3	GPa
Coeficiente de Poisson	0,243	
Dureza Knoop	620	HK

2.2.2 Aplicabilidade do ZERODUR[®]

O ZERODUR[®] pode ser utilizado em diversas aplicações ópticas assim como o vidro, mas suas características especiais possibilitam seu emprego em aplicações mais exigentes, como por exemplo, a fabricação de painéis elétricos para fogão, como pode ser observado na Figura 2.2. A eficiência deste compósito nesta aplicação possibilita uma economia do tempo de fervura em até 20% quando comparado com os fogões convencionais (BACH; KRAUSE, 2005).

Figura 2.2 – a) apresenta grande variedade de formas possíveis e, b) a funcionalidade do produto final

Fonte: Bach e Krause (2005)

Já em usos mais nobres, o ZERODUR® pode ser empregado na fabricação de blocos padrões utilizados na metrologia convencional, ou em padrões ópticos utilizados na aferição de componentes ópticos durante ou após o processo de fabricação.

Uma das aplicações mais nobres na metrologia é a fabricação de espelhos para interferômetros. O grau de acabamento e a estabilidade mecânica oferecida por este compósito faz dele um dos principais materiais para esta finalidade.

Outra área que o ZERODUR® exerce função de grande relevância é a astronomia. Assim como no uso em espelhos para interferômetros, as características mecânicas e ópticas fazem dele uma das principais matérias-primas para fabricação de espelhos para telescópios e satélites. Atualmente a maioria dos grandes telescópios ópticos de última geração (4, 8, 10 metros de diâmetro) é equipada com espelhos fabricados em ZERODUR® (DÖHRING et al., 2008). Há ainda vários projetos de telescópios extremamente grandes utilizando espelhos primários de ZERODUR® que variam entre 32 a 42 m de diâmetro.

Na área aeroespacial, o ZERODUR® é utilizado há mais de 30 anos como substratos para espelhos e componentes estruturais.

Espelhos para satélites custam cerca de 10 vezes mais que espelhos para telescópios em solo. A restrição de peso imposta pelo veículo lançador e o alto custo do lançamento, cerca de US\$ 10.000,00 por kg, o que impõe a redução do peso do espelho e componentes fabricados em ZERODUR®. Esta redução de peso é obtida mediante a retirada de material por processos de usinagem abrasiva ou até mesmo por processos químicos, proporcionando assim estruturas leves. Para tanto, a tecnologia CNC é dominante na fabricação destas estruturas que proporcionam relações de mínimo peso com grande rigidez, podendo oferecer uma ampla variedade de formatos e dimensões (DÖHRING et al., 2009).

2.3 Usinagem por Abrasão

É denominada usinagem por abrasão todo processo de remoção de material por um abrasivo ligado por um aglutinante, solto ou suspenso em líquido (normalmente é utilizado água para esta função). O processo de usinagem por abrasão é muito complexo por ter natureza não determinística, envolvendo vários processos de retirada de material até se obter uma superfície de alta qualidade e livre de trincas (BRINKSMEIER et al., 2010).

Os três processos mais comuns de usinagem por abrasão são a retificação, lapidação, e polimento que serão mais bem detalhados a seguir.

2.3.1 Retificação

A retificação é considerada um dos processos de usinagem por abrasão de grande complexidade devido ao grande número de fatores envolvidos durante o processo de usinagem. Alguns desses fatores são:

- Tipo de material a ser retificado;
- A escolha do rebolo mais adequado;
- Escolha e controle do fluido de corte para o processo;

- A profundidade de corte;
- O desgaste do rebolo durante o processo, entre outros.

Existem dois tipos de retificação comumente utilizados. A retificação cilíndrica ou derivação dela, e a retificação plana. Os dois tipos de retíficas, vistos na Figura 2.3, utilizam o rebolo como ferramenta para remoção de material. O rebolo é quem diferencia a retificação dos outros processos de usinagens (FERRARESI, 1970). Fatores como acabamento superficial, energia gasta no processo, temperatura gerada no processo etc. estão diretamente relacionados ao tipo de rebolo empregado.

Figura 2.3 – a) detalhe de uma retifica cilíndrica e figura b) detalhe de uma cilíndrica plana

O rebolo é composto por grãos abrasivos aglomerados a uma matriz. Cada grão funciona como uma micro-ferramenta utilizando suas arestas cortantes para remover o material da peça de trabalho.

Os três materiais mais utilizados na fabricação dos rebolos são: o óxido de alumínio, carboneto de silício e o diamante. Os rebolos fabricados em diamante são os mais utilizados na usinagem de cerâmica ou vidro. Devido a sua grande dureza, o rebolo de diamante sofre menor desgaste durante o processo de usinagem e, conseqüentemente, exige menor quantidade de dressagens, tornando-o assim o mais usado.

2.3.2 A Lapidação

A lapidação é um processo semelhante ao polimento, sendo que se difere deste em dois pontos básicos:

- A lapidação pode dar forma à peça obtendo dimensões desejadas;
- Pode reduzir a rugosidade de um nível alto para um nível baixo.

Estas características da lapidação só são possíveis pelo uso de grãos com tamanhos bem superiores aos utilizados no polimento (DOI; KASAI; TONSHOFF, 1999). A superfície lapidada apresenta característica fosca que não reflete coerentemente os raios de luz que nela incidem.

Normalmente a lapidação é o processo que antecede ao polimento, portanto quanto melhor for o acabamento obtido, ou em outras palavras, quanto menor for a rugosidade alcançada durante a lapidação, menor será o tempo de polimento da peça.

Os danos subsuperficiais causados durante o processo de lapidação estão diretamente ligados ao tamanho dos grãos de diamante ou alumina utilizados no processo, já a velocidade de corte, velocidade da ferramenta e profundidade de corte apresenta pouca ou nenhuma influência (YAGUO et al., 2011).

A ferramenta de lapidar pode ter os grãos aglutinados por um agente ligante, onde é possível dar forma a ferramenta, quando necessário, para que de forma ao componente fabricado. Também é possível a utilização dos grãos soltos e suspensos em líquido, sendo que esta mistura é constantemente despejada entre a roda de moagem e a peça a ser lapidada.

Em regra geral, o tamanho do dano causado na subsuperfície pela ação do grão é de aproximadamente três vezes o tamanho deste, mas se o grão de mesmo tamanho estiver aglutinado em uma ferramenta, sua área útil passa ser em torno de 1/3 do grão solto, mudando a proporcionalidade do dano causado por ele (ZHANG; ZHU, 2007).

Na Figura 2-4 são apresentadas ferramentas de lapidação que utilizam grãos aglutinados e suspensos em líquido.

Figura 2-4 – As vistas a) e b) mostram ferramentas de lapidar com grãos de diamante aglutinados enquanto a vista c) apresenta uma foto de uma peça sendo lapidada com grãos suspensos

Durante a lapidação, existem duas formas de ação do grão abrasivo na superfície da peça.

- A primeira é o efeito de rolamento, no qual o grão gira entre a superfície da peça e da ferramenta, causando tensão pontual que causa micro fraturas na superfície da peça.

- A segunda é o efeito de deslizamento. Nesta forma de ação do grão existe a retirada de material em forma de cavaco, resultante do formato irregular do grão.

A razão ótima entre os dois efeitos durante o processo é difícil de avaliar. Há muitas variáveis envolvidas no processo como o tamanho dos grãos, formato dos grãos, a mudança de forma durante o processo etc. (PAGOTTO, 1998).

2.3.3 Polimento

Uma superfície polida é caracterizada pela ausência de cavidades e projeções com dimensões superiores ao comprimento de onda da luz refletida, sendo que, para o vidro os limites práticos alcançados em polimentos superficiais encontram-se na ordem de 20 Angstrons (HORNE, 1983).

O processo de polimento, diferente da lapidação, não oferece alterações na forma ou dimensões da peça e, por não retirar grandes quantidades de material, é necessário que a qualidade superficial da peça de trabalho esteja próxima da desejada.

Na técnica mais comum de polimento, a peça ou peças são coladas (blocadas) em um suporte, pois raramente são polidas sem o auxílio deste. Em seguida o suporte é colocado na politriz e uma roda de moagem é acionada contra a superfície da peça. A região em que ocorre o atrito da peça com a roda de moagem é constantemente banhada com grãos abrasivos suspensos em água. Para que não ocorra interferência do material que é produzido com roda de moagem, sua face de atrito é revestida por um material com baixa dureza, normalmente piche ou poliuretano. A Figura 2.5 traz alguns exemplos de roda de moagem para polimento.

Figura 2.5 – As figuras a) e b) apresentam rodas de moagem para polimento utilizando revestimento de poliuretano sendo que a primeira é para polimento de superfícies planas e a segunda para superfícies côncavas. As figuras c) e d) trazem rodas de moagem para polimento que utilizam revestimento de piche, para polimento de superfícies planas e superfícies côncavas, respectivamente

A montagem para o polimento depende do tipo de politriz ou técnica escolhida, podendo a peça ficar sob ou sobre a roda de moagem. Se a peça com suporte ficar presa no eixo inferior da politriz, realizará movimentos circulares enquanto a roda de moagem realizará movimento de translação pra frente e para traz e movimento de rotação sobre uma das laterais da peça ou vice e versa. O movimento de rotação é resultante da tração do atrito gerado entre os dois movimentos, translação e rotação, respectivamente. Nas politrizes, é comum que a parte que está sobre a outra (peça ou roda de moagem) realize os movimentos de translação ao longo da parte que ficou fixa no eixo.

Um abrasivo suspenso em um líquido (normalmente água destilada ou deionizada) é constantemente aplicado entre as superfícies. A pressão exercida pela roda de moagem faz com que os abrasivos removam constantemente pequenas porções de materiais da superfície exercendo desta forma a usinagem da peça.

Em muitos casos o acabamento desejado não é obtido em uma única etapa, sendo necessário fazer o polimento gradativamente, de maneira que a cada nova etapa, o grão é trocado para um de menor tamanho até a obtenção do resultado satisfatório. Portanto, temos como resultado a redução da taxa de remoção de material e, conseqüentemente, o aumento do tempo de polimento (TONNELIER et al., 2007).

O acabamento obtido no processo de polimento é proporcional ao tamanho do grão utilizado (BELKHIR et al., 2011). O gráfico apresentado na Figura 2.6 mostra a correlação entre o tamanho do grão e a rugosidade total (R_t) obtida. É importante notar que com o aumento do tempo de polimento, há uma pequena queda na rugosidade. O principal motivo pode ser a diminuição do tamanho médio dos grãos em virtude das quebras ocorridas nos grãos durante o processo.

Figura 2.6 – Influência do tamanho do grão na altura total do perfil da rugosidade (R_t)

Fonte: Belkhir et al. (2011)

2.4 Indentação

A indentação é um ensaio para determinar certas propriedades mecânicas através da aplicação de um penetrador com geometria e força conhecidas, em um ciclo de carregamento (penetração) e descarregamento (afastamento).

Para que as propriedades mecânicas sejam encontradas é medida a razão entre a força aplicada e o deslocamento do indentador ou a área deixada pela impressão do penetrador na superfície da amostra.

A indentação normalmente é usada para determinação da dureza dos materiais, sendo que, também é possível obter outros dados como, por exemplo, o módulo elástico, a tenacidade à fratura de materiais frágeis, etc. (DAO et al., 2001). A investigação em materiais frágeis e de pouca espessura só é possível porque nos ensaios de microindentação pode-se aplicar cargas e deslocamentos muito pequenos, na ordem de 1 nN e 1 nm respectivamente.

De maneira geral não é necessário que se faça preparação minuciosa para realização do ensaio, basta que a superfície a ser medida tenha baixa rugosidade. Contudo, na microindentação é necessário que se tenha excelente acabamento na superfície que será medida, desta forma, a leitura dos resultados terá menos influências externas.

O formato da ponta do indentador pode ser cônico, esférico ou piramidal dependendo do tipo de teste que será empregado no material.

Os testes de dureza mais conhecidos são: Rockwell, Brinell, Vickers e Knoop. A medição da dureza no teste Rockwell é feita baseada na quantidade de deformação causada pelo indentador durante o processo. Para tanto, é comum o uso de relógios comparadores para medição do deslocamento do indentador. Já nos processos que utilizam indentadores do tipo Knoop, Vickers ou Brinell, a dureza é obtida pela impressão deixada pelo indentador. A impressão é o resultado da deformação permanente ou escoamento plástico, onde é observada a formação de padrões de trincas, bem como o começo de sua propagação. Também é possível

verificar se ocorreu a formação de *pile-up* ou (formação de borda) e *sink-in* (retração).

Indentadores que apresentam os raios das pontas menores tendem a promover deformações permanentes com extrema facilidade, é o que acontece com os indentadores Vickers e Knoop (pontas piramidais). Um fator de grande importância neste formato de indentador é a semelhança com as ferramentas de usinagem utilizadas para remoção de materiais frágeis. Com base nesta semelhança, podemos inferir algumas condições de remoção de material na usinagem de materiais frágeis (GONÇALVES, 2009).

2.4.1 Dureza Rockwell

A dureza Rockwell é obtida por um método direto e relativamente simples de ser utilizado. Neste tipo de teste a dureza é dada pela diferença da profundidade obtida na aplicação de uma carga inicial por uma carga maior aplicada na sequência, como apresentado na Figura 2.7.

O ensaio de dureza Rockwell pode ser classificado como Rockwell comum ou Rockwell superficial, a depender do tipo de penetrador e da pré-carga escolhida.

O procedimento usual nos ensaios utilizando o método é descrito da seguinte maneira:

Num primeiro momento aplica-se uma pré-carga (10 Kg para dureza comum ou 3 kg para dureza superficial) na superfície a ser testada, em seguida a pré-carga é retirada. Na sequência aplica-se a carga do ensaio (60, 100 ou 150 Kg para dureza comum ou 15, 30 ou 45 kg pra dureza superficial). São aguardados 10 segundos antes que a carga de ensaio seja retirada o que permite a recuperação elástica do material. Novamente é aplicada e mantida a pré-carga inicial para que seja realizada a leitura. Esta é feita diretamente na máquina em um mostrador com varias escalas, escolhendo a que se ajusta ao penetrador e valor da carga de ensaio.

O valor encontrado é a diferença entre a profundidade obtida inicialmente pelo penetrador na aplicação da pré-carga e a profundidade causada pela carga de ensaio, sendo que, a escala apresenta um valor alto quando a diferença entre a profundidade da pré-carga e a carga do ensaio é pequena e um valor baixo quando esta diferença é grande. Os tipos de escalas utilizadas nas medições podem ser vista na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Escalas de Dureza Rockwell adaptado para ASTM E18-94

Escala	Penetrador	Carga (kgf)	Leitura na Escala	Aplicações Típicas
B	Esfera 1,588 mm	100	Vermelha	FoFo (ferro fundido), aços não temperados
C	Diamante (cone)	150	Preta	Aço temperado ou cementado,
A	Diamante (cone)	60	Preta	Metal duro, aço fundido/temperado/rápido
D	Diamante (cone)	100	Preta	Aço fundido com espessura reduzida
E	Esfera 3,175 mm	100	Vermelha	FoFo, ligas de alumínio e magnésio, metal duro
F	Esfera 1,588 mm	60	Vermelha	Metais moles, ligas de cobre
G	Esfera 1,588 mm	150	Vermelha	Bronze, fósforo, ligas de Berílio, FoFo maleável
H	Esfera 3,175 mm	60	Vermelha	Alumínio, zinco, chumbo e abrasivos
K	Esfera 3,175 mm	150	Vermelha	Metal e metais de baixa dureza
L	Esfera 6,350 mm	60	Vermelha	Mesma Rockwell K, borracha e plásticos
M	Esfera 6,350 mm	100	Vermelha	Mesma Rockwell K e L, madeira e plásticos
P	Esfera 6,350 mm	150	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plástico
R	Esfera 12,70 mm	60	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plástico
S	Esfera 12,70 mm	100	Vermelha	Mesma Rockwell K, L e M, plástico
V	Esfera 12,70 mm	150	Vermelha	Mesma Rockwell K, L, M, P e R ou S

Os penetradores ou indentadores utilizados neste tipo de ensaio podem ser do tipo esférico ou cônico, sendo que os esféricos são confeccionados com uma

esfera de aço temperado e os cônicos são confeccionados em diamante com conicidade de 120° .

Figura 2.7 – Esquemático do processo de aplicação das cargas. Na vista a) tem-se a aproximação do penetrador no corpo de prova, na vista b) é aplicado uma pré-carga, na vista c) é aplicada a carga de teste até que o ponteiro pare completamente. A carga é retirada e novamente é aplicada a pré-carga para que se possa fazer a leitura no mostrador

Atenção especial deve ser dada à espessura da amostra. Caso esta espessura tenha valor relativamente pequeno, poderá interferir no resultado da medição. De modo geral a espessura mínima deverá ser superior a 17 vezes a profundidade que o penetrador deverá atingir.

2.4.2 Dureza Brinell

O método Brinell foi o primeiro método de medição de dureza a ser normatizado e é amplamente utilizado pela área de engenharia na medição de materiais metálicos.

A metodologia consiste em aplicar uma carga na peça que varia de 500 a 3000 kgf com um indentador (penetrador) esférico de aço de alta dureza ou carbeto

de tungstênio sobre a área de interesse. A carga é mantida constante por 10 a 30 segundos, em seguida ela é removida.

A dureza do material é obtida pelo diâmetro da impressão deixado pelo indentador em função da carga aplicada. A relação entre a impressão e carga é descrita pela equação (2.1).

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

Onde:

P = Carga aplicada;

D = Diâmetro do indentador;

d = Diâmetro da impressão.

O diâmetro da impressão é a média obtida em duas direções, como mostrado na Figura 2.8. Desta maneira é possível obter um melhor resultado diminuindo os possíveis erros de forma.

Figura 2.8 – Detalhe a) aplicação da carga para impressão e detalhe b) medida da impressão em duas direções

2.4.3 Dureza Knoop

O método de dureza Knoop é utilizado para medição de microdureza. Neste método o indentador é fabricado em diamante com formato de uma pirâmide

alongada, onde a relação das diagonais é de 7:1, como mostra a Figura 2.9. A profundidade da indentação deixada durante a medição é de aproximadamente 1/30 da sua maior diagonal.

A dureza é dada pela equação (2.2):

$$HK = \frac{P}{A} = \frac{P}{C_p L^2} \quad (2.2)$$

Onde:

P = carga aplicada;

A = área da superfície da impressão;

L = é o comprimento da impressão (mm);

C_p = fator de correção relacionado ao formato do penetrador (ideal = 0,070279).

A metodologia empregada é semelhante à utilizada no procedimento Vickers. Com cargas inferiores a 1 kgf o indentador Knoop deixa metade da penetração de um indentador Vickers. Por este motivo é um método muito empregado em medições de camadas eletrodepositadas ou endurecidas. Também é utilizada nas medições da dureza de vidros, filmes finos e dureza de camadas de tintas.

Figura 2.9 – Esquemático de um indentador Knoop e uma impressão deixada por ele

2.4.4 Dureza Vickers

A dureza Vickers é obtida por um método baseado na impressão de um indentador piramidal de diamante com ângulo de diedro de 136° , esquematizado na Figura 2.10, comprimindo com uma força F contra a superfície de um material, que deve estar polida e limpa. A dureza é dada pelo cálculo da área (A) em função das suas diagonais pela força F expressa em:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2.F.\sin\frac{136^\circ}{2}}{d^2} \cong 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.3)$$

Onde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.4)$$

Onde:

HV = Dureza Vickers;

F = Força;

A = Área;

d_1 = Comprimento da primeira diagonal;

d_2 = Comprimento da segunda diagonal;

d = Média das diagonais.

O método Vickers foi desenvolvido no início da década de 1920 como uma alternativa ao método Brinell é amplamente utilizado para avaliar propriedades mecânicas, como dureza superficial (H), módulo de Young (E), tenacidade à fratura (K_{IC}) para diferentes tipos de materiais tendo como grande vantagem o fato de que os cálculos para obtenção da dureza não dependem das dimensões do indentador.

Figura 2.10 – Esquemático do indentador Vickers e uma impressão deixada por ele

Por empregar um indentador de diamante, o método pode ser aplicado a diversos tipos de materiais das mais variadas durezas. A escala Vickers é uma das mais amplas que existe e oferece grande exatidão de medida.

2.4.5 Microindentação Vickers

O método empregado no teste de microdureza Vickers é semelhante ao método Vickers convencional. A diferença entre eles está na carga empregada. É considerado microdureza Vickers quando as cargas empregadas no teste são inferiores a 1,0 kgf. Pode-se até realizar ensaios com cargas inferiores a 5 gf.

Como o indentador empregado deixa uma impressão com ordem de grandeza de microns, o método é empregado em ensaios de microdureza e nanodureza. Esta é uma das grandes vantagens deste método, pois possibilita seu uso em análise de materiais frágeis como: cerâmicas, vidros, camadas de revestimento muito finas etc.

A aplicação do método também traz algumas desvantagens como, por exemplo:

- A necessidade de preparo da face da amostra a ser analisada (fazer um bom polimento);
- O uso de um microscópio preparado para realização das medidas;
- A falta de precisão na medição do tamanho da trinca superficial.

Outro grande cuidado que se deve tomar ao utilizar o método de microindentação é a diferença de fase contida em certos materiais. A presença de contorno de grãos pode conter, por exemplo, perlita e cementita em uma mesma estrutura. As propriedades obtidas em regiões distintas não representaram as propriedades de um sólido isotrópico, ou seja, a indentação obtida próximo da região central de um grão trará informações diferentes de uma indentação realizada nos limites deste grão ou próximo a ele.

Durante o processo de penetração do indentador em materiais frágeis surgem pequenas trincas superficiais próximas à impressão deixada pelo indentador. Este processo é denominado de nucleação. Nos ensaios Vickers os principais mecanismos deste processo nomeados pela literatura são a trinca Mediana, a trinca Lateral, a trinca Palmqvist e a trinca Radial (MEDEIROS; DIAS; MODENESI, 2006).

Estas trincas, vistas na Figura 2.11 a), são resultantes da ação do indentador após atingir um valor crítico de carregamento P , Figura 2.11 b) ou durante a ação de descarregamento. Isto se dá por conta do campo de tensões residuais superficiais decorrentes do campo de deformações plásticas ocorridas durante a fase de penetração (MEDEIROS; DIAS; MODENESI, 2006).

Figura 2.11 – Esquemático da formação de trincas a partir de um ensaio Vickers. Em a) podemos observar o Sistema de Nucleação e em b) o Estado de Tensões durante o carregamento

Fonte: Medeiros, Dias e Modenesi (2006)

2.4.5.1 Trinca Mediana

Este tipo de trinca se propaga de maneira estável com o aumento da carga até que o carregamento atinja um valor crítico. Após esta condição, a trinca se propagará de forma instável tornando-se uma trinca radial-mediana.

Ocorre abaixo da transição entre a região deformada plasticamente e deformada elasticamente tendo como responsável um campo hidrostático de tensões de tração (perda da restrição à plasticidade) ocorrido durante a fase de carregamento.

2.4.5.2 Trinca lateral

Localizada no contorno da região de deformação plástica e paralela à superfície da amostra, ela tem como provável origem a trinca mediana, e aparece durante a fase de descarregamento. Nos materiais frágeis ela está associada aos

desgastes superficiais ocorridos durante as operações de retirada de materiais (MEDEIROS; DIAS; MODENESI, 2006).

2.4.5.3 Trinca de Palmqvist

Comuns em alguns metais duros como, por exemplo, os carbonetos de tungstênio com cobalto, as trincas de Palmqvist, assim como as trincas medianas, propagam-se instavelmente a partir de um valor de carga crítica. Também é comum que ocorra no instante do descarregamento, tendo como responsável o campo de tensões residuais formados quando da retirada da carga do indentador.

Semelhante às trincas medianas, a nucleação da trinca de Palmqvist também ocorre na interface entre a região plástica e elástica, mas, diferente da primeira, o ponto de nucleação fica próximo da superfície da amostra e na direção diagonal do indentador.

2.4.5.4 Trinca Radial

No exato instante em que ocorre a propagação instável destes processos de nucleação da trinca mediana ou de Palmqvist, ou mesmo da combinação dos dois processos, surgem as trincas Radiais. Elas são importantes parâmetros para se avaliar a tenacidade à fratura do material, por que o traço radial formado por ela na superfície da amostra é facilmente visível e mensurável. Assim, para muitos pesquisadores, o sistema de nucleação de trincas radiais é estabelecido pela razão entre o comprimento da trinca e o comprimento total da diagonal da impressão deixada pelo indentador.

A análise detalhada de cada indentação é de muita importância para entender os fenômenos envolvidos nas deformações sofridas pelo material durante o processo de indentação. Pulecio (2010) em seu estudo de caracterização de

materiais por técnica de indentação instrumentada demonstra que há uma falta de relação única entre as propriedades mecânicas e a forma da curva de endentação. Qualquer curva de indentação que tenha a relação da profundidade residual da indentação pelo deslocamento máximo do indentador inferior a 90% ($\delta_r/\delta_{\max} < 90\%$) pode ser obtida por infinitas combinações de propriedades mecânicas. Porém, se for incorporada informação adicional, como por exemplo, o módulo elástico do material endentado ou a área residual da indentação é possível obter uma relação única das propriedades.

2.5 Riscamento

No ensaio de riscamento, um indentador ou uma ferramenta é translada, com velocidade controlada, sobre a superfície da amostra enquanto uma carga é incrementada de forma controlada. O teste é repetido varias vezes variando a velocidade de translação e intensidade da carga. Os caminhos ou riscos deixados pela ferramenta ou indentador são analisados a fim de se obter informações que possam ser utilizadas nos experimentos.

Wasmer et al. (2005) em seu trabalho com semicondutores frágeis apresenta o modelo proposto por Houérou para materiais vítreos. O modelo pode ser visto na Figura 2.12. Em seus experimentos Wasmer et al. (2005) procuram relações entre os fenômenos do modelo proposto e as impressões deixadas pelo riscamento em suas amostras.

Figura 2.12 – modelo de riscamento típico em materiais vítreos

Fonte: Wasmer et al. (2005)

Um fator importante observado no modelo de Houérou é a existência de uma região com regime plástico semelhante a materiais dúcteis. Nesta região é possível a realização de usinagens semelhantes às praticadas em materiais dúcteis.

O riscamento é considerado um processo intermediário entre a indentação e o processo de torneamento com ferramenta de diamante. No processo de riscamento, quando o indentador atinge uma profundidade onde o material apresenta deformação plástica, o mecanismo apresenta semelhanças muito próximas ao do torneamento em materiais dúcteis. Desta forma, podemos inferir algumas informações importantes a respeito da usinagem daquele material no regime dúctil ou próximo do regime dúctil. Informações como: profundidade de corte, formação de trincas, entre outras podem ser coletadas e utilizadas como ponto de partida para os experimentos.

2.6 Usinagem de ultraprecisão

As máquinas-ferramentas de ultraprecisão surgiram após a segunda guerra, época em que ocorreram muitas pesquisas em todo o mundo na busca por alternativas de usinagens viáveis de componentes especiais como: componentes de computadores, mancais, componentes microeletrônicos, componentes para sistemas ópticos etc. Este tipo de máquina era destinado à produção de superfícies com qualidade óptica em materiais denominados dúcteis, sendo um método alternativo à retífica de precisão.

Os avanços alcançados ano a ano tornam a usinagem de precisão um campo em constante crescimento. Isto é facilmente observado na análise histórica dos processos, máquinas e tolerâncias realizados por Taniguchi em 1983 e modificado por outros pesquisadores², retratado na Figura 2.13 (VENKATESH; IZMAN, 2007).

Para Duduch (1993) a usinagem de ultraprecisão não possui definição fixa, é uma tecnologia que tende a melhorar com o passar do tempo. O nível de exatidão alcançável relacionado à expressão ultrapecisão, está diretamente ligada com a época e tipo de equipamento.

Uma máquina considerada de grande precisão na metade do século XX, se comparada com uma máquina de ultraprecisão nos dias atuais, estará aquém várias ordens de grandezas.

² F.W. Taylor (1907) High speed steel (HSS), Merchant's mechanics of machining (1944), Gilbert's economics of machining (1945) and Scattergood's theory of ultra-precision turning (1988)

Figura 2.13 – Gráfico de Taniguchi (1983) modificado por outros autores para mostrar a precisão de usinagem alcançado para intervalos no começo da década de 1900

Fonte: Venkatesh e Izman (2007)

2.6.1 Torneamento de ultraprecisão

A busca de alternativas para fabricação de elementos com alto grau de acabamento e superfícies não convencionais tem sido há muito tempo objeto de estudos. A usinagem com abrasivos utilizada por séculos quase sem alteração das suas técnicas nos dias atuais encontra dificuldade ou não conseguem produzir componentes com características não convencionais e alcançar altos níveis de acabamento.

As máquinas-ferramentas de ultraprecisão surgiram após a segunda guerra, época em que ocorreram muitas pesquisas em todo o mundo na busca por

alternativas de usinagens viáveis de componentes especiais. Este tipo de máquina era destinado à produção de superfícies com qualidade óptica em materiais denominados dúcteis, sendo um método alternativo à retificação de precisão. Empresas privadas e departamentos militares da Europa e EUA foram os principais investidores neste tipo de pesquisa. A extensão do uso da usinagem de precisão em materiais frágeis só foi possível devido aos bons resultados obtidos em materiais metálicos. O emprego desta tecnologia possibilitou a produção de produtos ópticos com acabamento superficial submicrométrico e nanométrico com ótima resolução de forma (BLACKLEY; SCATTERGOOD, 1994; CHAO, 1992).

Na usinagem de ultraprecisão de materiais frágeis é inerente o uso de ferramentas de diamantes. O sucesso alcançado neste tipo de usinagem tem relação direta com a alta dureza oferecida pelo diamante e do fato deste ser produzido em um monocristal, o que lhe confere a possibilidade de alto grau de afiação.

2.7 Fenômeno da transição dúctil-frágil em materiais denominados frágeis

Existem duas formas de se classificar o comportamento de fratura nos materiais de engenharia, a fratura dúctil e fratura frágil (CALLISTER, 2002). Quando observado pelo consumo de energia ou energia absorvida durante o processo, podemos classificá-las como:

- Fratura frágil, onde a energia absorvida durante o processo é pequena.
- Ou fratura dúctil, também denominada de tenaz, onde a energia absorvida no processo é relativamente alta.

Outra maneira de classificar o comportamento da fratura é em função da deformação plástica sofrida durante o processo. Quando há uma grande deformação plástica antes da fratura, a fratura é classificada como dúctil. Já na fratura frágil, a deformação plástica sofrida pelo material antes da fratura é muito pequena ou até mesmo inexistente.

Analisando os mecanismos de fratura, podemos dizer que a fratura frágil ocorre por clivagem e a fratura dúctil por cisalhamento.

A qualidade superficial de uma peça é diretamente afetada pela remoção de cavaco. Nakasuji et al. (1990) classifica a remoção do cavaco no torneamento de materiais frágeis com ferramenta de diamante em dois processos, sendo eles:

- O processo decorrente da deformação plástica sobre o plano de escorregamento característico;
- O processo decorrente da fratura por clivagem sobre o plano de clivagem característica.

Os modelos esquemáticos dos processos de remoção de cavaco segundo Nakasuji (1990) são apresentados na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Modelo de remoção do cavaco

Fonte: Nakasuji (1990)

As condições de corte predominante são as responsáveis por determinar o tipo de processo de remoção de material.

Processo onde a deformação plástica predomina sobre a de clivagem se obtém qualidade de superfície óptica. Quando ocorre o oposto, onde a predominância é o processo de remoção por clivagem, a superfície obtida será coberta por trincas residuais e a aparência será fosca.

A densidade de defeitos e/ou discordância presentes no material do substrato afetam os valores críticos que determinam o processo de remoção de cavaco, deformação plástica ou clivagem. Como em materiais frágeis não há predominância de densidade de defeitos, a dependência do valor crítico fica em função do campo de tensão no qual a clivagem ocorre, caso os defeitos existam. Logo, para que não ocorra o início da clivagem nos defeitos, é necessário que a tensão crítica seja pequena, dessa forma, o valor crítico necessário para deformação não apresenta o efeito de tamanho ou *size effect*, demonstrado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Modelo de remoção de cavaco com *size effect* em termos de distribuição de defeitos

Fonte: PORTO et al. (2004)

Este fenômeno só é possível porque mesmo que um campo de tensão seja pequeno, a densidade de discordância é suficientemente alta para provocar a deformação plástica. Portanto, a espessura do cavaco indeformado influencia na transição do processo frágil para dúctil. Assim, controlar a distribuição dos defeitos e o estado de tensão é uma forma de se obter a remoção do cavaco por deformação plástica ou evitar a clivagem.

2.8 Formação de cavaco

Segundo Ferraresi (1970), o mecanismo de remoção do cavaco em materiais dúcteis envolve quatro etapas distintas, sendo que, na primeira etapa há a penetração da ferramenta na peça, onde uma pequena porção de material é recalcada contra a superfície da ferramenta.

Na segunda etapa, devido a uma crescente deformação plástica ocorre o deslizamento entre a pequena porção de material e a peça. Estes deslizamentos ocorrem nos planos cristalográficos denominados planos de cisalhamento. Os planos de cisalhamento apresentam menor resistência ao “desagregamento”. Isto se dá devido à menor densidade atômica existentes nestes planos. A região onde ocorrem os deslizamentos é denominada região de cisalhamento. A região de cisalhamento no processo de torneamento pode ser observada na Figura 2.16.

Figura 2.16 – mecanismo de remoção do cavaco

Na terceira etapa há uma ruptura parcial ou completa da porção de material na região de cisalhamento. O fenômeno se dá devido a contínua penetração da ferramenta.

Na quarta etapa inicia-se o escorregamento da porção de material cisalhada sobre a superfície da ferramenta, resultado do movimento relativo entre ferramenta e

peça. Enquanto esta porção de material é “expulsa” ou “escorregada” sobre a ferramenta, uma nova etapa está iniciando, dando origem a um novo ciclo.

2.8.1 Formas de remoção do cavaco em materiais frágeis

A necessidade de usinar elementos ópticos com grandes tolerâncias de forma e alto grau de acabamento superficial utilizando materiais não ferrosos como: Níquel, Cobre Eletrolítico, Platina e ligas de Alumínio, estimulou o aumento de trabalhos pela busca do entendimento dos processos de usinagem em termos do mecanismo de remoção de material (cavaco) no torneamento com uso de ferramentas de diamante.

Características da usinagem, usinabilidade, integridade superficial relacionada com as propriedades do material, podem ser compreendidas estudando o mecanismo de formação do cavaco (GRANADO et al., 2008).

Entender de forma precisa os mecanismos de interação ferramenta/material tem sido o objeto de estudo de muitas pesquisas.

O uso da microindentação com cargas muito baixas, na ordem de algumas gramas, produzindo penetrações com profundidades na ordem de μm , proporcionou o embasamento necessário da possibilidade de usinar materiais frágeis dentro de um regime dúctil.

Podemos descrever o torneamento de materiais frágeis em regime dúctil como o mecanismo de remoção proposto para metais.

2.9 Torneamento dúctil-frágil

O torneamento de ultraprecisão de materiais frágeis é uma operação voltada principalmente para a indústria óptica e eletrônica envolvendo principalmente processos de retificação de ultraprecisão com diamante. Pode-se obter em

usinagem de ultraprecisão elementos da ordem de milímetro com resolução de medição da ordem de 1 nm, o que a configura como nanotecnologia.

A usinagem de ultraprecisão surgiu após a Segunda Guerra Mundial, sendo o ponto de partida retificadoras de ultraprecisão desenvolvidas por empresas privadas da Europa e por Departamentos Militares dos Estados Unidos. Em seguida, na busca por alternativas para fabricação de componentes anesféricos, o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante que, originalmente foi desenvolvido para fabricação de componentes em materiais dúcteis, torna-se uma importante alternativa para esta função.

Nas últimas décadas, a usinagem de ultraprecisão tornou possível a geração de superfícies de formas complexas com grande precisão e alta qualidade óptica utilizando métodos determinísticos.

2.9.1 Modelo de Duduch

Após as primeiras tentativas de usinar materiais frágeis em torno de ultraprecisão utilizando ferramenta de diamante de ponta única com aresta de corte reto, Duduch em 1993 sente-se desencorajado em obter corte totalmente dúctil neste tipo de material. O processo, inevitavelmente, produzia fratura frágil.

A ferramenta estando com a aresta de corte totalmente paralela a superfície da amostra a ser usinada, provocava trincas abaixo do plano de corte da superfície. Este fenômeno se dá pelo fato de que a propagação de trincas ocorre tanto lateralmente quanto na descendente com relação à direção de avanço da ferramenta.

No exemplo apresentado na Figura 2.17 é ilustrada uma condição em que ocorre propagação de microtrincas inferiores a 3 μm de profundidade quando são utilizados avanços menores que 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$.

Figura 2.17 – Modelo esquematizado da propagação de trincas no torneamento de materiais frágeis

Duduch considera uma pequena inclinação da aresta de corte em relação à superfície usinada. Desta forma, ele divide em duas regiões bem definidas de formação de cavaco. Uma das regiões está localizada na parte superior da ferramenta da área em contato com a peça. Esta região se estende do ponto S até a profundidade do canto C, como pode ser visto na Figura 2.18c. E a região localizada na parte inferior da área de contato com a peça, começando no canto C até a profundidade T, ponto este que coincide com o plano de corte da superfície.

Na região inferior a espessura do cavaco é muito mais fina que a região superior, onde a espessura do cavaco é bem próxima do valor de avanço por revolução. Duduch aponta para o provável aparecimento de trincas na região superior caso o avanço por revolução utilizado tenha valores acima de $5\ \mu\text{m}$ e que estas trincas se propaguem alguns micrômetros abaixo do plano de corte.

Testes com uma amostra de Si foram feitos a fim de comprovar o efeito provocado pela inclinação. Para tanto, algumas configurações foram mantidas como: o ângulo de saída da ferramenta em -30° , o avanço da ferramenta em $5\ \mu\text{m}/\text{rev}$ e a profundidade de corte.

Três condições de corte foram testadas variando a inclinação da aresta:

$$\delta = 4,5^\circ \rightarrow h = 4\ \mu\text{m};$$

$$\delta = 3^\circ \rightarrow h = 2,6\ \mu\text{m};$$

$$\delta = 2^\circ \rightarrow h = 1,7 \mu\text{m}.$$

Como a profundidade das microtrincas está em torno de $3 \mu\text{m}$ de profundidade com avanço de $5 \mu\text{m}$, a influência na qualidade superficial da amostra provocada pela inclinação δ na aresta da ferramenta pode ser vista na Figura 2.18 e os resultados descritos na Tabela 2.4.

Figura 2.18 – Modelo esquemático da influência da inclinação da aresta da ferramenta na superfície usinada

Tabela 2.4 – Influência da inclinação δ da aresta da ferramenta em relação à superfície usinada

δ (°)	h (μm)	Comentários
2	1,7	Grande número de trincas detectadas
3	2,6	Algumas trincas observadas
4,5	4	Nenhum dano detectado

Com relação à influência do avanço f , nos testes realizados na mesma amostra demonstrou que o avanço só terá influência no surgimento de trincas se a espessura do cavaco t exceder um valor crítico (para a amostra de Si em torno de $0,43 \mu\text{m}$). O teste demonstrou que, acima deste valor crítico ocorre uma transição do modo de remoção em regime dúctil para o modo de remoção por fratura frágil.

2.9.2 Modelo de Blake

Analizando o processo de torneamento em regime dúctil de materiais frágeis utilizando ferramenta de ponta única de diamante, Blake em 1988 sugere um modelo de corte sobre o perfil da ferramenta impresso na superfície da peça usinada em relação à posição de transição dos danos por microfratura (VIEIRA PORTO et al., 2004).

O modelo foi feito sobre um seguimento de arco em uma ferramenta de ponta arredondada e os danos por microfraturas por ele provocado

O modelo advém do fato de existir uma linha de transição que pode ser determinada do centro da ferramenta até a distância denominada de W_d . Esta linha de transição esta localizada na região de ombro e é o ponto exato onde a espessura do cavaco ($t_{ef} = t_c$) é igual à profundidade crítica de corte (y_c), nesta igualdade, os danos causados por microfraturas não ultrapassam a linha ou plano de corte da superfície. O autor observa as diversas características na relação entre a espessura efetiva do cavaco (t_{ef}) e espessura crítica do cavaco (t_c) e as descreve da seguinte forma:

- $t_{ef} = t_c \rightarrow$ define a condição de transição dúctil/frágil;
- $t_{ef} > t_c \rightarrow$ há formação de microfraturas ao longo da ponta da ferramenta;
- $t_{ef} < t_c \rightarrow$ ocorre o corte dúctil.

Um esquemático das três condições pode ser observado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Esquema dos modelos de usinagem do modelo de Blake. Em a) a espessura efetiva do cavaco é menor que a espessura crítica, ocorrendo o corte dúctil. Em b), mostra a transição frágil-dúctil onde a espessura efetiva é igual a crítica e em c) há grande danos na camada sub-superfície, porque a espessura efetiva é maior que a espessura crítica

Segundo Blake (1988), a profundidade nominal de corte (a_p) não tem relevância para este modelo, já o avanço (f) altera a espessura efetiva do cavaco. Ou seja, se o avanço aumentar a espessura efetiva do cavaco (t_{ef}) e este superar a relação $t_{ef} = t_c$ ocorrerá danos abaixo do plano de corte.

Blake (1988) define que o corte em regime dúctil está na interação entre o perfil da geometria da ferramenta e o avanço, pois estes definem a seção transversal do cavaco e o parâmetro de profundidade crítica (Y_c), este por sua vez ditará o início da ocorrência de fraturas.

Blake (1988) define a relação entre t_c e W_d com a seguinte equação:

$$t_c = f (W_d + f) / R_p \quad (5)$$

Onde: f/R_p (R_p = raio da ponta da ferramenta) será $\ll 1$ e $W_d \gg f$ para os ensaios.

É importante salientar que, o corte no regime dúctil não ocorre apenas na região abaixo do t_c . Na região sobre o t_c ocorre a remoção de material por combinação de plasticidade e microfratura extensiva.

2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento que possibilita aumentos muito superiores aos microscópios ópticos. Dependendo do tipo de material pode, alcançar aumentos de até 900.000 vezes, sendo que normalmente para as análises utilizam-se aumentos podendo chegar a 10.000 vezes e resoluções na ordem de 20nm. Possui o mesmo princípio de funcionamento de um microscópio óptico, exceto pelo uso de elétrons ao invés de luz na produção da imagem. Sendo

assim, para obtenção de foco no feixe de elétrons, faz-se uso de lentes magnéticas e não de lentes de vidro.

No MEV a superfície é varrida por um feixe de elétrons de 5-50 keV. Raios-X, elétrons retroespalhados e elétrons secundários gerados durante o processo de varredura são detectados e analisados por diferentes técnicas. Durante a varredura, quase todos os sinais resultantes da interação entre o feixe de elétrons e a peça resultam em informações complementares sobre o material.

Seu funcionamento pode ser descrito como a emissão de elétrons através de um fio com dimensões capilares (catodo) resultante de uma diferença de potencial (podendo variar de 0,5 a 30 kV). O feixe gerado passa por lentes condensadoras que reduzem seu diâmetro para, na sequência, uma lente objetiva foca-lo sobre a amostra. Pouco antes da lente objetiva, o feixe passa por duas bobinas eletromagnéticas que são responsáveis pelo processo de varredura do feixe sobre a amostra. Todo processo acontece dentro de uma câmara de vácuo (Figura 2.20).

Os elétrons gerados são atraídos pelo eletrodo positivo do microscópio (catodo) atingindo a amostra. Para formação da imagem são utilizados os elétrons secundários e os retroespalhados. Os secundários são responsáveis pela geração da topografia da superfície e da alta resolução das imagens geradas. Os elétrons retroespalhados são responsáveis pela geração de imagens que contém características de variação de composição.

Figura 2.20 – Representação esquemática dos componentes do MEV

A importância do MEV não se dá apenas pela geração de imagens com grandes aumentos de forma fácil, precisa e rápida, mas também pelo fato dele proporcionar análise microestrutural com microanálise química. Os raios-X emitidos pelas amostras possibilitam a determinação da composição do material, por meio de técnicas não destrutivas em regiões com até $1\mu\text{m}$ de diâmetro.

Os raios-X podem ser detectados e medidos pelo comprimento de onda dispersivo (WDS) ou pela energia dispersiva de raios-X (EDS). Devido à grande rapidez com que as amostras são analisadas, o EDS é o método mais utilizado.

Durante 2 minutos aproximadamente, a amostra recebe a varredura de elétrons. O detector capta e determina a energia dos fótons recebidos. Um

histograma é gerado e com a ajuda de um banco de dados que contém os elementos com as energias e as raias que as produziram, a interpretação fica mais fácil.

Para facilitar o processo de detecção faz-se necessário conhecer previamente os elementos que compõe a amostra. Desta forma é mais fácil definir qual será a tensão mais adequada na geração e aceleração dos elétrons para análise. Deve-se lembrar de que elementos presentes na amostra em quantidade inferior a 0,2% não poderão ser detectadas, assim como os elementos hidrogênio (H), lítio (Li) e berílio (Be) também não poderão ser detectados (DEDAVID et al., 2007).

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Neste capítulo estão descritos as metodologias e ensaios utilizados para levantamento dos parâmetros e usinagem de um material frágil dentro de um regime dúctil. O material utilizado nos experimentos foi o ZERODUR[®], um vitrocerâmico da Schott AG.

3.2 Caracterização do material

3.2.1 Ensaio da dureza

Utilizado para caracterizar as qualidades plásticas dos sólidos, tendo como objetivo estimar/determinar o campo de tensão através de medidas de dureza, a técnica de microindentação foi desenvolvida originalmente para o estudo das propriedades mecânicas e espessura de coberturas finas nos substratos dos materiais (COLAFEMINA, 2005). A determinação da dureza é dada pelo carregamento do indentador dividido pela área de impressão resultante expressa pela seguinte equação:

$$H = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde:

H: é a dureza;

F: é a carga;

A: área de impressão.

Segundo Wei e Hutchinson (2003) os testes de microdureza têm como objetivo, geralmente, tirar conclusões sobre as propriedades mecânicas (por exemplo, módulo de elasticidade, tensão de ruptura) do material. Fazendo uma análise de forma comparativa, pode-se medir a resistência de um material que passa por deformação (na região da análise) permanente ou escoamento plástico. Desta forma, a microindentação pode fornecer informações a respeito dos fenômenos envolvidos na remoção de materiais frágeis.

Para realização deste ensaio foram utilizados:

- Amostras de ZERODUR® com $\varnothing 25 \times 3$;
- Microindentador Leica VMHT MOT;
- Politriz modelo JP25A Hand-repairing Polish-grind;
- Álcool isopropílico com 99% de pureza e 0,2% de umidade.

As microendentações foram realizadas em um microindentador modelo VMHT HOT da marca Leica, mostrado na Figura 3.1, que está localizado no Laboratório da Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (USP).

Figura 3.1 – Detalhes do Microindentador Leica VMHT MOT

As medidas foram realizadas em três amostras de ZERODUR[®] retiradas do mesmo bloco de material. As amostras foram usinadas com as mesmas medidas ($\varnothing 25 \times 3$ mm) dos modelos que seriam posteriormente torneados.

Para que fosse possível minimizar os erros de medição durante as microendentações, uma das faces de cada amostra foi polida apresentando rugosidade de aproximadamente 10 nm Ra. Após o polimento, as amostras foram limpas com álcool isopropílico e as regiões onde seriam realizadas as microendentações foram demarcadas com um pincel atômico para que fosse possível a localização das micromarcas posteriormente.

Em cada amostra foram realizadas 25 medições divididas em cinco grupos, sendo que as cargas utilizadas em cada grupo foram de:

5g, 10g, 25g, 50g e 100g.

A análise completa dos resultados encontrados nos ensaios de microindentação será apresentada no capítulo 4.

3.2.2 Ensaio de Riscamento

Para o ensaio de riscamento foram utilizados:

- Amostras de ZERODUR® com $\varnothing 25 \times 3$;
- Centro de usinagem CNC Romi modelo D 1250;
- Ferramenta de diamante monocristalino Mod. C020JG da Contour Fine Tooling Ltda com ângulo de saída de 0° e raio de ponta de 0,507 mm;
- Mesa de seno dupla Vertex.

3.2.2.1 Preparação da amostra

Para o ensaio de riscamento foram cortadas quatro amostras do mesmo bloco com as mesmas dimensões ($\varnothing 25 \times 3$ mm) dos modelos que seriam torneados.

Para minimizar os erros de leitura nas medições do riscamento, uma das faces das amostras foi polida apresentando rugosidade superficial de aproximadamente 10 nm de Ra.

As amostras foram limpas com álcool isopropílico e em seguida, utilizando um fogão elétrico Brastemp modelo BDG30A, as amostras foram coladas em um suporte com cera de abelha à aproximadamente 80°C . Após o resfriamento até a temperatura ambiente, amostras e suporte foram limpos com *Thinner* e álcool isopropílico para eliminar o excesso de cera. A aparência final do dispositivo com as amostras coladas é apresentada Figura 3.2.

Figura 3.2 – Detalhe das amostras coladas no suporte para riscamento

3.2.2.2 Procedimento de riscamento

Para execução do riscamento, o suporte foi fixado em uma mesa de seno presa na mesa de um CNC Romi. Com auxílio de calços padrões foi realizado o zeramento da face da amostra no sentido longitudinal ao eixo suporte. Em seguida, também com o auxílio de calços padrões, foi realizada a inclinação da amostra no sentido transversal ao eixo do suporte em $0,005 \text{ mm}$ ($0,01146^\circ$), como no esquema apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquemático do zeramento das amostras para o riscamento. Vista a) inclinação de $0,01146^\circ$ da amostra na mesa de seno no sentido transversal e, vista b) zeramento da amostra no sentido longitudinal

A ponta da ferramenta foi zerada na extremidade mais baixa da amostra, de forma que, com o deslocamento da ferramenta ela deslocaria da extremidade mais baixa até a extremidade mais alta (0,005 mm), como demonstrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – detalhe do deslocamento da ferramenta no processo de riscamento

Na sequência foram realizados na primeira amostra três deslocamentos com velocidade de 3 m/min, sendo que, cada deslocamento foi espaçado em 1 mm. Terminada esta série, mais três deslocamentos foram realizados com velocidade de 8 m/min, também com espaçamento de 1 mm entre eles.

O mesmo procedimento foi repetido nas demais amostras.

A análise completa dos resultados encontrados nos ensaios de riscamento será apresentada no capítulo 4.

3.3 Ensaios de usinagem

3.3.1 Delineamento do experimento

Em um experimento são realizadas alterações controladas nas variáveis de entrada ou variáveis de controle com o objetivo de se avaliar a variação na variável ou nas variáveis de saída, também denominadas de variáveis resposta (MONTGOMERY, 2005). Desta forma, consegue-se entender melhor a influência de cada fator e assim, por exemplo, melhorar um processo, diminuir custos, reduzir tempo etc.

Segundo o autor supracitado, nos experimentos onde são testadas várias configurações de variáveis de entrada e não é empregado um modelo que permita uma análise dos dados com técnicas estatísticas adequadas, as respostas encontradas nas variáveis de saída serão extremamente pobres. Normalmente o resultado final se resume na configuração onde se obteve o melhor desempenho. Ao se utilizar de um modelo estatístico bem embasado é possível gerar gráficos de controle, nos quais se pode prever a variabilidade dos fatores. Ou seja, com um modelo robusto, é possível prever onde se encontra a melhor solução ou a região em que ela possa estar.

Na literatura existem várias técnicas que podem ser empregadas para avaliação da influência de um dado fator no processo, ou a influência da combinação de vários fatores. Algumas das técnicas empregadas são: experimentos aleatórios, quadrado latino, experimento fatorial etc.

O modelo fatorial 2^k é empregado quando se deseja avaliar o efeito ou a variação na variável resposta quando empregadas várias variáveis de entrada. Este modelo também possibilita avaliar a influência de cada fator individualmente, ou os chamados efeitos principais, e a combinação 2 a 2 entre os fatores, que representa os efeitos de interação, não sendo possível avaliar os efeitos de segunda ordem (MONTGOMERY, 2005). Neste modelo, os k fatores considerados são testados em dois níveis, um nível alto, representado pelo sinal (+) ou (+1), e um nível baixo, indicado por (-) ou (-1). Figura 3.5

A Figura 3.5 traz a representação geométrica e a matriz de planejamento para um experimento 2^k para $k = 3$.

Figura 3.5 – Representação gráfica do modelo 2^3

Com base nas literaturas pesquisadas e valores dos ensaios de indentação e riscamento, foram determinadas as variáveis de entrada ou parâmetros de controle, e seus respectivos níveis, conforme apresentado a seguir:

- Ângulo de saída da ferramenta (γ): -5° e -20° ;
- Avanço da ferramenta ($\mu\text{m}/\text{rev}$): 0,1 e 0,3;
- Profundidade de corte (μm): 0,2 e 0,4.

A variável de saída ou variação de resposta de interesse avaliada é a rugosidade R_a , medida em micrometro (μm).

Abaixo a Tabela 3.1 contém as 8 combinações testadas no modelo 2^3 , respeitando-se uma ordem padrão de combinação dos testes. Mas, para realização das usinagens, as combinações deverão estar em uma dada ordem aleatória, como no exemplo da Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Tabela com valores e ordem padrão gerada pelo programa statistic

Teste	F1	F2	F3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Tabela 3.2 – Tabela com os valores padrões em ordem aleatória

Teste	F1	F2	F3
8	1	1	1
1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1
7	-1	1	1
2	1	-1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1

Para o preenchimento da tabela aleatória com os parâmetros reais de usinagem, foi realizada a troca dos valores padrões pelos valores determinados nos ensaios e nas literaturas. Os valores encontrados e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Tabela com os valores reais de cada parâmetro

Variável	Referencia	Padrão inf	Padrão sup.
Ângulo de saída (graus)	Valor padrão Grand. Física	- 1 - 20	1 -5
Avanço	Valor padrão. Grand. Física	- 1 0,1	1 0,3
Profundidade de corte	Valor padrão Grand. Física	- 1 0,2	1 0,4

Realizando a troca dos valores padrões na tabela aleatória pelos valores reais, temos então a Tabela 3.4 com as variáveis de entrada utilizadas nos ensaios de torneamento.

Tabela 3.4 – Variáveis de entrada

Teste	Ângulo (°)	Avanço ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	Profundidade (μm)
8	-5	0,3	0,4
1	-20	0,1	0,2
3	-20	0,3	0,2
7	-20	0,3	0,4
2	-5	0,1	0,2
4	-5	0,3	0,2
5	-20	0,1	0,4
6	-5	0,1	0,4

Um critério importante para robustecimento do experimento é a sua replicação. Portanto, para maior confiabilidade nos resultados, realizou-se uma replicação do experimento. Ou seja, serão usinadas 2 amostras com 8 faixas cada.

3.3.2 Ferramenta

O modelo de ferramenta utilizado neste experimento foi o C020LG da empresa Contour Fine Tooling Ltda³, vista na Figura 3.6. É uma ferramenta de diamante monocristalino com ângulo de saída de 0° e raio de ponta de 0,507 mm.

³ Contour Fine Tooling Inc.

Wedgwood Way, Stevenage, Hertfordshire SG1 4QR, Reino Unido.

143 Jaffrey Rd, Marlborough, Cheshire, New Hampshire 03455, Estados Unidos.

Av. Pedro Bueno, 976, Pq. Jabaquara, 04342-000, São Paulo - SP- Brasil.

Figura 3.6 – Ferramenta de diamante monocristalino Mod. C020JG da Contour Fine Tooling Ltda

Como demonstrado no delineamento, seriam necessárias duas ferramentas com os ângulos: -5° e -20° . Infelizmente não dispomos dos modelos de ferramentas propostos. Para resolver este problema, foi fabricado um suporte, observado no esquemático da Figura 3.7, utilizado para realizar a interface ferramenta/magazine que possibilitou a fixação da ferramenta nos ângulos necessários para o experimento.

Na Figura 3.8 é possível visualizar uma foto do suporte sendo utilizado no procedimento de aproximação da ferramenta na amostra.

Figura 3.7 – Suporte com ângulo de fixação da ferramenta ajustável. Vista a) -5° , b) -20° e c) vista isométrica do suporte

Figura 3.8 – Imagem da utilização do suporte durante a aproximação da ferramenta na amostra. Posição de 20° no suporte proporcionando 20° de ângulo de saída da ferramenta

3.3.3 Máquina-ferramenta

Para geração das superfícies de ensaios foi utilizado um torno de ultraprecisão ASG 2500 (Aspheric Surface Generator 2500) da empresa Rank Pneumo®. A máquina é projetada para ser livre de tensões e isolada de vibrações externas por isoladores pneumáticos. Na Figura 3.9 pode ser visto o torno ASG 2500 e o painel do Controle Numérico utilizados nos experimentos.

Figura 3.9 – Torno de Ultraprecisão da Escola de Engenharia de São Carlos, localizado no Laboratório de Engenharia de Precisão

Fonte: Gonçalves (2009)

Um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY série 8200® e um sistema de realimentação interferométrico a laser da HP são utilizados para controlar de forma simultânea os deslocamentos dos eixos X e Z, possibilitando à máquina capacidade de resolução e acabamentos superficiais na ordem de 75 Angstroms Ra em muitos materiais (GONÇALVES, 2009). A precisão é conseguida controlando ou compensando as condições do ambiente (pressão, temperatura e umidade).

São máquinas especiais com alto grau de automação empregadas na fabricação de lotes pequenos (muitas vezes na fabricação de uma única peça) ou médios.

Tornos de ultra precisão são desenhados para apresentar alta rigidez em suas partes funcionais, sofrer pouca ou nenhuma influencia de vibrações externas e oferecer alto grau de acurácia. Para tanto, a máquina possui uma base de ferro fundido tratado para aliviar as tensões térmicas e é isolada das vibrações do solo por isoladores de ar passivos montado cinematicamente em um quadro externo de aço soldado (RANK PNEUMO, 1988).

Os eixos X e Z utilizam filmes aerostáticos e fusos hidrostáticos que possibilitam maior estabilidade e rapidez nos posicionamentos. O eixo-árvore possui mancais a ar e um fuso hidrostático disposto de forma a minimizar o momento de inércia e assim proporcionar melhores características de aceleração, maior rigidez e estabilidade (YOU DEN, 1988).

Na Tabela 3.5 a 3.9 podem ser observadas a principais características de cada subconjunto do torno de ultraprecisão ASG 2500.

Tabela 3.5 – Características do eixo da máquina

Tipo	Classificação pneumo com rolamento de ar hidrostático e placa de empuxo traseira
Variação da velocidade	100 – 2400 RPM
Batimento radial/axial	0,1 micron ou menos
Rigidez Axial	$14,01 \times 10^7$ N/m
Rigidez Radial	$8,70 \times 10^7$ N/m
Drive	Servo motor DC diretamente acoplado nos eixos para possibilitar 0,9 HP

Tabela 3.6 – Características do eixo da retifica

Tipo	Rolamento de ar hidrostático e placa de empuxo traseira
Variação da velocidade	3000 – 10000 RPM
Batimento radial	0,25 μ m ou menos

Rigidez Radial	7×10^7 N/m
Drive	Motor refrigerado com combinação de água e ar

Tabela 3.7 – Características dos deslocamentos X e Z

Tipo	Caixa de óleo hidrostática
Taxa de avanço	0,25 a 762 mm/min
Linearidade horizontal	X – 0,5 μ m ou menos (em todo percurso) Z – 0,5 μ m ou menos (em todo percurso)
Comprimento transversal	X – 254 mm Z – 152 mm
Rigidez Horizontal	$17,5 \times 10^7$ N/m
Rigidez Longitudinal	$3,00 \times 10^7$ N/m
Drive	Servomotor diretamente acoplado em parafuso de esfera com pré-carga, que por sua vez está acoplado para deslizar o carro

Tabela 3.8 – Controle de realimentação

Tipo	Allen-Bradley 8200 CNC interfaceado a um transdutor interferométrico a laser HP 5518
Resolução	10 nm
Recursos	Compensação manual de temperatura, umidade e pressão do laser

Tabela 3.9 – Capacidade de usinagem da peça de trabalho

Tipo	Dimensões
Concavidade	Diâmetro máximo – 150 mm Profundidade sagital máxima – 38 mm
Convexidade	Diâmetro máximo – 150 mm Profundidade sagital máxima – 75 mm

3.3.4 Preparação das amostras

Para o ensaio do torneamento foram cortadas duas amostras do mesmo bloco com as mesmas dimensões ($\varnothing 25 \times 3$ mm).

Um suporte de alumínio utilizado para fixação das amostras no torno foi previamente usinado para que as faces estivessem paralelas com a placa do torno. Em seguida, com o auxílio de uma base retificada, a amostra foi presa no suporte de alumínio com cera. Para minimizar o erro de paralelismo da amostra com o suporte, calços padrões foram utilizados para fazer a interface da placa retificada com a face do suporte, como demonstrado no esquemático da Figura 3-10.

Figura 3-10 – Esquemático da fixação da Amostra no Suporte de Alumínio.

Após o procedimento estar finalizado, o suporte foi fixado na placa de vácuo do torno e um apalpador conectado a um sistema analógico modelo TTA20 da Tesatronic foi utilizado para verificação do batimento. Se na verificação o batimento da amostra apresentasse valores superiores a $5 \mu\text{m}$, a amostra seria descolada do suporte e o procedimento de fixação seria novamente realizado até que a condição de batimento desejada fosse alcançada.

3.3.5 Torneamento das amostras

Após a validação do batimento da amostra no suporte, o torneamento foi iniciado.

Cada amostra recebeu 8 faixas de usinagem escalonadas sendo que, cada faixa foi usinada com os parâmetros definidos no delineamento. Cada faixa possui 0,7 mm de largura, como pode ser visto na Figura 3-11, e a sequencia de usinagem também seguiu a definição do delineamento.

A fim de minimizar o desgaste da ferramenta no processo de desbaste, foi realizado um pré-torneamento das faixas com altura dos escalonamentos de aproximadamente 10 µm entre faixas, utilizando uma ferramenta apenas para esta finalidade. Desta forma, a ferramenta utilizada em cada configuração realizou somente o corte na faixa de interesse.

Na usinagem das amostras foi utilizado o fluido de corte Alkalisol 900 na proporção de 1:10 de água. É um óleo sintético da Alkallis Brasil Ind. composto por carbono, hidrogênio, cloro, flúor e benzina com finalidade de lubrificar e refrigerar. Desta forma espera-se que ocorra a redução do atrito da ferramenta com a peça, remoção do calor e remoção dos cavacos gerados pelo processo.

Figura 3-11 – Esquemático das faixas de usinagem das amostras.

Após as usinagens as peças foram submetidas aos ensaios de MEV e Perfilometria.

Capítulo 4

4 RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do material, realizados na busca dos parâmetros para os ensaios de usinabilidade do vitrocerâmico ZERODUR[®]. Também serão apresentados os resultados dos ensaios de usinagem utilizando os parâmetros encontrados na caracterização.

O processo de usinagem proposto tem como objetivo fornecer à peça um acabamento superficial com qualidade óptica. Para tanto, a análise minuciosa dos parâmetros de ensaios é de grande importância para o sucesso do experimento. JASINEVICIUS (1998) alerta para importância de uma superfície livre de danos em componentes com qualidade óptica. Mesmo que os danos apresentem dimensões muito reduzidas, eles podem comprometer os objetivos a que os componentes foram propostos.

4.2 Ensaio de raio-X

Foi realizado um ensaio com um Espectrômetro de raios-X por Dispersão de Energia (EDS ou EDX), com a finalidade de verificar a composição química das amostras utilizadas nos experimentos. O EDS permite identificar a composição da amostra, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem. O resultado visto na Figura 4.1 foi comparado com a tabela de composição química do ZERODUR[®] para análise da existência dos elementos com as maiores relevância.

É importante ressaltar que alguns elementos contidos na tabela do ZERODUR[®] não são identificados na tecnologia EDS e, a necessidade de se empregar um filme condutor na superfície da amostra para realização da análise,

pode surgir alguns elementos, devido a este filme, não pertencentes à composição do elemento analisado.

Figura 4.1 – EDS realizada em uma amostra de ZERODUR®.

Na imagem é possível notar a presença de O, Si e Al presentes na composição original do ZERODUR® na forma de SiO_2 (dióxido de silício) e Al_2O_3 (óxido de alumínio), elementos estes que são os mais relevantes neste tipo de material.

4.3 Ensaio de microindentação

4.3.1 Microdureza

Na sequência serão apresentados os resultado das microdurezas realizadas amostras indentadas.

A Figura 4.2 mostra a qualidade superficial obtida no polimento de uma das faces em uma das amostras.

Figura 4.2 – Vista da face de uma amostra de ZERODUR® polida para os testes de indentação.

As Tabela 4.4, a 4.3 apresentam os valores e as médias das microdurezas obtidas em cada amostra.

Tabela 4.1 – Resultados de durezas obtidos na amostra 01 de ZERODUR®.

Teste	Carga				
	5g	10g	25g	50g	100g
1	297 HV	336 HV	442 HV	556 HV	636 HV
2	311 HV	473 HV	451 HV	524 HV	604 HV
3	315 HV	421 HV	498 HV	562 HV	637 HV
4	305 HV	358 HV	514 HV	531 HV	640 HV
5	296 HV	327 HV	502 HV	522 HV	610 HV
Média	304,8 HV	383 HV	481,4 HV	539 HV	625,4 HV

Tabela 4.2 – Resultados de durezas obtidos na amostra 02 de ZERODUR®.

Teste	Carga				
	5g	10g	25g	50g	100g
1	291 HV	356 HV	473 HV	517 HV	604 HV
2	303 HV	403 HV	466 HV	564 HV	581 HV
3	279 HV	427 HV	499 HV	577 HV	612 HV
4	300 HV	450 HV	433 HV	552 HV	595 HV
5	295 HV	466 HV	426 HV	510 HV	569 HV
Média	293,6 HV	420,4 HV	459,4 HV	544 HV	592,2 HV

Tabela 4.3 – Resultados de durezas obtidos na amostra 02 de ZERODUR®.

Teste	Carga				
	5g	10g	25g	50g	100g
1	312 HV	471 HV	462 HV	562 HV	624 HV
2	284 HV	455 HV	449 HV	565 HV	637 HV
3	270 HV	472 HV	490 HV	516 HV	595 HV
4	281 HV	406 HV	427 HV	567 HV	635 HV
5	277 HV	363 HV	500 HV	523 HV	655 HV
Média	284,8 HV	433,4 HV	465,6 HV	546,6 HV	629,2 HV

Na Tabela 4.4 é apresentada a média geral da dureza de cada amostra em função da carga empregada.

Tabela 4.4 – Resultado médio das durezas por carga encontrada em cada amostra de ZERODUR®.

	5g	10g	25g	50g	100g
Amostra 1	304,8 HV	383 HV	481,4 HV	539 HV	625,4 HV
Amostra 2	293,6 HV	420,4 HV	459,4 HV	544 HV	592,2 HV
Amostra 3	284,8 HV	433,4 HV	465,6 HV	546,6 HV	629,2 HV
Média (HV)	294,4 HV	412,3 HV	468,8 HV	543,2 HV	615,6 HV
Variação (%)	3,53	5,11	2,68	0,62	2,21

A Figura 4-3 mostra os resultados inseridos no gráfico para comparação das curvas. Nota-se que há um padrão nas curvas de dureza geradas em cada amostra, indicando o aumento da dureza com o incremento da profundidade. Pode-se inferir que há uma região próxima à superfície onde o corte ocorrerá mais facilmente.

Figura 4-3 – Curvas comparativas das durezas x cargas.

4.3.2 Microscopia das endentações

A análise visual pode ser um importante aliado na busca pela otimização dos parâmetros de usinagem, pois pode reduzir consideravelmente a quantidade de combinações dos fatores a serem testados.

Com a análise microscópica das endentações pode-se avaliar com certa precisão, por exemplo, o surgimento de trincas, o comprimento das trincas, a formação de *pile-up* (formação de borda) e *sink-in* (retração).

Os ensaios de microscopia foram realizados em um microscópio modelo LEITZ DMRX da empresa Leica Camera AG que está localizado no Laboratório de Engenharia de Materiais da EESC-USP.

Na Figura 4-4 pode-se visualizar a impressão do indentador Vickers utilizando carga de 5 g. A impressão apresenta boa simetria sem formação de *pile-up* ou *sink-in*. Não há formação de trincas.

Figura 4-4 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 5 g (ampliada em 1000x)

Na Figura 4-5 pode-se visualizar a impressão do indentador Vickers utilizando carga de 10 g. A impressão apresenta pequena formação de *pile-up*. Não há formação de trincas.

Figura 4-5 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 10 g (ampliada em 1000x)

Na Figura 4-6 pode-se visualizar a impressão do indentador Vickers utilizando carga de 25 g. A impressão apresenta pequena formação de *pile-up* e a simetria um pouco comprometida. Não há formação de trincas.

Figura 4-6 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 25 g (ampliada em 1000x)

Na Figura 4-7 pode-se visualizar a impressão do indentador Vickers utilizando carga de 50 g. A impressão apresenta formação de *pile-up* e a simetria um pouco comprometida. Com esta carga há o surgimento de trincas com aproximadamente 5 μm.

Figura 4-7 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 50 g (ampliada em 1000x)

Na Figura 4-8 pode-se visualizar a impressão do indentador Vickers utilizando carga de 100 g. A impressão apresenta grande formação de *pile-up* e a simetria um pouco comprometida. Com esta carga há o surgimento de trincas com comprimento superior a 12 μm.

Figura 4-8 – imagem da impressão de uma indentação utilizando carga de 100 g (ampliada em 1000x)

Analisando os resultados no geral, nota-se a formação de *pile-up* mesmo com pouca carga, sugerindo que o corte no regime dúctil deverá ocorrer em uma profundidade de corte muito pequena neste material.

4.3.3 Perfilometria das microindentações

Com o objetivo de estudar as profundidades críticas das microindentações, as amostras endentadas foram analisadas em um perfilômetro óptico modelo NT-1100 do fabricante Wyco, que está localizado no Laboratório de Engenharia de Precisão do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP.

Nas figuras 4-9 a 4-13 a seguir são apresentadas as medições de endentações com cargas de 5, 10, 25, 50 e 100 g, respectivamente. Na indentação realizada com carga de 5g, obteve-se uma profundidade média 0,46 μm, e também é possível notar que não houve formação de *pile-up*. No caso da utilização da carga de 10 g, a profundidade média obtida foi 0,59 μm, também é possível notar que não houve formação considerável de *pile-up*. Quando se aplicou uma carga de 25 g, a profundidade média obtida foi 0,77 μm com o início da formação de *pile-up*, mas não ocorrem trincas visíveis. Na indentação com carga de 50g, a profundidade média obtida foi 1,00 μm, com formação de *pile-up* e trincas. Nesta condição nota-se a

deformação do perfil da impressão próximo ao ponto mais profundo da indentação. Na análise da carga de 100g nota-se deformação do perfil da impressão próximo ao ponto mais profundo da indentação; também é possível notar que há trincas e a formação de *pile-up* é bem acentuada com altura média de 0,20 μm . A profundidade média obtida com esta carga foi de 1,28 μm .

Figura 4-9 – detalhes da microindentação com carga de 5g.

Figura 4-10 – detalhes da microindentação com carga de 10g.

Figura 4-11 – detalhes da microindentação com carga de 25g.

Figura 4-12 – detalhes da microindentação com carga de 50g.

Figura 4-13 – detalhes da microindentação com carga de 100g.

4.3.4 Conclusão das análises das microindentações

Com base nas análises de microscopia, pode-se notar claramente que ocorre o surgimento de trincas nas endentações com cargas de 50g. Sendo assim, a região de interesse para usinagem situa-se abaixo desta carga.

Nas endentações com cargas de 25g, não foi possível observar (com aumento de 1000x) o aparecimento de trincas superficiais, no entanto, observou-se *pile-up* com 30% da profundidade total da impressão.

Portanto, os dados das medições obtidos com cargas de 5g (profundidade média = 0,46 μm e dureza = 294,4 HV) e 10g (profundidade média = 0,59 μm e dureza = 412,3 HV) serão utilizados como base de comparação nos resultados encontrados nos ensaios de riscamento.

4.4 Ensaio de riscamento

4.4.1 Preparação das amostras

Como preparação para os testes de riscamento, as amostras foram polidas até se obter uma qualidade superficial em torno de 12,5 nm Ra. Na Figura 4-14 pode-se visualizar uma perfilometria realizada em uma das faces das amostras.

Figura 4-14 – Perfilometria do polimento da face de uma amostra de ZERODUR®.

4.4.2 Análise visual

O riscamento, quando realizado de forma adequada, deverá apresentar as fases descritas no modelo de Houérou (2003), que são: regime elástico, regime plástico, regime de trincas superficiais e subsuperficiais e o regime micro abrasivo.

Para realização desta comparação foram utilizadas as imagens geradas no perfilômetro e o resultado é demonstrado na Figura 4-15.

Figura 4-15 – Fases do modelo de Houérou comparadas com as fase dos resultados experimentais.

Assim como no modelo de Houérou, nos resultados obtidos, é possível visualizar a existência de uma região de regime plástico semelhante à de materiais dúcteis. Logo, há uma região onde é possível que exista a possibilidade de retirada de material dentro de um regime dúctil.

4.4.3 Perfilometria dos riscamentos

Da mesma forma como foram analisadas as profundidades críticas das microindentações, as amostras submetidas ao ensaio de riscamento foram analisadas no perfilômetro óptico modelo NT-1100 do fabricante Wyco, que está localizado no Laboratório de Usinagem de Precisão do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP.

A Figura 4-16 traz uma medição realizada na transição do regime elástico para o regime plástico. A medida da profundidade em que começa ocorrer o riscamento quase pode ser confundida com a rugosidade obtida no polimento. Nesta região não há sinais de formação de *pile-up*.

Figura 4-16 – Detalhes da perfilometria da transição elástica para plástica.

A região plástica apresentou profundidade média de riscamento em torno de 0,315 μm com formação de *pile-up* próximo de 0,1 μm , como pode ser observado na Figura 4-17. Não há visualmente, nesta região, comprometimento da qualidade superficial devido à passagem da ferramenta.

Figura 4-17 - Detalhes da perfilometria na região plástica.

A região com início de fratura na subsuperfície apresentou profundidade média de riscamento em torno de 0,45 μm com formação de *pile-up* próximo de 0,3 μm (dois terços da profundidade efetiva do riscamento). Na Figura 4-18 pode-se observar claramente esta relação. Visualmente, identifica-se nesta região o

comprometimento da qualidade superficial devido ao “arrancamento” de material com passagem da ferramenta.

Figura 4-18 – Detalhes da perfilometria na região com fratura subsuperficial.

A região com início de fratura na subsuperfície e superfície, apresentou profundidade de riscamento superiores a $0,6 \mu\text{m}$. É possível visualizar na Figura 4-19 grande quantidade de danos superficiais e subsuperficiais, característicos de mecanismos de remoção de materiais no regime frágil.

Figura 4-19 – Detalhes da perfilometria na região com fratura subsuperficial e superficial.

Na região denominada de micro abrasiva, os danos causados pelo processo de riscamento dificultam até mesmo uma análise mais detalhada. Não é possível

estimar a profundidade do início dos danos. Grande quantidade de material é “arrancado” durante o processo, como pode ser visto na Figura 4-20.

Figura 4-20 – Detalhes da perfilometria na região micro abrasiva.

4.4.4 Conclusão do resultado de riscamento

Os resultados demonstram uma transição entre o corte no regime dúctil para o de clivagem localizado entre a região plástica e a região de fratura subsuperficial. As médias de profundidade destas regiões apresentam pouca diferença entre si, em torno de $0,135 \mu\text{m}$, mas, quando se compara a formação de *pile-up*, a região de danos subsuperficiais apresenta alturas com o dobro da região plástica.

As influências externas presentes nas condições de testes não permitem definir com exatidão a máxima profundidade de corte no regime dúctil. Porém, o teste dá informações da região onde está localizada esta posição.

As velocidades utilizadas nos testes não pareceram influenciar de maneira significativa os resultados.

4.4.5 Análise comparativa entre indentação e riscamento

Os dados médios encontrados na indentação sugerem uma profundidade para início das trincas superior a $0,59 \mu\text{m}$, enquanto o riscamento aponta para uma profundidade superior a $0,315 \mu\text{m}$.

Se for considerada apenas a semelhança entre o riscamento e o mecanismo de remoção do material no torneamento, seriam apenas necessários os resultados de profundidade obtidos neste ensaio para determinação dos parâmetros utilizados nos ensaios de torneamento. Entretanto, como apresentado no modelo de Blake (capítulo 2 item 2.9.2), o corte ocorre a partir do centro do raio da ferramenta até a altura a_p localizada na região do ombro não cortado. Já no riscamento, o corte ocorre em toda seção da ferramenta em contato com a peça, o que indica maior tensão da ferramenta na região de remoção de material. Desta forma é razoável supor que as forças de corte envolvidas no ensaio de riscamento são maiores que as envolvidas no torneamento sugerindo que a profundidade para início das trincas possa ser superior ao valor de $0,315 \mu\text{m}$ encontrado no riscamento.

Por esta razão, escolheram-se para os testes os valores para profundidade de corte $0,4 \mu\text{m}$ (nível alto = +1) e $0,1 \mu\text{m}$ (nível baixo = -1).

Após definir a profundidade de corte, o passo seguinte é determinar a taxa de avanço (f) para o torneamento. Para este cálculo, utilizou-se a equação (5) vista na seção 2.9.2, admitiram-se as seguintes condições como ponto de partida:

- A espessura efetiva do cavado t_{ef} é igual à espessura crítica do cavaco t_c ;
- A espessura crítica do cavado t_c é igual à profundidade de corte no nível alto $0,4 \mu\text{m}$;
- A taxa de avanço igual a t_c ($0,4 \mu\text{m/rev}$).

No modelo de Blake para que o corte ocorra no regime dúctil faz-se necessário encontrar a relação entre t_c e a linha de transição de danos W_d tal que a condição $f/R_p \ll 1$ e $W_d > f$, onde R_p é o raio da ponta da ferramenta, seja satisfeita.

Após várias iterações chegou-se a uma taxa de avanço de $0,3 \mu\text{m}$ (nível alto = +1) e $0,1 \mu\text{m}$ (nível baixo = -1).

4.5 Usinagem de Ultraprecisão

Todas as faixas usinadas foram analisadas no Perfilômetro Óptico Interferométrico e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com o propósito de colher informações sobre a qualidade superficial e o mecanismo de remoção do material. A análise dos dados quantitativos foi realizada com o auxílio do programa estatístico livre Action 2.5. Tal programa funciona como uma ferramenta adicional (*add-in*) do programa Excel[®].

4.5.1 Perfilometria Óptica da superfície usinada

Foram realizadas as medições da rugosidade das usinagens das amostras de maneira que cada faixa fosse medida em 4 pontos diferentes. A Tabela 4-5 e Tabela 4-6 apresentam as médias das medidas de rugosidade das amostras e a aparência obtida após usinagem.

Tabela 4-5 – Resultados obtidos nas usinagens da Amostra 01.

Teste		Ângulo de Saída	Avanço (μm)	Prof. de Corte (μm)	Rugosidade Ra (nm)
1		-20	0,1	0,2	273,7
2		-5	0,1	0,2	479,0

3		-20	0,3	0,2	213,3
4		-5	0,3	0,2	413,8
5		-20	0,1	0,4	277,8
6		-5	0,1	0,4	518,9
7		-20	0,3	0,4	193,1
8		-5	0,3	0,4	537,8

Tabela 4-6 - Resultados obtidos nas usinagens da Amostra 02.

Teste		Ângulo de Saída	Avanço (μm)	Prof. de Corte (μm)	Rugosidade Ra (nm)
1		-20	0,1	0,2	302,5
2		-5	0,1	0,2	479,9

3		-20	0,3	0,2	215,1
4		-5	0,3	0,2	430,8
5		-20	0,1	0,4	301,8
6		-5	0,1	0,4	540,6
7		-20	0,3	0,4	213,8
8		-5	0,3	0,4	570,2

Como pode ser observado, em nenhuma das superfícies geradas existe evidências concretas de usinagem em regime dúctil. As superfícies não apresentam qualidade superficial óptica e apresentam grande quantidade de crateras (*pitting*), o que caracteriza a presença de remoção de material em regime frágil.

4.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura da Superfície Usinada

Nas imagens feitas no Microscópio Eletrônico de Varredura não foi possível visualizar marcas de avanço da ferramenta. Também não há evidência de anisotropia.

A Figura 4-21 mostra imagens de superfícies usinadas com o ângulo saída da ferramenta com -20° . As usinagens com esta configuração de ângulo geraram os melhores resultados, ou seja, superfícies com aproximadamente 200 nm Ra. A aparência exibe certa homogeneidade, com presença de pequenas crateras em vários pontos.

Figura 4-21 – Imagens de amostras usinadas com ângulo de saída da ferramenta com -20° .

A Figura 4-22 mostra imagens de superfícies usinadas com o ângulo saída da ferramenta com -5° . Nas usinagens com esta configuração os resultados encontrados para a rugosidade foram de 500 nm (Ra). Observa-se grande irregularidade na superfície gerada pela ferramenta. Visualmente pela ocorrência de danos superficiais fica caracterizada a remoção de material no regime frágil. Os resultados obtidos não são compatíveis com o torneamento de ultraprecisão.

Figura 4-22 – Imagens de amostras usinadas com ângulo de saída da ferramenta com -5° .

4.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura do cavaco

A análise do cavaco é uma das formas para verificação da ocorrência ou não da remoção de material no regime frágil. Quando o cavaco gerado exibe formas de lamelas sobrepostas, o corte ocorreu acima da borda da ferramenta. Essa é a ação de corte observada em materiais dúcteis (SAITO, 1981; JASINEVICIUS et al, 2009). Quando há predominância de cisalhamento, típico de materiais frágeis, o cavaco não apresenta forma definida, pois sua integridade é comprometida. O resultado são fragmentos grandes de material misturados com pedaços menores e pó.

Na Figura 4-23 podem-se observar cavacos gerados no torneamento do ZERODUR[®]. O cavaco tem a formação típica de remoção no regime frágil. Este fato corrobora com a análise superficial das amostras, em que não há evidência de remoção de material no regime dúctil.

Figura 4-23 – Imagens dos cavacos de ZERODUR[®] geradas no MEV.

4.6 Análise estatística dos resultados

Os resultados experimentais estão apresentados na Tabela 4-7, com as combinações seguindo a forma modo padrão. Contudo, conforme apresentado no item 3.3.1, os testes foram realizados em ordem aleatória (8, 1, 3, 7, 2, 4, 5 e 6).

Tabela 4-7 – Resultados experimentais do torneamento de ultraprecisão com diamante de ponta do ZERODUR®.

Ângulo de Saída (°)	Avanço (μm/rev)	Prof. de Corte (μm)	Rugosidade Amostra 1 (nm)	Rugosidade Amostra 2 (nm)
-20	0,1	0,2	273,70	302,50
-5	0,1	0,2	479,00	479,95
-20	0,3	0,2	213,30	215,09
-5	0,3	0,2	413,85	430,84
-20	0,1	0,4	277,83	301,83
-5	0,1	0,4	518,94	540,67
-20	0,3	0,4	193,17	213,80
-5	0,3	0,4	537,84	570,23

Para a análise do experimento, foram calculados os valores dos efeitos principais gerados por cada fator (E_A , E_B e E_C), bem como os valores dos efeitos de interação (E_{AB} , E_{AC} , E_{BC} e E_{ABC}), como mostrado na Tabela 4-8. No experimento realizado, o fator A representa o ângulo de saída, o fator B, a taxa de avanço e o fator C, a a profundidade de corte. Além do cálculo dos efeitos, sua análise gráfica e análise de variância (ANOVA) do experimento também foram realizadas, com o auxílio do software estatístico aberto Action-2.5 (Excel add-in). Estas análises são mostradas na Figura 4-24 e na Figura 4-25, respectivamente. O principal objetivo da análise é encontrar os fatores que são mais relevantes para minimizar a rugosidade da superfície.

Tabela 4-8 – Efeitos principais e efeitos de interação calculados.

E_A	E_B	E_C	E_{AB}	E_{AC}	E_{BC}	E_{ABC}
247,91	-47,83	36,98	24,70	44,98	14,95	27,08

Figura 4-24 – Gráficos dos efeitos principais dos fatores (E_A , E_B and E_C).

Figura 4-25 – Gráficos dos efeitos de interação E_{AB} , E_{AC} e E_{BC} respectivamente.

Tabela 4.9 – Análise de variância para o experimento fatorial com replicação.

Tabela ANOVA					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor
A	1	245049,7506	245049,7506	1075,632153	8,14661E-10
B	1	9326,730625	9326,730625	40,93916159	0,000209496
C	1	7485,7104	7485,7104	32,85810645	0,00043785
A:B	1	4054,505625	4054,505625	17,79702531	0,002921187
A:C	1	9120,25	9120,25	40,03282646	0,000226086

B:C	1	1187,4916	1187,4916	5,212427855	0,051822061
A:B:C	1	2199,61	2199,61	9,655064872	0,014505501
Residual	8	1822,5543	227,8192875		

A análise dos efeitos principais das variáveis de entrada mostra que o ângulo de saída da ferramenta de corte exerce o efeito mais significativo sobre a variável de resposta (Figura 4-24a). A variação deste fator a partir do nível baixo (-1, isto é, -20°) até ao nível alto (1, isto é, -5°) causa um aumento médio na rugosidade da superfície de 247,91 nm. Assim, o experimento mostrou que os valores mais baixos de ângulo de saída (valores mais negativos) proporcionam uma melhor qualidade de superfície, e este fator é muito mais relevante para a variável resposta (qualidade superficial) do que os outros fatores testados. Por outro lado, o efeito principal E_B (Tabela 4-8) demonstra que um aumento na taxa de avanço provoca uma diminuição da rugosidade da superfície. Em outras palavras, para a faixa de valores analisada, as taxas mais elevadas de avanço resultarão em uma melhor qualidade de superfície. Este resultado é interessante sob a perspectiva econômica, uma vez que maiores taxas de avanço também reduzem o tempo total de usinagem, aumentando a produtividade do processo. No terceiro gráfico da Figura 4-24, também é possível ver que um aumento na profundidade de corte resulta em uma maior rugosidade da superfície, no entanto, este efeito é muito menos importante do que o efeito principal do ângulo da ferramenta.

Como pode ser visto na Tabela 4-8, o efeito E_{AC} tem a maior amplitude em comparação com os outros efeitos de interação. Este efeito representa a interação entre o ângulo de ferramenta e a profundidade de corte. Na Figura 4.25 b), é também possível observar a diferença entre as inclinações de cada linha. Isto significa que o efeito da variação da profundidade de corte é diferente para cada nível do ângulo de ferramenta. Em outras palavras, para o nível (-1) do ângulo de ferramenta, o efeito da variação da profundidade de corte é muito mais significativo do que para o nível (+1) do ângulo de ferramenta. Por outro lado, a partir do quadro de ANOVA constata-se que, como os p -valores das interações entre a BC e ABC são maiores do que $\pm 1\%$, eles não são significativos para o experimento considerando-se um nível de significância de 99%. Os demais fatores e suas

respectivas interações são importantes para a construção de um modelo para explicar a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente (ou seja, a rugosidade da superfície) ao nível de significância mencionada. Estas são as principais conclusões que podem ser extraídas da Tabela 4.9 de análise de variância (ANOVA).

O elemento BC na tabela diz respeito à interação entre taxa de avanço e a profundidade do corte. Assim, é possível afirmar que o efeito da variação da taxa de avanço é aproximadamente o mesmo, independentemente do nível em que se encontra a profundidade de corte. Em resumo, existe uma interação significativa entre o ângulo de saída da ferramenta e a profundidade de corte (AC), mas não existe interação significativa entre o ângulo da taxa de alimentação e a profundidade de corte (BC). O valor da interação entre o ângulo da ferramenta e a velocidade de avanço (AB) é intermediário em comparação às demais interações entre dois fatores. Finalmente, a interação entre todos os fatores (ABC) também pode ser considerado não relevante, como já foi dito.

Além disso, é importante notar que a magnitude dos efeitos principais, em geral, é maior do que a magnitude dos efeitos de interação. No entanto, existe uma exceção para isso: o efeito da interação entre o ângulo de saída e a profundidade de corte (E_{AC}) é ligeiramente maior do que o efeito principal da profundidade de corte (E_C). Este aspecto sugere que, para se obter valores mais baixos de rugosidade superficial utilizando o torneamento de ultraprecisão, é mais benéfico aplicar uma profundidade de corte maior (nível +1) em combinação com um ângulo de saída mais negativo (nível -1) do que usar, por si só, uma profundidade de corte menor (nível -1).

Capítulo 5

5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi estudar a usinabilidade do vitrocerâmico ZERODUR[®] da Schott AG utilizando o torneamento de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta única. Para tanto, algumas condições de corte (variáveis de entrada) foram variadas com a finalidade de avaliar os efeitos provocados sobre a variável de resposta, ou seja, a qualidade superficial obtida na usinagem.

Não houve evidência de que o corte do material tenha ocorrido dentro do regime dúctil. Porém, a rugosidade superficial encontrada com a utilização de algumas combinações de parâmetros de corte sugere que o torneamento de ultraprecisão pode ser uma alternativa viável ao processo lapidação que antecede o polimento.

Quanto à influência dos fatores testados, com base nos levantamentos estatísticos, foi possível ver que o ângulo de saída da ferramenta de usinagem é o fator que mais afeta a rugosidade superficial da estrutura do material. Além disso, os resultados da ANOVA revelaram que a interação entre este ângulo e a profundidade de corte também deverá ser considerada, assim como a influência individual da taxa de avanço. Estes últimos aspectos, contudo, influenciam a resposta num grau muito menor do que o primeiro fator referido.

Para os intervalos de variação abordados no experimento, o ângulo de inclinação da ferramenta deve ser definido para o nível mais baixo (-20°), enquanto a profundidade de corte e a taxa de avanço devem ser definidas no nível mais alto ($0,4 \mu\text{m}$ e $0,3 \mu\text{m/rev}$, respectivamente), a fim de se alcançar valores mais baixos de rugosidade, ou seja, a fim de se conseguir uma melhor qualidade superficial.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este estudo foi exploratório. Deste modo, com base nestes resultados preliminares, experimentos adicionais podem ser realizados para mover os intervalos de variação investigados nas direções que causaram a melhora da qualidade superficial. Os experimentos indicaram que ângulos de saída mais negativos, taxas de avanço maiores e profundidades de corte maiores geraram melhores resultados. Assim, seria interessante investigar em novos experimentos a utilização de ângulos de saída ainda mais negativos, bem como profundidades de corte e taxas de avanço um pouco maiores.

Outras possibilidades de trabalhos futuros consistem em:

- Avaliar a influencia da geometria da ferramenta (variação do raio de ponta da ferramenta e perfil de ferramenta) na qualidade superficial e no modo de remoção do material;
- Realizar um estudo comparativo entre a retificação de ultraprecisão e o torneamento de ultraprecisão e avaliar as vantagens e desvantagens de cada método.
- Realisar estudos para verificar se existe recalque provocado pelo desgaste da aresta da ferramenta (arredondamento da aresta de corte) durante o processo de remoção do material. As taxas de avanço utilizadas neste tipo de material são muito pequenas e podem sofrer influências relacionadas a este fenômeno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACH, H.; KRAUSE, D. (2005). **Low thermal expansion glass ceramics**. 2thed. Berlin: Springer.

BELKHIR, N. et al. (2011). Characterization of glass surface damaged by alumina abrasive grains. **Journal of non-crystalline solids**, v.357, n.15, p.2882–2887.

BLAKE, P.N. (1988). **Ductile-regime machining of Ge and Si**. Thesis (PhD) - North Carolina State University, Raleigh, 1988.

BLACKLEY, W.S.; SCATTERGOOD, R.O. (1994). Chip topography for ductile-regime machining of germanium. **Journal of industrial engineering**, v.116, n.2, p.263-266.

BRINKSMEIER, E. et al. (2010). Ultra-precision grinding. **CIRP annals - manufacturing technology**, v.59, n.2, p.652–671.

CALLISTER JUNIOR, W.D. (2002). **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC.

CHAO, C. L. (1992). **Investigation on the machining of glasses and other normally brittle materials in the ductile regime**. 203 f. Thesis (PhD), Cranfield Institute of Technology. School of Industrial and Manufacturing Science.

COLAFEMINA, J.P. (2005). **Estudo da microusinabilidade do Ti (CP) e da Liga Ti-6Al-4V no torneamento com ferramenta de diamante**. 132f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DAO, M. et al. (2001). Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. **Acta Materialia**, v.49, n.19, p.3899-3918.

DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. (2007). **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicação e preparação das amostras: materiais poliméricos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS.

DOI, T.K.; KASAI, T.; TONSHOFF, H.K. (1999). Lapping and Polishing. In: **Handbook of ceramic grinding and polishing**. New Jersey: Noyes Publications. p.354-442.

DÖHRING, T. et al.(2009). Four decades of ZERODUR® mirror substrates for astronomy. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED OPTICAL MANUFACTURING AND TESTING TECHNOLOGIES: LARGE MIRRORS AND TELESCOPES, 4, 2009, Chengdu. **Anais...** Chengdu: [s.n.]

DÖHRING, T. et al. (2009). **Heritage of ZERODUR® Glass ceramic for space applications**. Marseille: The International Society for Optical Engineering. (Proceedings SPIE 7425).

DUDUCH, J.G. (1993). **Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials**. 191f. Theses (PhD) – Cranfield Institute of Technology, Bedford, 1993.

FERRARESI, D. (2009). **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 13 ed. 2009. São Paulo: Edgard Blücher.

GONÇALVES, A.M. (2009). **Usinabilidade do carbetto de tungstênio no torneamento com ferramenta de diamante**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GRANADO, R.M.; OLIVEIRA, R.A.; JASINEVISIUS, R.G. (2008). Caracterização óptica estrutural de superfícies geradas em polímeros óptico (PMMA) através de torneamento com ferramenta de diamante monocristalino. **Minerva**, v.5, n.1, p.105-110.

HORNE, D.F. (1982). **Optical production techonology**. 2th ed. S.I.: Taylor & Francis.

JASINEVICIUS, R.G. (1998). **Influência da transição de fase sobre os limites de ductibilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino**. 166p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

JASINEVICIUS, R.G. et al. (2009). Brittle and ductile removal modes observed during diamond turning of carbon nanotube composites. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part B-journal of engineering manufacture**, v.223, n.1, p.1-8.

KURT, N., HERTMANN, P., KLING, G., GATH, P., LUCARELLI, S., MESSERSCHMIDT, B. **ZERODUR® Glass Ceramics Design of Structure with High Mechanical Stresses**, Proc. of SPIE Vol. 7018 70180Q-1, 2012.

LI, Y. et al. (2011). Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts: Bound-abrasive grinding. **Applied surface science**, v.257, n.6, p. 2066–2073.

MATEUS, S. C. A. **Caracterização de Quartzos de Origem Pegmatítica para Utilização Industrial**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2008.

MEDEIROS, E.E.; DIAS, A.M.S.; MODENESI, P. (2006). Simulação numérica dos ensaios de indentação Vickers. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, São José dos Campos, 2006. **Anais...** São José dos Campos: [s.n.].

MONTEDO, O. R. K. **Projeto, Caracterização e Preparação de Camada de Proteção para Revestimento Cerâmico Constituída por Vitrocerâmico do Sistema LZSA**, Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MONTGOMERY, D.C. (2005). **A Design and analysis of experiments**. 6thed. New York: John Wiley.

NAKASUJI, T. et al. (1990). Diamond turning of brittle materials for optical components. **CIRP annals - manufacturing technology**, v.39, n.1, p.89-92.

OLDENDORF, W. **Basics of magnetic resonance imaging**, Martinus Nijhoff Publishing, Boston, 1988.

PAGOTTO, C.R. (1998). **Análise do processo de torneamento do silício policristalino**. 93p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PULECIO, S.A.R. (2010). **Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional: análise de unidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador**. 167f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RANK PNEUMO. **Catálogo técnico ASG 2500**. New Hampshire: Precision Park.

RANK PNEUMO Machining Systems Group.(1988). Recent Developments in the Generation of Glass Aspherical Surfaces. **Micromachining optical components and precision engineering**, v.1015, p.36-44.

RUSSELL, R. **OPTI521, ZERODUR**: The University of Arizona College of Optical Sciences. Tucson, AZ 85721, 2011.

SAITO, K. **Fracture Phenomena of High Polymers in Cutting**, Journal of Macromolecular Science, Part B, vol. 19, Iss. 3, 1981.

SCHOTT, Technical Information - advanced optics. TIE - 33: **Design strength of optical glass and ZERODUR®**. 2009. 10p. Disponível em:
<http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/community/technical-papers-and-tools/tie-33.html>. Acesso em 15 nov. 2010.

SCHOTT, Technical Information - advanced optics. TIE - 37: **Thermal expansion of ZERODUR®**. 2006a. 19p. Disponível em:
<http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/community/technical-papers-and-tools/tie-37.html>. Acesso em 14 nov. 2010.

SCHOTT, Technical Information - advanced optics. TIE - 44: **Processing of ZERODUR®**. 2006b. 11p. Disponível em:
<http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/community/technical-papers-and-tools/tie-44.html>. Acesso em 25 nov. 2010.

SHOTT, Catalog: **ZERODUR®, Zero Expansion Glass Ceramic**. 2011. Disponível em:
<www.us.schott.com/advanced_optics> Acesso em 18 out. 2011

SCHOTT, schott_zerodur_katalog_july_2011_en. **A Superlative High-Tech Material**. 2011. 24p. Disponível em:
<http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/index.html>. Acesso em 30 mar. 2012.

TONNELIER X., MORANTZ P., SHORE P., BALDWIN A., EVANS R., WALKER D. D. **Subsurface damage in precision ground ULE® and Zerodur® surfaces**", OPTICS EXPRESS 12197, Vol. 15, nº 19, 2007.

Usinagem de Ultraprecisão. Livro. Organizador: Artur José Vieira Porto – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2004.

VENKATESH, V. C., IZMAN, S. **Precision Engineering**, MacGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2007.

WASMER, K., BALLIF, C., GASSILLOUD, R., POUVREAU, C., RABE, R., MICHLER, J., BREGUET, J. M., SOLLETTI, J. M., KARIMI, A., SCHULZ, D. **Cleavage Fracture of Brittle Semiconductors From the Nanometer to the Centimeter Scale**, *Advanced Engineering Materials*, 2005, 7, n° 5.

WEI Y., HUTCHINSON J. W. **Hardness trends in micron scale indentation**, Elsevier, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 51 (2003) 2037–2056.

WESTERHOFF, T., SCHÄFER, M., THOMAS, A., WEISENBURGER, M., WERNER, T., WERZ, A. **Manufacturing of the ZERODUR® 1.5 m primary mirror for the solar telescope GREGOR as preparation of light weighting of blanks up to 4 m diameter**. 2010. Proc. of SPIE Vol. 7739 77390M-1.

YAGUO, L., NAN, Z., HAIBO, L., JING, H., XIANGYANG, L., XIANHUA, C., ZHIGANG, Y., ZHAOZHOU, G., JIAN, W., YINBIAO, G., QIAO, X. **Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts: Bound-abrasive grinding**, Elsevier, *Applied Surface Science* 257 (2011) 2066–2073.

YODEN, D. H. **The Design and Construction of a Sub-Microinch Resolution Lathe**, International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Technology, May 19-20, 1988. Aachen, Germany.

ZHANG, W.; SHU, J. (2009). Controlling subsurface damage in neodymium-doped phosphate glass. **International journal for light and electron optics**, v.120, n.15, p.752–757.

BIBLIOGRAFIA PESQUISADA

<http://www.schott.com/advanced_optics/english/our_products/zerodur/zerodur_k20.html>

<http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/our_products/zerodur/zerodur.html>

<<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/fundusinagem.asp>>

CARPINETTI, L. C. R., “Planejamento e Análise de Experimentos”, Serviço Gráfico – EESC – São Carlos, 2003.

K. L. Blaedel, J. S. Taylor, C. J. Evans, Ductile-regime grinding of brittle materials, in: S. Jahanmir, M. Ramulu, P. Koshy, Machining Ceramics Composites, Marcel Dekker, EUA (1999) Cap. 5.

PORTAL ACTION. Disponível em: < <http://www.portalaction.com.br/>>, Acessado em 20 de abr. 2013.

RUSSELL, R., “ZERODUR[®]“, OPTI 521-Synopsis of a technical paper, 2011.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – Sistema Integrado de Bibliotecas. Grupo Diteses, Diretrizes para Apresentação de Dissertações e teses da USP: documento eletrônico e impresso. São Paulo: SIBi-USP, 2009, 102 p.

ZERODUR[®]-Catalogo, “ZERODUR[®] Glass Ceramic - Temperature stable precision and quality in series”, disponível em: www.schott.com/advanced_optics. Acesso em: 05 mai. 2010.

ZILIO, S. C., “Desenho e Fabricação Óptica”. USP – Instituto de Física de São Carlos, Apostila 186 p. 2006.

APÊNDICE I

Programa básico para o experimento.

N01 G90 G71# (Transmit)

N02 G01# (Transmit)

N03 G94 M04 S1000# (Transmit)

N04 X(raio da peça + 0,5 mm) Z2 F0 M07# (Transmit)

N05 Z0 F100# (Transmit)

N10 X (Até o ponto desejado) Z0 F20# (Transmit)

N20 Z2 F400# (Transmit)

N30 X13 F0 M09# (Transmit)

N40 M02# (Transmit)

Obs.: Na linha N10 o ponto desejado era alterado a cada nova faixa.