



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**

Ana Cláudia Rodrigues

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO NO ACABAMENTO
SUPERFICIAL DE CERÂMICAS APLICADAS À BIOMATERIAIS**

Bauru, SP

2016

ANA CLÁUDIA RODRIGUES

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL
DE CERÂMICAS APLICADAS À BIOMATERIAIS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, no programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na Área de Processos de Fabricação, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Renato Foschini

Co-orientador: Prof. Dr. Thiago Valle França

Bauru, SP

2016

Rodrigues, Ana Cláudia.

Efeito dos parâmetros de retificação no acabamento superficial de cerâmicas aplicadas à biomateriais / Ana Cláudia Rodrigues, 2016. 75 f.

Orientador: Cesar Renato Foschini

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Alumina. 2. Cerâmica. 3. Retificação. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ANA CLÁUDIA RODRIGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 05 dias do mês de fevereiro do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ANA CLÁUDIA RODRIGUES, intitulada **EFEITO DOS PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE CERÂMICAS APLICADAS À BIOMATERIAIS**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI


Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus, que cumpriu as promessas feitas em minha vida, iluminando meus passos e me dando sabedoria para seguir em frente.

Dedico este trabalho também aos meus pais Antônio e Angélica, que sempre me deram apoio e estiveram presentes em todos os momentos, mesmo a alguns quilômetros de distância. E aos meus amigos que com toda paciência e atenção, fizeram as vezes dos meus pais, dando apoio e amparo sempre que necessário.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir subir mais este degrau, me dando forças para prosseguir, fé e acalento nos momentos difíceis encontrados no meio desta jornada.

Agradeço aos meus pais por ter me dado a oportunidade de continuar meus estudos, sempre me apoiando em todas as decisões não me deixando desanimar.

Sou grata também à Josiane Messa, uma vizinha e amiga, por sempre me aconselhar e sempre estar presente em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Renato Foschini e ao meu co-orientador Prof. Dr. Thiago Valle França por confiar em mim e me dar essa oportunidade, uma área nova e desconhecida, que com calma e paciência me ajudaram e ensinaram tudo o que foi necessário para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos meus amigos que sempre se fizeram presentes me ajudando, aconselhando e apoiando em todos os momentos. Em especial sou imensamente grata a Rebeca Mantovaneli, Leonardo Bezerra, Guilherme Gonçalves, Bruno Hernandez, Lieca Lie, Alexander Paterno, João Paulo Freitas, Renan Franco, Fábio Trawisk, Otavio Ferrarini, Julio Cesar, Pedro Cleto, Felipe Pires e Isabela Fracarolli dentre outros amigos não menos importantes que sempre estiveram presentes em toda jornada.

Agradeço a empresa Jacto/Unipac, a empresa CoorsTek, a empresa ATF soluções - Master Chemical Corp, por apoiar este projeto com peças e fluido lubri-refrigerante para que os ensaios pudessem ser realizados.

Sou grata ao programa de Pós-graduação em Materiais - PosMat por abrir as portas dos laboratórios para que pudesse realizar ensaios de caracterização em minhas amostras.

Agradeço a todos os professores, funcionários e alunos do Departamento de Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Engenharia Elétrica e da equipe técnica da Pós-graduação

em Engenharia Mecânica que sempre estiveram de prontidão e nunca mediram esforços para me ajudar.

E finalmente agradeço a CAPES pelo apoio e financiamento mediante concessão da bolsa de mestrado.

“Tenho a impressão de ter sido uma criancinha brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.”

Isaac Newton

Rodrigues, A. C. **Efeito dos Parâmetros de Retificação no Acabamento Superficial de Cerâmicas Aplicadas à Biomateriais**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2016.

RESUMO

As cerâmicas avançadas apresentam uma ampla aplicação, desde componentes para a indústria eletrônica até implantes e próteses. Nas últimas décadas a biocerâmica vem chamando atenção como próteses ósseas e implantes dentários, pois pode ser um material bioinerte, bioativo, apresentar boa biocompatibilidade, além de alta resistência à compressão. Neste trabalho, estudou-se o efeito dos parâmetros de retificação por meio da análise do acabamento superficial em cerâmicas de alumina comercial e de alta alumina preparadas com três granulometrias diferentes. Para a alumina comercial os parâmetros de retificação variados foram profundidades de corte (sendo sete valores) e a velocidade da peça (58 mm/s e 125 mm/s). Os resultados obtidos de medidas de rugosidade da superfície retificada mostraram melhores resultados de rugosidade quando as peças foram submetidas às profundidades de 50 μm e 105 μm e com a velocidade de 125 mm/s, este fato pode estar associado a um menor dano superficial gerado durante o processo de retificação. Entretanto, quando a profundidade de corte foi elevada até 350 μm para ambas as velocidades, existiu um aumento substancial da rugosidade, isso pode estar relacionado a defeitos superficiais irreparáveis como trincas e arrancamentos de aglomerados de grão. Para a cerâmica de alta alumina os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, os parâmetros de retificação variados foram velocidade da peça (55 mm/s e 250 mm/s) e a profundidade de corte (5 μm e 60 μm). Além dos parâmetros variados, empregaram-se dois tipos de refrigeração convencional e MQL (mínima quantidade de lubrificante). Os resultados obtidos das medidas de rugosidade da superfície retificada e dos dados estatísticos, mostraram que houve uma redução na rugosidade das peças com granulometria média e fina quando se utilizou a refrigeração MQL. As cerâmicas de granulometria fina retificadas com velocidade de 55 mm/s e profundidade de 60 μm apresentaram rugosidade inferior a 0,28 μm usando o sistema de refrigeração MQL. Porém quando retificadas em velocidades maiores utilizando MQL as cerâmicas de granulometria mais fina apresentaram um aumento nos valores de rugosidade. Na segunda etapa foram utilizadas as mesmas velocidades para a mesa, a profundidade de corte além das já utilizadas na primeira parte foi acrescentada mais uma de 110 μm e foi usado apenas o

fluido convencional. Foi possível observar que houve um comportamento linear para as três profundidades de corte e que os grãos se comportaram de acordo com sua granulometria, ou seja, o grão grosso apresentou maior rugosidade que o grão mais fino. Independentemente das profundidades de corte ou velocidades da mesa, as cerâmicas fabricadas com grãos de menor granulometria apresentaram sempre a menor rugosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Alumina, Cerâmica, Retificação.

Rodrigues, A. C **Effect of Grinding Parameters on Surface Finishing Ceramics Applied to Biomaterials**. Master of Science Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) – Engineering College of Bauru, Post-Graduating Program, São Paulo State University, 2016.

ABSTRACT

Advanced ceramics have a wide application, from electronics components to implants and prostheses. In the recent decades, bioceramic has been drawing attention as bone prostheses and as in dental implants, because this kind of material is bioinert, bioactive and can show good biocompatibility, as well as high compressive strength. In this present assignment, it was studied the grinding parameters effects through the analysis of the superficial finishing in commercial alumina and high alumina ceramics prepared with three different particle size. For commercial alumina, the grinding parameters varied between depth of cut (seven different values) and workpiece speed (55 mm/s e 125 mm/s). The results obtained through roughness measures of the grinded surfaces showed better results when the workpieces were submitted to 50 μm and 105 μm depth and 125 mm/s speed, this fact can be associated with a smaller superficial damage generated in the grinding process. However, when the depth of cut was high to 350 μm for both speeds, there was a substantial rise in the roughness, which can be associated to irreparable superficial defects such as cracks and pull-outs of grain agglomerate. For high alumina ceramics the tests were split in two parts: part A and part B. In part A, the variable grinding parameters were workpiece speed (55 mm/s e 250 mm/s) and depth of cut (5 μm e 60 μm). Besides the varied parameters, two types of refrigeration were used, the conventional and the MQL (Minimum Quantity of Lubricant). The results obtained through roughness measures of the grinding surface as well as from statistics data show that there was a reduction on the roughness of the medium and thin particle size workpieces when the MQL refrigeration was used. The thin particle size ceramics were grinded with 55 mm/s speed and 60 μm depth and showed roughness below 0,28 μm , using the MQL system. For part B, it were used the same speeds for workpiece, depth of cut, and besides that, it was added another one of 110 μm , using the conventional fluid It was observed that there was a linear behavior for the three depths of cut and the grain behave according to their particle size, i.e., the coarse showed a higher surface roughness than the finer grain. Apart of the cut depths and workpiece speeds, the ceramics fabricated with smaller particle size grains always showed the smallest roughness.

Keywords: Alumina, ceramic, grinding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação da resistência de união interfacial de titânio poroso com e sem revestimento de HA. (HENCH, 1998).

Figura 2 – Estágios de sinterização de uma cerâmica, (a) partículas de pó após a prensagem, (b) coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início. (c) à medida que o processo de sinterização avança os poros mudam de tamanho e forma.

Figura 3 – Classificação dos fluidos de corte. (DINIZ *et al.*, 2010).

Figura 4 – Formação de zona plástica causada pelo riscamento do grão abrasivo contra a peça e a formação de trincas. (MALKIN *et.al.*,1996).

Figura 5 – Tensões causadas na cerâmica durante a retificação. (MARINESCU *et al.*, 2007).

Figura 6 – Representação da medida de rugosidade Ra. (FILHO, 2011).

Figura 7 – Representação da medida de rugosidade Ry. (FILHO, 2011).

Figura 8 – Representação de imagens formadas no microscópio óptico confocal, sendo a figura (a) imagem 3D, figura (b) imagem 2D e imagem (c) gráfico da rugosidade superficial da amostra no ponto desejado.

Figura 9 – Rebolo diamantado com liga resinoide.

Figura 10 – Dressador conglomerado usado para dressagem do rebolo.

Figura 11– Imagem da retificação plana no sentido longitudinal e seus componentes.

Figura 12 – Fluxograma de ensaios.

Figura 13 – Fluxograma de ensaios parte A.

Figura 14 – Fluxograma de ensaios parte B.

Figura 15 – Espessura equivalente de corte x profundidade de corte.

Figura 16 – Rugosidade das peças de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Figura 17 – Tela de aquisição para observar o perfil da amostra com profundidade de corte de 350 μm para um V_w de 125 mm/s.

Figura 18 – Gráfico da média da rugosidade RMS para as amostras de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Figura 19 – Gráfico da média da rugosidade Ra para as amostras de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Figura 20 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 50 μm para velocidade de 58 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

Figura 21 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 50 μm para velocidade de 125 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

Figura 22 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 350 μm para velocidade de 58 mm/s, (a) aumento de 100x, (b) aumento de 1000x.

Figura 23 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 350 μm para velocidade de 125 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

Figura 24 – Espessura equivalente de corte x profundidade de corte.

Figura 25 – Rugosidade versus profundidade de corte para velocidade de 55 mm/s.

Figura 26 – Rugosidade versus profundidade de corte para velocidade de 240 mm/s.

Figura 27 – Efeitos principais para a rugosidade para cerâmicas de grão grosso, médio e fino.

Figura 28 – Diagrama de Pareto para as cerâmicas de grão grosso, médio e fino.

Figura 29 – Rugosidade versus profundidade de corte.

Figura 30 – Rugosidade versus profundidade de corte.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de alguns materiais de implantes. (PICONI *et al.*, 1997; HENCH, 2008)

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas da Alumina. (PARK, 2008)

Tabela 3 – Composição da Alumina.

Tabela 4 – Profundidade de corte, taxa específica de remoção de corte e espessura equivalente de corte.

Tabela 5 – Dados da rugosidade coletados por meio do rugosímetro portátil.

Tabela 6 – Medidas de rugosidade RMS coletados no confocal.

Tabela 7 – Medidas de rugosidade Ra coletados no confocal.

Tabela 8 – Valores de profundidade de corte, taxa específica de remoção de corte e espessura equivalente de corte para velocidade da peça em 55 mm/s e 240 mm/s.

Tabela 9 – Média de rugosidade para as cerâmicas de alta alumina.

Tabela 10 – Dados de rugosidade com repetibilidade.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a_p – Profundidade de corte (μm)

HA – Hidroxiapatita

h_{eq} – Espessura equivalente de corte (μm)

l_m – comprimento de medição (mm)

MQL – Mínima quantidade de lubrificante

Q_w' – Taxa de remoção específica de corte ($\text{mm}^3/\text{mm.s}$)

R_a – Rugosidade média aritmética (μm)

RMS – Rugosidade quadrática média (μm)

R_y – Rugosidade máxima (μm)

R_t – Rugosidade total (μm)

V_w – Velocidade da peça (m/s)

V_s – Velocidade do rebolo (m/s)

Z_i – Rugosidade parcial (μm)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVO.....	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Cerâmicas	20
3.2	Biocerâmicas	21
3.3	Alumina	24
3.4	Processamento cerâmico.....	26
3.4.1	Processamento do pó	27
3.4.2	Processo de conformação	28
3.4.3	Sinterização	30
3.5	Processo de retificação	31
3.5.1	Rebolo.....	32
3.5.2	Perfilamento e Avivamento	33
3.5.3	Refrigeração.....	35
3.5.4	Mecanismos de remoção de material.....	36
3.5.5	Parâmetros de retificação.....	39
3.5.6	Rugosidade	40
3.6	Técnicas de caracterização	42
3.6.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	42
3.6.2	Microscópio óptico confocal	42
4.	METODOLOGIA.....	44
4.1	Ferramenta de corte utilizada.....	44
4.2	Perfilamento e avivamento do rebolo	45
4.3	Equipamentos utilizados.....	46
4.4	Etapa 1 – Cerâmicas de alumina Jacto/Unipac.....	46
4.4.1	Procedimentos executados nos ensaios	47
4.4.2	Medição de rugosidade	48
4.4.3	Caracterização da superfície através de microscopia óptica confocal e MEV	48
4.5	Etapa 2 – Cerâmica de alta – alumina CoorsTek.....	49
4.5.1	Parte A	50
4.5.2	Parte B	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1	Etapa 1 – Cerâmicas de alumina Jacto/Unipac.....	51

5.1.1	Rugosidade	53
5.1.2	Microscopia óptica confocal.....	54
5.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	57
5.2	Etapa 2 – Cerâmicas de alta - alumina CoorsTek.....	60
5.2.1	Parte A	61
5.2.2	Parte B	67
6.	CONCLUSÕES.....	68
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

As cerâmicas de engenharia, ou cerâmicas avançadas, são bastante utilizadas em diversas aplicações industriais devido a algumas de suas ótimas propriedades, tais como: alta resistência térmica, dureza, resistência ao desgaste, inércia química, estabilidade térmica, além da sua alta relação rigidez-peso (EMAMI *et al.*, 2013).

Cerâmicas avançadas estão ligadas à tecnologia de ponta, tendo propriedades elétricas, magnéticas e ópticas muito particulares. Esses materiais são amplamente utilizados em sistemas de comunicação por fibras óticas, sistemas micro eletromecânicos, como rolamentos de esferas, em aplicações que exploram o comportamento piezelétrico e em aplicações como biomateriais (CALLISTER, 2012).

Os biomateriais são definidos como materiais naturais ou sintéticos adequados para a introdução em tecidos vivos, especialmente como parte de um dispositivo médico. Considerando essas definições, é possível argumentar que a cerâmica tem sido usada como biomateriais há milênios (CHEVALIER *et al.*, 2008).

As biocerâmicas fazem parte da classe das cerâmicas avançadas, esta por sua vez vem ganhando espaço no mercado de implantes devido suas excelentes propriedades mecânicas e excelente biocompatibilidade. Além de ser menos prejudicial ao corpo quando exposto por longos períodos, diferente dos metais que podem causar mal de Alzheimer. O implante biocerâmico apresenta um tempo de vida do implante muito maior, evitando possíveis transtornos ao paciente.

É necessário ter uma interface estável entre o tecido hospedeiro vivo e material implantado para a sobrevivência de uma biocerâmica. A fixação do tecido está totalmente relacionada com o tipo de resposta tecido-implante (HENCH, 2013).

Existe a possibilidade de poder ser fabricado implantes cerâmicos densos ou porosos. Esta escolha depende do local onde será colocado este biomaterial, cerâmicas densas usualmente são implantadas em locais onde existe uma sobrecarga maior como, por exemplo, implantes para fêmur, quadril, joelho.

A utilização de materiais cerâmicos como implantes existe há milênios, estudos relatam a presença de nácar substituindo dentes perdidos com mais de 4000 anos de idade. (CHEVALIER *et al.*, 2009)

O processo de fabricação em cerâmicas avançadas é mais rigoroso, e o grau de pureza da sua matéria prima é altamente elevado, uma vez que sua aplicação requer melhores

propriedades mecânicas. Esse processo consiste em síntese do pó, conformação, sinterização e muitas vezes, usinagem (ALVES *et al.*, 2010).

As propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos determinam suas limitações para aplicações estruturais onde este material estará submetido a um carregamento mecânico. As cerâmicas apresentam propriedades mecânicas particulares quando comparadas com outros grupos de materiais, devido ao tipo de ligação química presente (ORÉFICE *et al.*, 2008).

Porém o sucesso da cerâmica na maioria das aplicações depende não somente das propriedades do material e do projeto da peça, mas também da qualidade do produto usinado, em termos de acabamento superficial, tensões residuais e defeitos (FUJITA, 2007).

A retificação é um processo de remoção de material onde os grãos abrasivos estão presos a um rebolo. Os mecanismos de remoção de material em desgaste abrasivo e retificação de cerâmica têm sido descritos, por analogia com o tipo de danos produzidos pela indentação. O processo de retificação produz trincas médias superficiais e subsuperficiais e trincas laterais que são paralelas à superfície, causando danos influenciando diretamente nas propriedades mecânicas da peça (XU *et al.* 1995).

A microestrutura desempenha um papel significativo no controle das propriedades mecânicas e usinabilidade de cerâmica. Em alumina, por exemplo, tem sido demonstrado que a tenacidade à fratura, medida em amostras contendo longas trincas da ordem de milímetros, aumenta à medida que o tamanho do grão aumenta; mas para um tamanho de trinca da ordem de um tamanho de grão, a resistência diminui. Aumentando o tamanho de grão de alumina também melhora a sua usinabilidade. Por exemplo, a mesma profundidade de corte, a força normal de retificação de uma alumina de grãos grosseiros é apenas um terço do que de uma alumina de grãos finos (DONGKUN *et al.*, 2014; XU *et al.* 1995).

2. OBJETIVO

Cerâmicas apresentam uma vasta aplicação como enunciado no item anterior. Entretanto, apresentam alta fragilidade. O objetivo deste trabalho foi realizar a retificação de cerâmicas de alumina e de alta alumina, onde os parâmetros de usinagem foram variados, ou seja, houve variação da profundidade de corte, velocidade da peça e para o caso da cerâmica de alta alumina houve a variação de fluido lubri-refrigerante, a fim de observar qual o dano causado na superfície final da cerâmica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada a revisão bibliográfica, onde a mesma está dividida em seis principais tópicos utilizados durante os estudos para a realização desse trabalho.

3.1 Cerâmicas

Materiais cerâmicos apesar da sua elevada fragilidade são candidatos atrativos para algumas aplicações, pois apresentam excelentes propriedades mecânicas e um desempenho excepcional (ZHANG *et al.*, 2014, ZHENG *et al.*, 2015).

Os materiais cerâmicos são compostos formados entre elementos metálicos e não metálicos; na maioria das vezes são óxidos, nitretos e carbetos, em suma os materiais cerâmicos são considerados não metálicos e inorgânicos podendo ser subdivididos em duas grandes classes: as cerâmicas tradicionais que são os vidros, porcelanas, tijolos, abrasivos; e as cerâmicas avançadas que são as cerâmicas eletrônicas, refratários avançados, biocerâmicas (CALLISTER *et al.*, 2012).

Quando se trata das estruturas cristalinas dos materiais cerâmicos, este possui uma estrutura pouco simétrica quando comparado à estrutura dos metais. As estruturas cristalinas são formadas a partir de ligações covalentes, ligações iônicas e interações de ambas (OIKAWA *et al.*, 2011).

As ligações covalentes são quem regem o comportamento mecânico da cerâmica, ou seja, dureza, módulo de elasticidade, temperatura de fusão dentre outros. As cerâmicas com ligação covalente são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, apresentando assim alta dureza e rigidez, um exemplo de cerâmica com ligação covalente é a alumina (OIKAWA *et al.*, 2011).

Apesar das excelentes propriedades mecânicas, esse material apresenta baixa ductilidade, sendo em geral frágil. Essa fragilidade está relacionada com sua capacidade de se deformar plasticamente, isso ocorre, pois a cerâmica apresenta uma estrutura cristalina pouco simétrica mesmo com o aumento de temperatura próximo ao ponto de fusão não resulta na ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias. Assim, há pouca deformação plástica e a elevada dureza persiste mesmo em altas temperaturas, ao contrário dos metais. Quando ocorre a deformação plástica em cerâmicas, normalmente ela é seguida de uma trinca ou um rompimento (ORÉFICE *et al.*, 2008; OIKAWA *et al.*, 2011).

Em cerâmicas avançadas o processo de fabricação é mais rigoroso e o grau de pureza da sua matéria prima é altamente elevado, uma vez que sua aplicação almeja melhores

propriedades mecânicas, nesta classe têm-se as biocerâmicas, por exemplo, uma cerâmica que exige um alto grau de resistência à tração, à compressão e elevada dureza.

3.2 Biocerâmicas

As biocerâmicas vêm sendo estudadas desde o século XVIII com o uso de porcelanas para coroas dentárias, na década de 20 houve o uso de gesso na ortopedia como preenchimento ósseo, mas devido sua fragilidade e baixa resistência ao desgaste não obteve sucesso clínico (CHEVALIER *et al.*, 2009).

Para obter sucesso clínico almejado, fora necessário criar um material que apresentasse simultaneamente interface estável com tecido conjuntivo e um bom comportamento mecânico do implante com o tecido (HENCH, 1998).

A primeira biocerâmica implantada e patenteada data do ano de 1965, sua aplicação foi como próteses totais de quadris, mas esta prótese ainda não satisfazia as necessidades, havia necessidade de um biomaterial mais estável. Na década de 70 surgiu um novo conceito que propunha uma nova maneira de se estabelecer a definição de biocompatibilidade dando origem a uma nova classe de biomateriais: os materiais bioativos. Este novo conceito foi baseado na procura de materiais idealmente dominados inertes, não apresentando respostas inflamatórias ou infecciosas no local do implante (ORÉFICE *et al.*, 2008; PARK, 2008).

Os biomateriais desse novo conceito foram produzidos propondo uma nova compreensão de biocompatibilidade, gerando melhores próteses e a interface desejada, esses biomateriais foram classificados em: materiais bioinertes, que são ignorados pelos tecidos vizinhos diminuindo assim a probabilidade inflamatória; e bioativa, que apresenta a função de provocar resposta biológica específica na interface com o tecido, normalmente para confecção desse implante utiliza-se hidroxiapatita (HA), pois suas composições estão próximas da parte mineral do osso, oferecendo uma interface estável para a fixação. A ideia do conceito foi dada por Larry Hench. Um exemplo de material bioativo são as cerâmicas bioativas densas (HENCH, 1998; ORÉFICE *et al.*, 2008; BASU *et al.*, 2009; CHEVALIER *et al.*, 2009).

Segundo HENCH, 1998, não existe nenhum material implantado em tecidos vivos que seja totalmente inerte ao organismo, este por sua vez sempre causará alguma reação com o tecido (por mínima que seja). No entanto, cerâmicas avançadas e vidros podem promover uma melhor adesão (CHEVALIER *et al.*, 2009).

Os tipos mais comuns e prováveis de respostas biológicas entre tecido e implante são:

a) Quando o material for tóxico, o tecido vizinho morre;

- b) Se o material for não tóxico, e dissolve ou é decomposto, o tecido vizinho o substitui, exemplo disso, são os materiais biodegradáveis e reabsorvíveis (cerâmicas reabsorvíveis são o fosfato tri cálcio e vidro cerâmico);
- c) Se o material for não tóxico e biologicamente inativo (quase inerte) uma cápsula fibrosa de espessura variável se forma em torno do implante, não apresentando mudanças químicas acentuadas no meio fisiológico sendo considerado bioinerte, exemplos desses materiais são óxidos de Al, Ti, Zr e materiais à base de carbono, metais como titânio, polímeros como silicone;
- d) Caso o material seja não tóxico e biologicamente ativo, forma-se uma ligação interfacial. Esses materiais induzem uma atividade biológica específica levando à formação de uma interface contínua entre o tecido e o material implantado, exemplos são as cerâmicas que levam hidroxiapatita em sua composição, vidros e vitrocerâmicas bioativos.

Sendo assim pode-se notar que a bioatividade é a capacidade de um material provocar a formação de uma ligação interfacial entre tecidos vivos e o material implantado, sem formação de uma cápsula fibrosa (ORÉFICE *et al.*,2008).

Além da nova compreensão de biocompatibilidade, houve estudos com relação ao tipo de fixação tecido-implante, onde pode ocorrer tanto em materiais bioativos, quanto em materiais bioinertes, sendo elas: a fixação morfológica, onde o implante é fixado devido ao crescimento tecidual nas irregularidades superficiais, ocorre em cerâmicas não porosas; a fixação biológica, onde o tecido cresce entre os poros, ocorre em cerâmicas inertes e porosas, a fixação biológica é capaz de resistir a estados de tensão mais complexos do que os implantes que atingem apenas fixação morfológica (HENCH, 1998); e a fixação bioativa cujo material se fixa através da formação de uma interface contínua com o tecido, ocorre para cerâmicas bioativas densas (ORÉFICE *et al.*,2008).

A interface e fixação gerada entre tecido-implante apresenta um papel muito importante para o desempenho dos implantes. O nível de reação química do implante influencia na espessura da camada interfacial entre o material e o tecido, uma análise feita nos materiais implantados mostrou que pode existir uma falha nessa interface. Quando os materiais são inertes ou quase inertes, a interface não é biologicamente ligada, há um movimento relativo e o progressivo desenvolvimento de uma cápsula de tecido fibroso não aderente, tanto em tecidos duros quanto moles. Esse movimento leva a deterioração das funções do implante ou do tecido na interface. A espessura da cápsula varia de acordo com o material e da quantidade de movimento relativo (ORÉFICE *et al.*,2008; CHEVALIER *et al.*,2009).

A alumina ou o titânio de grau médio apresentam uma cápsula de tecido fibroso bem fino, logo quando esses materiais são implantados, porém com um bom contato mecânico o sucesso clínico é muito promissor (ORÉFICE *et al.*, 2008).

As biocerâmicas em geral podem ser porosas ou densas, o uso de cada uma delas vai depender de sua aplicação e do tipo de resposta biológica necessária. Se a cerâmica for porosa ela não poderá ser utilizada como prótese de fêmur, por exemplo, pois seus poros podem propiciar a redução na resistência mecânica acarretando trincas e desgaste excessivo.

Quando porosas, as cerâmicas devem ter poros interconectados com um tamanho suficiente para que possam ali se hospedar os componentes celulares e extracelulares dos ossos, além de vasos sanguíneos, permitindo o crescimento do tecido e assim realizando a fixação biológica. Normalmente, são utilizados revestimentos de hidroxiapatita (HA) como uma alternativa para consolidar a fixação, ocorrendo uma fixação bioativa, a Figura 1 mostra a taxa de crescimento do osso para dentro da camada porosa é acelerada pela cerâmica bioativa HA, e a força da interface osso-implante também melhoram (HENCH, 1998; HING, 2005; ORÉFICE *et al.*, 2008).

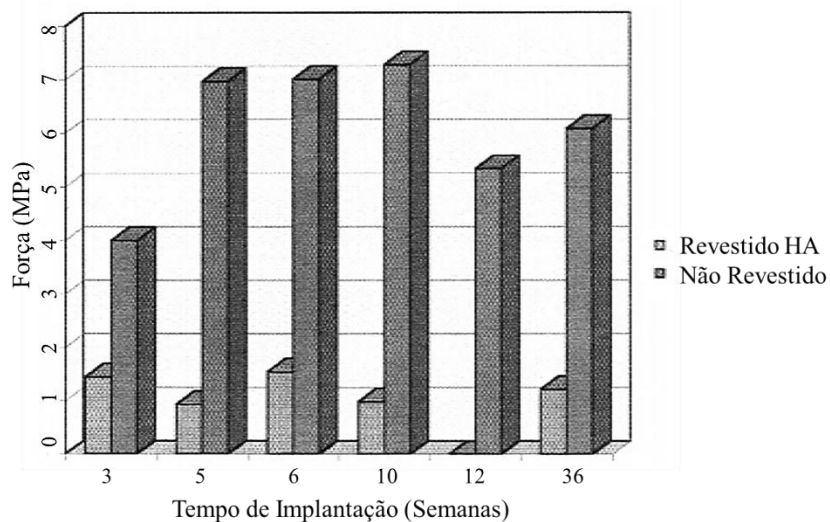


Figura 1 – Comparação da resistência de união interfacial de titânio poroso com e sem revestimento de HA (HENCH, 1998).

O tamanho do poro de um material implantado governa o comportamento de crescimento interno do tecido podendo ter macroporosidade e microporosidade e assim tendo influência direta sobre a formação do tecido ósseo. O osso humano se apresenta de duas formas, o osso cortical e o osso esponjoso. O osso cortical apresenta poros com diâmetro médio de 190 a 230 μm , já o osso esponjoso apresenta uma rede de poros interconectados de

500 a 600 μm de diâmetro. Para as cerâmicas o tamanho mínimo dos poros deve ter 100 μm , quando os poros são maiores que 200 μm ocorrem uma eficaz osseocondução (HING, 2005; ORÉFICE *et al.*, 2008).

Segundo HENCH (1998), a limitação associada a implantes porosos é que, para o tecido permanecer saudável, os poros devem estar entre 100-150 μm de diâmetro.

Aplicações clínicas de cerâmicas porosas envolvem o uso como recobrimentos porosos em implantes metálicos, e uso de monólitos porosos para preenchimento de defeitos ósseos em geral.

O tempo de vida de uma biocerâmica implantada varia de acordo com as condições estruturais da peça ou das condições do local implantado, mas pode chegar até 30 anos, diferente dos metais que de tempos em tempos o paciente deve realizar a troca e também, os danos à saúde (como mal de Alzheimer e radiação, por exemplo) quando a prótese é de cerâmica são quase mínimos devido à mínima liberação de íons (AZA *et al.*, 2002).

Além de todas as preocupações existentes quanto sua biocompatibilidade, tempo de vida, porosidade e fixação, existe a preocupação quanto à resistência mecânica das cerâmicas. A Tabela 1 a seguir faz uma comparação das propriedades mecânicas dos principais materiais utilizados como implantes.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de alguns materiais de implantes (PICONI *et al.*, 1997; HENCH, 2008).

	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência (MPa)	Dureza (HV)
Aço Inox 316	200	650	190
Y - TZP	210	900 – 1200	1200
Alumina	380	4100	2200
Osso cortical	7 – 30	50 – 150	-

3.3 Alumina

A alumina (Al_2O_3) é uma cerâmica que apresenta uma vasta aplicação. Dentre elas, a estudada neste trabalho é a biocerâmica de alumina, utilizada em implantes ósseos e dentários.

Os primeiros estudos desse material datam do ano de 1907, quando foi concedida uma patente para o refino de cerâmica. Já a comercialização de produtos feitos de óxido de alumínio veio na década de 1920 e 30 (WACHTMAN *et al.*, 2009).

A primeira biocerâmica de alumina aplicada e patenteada foi no ano de 1965, esta por sua vez fora utilizada como prótese total de quadril e implantes dentários, devido sua

excelente biocompatibilidade com os tecidos, resistência à corrosão e estabilidade mecânica (HENCH, 1998; CHEVALIER *et al.*, 2009).

A biocerâmica de alumina é composta por três gerações, a primeira foi utilizada em 1965, que foram as bioinertes, entretanto estas apresentaram uma alta taxa de fraturas. A segunda geração foi desenvolvida no final de 1980, as cerâmicas bioativas, apresentando grãos menores e maior densidade com uma taxa de falha menor que 5%, e a terceira geração de alumina apresentam sistemas funcionais (regeneração óssea – Osseointegração) data do ano 2000, sendo elas microestruturadas mais finas apresentando melhores propriedades mecânicas (ORÉFICE *et al.*, 2008).

A maior parte da alumina utilizada para fabricação de implantes ou é policristalina sólida de alta densidade e pureza ou composta por um monocristal incolor crescido artificialmente semelhante à safira ou rubi, entretanto esse monocristal apresenta elevado custo para fabricação, inviabilizando sua utilização (WACHTMAN *et al.*, 2009).

A Tabela 2 mostra os valores das propriedades mecânicas da alumina tanto na forma policristalina quanto na forma de monocristal e já transformada em safira, os dados obtidos segundo PARK, 2008, são valores típicos de um implante de alumina de alta pureza.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas da Alumina (PARK, 2008).

Propriedades	Materiais	Valores
Resistência à Flexão (MPa)	Safira	496 – 703
	Policristalina	241 – 482
Resistência à Compressão (MPa)	Safira	3055 – 3413
	Policristalina	2069 – 3861
Resistência à Tração (MPa)	Monocristalinas	490
	Policristalina	259
Módulo Elástico (GPa)	Monocristalina	362,7
	Policristalina	408,9
Coefficiente de Poisson	Safira	0,257
	Policristalina	0,32

Comercialmente a alumina pura contém 99,5 a 99,6% de Al_2O_3 , 0,06 a 0,02% de SiO_2 , 0,03 a 0,06% de Fe_2O_3 e 0,04 a 0,20% de Na_2O , densidade de 3,65 a 3,9 g/cm^3 . Segundo a ASTM, a alumina pura deve ter 99,5% de Al_2O_3 e menos de 0,1% de SiO_2 combinado com óxidos alcalinos (principalmente Na_2O) (PARK, 2008).

O tamanho de grão de uma cerâmica de alumina deve permanecer em no máximo $4\mu\text{m}$ e a cerâmica ter um grau de pureza maior que 99,7%, exibindo assim uma boa resistência à flexão e excelente resistência à compressão. Um aumento no tamanho do grão par $7\mu\text{m}$ pode levar a uma diminuição das propriedades mecânicas em cerca de 20%, pois ocorre um maior desgaste devido ao atrito (HENCH, 1998).

Por se obter uma biocerâmica com microestrutura fina, pode-se acrescentar um pouco de óxido de magnésio (menor que 0,5%) que auxilia sua sinterização e limita o crescimento dos grãos.

Testes estatísticos e experimentais são feitos para estimar o tempo de vida de uma cerâmica implantada. Os testes experimentais se baseiam em resistência à flexão desse material e ao seu ambiente de implantação. Resultados mostram que para uma carga de 12000 N ou 12 MPa, a cerâmica pode sobreviver 30 anos implantada, e que 1 a cada 100 implantes apresentaram falhas (HENCH, 2013).

Devido ao sucesso clínico desse material, desde o ano de 1990 cerca de 3,5 milhões de aluminas foram implantadas no mundo. As formas mais comuns de implantes são as próteses totais de quadris e joelhos (CHEVALIER *et al.*, 2009, HENCH, 2013).

3.4 Processamento cerâmico

O processamento cerâmico pode ser considerado como uma sequência de operações que transformam as matérias-primas por meio de um número de estágios intermediários até a obtenção do produto final (MESQUITA *et al.*, 2003; KOSHIMIZU, 2008).

Materiais cerâmicos cristalinos são fabricados em uma forma específica a partir da preparação de um compacto, a partir da matéria-prima na forma de pó ou grânulos, que são posteriormente ligados por meio de um tratamento térmico necessário para se desenvolver a estrutura e propriedades desejadas (ORÉFICE *et al.*, 2008).

Para gerar a cerâmica são necessárias três etapas principais: preparação do pó, conformação e queima (sinterização).

As matérias-primas utilizadas na fabricação de cerâmicas podem ser naturais ou produtos químicos inorgânicos sintetizados por uma rota específica. Para fabricação de cerâmicas avançadas, é necessário uma elevada pureza e controle (ORÉFICE *et al.*, 2008).

Além da composição química e do nível de pureza do pó, características físicas, como por exemplo, o tamanho de partículas e a distribuição de tamanho, devem ser controlados, pois afetam tanto o processamento quanto as propriedades finais do material (REGIANI, 1997).

O processamento é feito a partir da mistura de um ou mais tipos de matérias-primas, líquidos e aditivos. O material iniciado deve ser beneficiado quimicamente e fisicamente por processos como: moagem, trituração, lavagem, dissolução dentre outros (ORÉFICE *et al.*, 2008).

Os aditivos podem ser adicionados dependendo do processo de conformação a ser usado, tendo diferentes funções, como o controle de dispersão das partículas, ação como ligante entre as partículas visando o aumento da resistência do corpo verde, conferir plasticidade ao sistema de partículas, conferir efeitos de cor e translucidez (ORÉFICE *et al.*, 2008).

3.4.1 Processamento do pó

Para o processamento, a caracterização precisa do material é essencial, do ponto de vista da qualidade, porque qualquer variação na mistura dos aditivos provocará variações severas ao produto final. O nome da técnica usada para fazer o processamento do pó é chamado moagem (WOLF, 1995).

Existem vários tipos de moagem usados para cerâmica, porém três são mais utilizados: moagem em jarros, a vibratória e a por atrito. Usando elementos de moagem cilíndricos ou esféricos (REGIANI, 1997).

Na moagem esférica, normalmente mais usada em moinhos de jarros, existe apenas um ponto de contato entre a esfera e a partícula a ser moída. Neste caso, a moagem se torna mais heterogênea (FORTULAN *et al.*, 1996).

Quando a moagem é cilíndrica, as regiões com partículas maiores serão preferencialmente moídas fazendo assim com que a moagem seja mais homogênea (FORTULAN *et al.*, 1996).

No moinho por atrito o material é colocado em um reservatório com esferas e cilindros. Elementos de moagem e o material são agitados, a quebra das partículas e do aglomerado se dá por cisalhamento da partícula (REGIANI, 1997).

O tipo mais comum de aglomerado em um pó cerâmico é aquele formado durante a calcinação. Podem também ocorrer aglomerados de fases de transição que possuam uma baixa densidade a verde e baixa resistência mecânica, características contrárias ao aglomerado formado na calcinação, que apresenta uma resistência mecânica suficiente para manter sua estrutura durante a compactação (REGIANI, 1997).

A resistência mecânica do aglomerado é um fator de grande importância para determinar as características da compactação do pó (RICHERSON, 1992).

3.4.2 Processo de conformação

A conformação serve para transformar um material inicial processado em uma forma consolidada com tamanho, geometria, densidade e microestrutura. A seleção do método de conformação depende de fatores como tamanho e formato (REED, 1995).

Durante o processo de conformação alguns defeitos comuns não são eliminados quando o produto é queimado, deve ter um controle cuidadoso de densidade da microestrutura da peça verde. A resistência do produto a verde deve ser suficiente para o manuseio em etapas de acabamento (REED, 1995; KOSHIMIZU, 2008).

Ele é necessário para que o pó cerâmico seja moldado em uma forma próxima ao formato final da peça desejada, necessitando de pouca usinagem posterior, usualmente abrasiva, além de visar maior produtividade e menor custo (REGIANI, 1997).

Cada processo de conformação influencia de forma diferente na camada superficial da peça a ser usinada, principalmente da ocorrência de uma compactação dos pós-maiores na parte externa que na interna, gerando uma diferença na dinâmica de formação de grãos cristalinos da microestrutura durante o processo de sinterização (RICHERSON, 1992, REGIANI, 1997).

O processo de conformação de cerâmicas é dividido em quatro classes, baseado na consistência da mistura: via seca por prensagem, conformação plástica por extrusão ou injeção, via líquido por colagem de fita ou colagem de barbotina e fusão (KOSHIMIZU, 2008).

O método de conformação impacta diretamente na produtividade e na qualidade do produto final (REED, 1995).

Depois da conformação os corpos cerâmicos são de baixa resistência, contendo água e outros aditivos, e são porosos. Sendo assim os produtos cerâmicos devem ser submetidos à secagem e depois passar por tratamentos térmicos em fornos para assim desenvolver de forma adequada suas microestruturas e propriedades (ORÉFICE *et al.*, 2008).

A prensagem é um dos processos mais utilizados no processo de fabricação de cerâmicas, ela consiste num método em que o pó é comprimido dentro de um molde metálico. Utilizada em peças de geometria mais uniforme, e de pequenas alturas, como pastilhas, cilindros, blocos retangulares, dentre outros (CALLISTER, 2012).

Dentre os vários tipos de conformação por prensagem, destacam-se:

a) Prensagem uniaxial:

A prensagem uniaxial utiliza punções e matriz para processar a compactação do pó cerâmico. O pó é colocado dentro da cavidade do molde e dois punções pressionam simultaneamente o material a fim de atingir o formato final compactado (RICHERSON, 1992; REED, 1995).

A desvantagem desse processo está no fato da pressão de compactação não ser homogênea ao longo de todo o corpo da peça (REGIANI, 1997).

b) Prensagem isostática a frio:

A aplicação de pressão em várias direções simultaneamente atinge maior uniformidade de densidade e aumenta a precisão da prensagem (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

A peça prensada de forma isostática apresenta densidade maior e uma variação menor de densidade ao longo do seu corpo; as diferenças de densidades não são vantajosas em alguns tipos de peças, pois acarretam a não uniformidade das propriedades mecânicas da cerâmica (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

c) Prensagem isostática via úmido:

Nesse método o pó é selado em um molde seco com paredes flexíveis. O molde selado é colocado em um vaso de compressão com líquido o qual é selado por rosca ou grampos, a pressão aumenta e com essa elevação, as paredes do molde se deformam e transmitem a pressão uniformemente ao pó cerâmico resultando na compactação da peça. Após a conformação, a pressão é aliviada e as paredes do molde retornam a forma anterior (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

A maior dificuldade encontra-se no preenchimento uniforme do molde com o pó cerâmico antes da prensagem. Esse preenchimento é feito por vibrações. A pressão maior é alcançada e esta é aplicada uniformemente na conformação da peça resultando em um grau maior de compactação, uma melhor densificação e, como consequência, uma melhor uniformidade no processo de sinterização com maiores chances de resultar em uma peça sem defeitos (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

d) Prensagem isostática a seco:

A prensagem isostática a seco foi desenvolvida para aumentar a taxa de produtividade e melhorar a tolerância dimensional das peças, necessitando menos usinagem. Nesse processo não deve imergir o molde em um líquido, o molde é construído com canais internos onde o líquido é bombeado a alta pressão (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

e) Prensagem a quente:

Na prensagem a quente, a prensagem de pós e o tratamento térmico são realizados simultaneamente. Esse procedimento é usado em materiais que não formam uma fase líquida, exceto quando submetidos a temperaturas muito elevadas; além disso, é utilizado quando são desejadas densidades elevadas sem que haja crescimento apreciável do tamanho de grão. A prensagem a quente é uma técnica de fabricação cara, que apresenta algumas limitações. Ela é custosa em termos de tempo, uma vez que tanto o molde quanto a matriz devem ser aquecidos e resfriados durante o ciclo (RICHERSON, 1992; REED, 1995; FORTULAN *et al.*, 2014).

3.4.3 Sinterização

Quando ocorre a queima a rigidez e a resistência cerâmica aumentam, sendo assim ocorre a sinterização e a densificação do produto. O termo sinterizar significa consolidação ou união das partículas do produto, por meio da sinterização a cerâmica passa por modificações como a redução na área específica total, além de ocorrer mudanças na fase ao ponto de chegar formar líquido (REGIANI, 1997; OREFICE *et al.*, 2008).

Durante o processo ocorre à união das partículas resultando na redução da porosidade, essa união de partículas resulta em uma elevada resistência mecânica. A força motriz para a sinterização é a redução na energia livre total do sistema, devido à eliminação da área relativa à superfície das partículas. Esse fenômeno pode ocorrer pelo mecanismo de difusão ao longo dos contornos de grão, entre as partículas e no interior do grão, a Figura 2 exemplifica o processo de sinterização na cerâmica (REED, 1995; REGIANI, 1997; OREFICE *et al.*, 2008; CALLISTER, 2012).

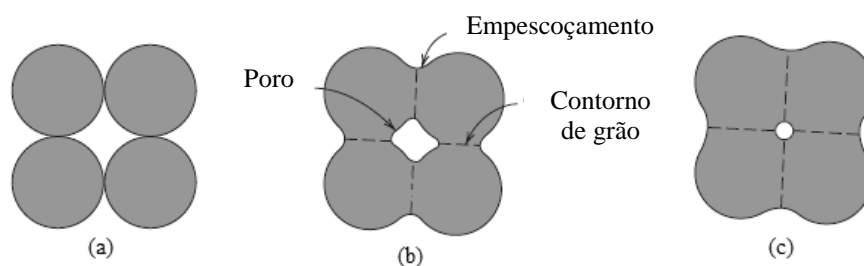


Figura 2 – Estágios de sinterização de uma cerâmica, (a) partículas de pó após a prensagem, (b) coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início. (c) à medida que o processo de sinterização avança os poros mudam de tamanho e forma.

A queima prolongada reduz a porosidade, entretanto, aumenta o tamanho do grão (OREFICE *et al.*, 2008; CALLISTER, 2012).

Durante o processamento pós-cristalinos ou não, são compactados e aquecidos a uma temperatura suficiente para desenvolver propriedades úteis, podem ocorrer mudanças pela

decomposição ou pelas transformações de fase (REED, 1995; REGIANI, 1997; OREFICE *et al.*, 2008; CALLISTER, 2012).

No processo de aquecimento ocorrem três mudanças:

- Aumento do tamanho do grão;
- Mudança no formato do poro;
- Mudança no número de poros, gerando uma porosidade decrescente.

Em algumas cerâmicas podem ocorrer reações de estado sólido formando novas fases, transformações polimórficas, decomposição de compostos cristalinos para formar fases novas ou gases (RICHERSON, 1992; REGIANI, 1997; OREFICE *et al.*, 2008; CALLISTER, 2012).

3.5 Processo de retificação

O processo de retificação pode ser o último processo de fabricação pelo qual a peça passa, nem sempre é necessário realizar esse procedimento, porém ele confere um melhor acabamento superficial na mesma.

A retificação é um processo de remoção de material onde os grãos abrasivos estão presos a uma ferramenta denominada rebolo, onde este comprime a superfície a ser usinada, e durante o movimento de rotação do rebolo, este gera cavacos. O objetivo da retificação é prover à peça dimensão, geometria e acabamento superficial específico, minimizando o dano causado à peça (TÖNSHOFF *et al.*, 1999; DINIZ *et al.*, 2009; ZANG *et al.*, 2014).

Segundo Malkin (1989), a retificação é a designação para o processo de usinagem que utiliza partículas abrasivas duras como meio de corte, isto é, o material é removido por meio da ação de grãos abrasivos que possuem alta dureza e que apresentam arestas que possuem formas e orientação irregular.

O processo é de grande importância na cadeia produtiva, pois influencia diretamente no acabamento superficial afetando as características finais da peça (DHANASEKAR, 2008).

A complexidade da retificação é consequência da grande quantidade de arestas de corte, da aleatoriedade do seu formato e da contínua alteração da geometria das arestas durante a retificação, devido ao desgaste e fratura das partículas abrasivas (TÖNSHOFF *et al.*, 1999).

A retificação pode ser à verde, que é realizada antes do tratamento térmico, para gerar superfícies precisas que sirvam de referência para outras operações de usinagem; ou pode ser realizada depois da sinterização, com a peça já endurecida, com o fim de conferir as dimensões finais à peça retificada (DINIZ *et al.*, 2010).

Na retificação, o material é removido pelo contato contra o rebolo, a uma elevada velocidade de corte, a uma determinada velocidade de avanço (V_w) entre a peça e o rebolo e determinada profundidade de corte (a_p).

O processo de retificação em cerâmicas é uma técnica que apresenta um elevado grau de complexidade, uma vez que esse material apresenta alta dureza e fragilidade após a sinterização.

Devido as cerâmicas apresentarem elevada dureza, para obter sucesso no processo de retificação é necessário o uso de um grão abrasivo mais duro, no caso o diamante. Além disso, o diamante possui elevado coeficiente de condutividade térmica, auxiliando na remoção de calor da zona de retificação (AGARWAL *et al.*, 2008).

Os grãos de diamante são fixados no rebolo por uma liga, que deve ser otimizada de maneira a manter os grãos afiados e liberar os grãos desgastados. As propriedades físicas da liga, como a resistência à abrasão, resistência à remoção do diamante e condutividade térmica, bem como a especificação do diamante, determinam o comportamento do rebolo durante a retificação (GUO *et al.*, 1998).

Normalmente, no processo de retificação de cerâmicas avançadas cada grão abrasivo do rebolo gera um campo de tensão sob a superfície da peça, causando deformações irreversíveis como trincas.

3.5.1 Rebolo

A durabilidade do rebolo varia de acordo com sua aplicação, ou seja, a durabilidade dele aumenta de acordo com o aumento da tenacidade a fratura do grão abrasivo (DINIZ, *et al.*, 2010).

O rebolo diamantado apresenta alta durabilidade devido à dureza dos grãos, este tipo de rebolo além de diferir na alta dureza também apresenta três aspectos básicos diferente dos demais que são: abrasivo, liga (aglomerante) e o corpo do rebolo (MEYER *et al.*, 1998).

Os grãos de diamante utilizados na retificação normalmente são sintéticos, fabricados principalmente para otimizar sua dureza e densidade, permitindo o controle de características, gerando grãos com alta resistência ao impacto ou baixa resistência ao impacto (friáveis) (FUJITA, 2007; DINIZ, *et al.*, 2010).

Os diamantes friáveis são principalmente utilizados para retificação de cerâmicas, pois quando se micro-fraturam regeneram as arestas de corte, gerando menores forças para a

remoção do diamante da liga e assim limitando o dano na peça. Esse tipo de abrasivo se sobressai com ligas resinoides (SHIBATA 1998; JAKOBUSS *et al.*, 2000).

A granulometria dos rebolos diamantados, nada mais é que o tamanho do grão e a concentração da liga, onde o tamanho do grão é expresso pela letra D medido em micrometros. A concentração de diamante descreve o volume de diamante presente na liga normalmente é utilizado 4,4 quilates, indicado por C100 e com uma fração volumétrica de 25% (MARINESCU *et al.*, 1998; DINIZ *et al.*, 2010). A concentração do diamante no rebolo determina a distância entre as trincas laterais, influenciando na taxa de remoção de material e assim influenciando nos danos superficiais (JAHANMIR *et al.*, 1999).

Vale ressaltar que quanto menor o grão abrasivo, maior será a pressão exercida. Grãos menores que 35µm, precisam de pressão mínima alta para que ocorra a remoção de material. A força normal exercida na cerâmica pelo rebolo é distribuída individualmente entre os grãos de diamante penetrantes na cerâmica. O número de grãos em contato com a superfície é determinado pelo tamanho do grão de diamante (FUJITA, 2007).

Além da resina existem outros tipos de ligas usadas na fabricação de rebolos diamantados, de acordo com Tönshoff *et al.* (1999), existem três materiais tipicamente utilizados como ligantes que são: resina, ligas metálicas e ligas vítreas.

As ligas metálicas utilizadas em rebolos são compostas basicamente por cobre/estanho e cobalto/bronze. Neste caso, a principal característica dessa liga é sua adesão ao grão de diamante e sua alta resistência ao desgaste abrasivo. Quando comparada à liga metálica, a liga resinóide apresenta um desgaste mais rápido fazendo com que ocorra mais vezes a dressagem do rebolo (FUJITA, 2007).

3.5.2 Operação de dressagem

A operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais na retificação é denominada dressagem (SENA, 2007; MARINESCU *et al.*, 2007).

A dressagem é considerada diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do rebolo, o tempo do ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (MARINELLI *et al.*, 1998).

As principais finalidades da operação de dressagem são: obtenção de concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação; perfilamento e avivamento da superfície de

corte do rebolo para uma operação de forma; arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de corte do rebolo (MARCHI, 2012).

Segundo Hassui (2002), a definição do momento correto de dressagem do rebolo é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo. Desta forma, ocorrerá um desperdício de abrasivo e, principalmente, um aumento do tempo de processo pelo maior número de dressagens realizadas. Vale lembrar que o tempo de corte na retificação normalmente é bastante curto em função dos baixos volumes de material removido. Por outro lado, uma utilização do rebolo além da sua vida poderá acarretar uma rejeição da peça retificada. Caso isso ocorra, o custo aumentará significativamente, já que as peças quando chegam neste estágio possuem alto valor agregado.

Na operação de dressagem, são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores, ou retificadores, que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, pontas simples de diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante, roletes de esmagamento dentre outros. Cada tipo apresenta vantagens específicas (MARCHI, 2012).

Para que durante a dressagem seja possível a remoção de material do rebolo, os dressadores devem ser mais duros que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas de diamantadas. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual se empregar uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície do rebolo. Este procedimento permite que retificação de materiais extremamente duros, sob condições extremas de usinagem, sejam produzidas grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abrasivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos cegos lasquem, sendo expulsos do ligante.

Através do perfilamento que o rebolo toma forma e geometria necessária para o processo de retificação. Esse processo é importante, pois ajuda evitar vibrações do rebolo e regulariza a superfície do mesmo (SHIBATA, 1998; FUJITA, 2007).

Para realização do perfilamento é necessária a utilização de rebolos de liga metálica ou resinoide, utilizando um rebolo não poroso, por exemplo, carbeto de silício (SiC), nesse processo pouco material do rebolo diamantado é removido quando comparado com o rebolo usado no perfilamento (TÖNSHOFF *et al.*, 1999; FUJITA, 2007).

3.5.3 Refrigeração

Durante o processo de retificação, é gerado muito calor no sistema, logo é necessário refrigerar o mesmo e para isso são utilizados fluidos de corte.

A refrigeração é necessária para melhorar o desempenho da retificação, que pode ser caracterizado pelo acabamento superficial, ou seja, quanto melhor a refrigeração do sistema, melhor será o acabamento final da peça usinada (FUJITA, 2007; DINIZ, *et al.*, 2010; SOUSA *et al.*, 2011; BIANCHI *et al.*, 2012).

Além da importância de refrigeração, o fluido de corte tem a importância de expulsar o cavaco da zona de corte, reduzir o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e diminuir a força e a potência de corte (DINIZ *et al.*, 2010).

Quando o fluido de corte é empregado, ocorre um processo denominado ebulição. Neste processo aumenta a taxa de transferência de calor entre a peça e o fluido, e conforme a temperatura aumenta o mecanismo de ebulição forma uma fina camada de vapor entre o fluido e a peça, este vapor atua como isolante térmico, impedindo a transferência de calor, podendo assim causar a queima da superfície da peça (FUJITA, 2007).

Os fluidos de corte são classificados conforme mostra a Figura 3.

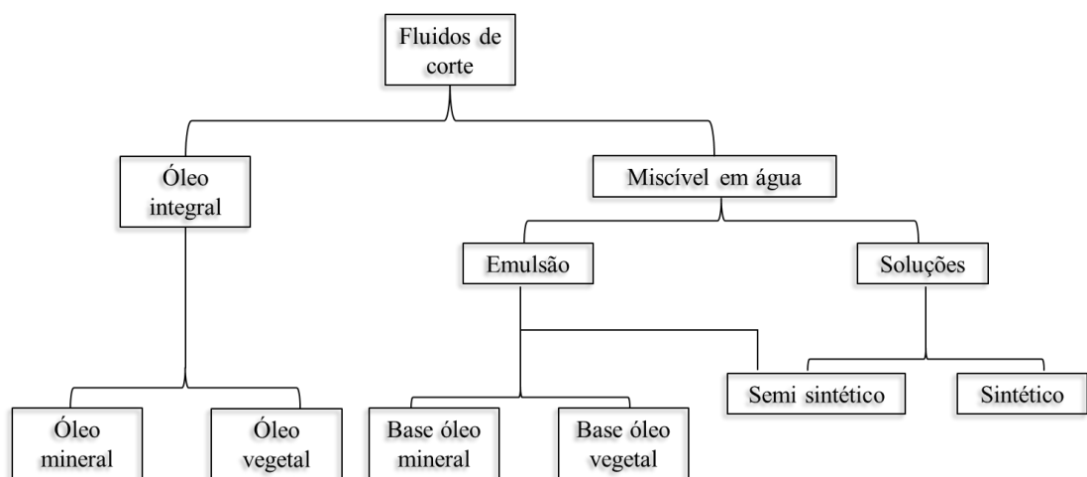


Figura 3 – Classificação dos fluidos de corte (DINIZ *et al.*, 2010).

Estudos comparativos feitos entre o óleo integral e a emulsão listada no fluxograma da Figura 3 constataram que os óleos integrais se mostraram mais vantajosos quanto ao acabamento superficial e desgaste do rebolo. A justificativa para este estudo é que devida a sensibilidade da alumina ao choque térmico e pela maior capacidade calorífica da emulsão são

gerados gradientes de temperatura, tensões térmicas e consequentemente fratura frágil (TÖNSHOFF *et al.*, 1999; FUJITA, 2007).

Além dos tipos de fluidos, existem três principais técnicas de refrigeração:

- a) Convencional, consiste na aplicação do fluido de corte com alta vazão e baixa pressão. A lubrificação e refrigeração dependem da entrada efetiva do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo e dessa forma grandes volumes de fluido podem ser reduzidos pela otimização da aplicação (FUJITA, 2007; SOUSA *et al.*, 2011);
- b) MQL onde existe a aplicação de pouca quantidade de óleo lubrificante com ar comprimido diretamente na região de usinagem; a mínima quantidade de fluido deve ser suficiente para reduzir o atrito e evitar aderência de materiais (FUJITA, 2007; SOUSA *et al.*, 2011).

O intuito de aplicar fluido de corte no processo de usinagem é para que haja aumento na produtividade e redução do atrito entre ferramenta e peça, tornando possível a utilização de velocidades de corte mais altas com maiores taxas de remoção e profundidades de corte, entretanto isso só ocorre quando feita de modo adequado (BIANCHI *et al.*, 2012).

3.5.4 Mecanismos de remoção de material

Mecanismos de remoção de material podem ser descritos como uma interação entre cada grão abrasivo do rebolo com a superfície da peça, esta interação ocasiona um campo de tensão extrema fazendo com que o material seja removido. Essa interação causa danos irreversíveis na peça, a Figura 4 mostra as deformações causadas na peça desde a remoção de material até as trincas.

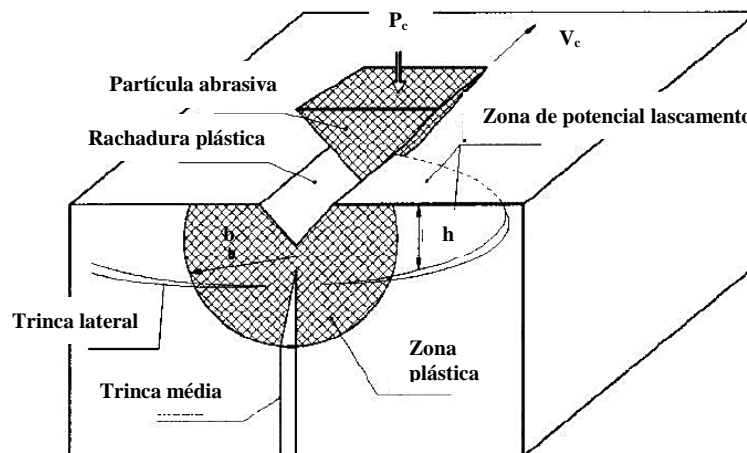


Figura 4 – Formação de zona plástica causada pelo riscamento do grão abrasivo contra a peça e a formação de trincas (MALKIN *et al.*, 1996).

O mecanismo de remoção de material geralmente é classificado em duas classes: fratura frágil e deformação plástica ou dúctil. A fratura frágil é similar à indentação de materiais frágeis, apresentam trincas laterais que são responsáveis pela remoção de materiais e trincas médias que reduzem a resistência do material. Na fratura frágil ocorrem nucleação e propagação de trincas, cavacos ou riscos (XU *et al.*, 1995; ZANG *et al.*, 2014).

A deformação plástica ou regime dúctil é equivalente à formação de cavaco em metais, envolvendo riscamento e formação de cavaco. O que controla o processo de fratura frágil ou deformação plástica é a resistência mecânica, a dureza, tenacidade à fratura e a microestrutura do material (FUJITA, 2007; AGARWAL *et al.*, 2008; ZANG *et al.*, 2014) .

Segundo XU *et al.* (1995), o processo de retificação é uma introdução de defeitos desde o início em que o grão abrasivo seja forçado contra a superfície da peça. Por consequência, as operações de retificação causam frequentemente a mudança da resistência mecânica dos componentes.

O mecanismo de remoção de material é composto por três regimes importantes, podendo ocorrer simultaneamente durante a retificação, esses regimes estão descritos a seguir:

a) Regime Dúctil

É uma descrição para o mecanismo de remoção de cavaco contínuo na retificação de cerâmicas avançadas. Todo material cerâmico apesar de sua dureza e fragilidade deve ter uma transição de regime frágil para regime dúctil abaixo de uma dimensão característica da geometria de corte, por exemplo, a profundidade de corte (FUJITA, 2007; AGARWAL *et al.*, 2008; ZANG *et al.*, 2014).

Durante regime dúctil ocorre a formação de sulcos laterais, não evidenciando estilhaçamentos e remoção de grãos inteiros. Normalmente esse regime ocorre para profundidades de corte abaixo do limite para introduzir a nucleação de trincas, tendo ausência de trincas residuais (XU *et al.*, 1995; INACIO, 1997; FUJITA, 2007; AGARWAL *et al.*, 2008; ZANG *et al.*, 2014).

Para conseguir realizar a retificação no modo dúctil é necessário controlar a profundidade de corte, esta por sua vez não pode exceder a 1µm (XU *et al.*, 1995; INACIO, 1997; FUJITA, 2007).

b) Regime Dúctil – Frágil

A abrasão dúctil-frágil é composta por características de remoção de material frágil e riscos onde só houve deformação plástica que é uma das características do regime dúctil (FUJITA, 2007; AGARWAL *et al.*, 2008; ZANG *et al.*, 2014) .

c) Regime Frágil

Esse processo caracteriza-se pela presença de trincas e estilhaçamentos, nesse regime é possível verificar o aparecimento de pares de trincas laterais seguidas de uma curta zona de sulcamento, surgimento de microtrincas (XU *et al.*, 1995; AGARWAL *et al.*, 2008; ZANG *et al.*, 2014).

Durante esse regime ocorre o aumento do número de defeitos no campo tensionado, devido ao aumento de discordâncias e da escala de retificação, sendo assim diminui a energia necessária para propagação de trincas (MARINESCU *et al.*, 2007).

No caso da alumina o mecanismo de remoção de material é considerado frágil, já no caso da zircônia, outra cerâmica muito utilizada devida suas excelentes propriedades mecânicas, o regime de remoção de material é considerado dúctil, e com isso existe um menor desgaste de rebolo quando se retifica alumina (HUANG *et al.*, 2003).

A retificação é um processo introdutório de tensões no material, devido à natureza frágil das cerâmicas essas tensões causam trincas superficiais nas direções perpendiculares sendo responsável pela degradação da propriedade mecânica da peça e paralelas a superfície, responsáveis pela remoção de material (XU *et al.*, 1995,1996). Quando perpendiculares à superfície as trincas podem ser longitudinais ou radiais à deformação causada pelo grão abrasivo como mostrado na Figura 5.

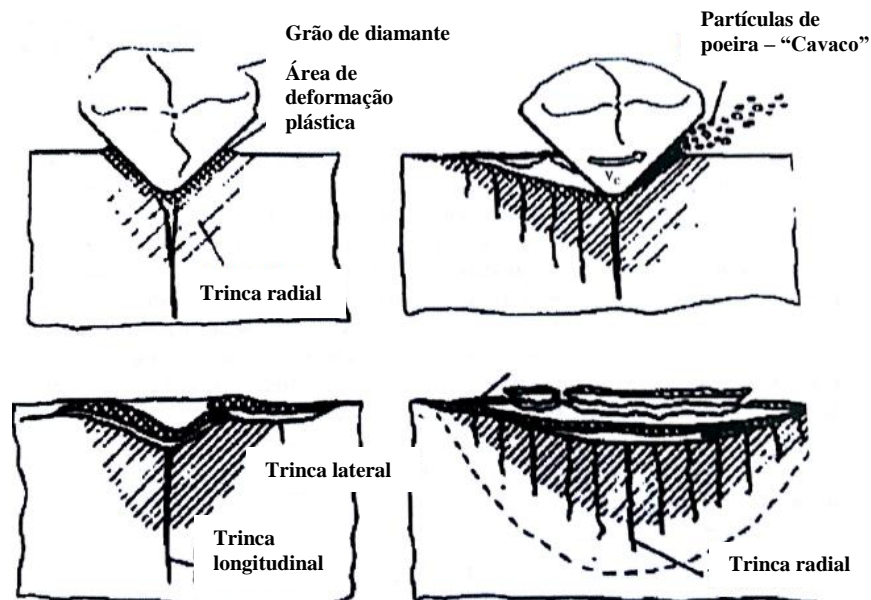


Figura 5 – Tensões causadas na cerâmica durante a retificação (MARINESCU *et al.*, 2007).

Os danos subsuperficiais causados na retificação são caracterizados por deformações internas dos grãos com a movimentação dos planos de escorregamento e trincas inter e

transgranulares; essas deformações aumentam conforme aumenta a taxa de remoção de material (XU *et al.*, 1995; ZANG *et al.*, 2014).

O modelo de formação de cavacos é baseado na pressão da superfície Hertiziana de dois corpos em contato uns com os outros, em que as tensões e as deformações produzem microtrincas, que causam a ruptura dos grãos de cerâmica de modo que a erosão do material frágil tem lugar (MARINESCU *et al.*, 2007).

3.5.5 Parâmetros de retificação

Existem alguns parâmetros utilizados para saber a quantidade de material que foi removido e qual a espessura equivalente de corte (h_{eq}).

A taxa específica de remoção de material (Q_w) é dada por:

$$Q_w = a_p \times V_w \quad (3)$$

Onde:

Q_w = é a taxa específica de remoção de material [$\text{mm}^3/\text{mm.s}$]

a_p = é a profundidade de corte [mm]

V_w = é a velocidade da peça [m/s]

Se houver o aumento da profundidade de corte e da velocidade da peça, aumentará proporcionalmente a taxa de remoção: portanto, quanto maior a taxa específica de remoção de material, maior o dano causado na peça (FUJITA, 2007).

Ainda sobre a taxa de remoção de material TÖNSHOFF *et al.* (1999), explicam que a taxa de remoção pode ser entendida como porcentagem de material que é removida da peça a uma dada velocidade de corte (V_s). A espessura dessa banda removida é chamada espessura equivalente de corte (h_{eq}) que é dada por:

$$h_{eq} = \frac{a_p \times V_w}{V_s} \quad (4)$$

Onde:

h_{eq} = Espessura equivalente de corte [μm]

a_p = é a profundidade de corte [μm]

V_w = é a velocidade da peça [m/s]

V_s = é a velocidade de corte [m/s]

A espessura equivalente de corte calcula a espessura de material que é removida. Sendo assim, está totalmente ligada à rugosidade da peça (FUJITA, 2007; DINIZ *et al.*, 2010).

Se houver o aumento do h_{eq} seja pelo aumento da profundidade de corte ou da velocidade da peça, ou pela diminuição da velocidade do rebolo, haverá alterações nos

esforços causados entre rebolo/peça podendo gerar diminuição no tempo de vida do rebolo e também aumento da rugosidade (DINIZ *et al.*, 2010). Lembrando que para ter uma superfície com poucos danos, a espessura equivalente de corte não deve exceder $1\mu\text{m}$ (FUJITA, 2007).

3.5.6 Rugosidade superficial

A rugosidade está presente em toda e qualquer superfície por mais lisa e polida que esta seja. Além do mais, a rugosidade está diretamente associada à influência que a peça sofreu durante o processo de fabricação e de retificação.

Segundo TÖNSHOFF *et al.* (1999) e JAHANMIR *et al.* (1999), as cerâmicas mais dúcteis geram superfícies menos rugosas e a microestrutura desempenha um papel fundamental, sendo que a média do tamanho de grão da cerâmica determina a rugosidade superficial alcançável. A escolha do refrigerante e do rebolo influencia diretamente na rugosidade.

Se houver o aumento da velocidade de corte existe a tendência de diminuir a rugosidade superficial da cerâmica. Entretanto, se o modo de remoção dominante é por fratura frágil a velocidade de corte não afetará tanto a rugosidade, mas quando o modo de remoção de material é dúctil haverá redução da rugosidade (HUANG *et al.*, 2003; FUJITA, 2007).

A dificuldade em se observar a transição dúctil – frágil deve-se a fatores como o deslocamento irregular dos abrasivos, exatidão de posicionamento e vibrações (HUANG *et al.*, 2003; FUJITA, 2007).

Fatores que afetam diretamente a rugosidade da peça segundo Huang *et al.* (2003) são principalmente a velocidade da peça, profundidade de corte, tamanho do grão abrasivo e fluido refrigerante. Neste trabalho foram variados esses parâmetros e os resultados que comprovam essa afirmação são mostrados no decorrer do trabalho.

Existem vários parâmetros de medição da rugosidade de uma superfície, podendo ser feita em R_a (rugosidade média), onde é traçado uma linha média entre os picos e vales presentes no comprimento de amostragem da superfície usinada, a Figura 6 apresenta como é o comportamento deste caso (FILHO, 2011).

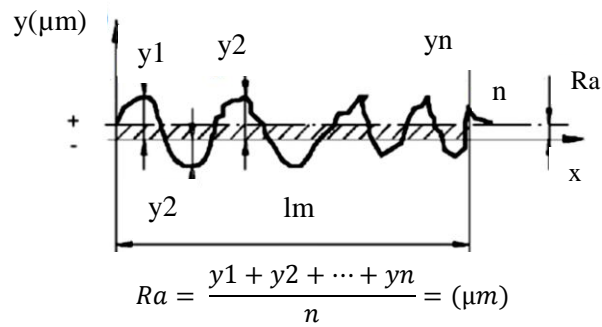


Figura 6 – Representação da medida de rugosidade Ra (FILHO, 2011).

Este é o parâmetro mais utilizado, sendo aplicado à maioria dos processos de fabricação. Entretanto, se houver um pico ou um vale muito atípico, este não será identificado como defeito, pois esse tipo de medida não distingue picos e vales (FILHO, 2011).

Outra forma mais convencional de medir a rugosidade superficial é utilizando a rugosidade máxima (Ry), definida como sendo o maior valor das rugosidades parciais (Zi) que se apresenta no comprimento da medição (lm) como mostra a Figura 7. Essa medida é utilizada quando os resultados encontrados para o Ra são valores muito discrepantes, pois essa medida fornece informações complementares ao Ra.

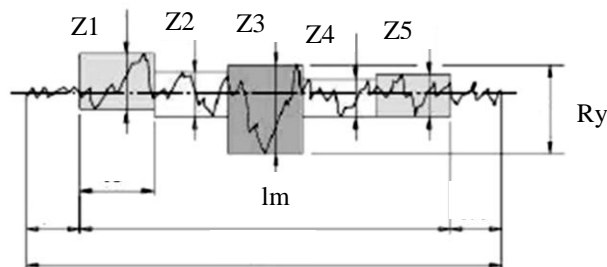


Figura 7 – Representação da medida de rugosidade Ry (FILHO, 2011).

Além das citadas existe também a RMS que é a rugosidade quadrática média, um padrão muito utilizado nos Estados Unidos, e também existe a rugosidade total (Rt) que corresponde à distância vertical entre o pico mais profundo e o vale mais alto (FILHO, 2011).

3.6 Técnicas de caracterização

Neste capítulo será abordado um breve estudo sobre as técnicas de caracterização superficiais realizadas no decorrer do trabalho.

3.6.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O princípio de funcionamento da microscopia eletrônica de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio, que, concentrado controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, incide sobre a amostra, provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação do feixe de elétrons incidente e a amostra. Os sinais emitidos são encontrados na forma de elétrons e fótons, os quais são captados por detectores apropriados, sendo amplificados e processados num sistema específico para cada tipo de sinal (ORÉFICE *et al.*, 2008).

O MEV possibilita ter imagens ampliadas e tridimensionais da amostra a partir da interação entre feixe e amostra. Entretanto, o material deve ser não transparente aos elétrons.

Quando a amostra não é condutora como é o caso da cerâmica é necessário recobrir a amostra com uma fina camada de ouro, cobre ou carbono para que possa ocorrer a interação entre feixe e amostra e assim formar a imagem.

Esse tipo de procedimento é muito utilizado para caracterização de superfícies fraturadas para investigar a estrutura superficial, detectar falhas e poros abertos (MARINESCU *et al.*, 1998).

3.6.2 Microscópio óptico confocal

A microscopia óptica confocal é uma ferramenta que apresenta uma vasta aplicação, ela auxilia a obtenção de informação detalhada sobre a natureza física de superfícies, como rugosidade, forma e volume da amostra sem necessidade de preparação da mesma. Por meio da microscopia óptica confocal é possível construir imagens em duas ou três dimensões através de um orifício de abertura, chamado *pinhole*, que permite uma grande definição de imagem em amostras mais espessas que o plano confocal (TRINO, 2014).

Para o microscópio formar a imagem é utilizado um conjunto de lentes capaz de focar um cone de luz laser em uma profundidade predeterminada pelo usuário, quando muda-se o ponto focal mantendo a mesma profundidade, é possível iluminar todo o plano em estudo, ponto a ponto. Somente a luz dos pontos em foco é registrada, com ajuda de tubos

fotomultiplicadores. Estes sinais gerados pelas fotomultiplicadoras são processados por um computador e assim imagens bidimensionais extremamente precisas podem ser construídas. A obtenção de imagens sucessivas de diferentes planos da mesma amostra possibilita construir imagens tridimensionais (TRINO, 2014).

Na microscopia óptica confocal quando comparado com o microscópio óptico, são eliminadas todas as estruturas fora de foco para formação da imagem, deixando a mesma com uma melhor definição e profundidade do campo. Outra vantagem é sua capacidade em realizar imagens em seções ópticas para amostras com maior espessura, podendo subsequentemente sobrepor as imagens formando uma imagem 3D.

A Figura 8 apresenta as formas em que as medidas são feitas no microscópio óptico confocal, onde a Figura 8(a) é a imagem com formato em 3D com os picos representados pela cor vermelha e os vales pela cor azul, a escala das cores pode ser alterada pelo operador. A Figura 8(b), mostra como é formada a imagem 2D os vales são mostrados com pontos mais escuros, e por fim a Figura 8(c), mostra como é formado o gráfico da medida de rugosidade.

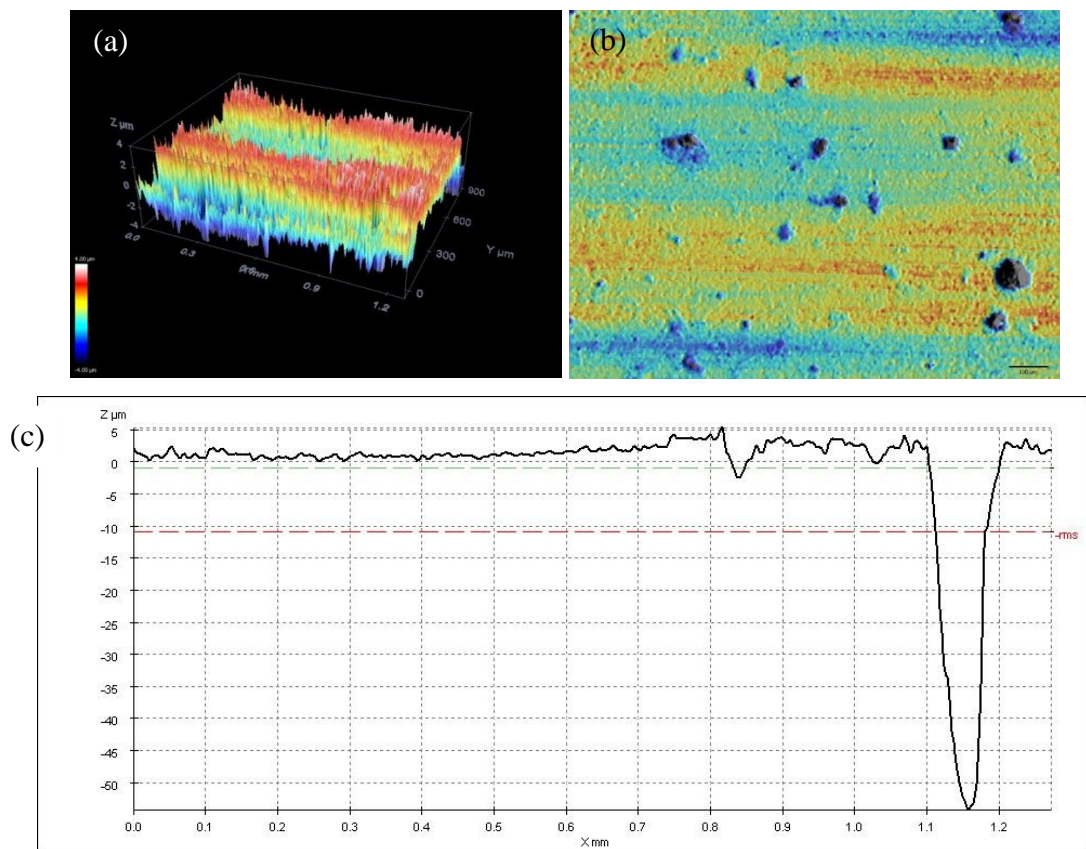


Figura 8 – Representação de imagens formadas no microscópio óptico confocal, sendo a figura (a) imagem 3D, figura (b) imagem 2D e imagem (c) gráfico da rugosidade superficial da amostra no ponto desejado.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão enunciados todos os equipamentos, procedimentos e materiais empregados na confecção dos ensaios. Os parâmetros analisados neste estudo, relacionados aos materiais cerâmicos e ao processo de retificação foram: profundidade de corte, velocidade da peça, granulometria e composição das cerâmicas e fluido de corte.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB – Campus Bauru. Neste laboratório foi realizado o processo de retificação em uma retificadora plana tangencial e as medições de rugosidade das amostras.

A parte de caracterização como MEV e Microscopia confocal foram realizados nos laboratórios do departamento de física da Faculdade de Ciências – FC – Câmpus Bauru.

O intuito de realizar a retificação nos corpos de prova, variando os parâmetros do processo de retificação, foi buscar otimizar esses parâmetros, objetivando obter nas peças cerâmicas o melhor acabamento superficial. Minimizando a formação e propagação de trincas e assim produzindo peças viáveis para diversas aplicações.

4.1 Ferramenta de corte utilizada

Para a realização dos ensaios de retificação utilizou-se um rebolo diamantado de liga resinoide com diâmetro de 360 mm, largura de 15 mm, dureza da liga N, concentração 50% e tamanho de grão de 126 μm da marca Dinser.

Essa especificação de rebolo já havia sido adotada em outro trabalho de mestrado para retificação de cerâmicas, onde este trabalho explica que a escolha de uma liga resinoide deve-se ao fato de esta apresentar maior desgaste, a concentração de 50% por este mesmo aspecto, e o tamanho de grão escolhido seguiu referências da literatura (RAMESH *et al.*, 2001; HUANG *et al.*, 2003; YIN *et al.*, 2005). A Figura 9 mostra o rebolo utilizado.



Figura 9 – Rebolo diamantado com liga resinoide.

4.2 Perfilamento e avivamento do rebolo

O perfilamento e avivamento do rebolo foram realizados sempre que houve a alteração da velocidade da peça, seguindo-se sempre o mesmo método, de forma que novas arestas de corte foram formadas.

Para realizar o perfilamento do rebolo foi necessário um dressador conglomerado como mostra a Figura 10. Este aparato fora fixado na mesa magnética ao lado do porta amostras, tomando cuidado para não interferir durante a confecção dos ensaios.

Neste procedimento, houve movimento transversal do rebolo contra a ponta do dressador, de forma que o contato entre eles promoveu a afiação dos grãos abrasivos, sendo feitos 10 passes com 20 μm de avanço para cada um dos passes, com movimento transversal de 300 hertz sempre utilizando fluido de corte.

O avivamento do rebolo foi feito para revelar os grãos abrasivos, pois a liga resinoide não sai apenas no processo de perfilamento. Para realização foi utilizado um rebolo de carbeto de silício (SiC), onde este fora colocado em contato com o rebolo diamantado que se encontrava com velocidade periférica de 33 m/s. Foi desgastado 10 mm do rebolo de SiC a cada operação de avivamento.



Figura 10 – Dressador conglomerado usado para dressagem do rebolo.

4.3 Equipamentos utilizados

Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora plana da marca Sulmecânica modelo RAPH – 1055E, a rugosidade foi medida em um rugosímetro portátil da marca Taylor-Hobson modelo Surtronic 3+.

As análises por microscópio óptico eletrônico de varredura (MEV) foram feitas em um microscópio da marca Zeiss modelo EVO LS15 e a microscopia óptica confocal foi realizada em um microscópio da marca LEICA modelo DCM3D.

4.4 Etapa 1 – Cerâmicas de alumina Jacto/Unipac

Nessa primeira etapa do trabalho utilizou-se corpos de prova de cerâmicas de alumina comercial em formato de barras retangulares com dimensões de 24 x 17 x 8 mm, composta por 96% de dióxido de alumínio e 4% de óxidos fundentes como SiO_2 , CaO e MgO , apresentando densidade aparente de $3,701 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3$.

Durante o processo de retificação dos corpos de prova foi utilizado um fluido de corte da empresa ATF soluções – Master Chemical Corp – CLEAN 2115AL diluído na relação 5% de fluido e 95% de água e vazão de 27,5 L/min.

Variaram-se os parâmetros: profundidade de corte (a_p) e a velocidade da peça (V_w) mantendo-se constante a velocidade de corte em 33,9 m/s.

Calculou-se a taxa de remoção específica de corte (Q_w) e a espessura equivalente de corte (h_{eq}) por meio das equações (3) e (4) respectivamente.

Por se tratar de corpos de provas em formato de barras foi empregada uma retificadora plana tangencial, e por estes ter um comprimento pequeno em relação ao porta amostras foram retificadas três amostras por vez como está mostrado na Figura 11. Em todos os ensaios as peças foram submetidas a 10 passes do rebolo.

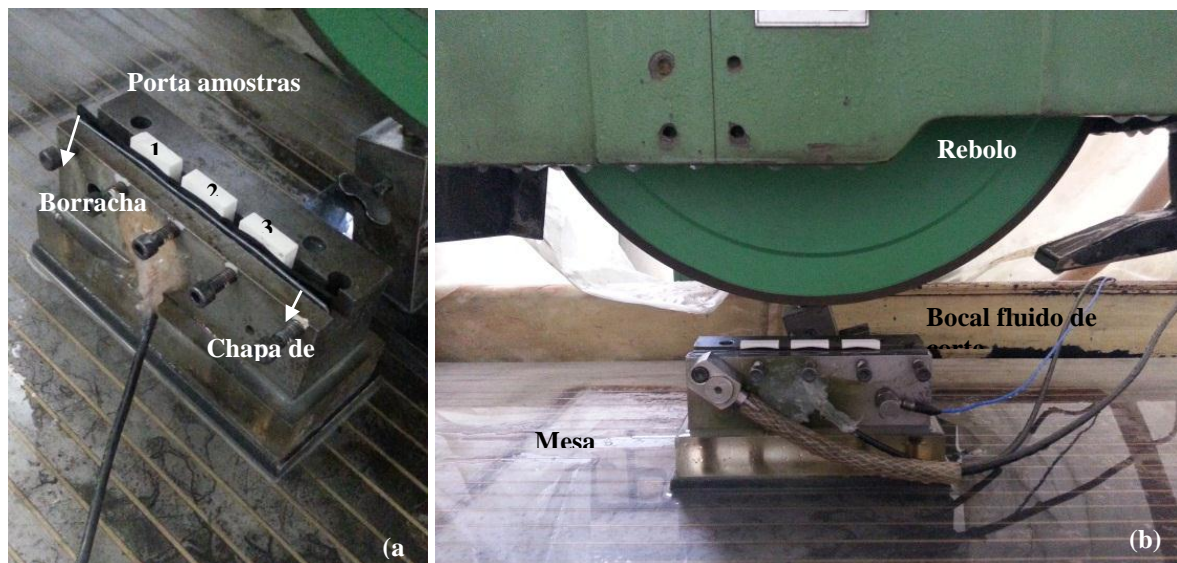


Figura 11– Imagem da retificação plana no sentido longitudinal e seus componentes.

As amostras foram enumeradas para que fosse possível identificar cada uma após os ensaios. Durante a fixação foi colocado uma chapa de metal dúctil e uma borracha, o intuito de utilizar esses materiais foi evitar possíveis trincas devido ao atrito entre o parafuso de fixação e os corpos de prova ao longo do ensaio.

4.4.1 Procedimentos executados nos ensaios

A Figura 12 mostra por meio de um fluxograma quais foram os passos realizados durante os ensaios.

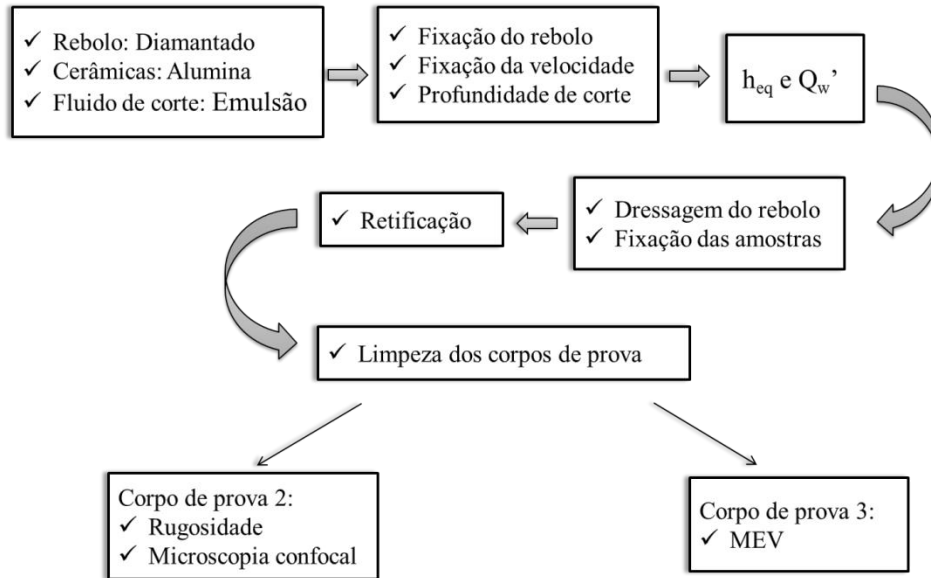


Figura 12 – Fluxograma de ensaios.

A peça cerâmica posicionada na parte central do porta amostras (peça #2) foi selecionada para as medidas de rugosidade no rugosímetro portátil e também para a microscopia confocal.

4.4.2 Medição de rugosidade

A rugosidade foi medida por meio de um rugosímetro portátil, o rugosímetro foi mantido no parâmetro Ra e seu *cut-off* foi mantido em 0,25.

Antes das medidas, os corpos de prova foram limpos com querosene, *thinner*, álcool etílico e álcool metílico no intuito de retirar toda sujeira ou gordura que pudesse estar aderida na superfície das peças e, com isso alterar as medidas de rugosidade.

Nesse primeiro lote de ensaios para obter precisão nos resultados de rugosidade, dividiu cada superfície retificada em 36 pontos para que fosse possível mapear toda região e assim calcular a média de cada corpo de prova em cada uma das condições.

4.4.3 Caracterização da superfície utilizando microscopia óptica confocal e MEV

A superfície das amostras após os ensaios de retificação foram analisadas com o intuito de observar possíveis degradações superficiais causadas pelo processo de retificação.

Para realizar o MEV foi necessário recobrir as amostras, pois a cerâmica não é um bom condutor. O recobrimento foi feito com uma fina camada de ouro depositado na superfície retificada.

Já a microscopia óptica confocal não precisou de nenhum tratamento prévio na superfície das amostras além da limpeza. Esse tipo de ensaio é importante, pois ele sobrepõe às superfícies resultando em medidas de rugosidade, pico-vale, RMS dentre outras.

Para realizar as medidas no microscópio óptico confocal, foram selecionados cinco pontos na superfície da amostra, sendo um ponto em cada uma de suas quatro laterais e um ponto central.

Entretanto, essa rugosidade encontrada no confocal não pode ser comparada com a rugosidade do rugosímetro, pois o confocal utiliza um *laser* para fazer a leitura das amostras, e quando este entra em contato com a mesma, consegue captar os picos e os vales mais acentuados da amostra, diferente do rugosímetro, que sua agulha de diamante não consegue penetrar e varrer os picos e vales com tanta precisão.

4.5 Etapa 2 – Cerâmica de alta – alumina CoorsTek

Nessa etapa do trabalho, foram utilizados corpos de provas cerâmicas de alta-alumina com 150 x 25 x 10 mm. Diferente das outras cerâmicas, essas foram feitas sob encomenda e o tamanho escolhido deve-se ao tamanho do porta amostras.

Essas cerâmicas apresentam três tipos de granulometria que estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição da Alumina.

Granulometria	Identificação
Grosso	3
Médio	1
Fino	2

Para realização dos experimentos, variou-se a velocidade da peça em 55 mm/s e 240 mm/s e fixou-se a velocidade de corte do rebolo em 33,9 m/s. Variaram-se também as profundidades de corte em 5 μ m, 60 μ m e 110 μ m.

Também foi calculada a taxa de remoção específica de corte (Q_w') e a espessura equivalente de corte (h_{eq}) utilizando-se as equações (3) e (4).

A rugosidade foi medida dividindo-se a superfície retificada em 12 pontos (foram feitas 3 medidas para cada ponto escolhido) mapeando-se toda região da peça.

4.5.1 Parte A

Durante a retificação foram adotadas duas condições de lubri – refrigeração, sendo a primeira convencional empregando o fluido de corte da empresa ATF soluções – Master Chemical Corp – CLEAN 2115AL e a segunda utilizando MQL (Mínima quantidade de lubrificante) da empresa Accu-Lube LB2000.

A preparação do fluido de corte convencional seguiu as recomendações do fornecedor sendo 5% de fluido e 95% de água e vazão de 27,5 L/min. Para o MQL foi adotado 90% ar e 10% fluido tendo uma vazão de 70 ml/h.

Nesta etapa foram realizados 48 ensaios, sendo 24 ensaios de controle e 24 sendo reprodutibilidade, foram realizados 10 passes em cada condição.

As fixações das peças ocorreram da mesma forma que descrita anteriormente (item 4.4).

A Figura 13 traz um fluxograma os procedimentos executados nessa etapa do trabalho.

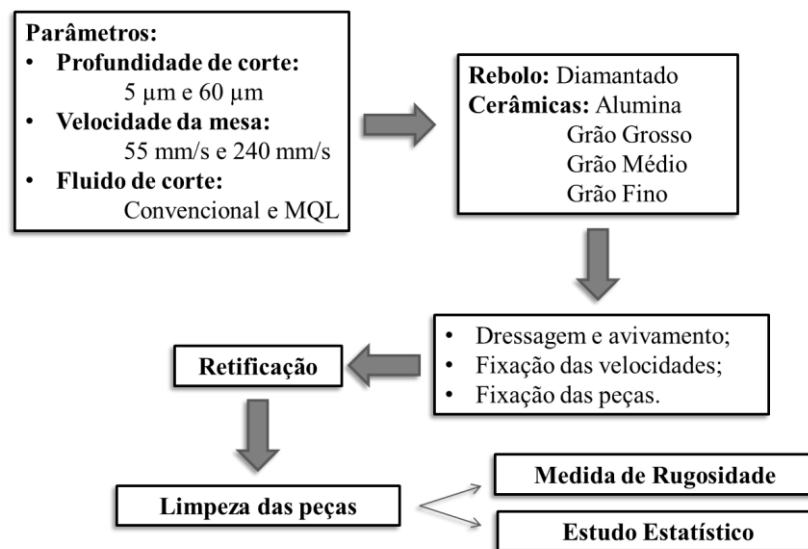


Figura 13 – Fluxograma de ensaios parte A.

Para esta etapa do trabalho, como visto no fluxograma, variou-se a profundidade de corte em 5 e 60 μm e a velocidade da peça em 55 e 240 mm/s.

O estudo estatístico foi realizado utilizando um *software* chamado Minitab, onde análises baseadas em ANOVA e diagrama de Pareto, determinaram a influência de cada fator na qualidade superficial.

4.5.2 Parte B

Nesta etapa, as peças foram retificadas utilizando-se três profundidades de corte (5, 60 e 110 μm) empregando-se a técnica convencional de lubri-refrigeração.

Os ensaios realizados nessa etapa foram feitos para observar o comportamento da cerâmica para a profundidade de corte mais branda (5 μm), intermediária (60 μm) e grosseira (110 μm), o roteiro de ensaios pode ser visto na Figura 14.

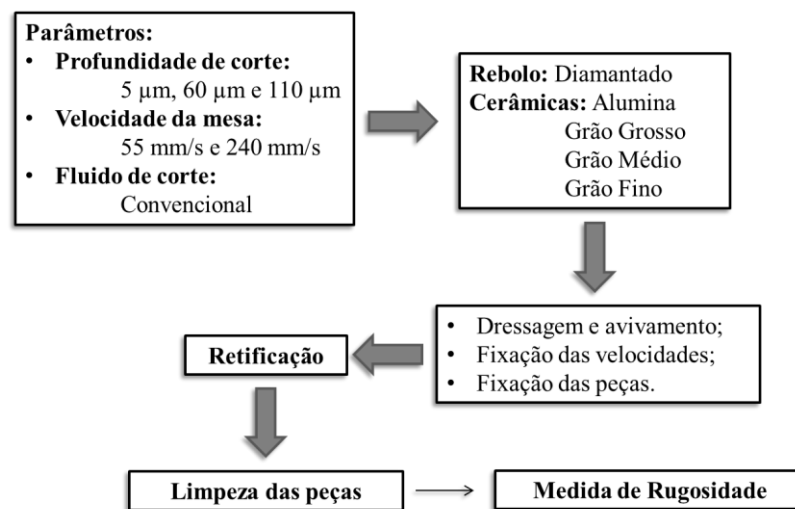


Figura 14 – Fluxograma de ensaios parte B.

Como visto na Figura 14 o procedimento foi bem parecido ao anterior, o fluido de corte convencional utilizado também foi o mesmo (ATF soluções – Master Chemical Corp – CLEAN 2115AL).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas duas etapas do trabalho.

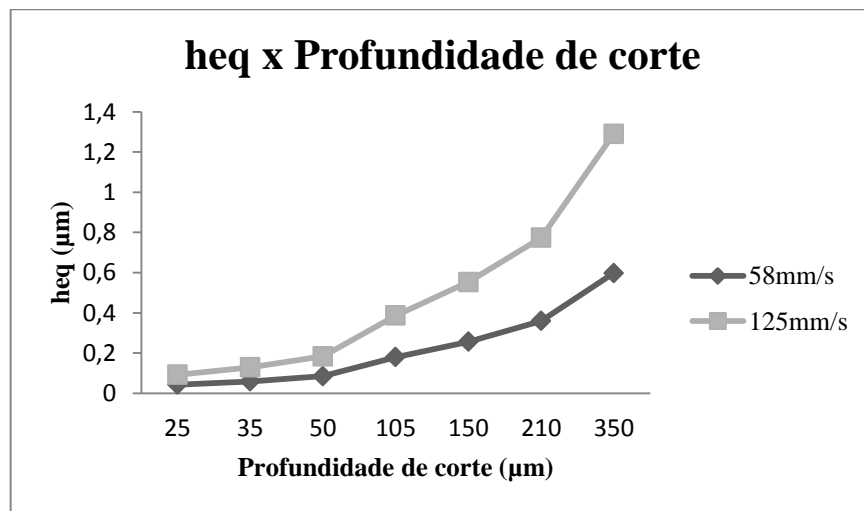
5.1 Etapa 1 – Cerâmicas de alumina Jacto/Unipac

Os resultados de taxa de remoção específica de corte e espessura equivalente de corte foram calculados por meio das equações (3) e (4) e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Profundidade de corte, taxa específica de remoção de corte e espessura equivalente de corte.

a_p (μm)	25	35	50	105	150	210	350
$V_w = 58 \text{ mm/s}$							
h_{eq} (μm)	0,043	0,059	0,085	0,180	0,256	0,360	0,598
Q_w' (mm^2/s)	1,45	2,03	2,90	6,09	8,70	12,18	20,30
$V_w = 125 \text{ mm/s}$							
h_{eq} (μm)	0,092	0,129	0,184	0,387	0,553	0,774	1,291
Q_w' (mm^2/s)	3,13	4,38	6,25	13,13	18,75	26,25	43,75

A Figura 15 representa graficamente os resultados listados na Tabela 4.

**Figura 15** – Gráfico da espessura equivalente de corte x profundidade de corte.

Os valores de taxa de remoção específica aumentaram gradativamente como visto na Figura 15, com o aumento da velocidade da peça e da profundidade de corte, ou seja, com o aumento da remoção de material, pior será o acabamento superficial da peça. O mesmo é observado para a espessura equivalente de corte, onde se pode observar que para a profundidade de 350 μm e velocidade de 125 mm/s a espessura equivalente de corte é maior que 1 μm sendo assim pode-se afirmar que esta peça apresentará maior rugosidade, podendo apresentar então mais trincas e falhas superficiais.

5.1.1 Rugosidade

Como visto anteriormente os dados de rugosidade foram coletados em um rugosímetro portátil, os dados abaixo foram coletados da amostra 2. Essa amostra foi escolhida para esses ensaios por estar no centro da porta amostras sofrendo menos força de impacto na entrada e saída do rebolo. Como enunciado no item 4.4.2 desta, foram feitas 36 medidas em cada uma das peças calculando assim uma média e um desvio padrão total para toda a superfície e os dados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados da rugosidade coletados por meio do rugosímetro portátil.

a_p (μm)	25	35	50	105	150	210	350
$V_w = 58\text{mm/s}$							
Média	0,57	0,66	0,56	0,60	0,62	0,63	0,72
Desv. pad.	0,16	0,15	0,11	0,10	0,13	0,10	0,09
$V_w = 125\text{ mm/s}$							
Média	0,61	0,56	0,54	0,53	0,71	0,68	0,87
Desv. pad.	0,16	0,17	0,12	0,08	0,09	0,13	0,12

Como pode se observar na Tabela 5 e na Figura 16 a rugosidade apresentou uma alta variação tanto da média quanto do desvio padrão. Deve se levar em consideração nesse tipo de ensaio fatores externos, como por exemplo, vibrações causadas na mesa, má colocação do braço de medição, dentre outros que podem causar algumas variações no resultado final.

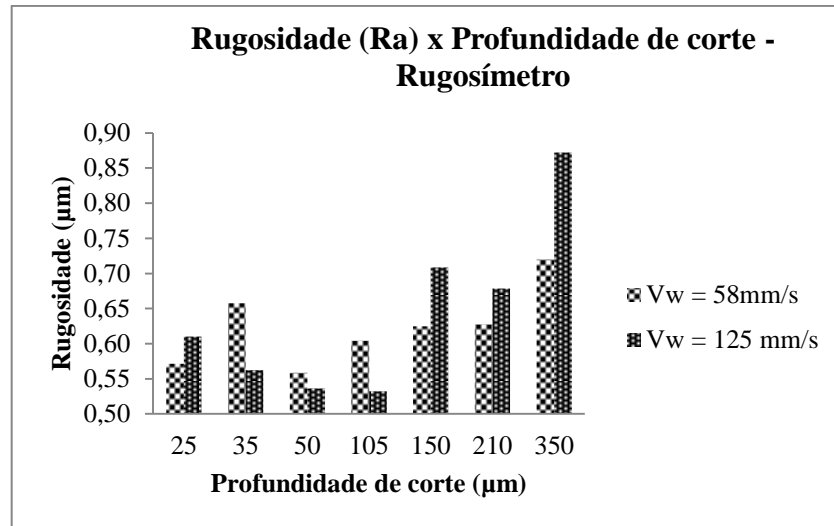


Figura 16 – Rugosidade das peças de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Analisando o gráfico da Figura 16, pode-se observar que para as profundidades de corte de 50 e 105 μm para ambas as velocidades da mesa (58 e 125 mm/s) a rugosidade medida nas peças, apresenta um decréscimo significativo. Por outro lado, observou-se uma tendência contrária nas amostras retificadas com profundidade de corte acima de 150 μm para ambas as velocidades. As amostras retificadas com profundidade de corte de 350 μm e velocidade da peça de 125 mm/s apresentam maiores valores de rugosidade. Este feito pode estar relacionado a defeitos superficiais irreparáveis tais como trincas e arrancamentos de aglomerados de grãos.

5.1.2 Microscopia óptica confocal

Os resultados de rugosidade do confocal não podem ser comparados com os resultados de um rugosímetro. Uma vez que para formar a imagem, o confocal sobrepõe os planos formando uma área e nesta região são apresentados medidas de RMS e Pico – Vale. Com este equipamento pode-se ter uma informação microscópica 2 e 3D e topográfica da superfície da amostra.

A medida da rugosidade Ra é dada por meio de uma linha traçada na área, portanto, se houver alteração da posição da linha, haverá alteração da medida da rugosidade Ra, a Figura 17 ilustra como são representados estes dados.

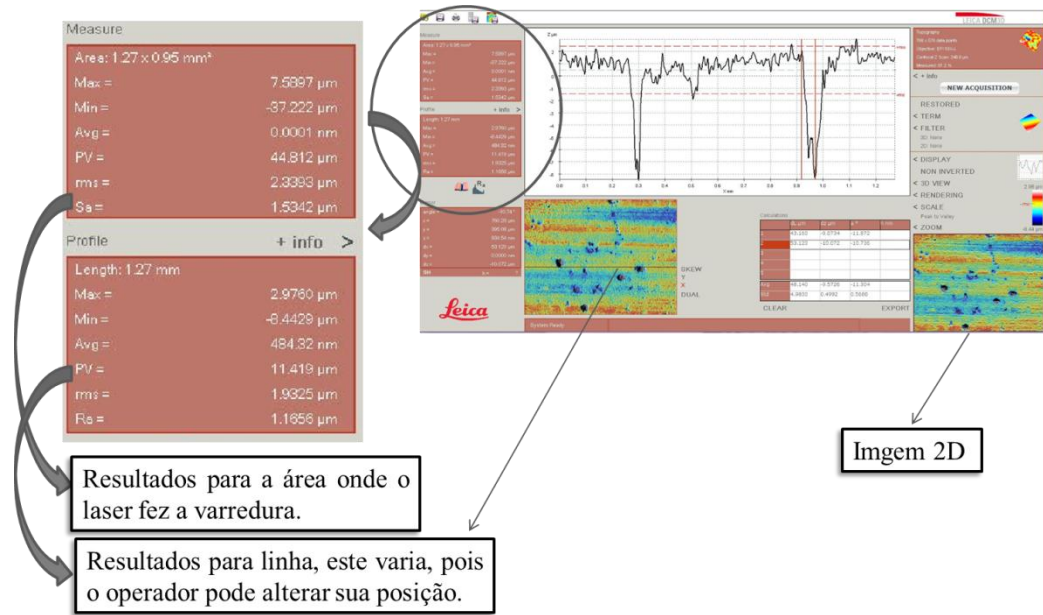


Figura 17 – Tela de aquisição para observar o perfil do corpo de prova com profundidade de corte de 350 μm para um V_w de 125 mm/s.

A medida mostrada na Figura 17 foi coletada em uma determinada região da amostra e neste ponto foram coletadas as medidas de RMS e Ra utilizadas neste trabalho, cada corpo de prova foi dividido em cinco regiões podendo assim obter uma imagem como a mostrada na Figura 17 e assim obter uma média e um desvio padrão total de RMS e Ra. A Tabela 6 traz os resultados de RMS, os resultados de rugosidade serão proposta a seguir. Já a Figura 18 mostra por meio gráfico a média encontrada nas medidas.

Tabela 6 – Medidas de rugosidade RMS coletados no confocal.

a_p (μm)	25	35	50	105	150	210	350
$V_w = 58\text{mm/s}$							
Média	2,29	2,11	1,75	2,20	1,87	1,50	2,43
Desv. pad.	1,61	1,10	0,81	1,28	0,59	0,47	0,88
$V_w = 125\text{ mm/s}$							
Média	2,83	1,98	1,68	1,78	2,66	2,01	2,74
Desv. pad	2,26	2,02	1,21	0,69	2,28	0,98	0,83

Assim como enunciado anteriormente, não é aconselhável comparar medidas de rugosidades feitas por um rugosímetro portátil com as medidas do confocal. Entretanto, pode-

se observar uma tendência nas profundidades de corte de 50 μm , neste ponto a rugosidade teve um decréscimo para ambas as velocidades da mesa assim como já observado nas medidas efetuadas no rugosímetro. No entanto, neste caso a profundidade de 105 não apresentou a mesma tendência para as duas velocidades. Foram feitas as medidas nos dois equipamentos para ter a segurança de que a amostra seguiria a mesma tendência e isso foi observado a partir dos resultados mostrados.

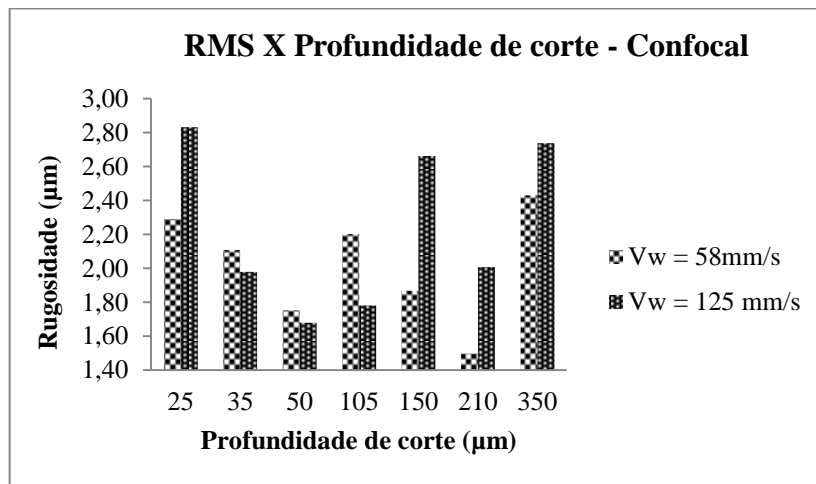


Figura 18 – Gráfico da média da rugosidade RMS para as peças de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Os resultados mostrados na Tabela 7 são das médias e desvio padrão total de Ra feitas no confocal coletadas da mesma forma que o RMS, e é possível visualizar a diferença entre as médias e as curvas quando comparadas com a média do rugosímetro. Já a Figura 18 demonstra por meio de gráfico o resultados das médias encontradas nas medidas.

Tabela 7 – Medidas de rugosidade Ra coletados no confocal.

$a_p(\mu\text{m})$	25	35	50	105	150	210	350
$V_w = 58\text{mm/s}$							
Média	0,53	0,54	0,45	0,51	0,58	1,14	1,48
Desv. pad.	0,11	0,18	0,07	0,12	0,17	0,47	1,02
$V_w = 125\text{ mm/s}$							
Média	2,64	2,10	1,16	1,51	4,34	1,60	2,98
Desv. pad.	1,32	2,05	0,47	0,51	4,01	0,68	1,84

Partindo da Figura 19, observa-se a mesma tendência ocorrida nas medidas anteriores. Quando a amostra é retificada com uma profundidade de corte de 50 μm apresenta os menores valores de rugosidade. Este fato pode estar associado a um menor dano superficial gerado durante o processo de retificação.

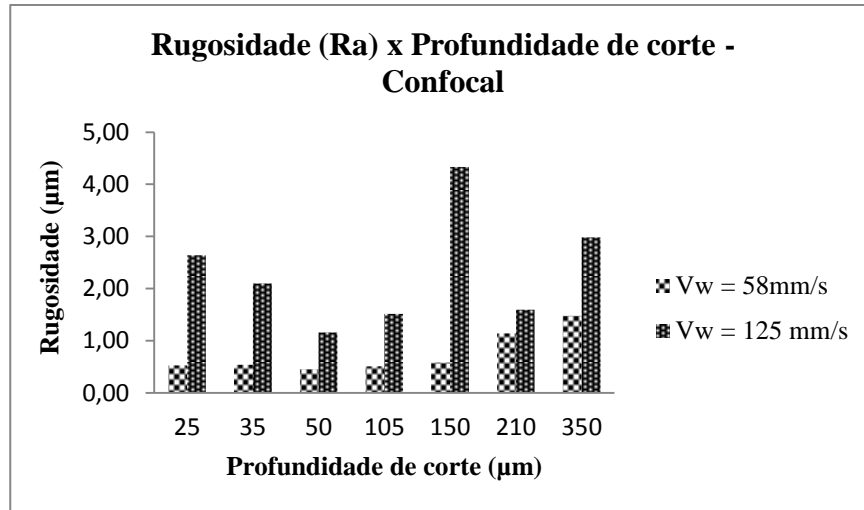


Figura 19 – Gráfico da média da rugosidade Ra para as peças de alumina nas velocidades de 58 mm/s e 125 mm/s.

Pode-se afirmar dos resultados obtidos que existe uma correlação entre os parâmetros empregados durante o processo de retificação das amostras de alumina e o acabamento superficial, medido através da rugosidade utilizando de dois métodos distintos sendo um mecânico e um óptico. As amostras retificadas com profundidades de corte de 50 e 105 μm apresentaram os menores valores de rugosidade principalmente em velocidades maiores de 125 mm/s.

5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O MEV foi feito nas amostras que se encontravam na posição de número 3, para realizar esse procedimento as amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro, tornando assim um experimento destrutível, pois quando recoberta a superfície a amostra perde suas características iniciais, impossibilitando a mesma de ser empregadas para outras possíveis observações. As figuras a seguir mostram a superfície das condições de 50 e 350 μm para as duas velocidades da mesa.

A Figura 20 e a Figura 21 trazem imagens das amostras retificadas com profundidade de corte de 50 μm para a menor velocidade, com os aumentos de 100x e 1000x, pode-se observar uma superfície menos degradada.

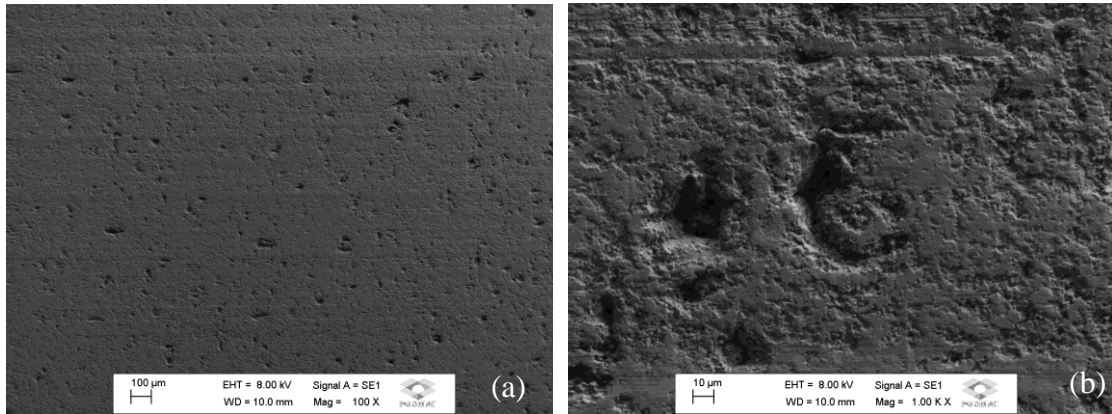


Figura 20 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 50 μm para velocidade de 58 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

Essas pequenas irregularidades na superfície parecidas com buracos, não podem ser consideradas trincas e sim poros e possíveis defeitos durante a compactação.

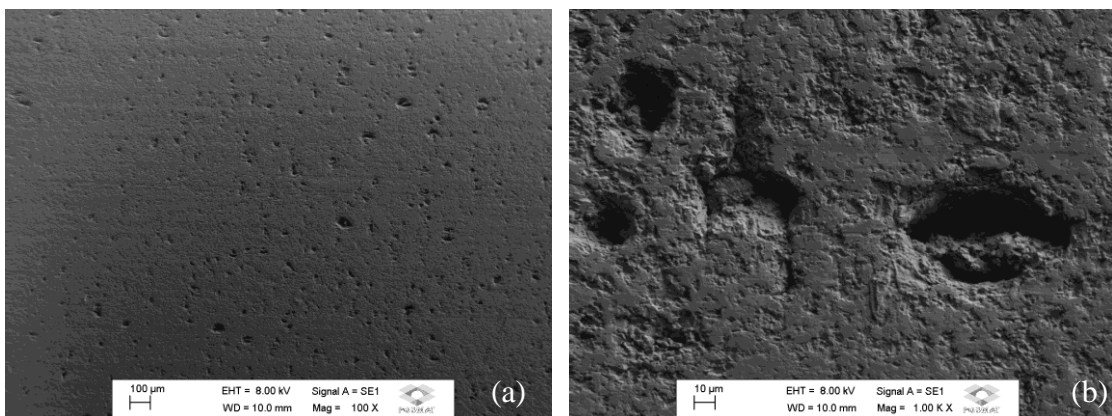


Figura 21 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 50 μm para velocidade de 125 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

Fazendo uma comparação entre as Figuras 20 e 21, pode-se observar que as superfícies estão pouco afetadas pelo processo de retificação. Quando se usa um aumento maior observam-se riscos de rebolo na superfície, porém este não é seguido de degradações em seu caminho.

A Figura 22 e a Figura 23 trazem imagens de uma amostra retificada com uma profundidade de corte de 350 μm com ambas as velocidades de corte, com aumento de 100x, já é possível visualizar fortes danos na superfície.

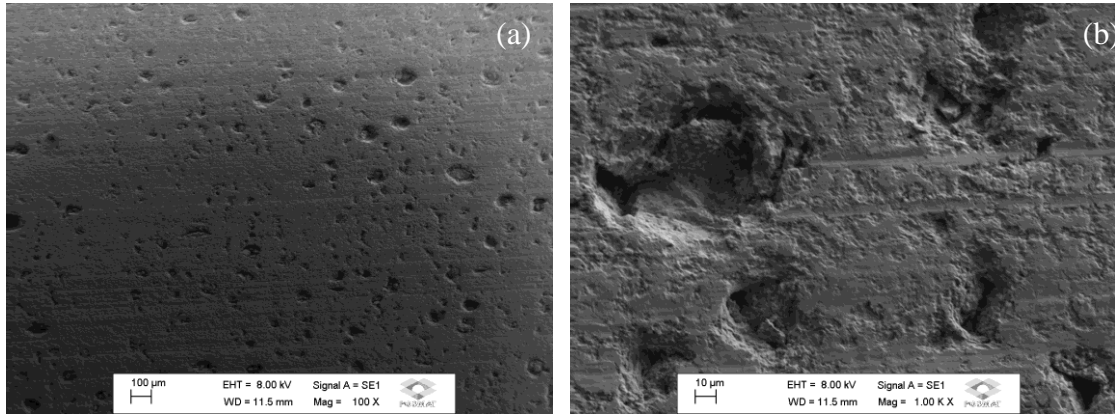


Figura 22 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 350 μm para velocidade de 58 mm/s, (a) aumento de 100x, (b) aumento de 1000x.

Nas Figuras 22 e 23 para maiores aumentos é possível observar que no caminho por onde o rebolo passa, podem-se notar sérios danos na superfície, possivelmente esse caminho do rebolo pode estar relacionado a deformações plásticas seguido de uma possível trinca e/ou arrancamento de grãos.

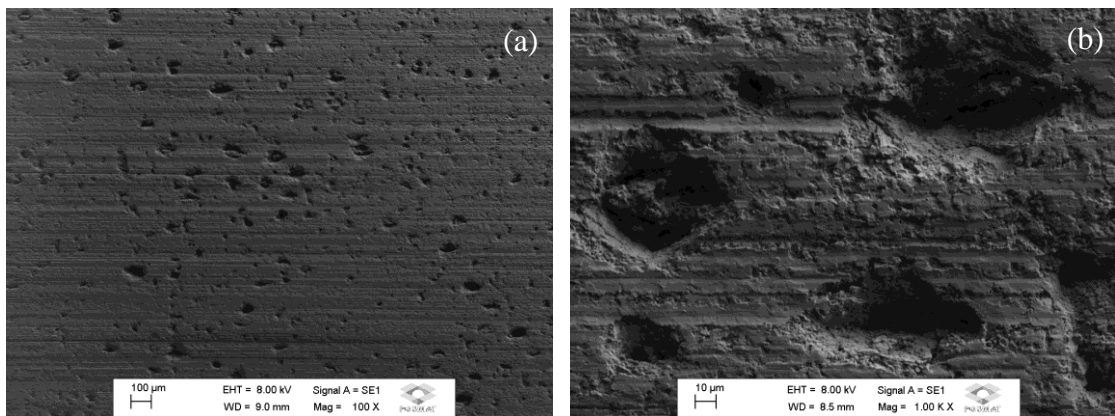


Figura 23 – Imagens feitas no MEV, amostra com profundidade de corte de 350 μm para velocidade de 125 mm/s, (a) aumento de 100x e (b) aumento de 1000x.

As imagens de MEV evidenciam claramente o que os resultados de rugosidade mostraram. As amostras com profundidade de corte de 50 μm quando comparada com as de 350 μm apresentam uma superfície com menos falhas advindas do processo de retificação. É

útil advertir-se que durante a compactação e sinterização da cerâmica alguns poros podem se formar, onde estes estão presentes em todos os casos.

Entretanto, é visível na profundidade de 350 μm uma pequena deformação plástica causada pelos grãos abrasivos seguida de uma falha, podendo estar relacionado à remoção de grãos.

5.2 Etapa 2 – Cerâmica de alta – alumina CoorsTek

Os resultados de taxa de remoção específica de corte e espessura equivalente de corte foram calculados por meio das equações (3) e (4) e são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de profundidade de corte, taxa específica de remoção de corte e espessura equivalente de corte para velocidades da peça de 55 mm/s e 240 mm/s.

a_p (μm)	5	60	110
$V_w = 55 \text{ mm/s}$			
h_{eq} (μm)	0,008	0,097	0,183
Q_w' (mm^2/s)	0,275	3,3	6,05
$V_w = 240 \text{ mm/s}$			
h_{eq} (μm)	0,035	0,423	0,8
Q_w' (mm^2/s)	1,2	14,4	26,6

A Figura 24 mostra o gráfico da espessura equivalente de corte (h_{eq}) *versus* a profundidade de corte (a_p).

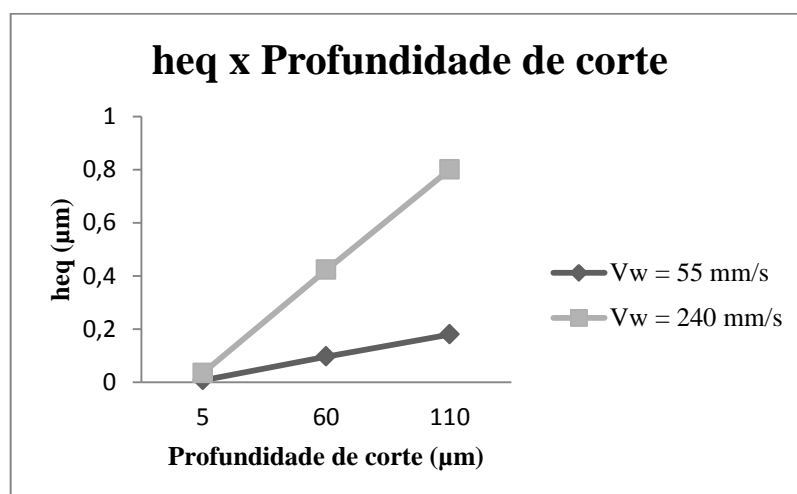


Figura 24 – Gráfico sobre espessura equivalente de corte x profundidade de corte.

Como constatado na Figura 24, observou-se que quanto maior a velocidade e a profundidade de corte, maior a espessura equivalente de corte e maior taxa de remoção. Quanto maior a taxa de remoção menor o tempo de ciclo, ou seja, menor o tempo para retificar as peças cerâmicas, com o aumento da taxa de remoção e da velocidade, aumenta o volume de material removido da superfície da peça retificada, podendo causar mais danos à peça. Logo se houver aumento da espessura de corte o acabamento superficial da peça será prejudicado.

A rugosidade é um fator muito importante a ser analisado, pois irregularidades superficiais atuam como concentradores de tensão, influenciando, portanto, nas propriedades mecânicas das peças acabadas.

5.2.1 Parte A

Nesta parte do trabalho, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das medidas de rugosidades feitas pelo rugosímetro e dos estudos estatísticos dos ensaios realizados utilizando dois fluidos refrigerantes, duas profundidades de corte, duas velocidades para as peças (55 e 240 mm/s), lembrando que para esta etapa foram utilizadas cerâmicas com diferentes granulometrias.

A Tabela 9 traz as medidas de rugosidade.

Tabela 9 – Media de rugosidade para as cerâmicas de alta alumina.

Peça 3 – Grão Grosso					
V_w = 55 mm/s			V_w = 240 mm/s		
ap	5 μm	60 μm	ap	5 μm	60 μm
Convencional	0,68	0,73	Convencional	0,65	0,67
MQL	0,61	0,67	MQL	0,66	0,77
Peça 1 – Grão Médio					
V_w = 55 mm/s			V_w = 240 mm/s		
ap	5 μm	60 μm	ap	5 μm	60 μm
Convencional	0,54	0,64	Convencional	0,56	0,45
MQL	0,41	0,44	MQL	0,49	0,52
Peça 2 – Grão Fino					
V_w = 55 mm/s			V_w = 240 mm/s		
ap	5 μm	60 μm	ap	5 μm	60 μm
Convencional	0,45	0,47	Convencional	0,42	0,46
MQL	0,35	0,28	MQL	0,43	0,54

Partindo da tabela é possível observar que a rugosidade não ultrapassou 0,8 μm mesmo quando se elevou a velocidade. Esse dado é relevante, pois como se trata de um material

cerâmico e este por sua vez é um material frágil, normalmente sua rugosidade não deve exceder 1 μm .

As Figuras 25 e 26 trazem os gráficos dos resultados de rugosidade versus profundidade de corte para a velocidade de 55 e 240 mm/s, respectivamente.

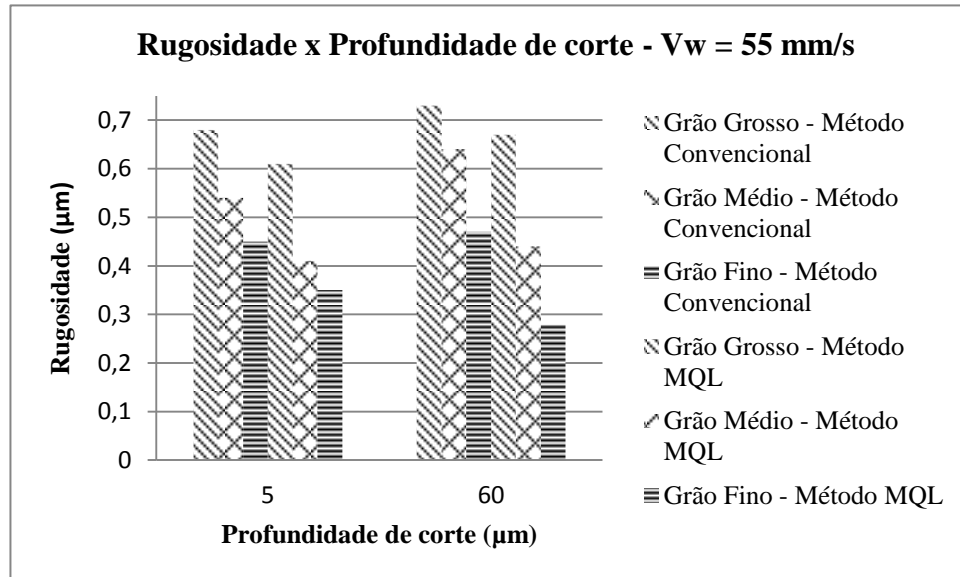


Figura 25 – Gráfico de rugosidade versus profundidade de corte para velocidade de 55 mm/s

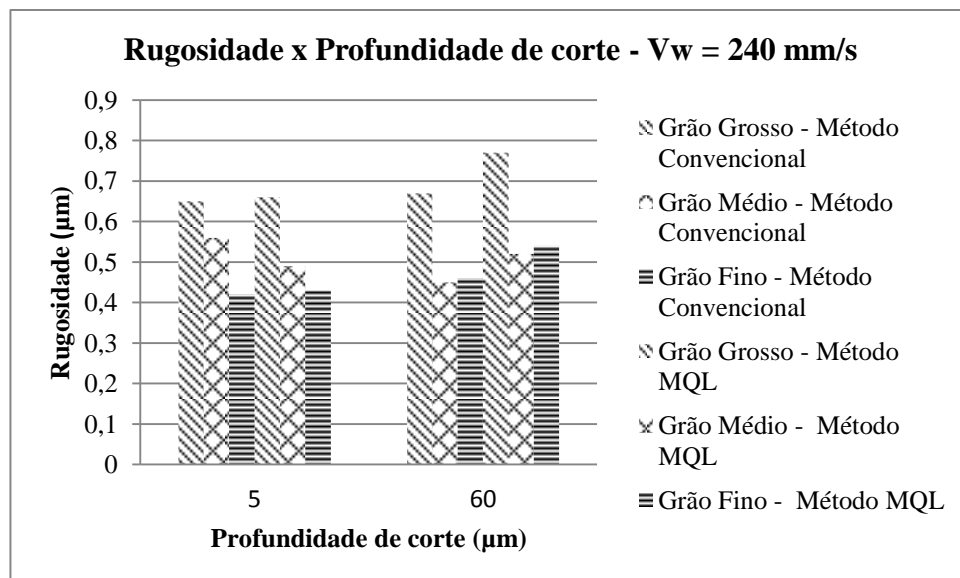


Figura 26 – Gráfico de rugosidade versus profundidade de corte para velocidade de 240 mm/s.

É possível afirmar que houve uma tendência nos resultados obtidos para a condição mais branda, ou seja, para a velocidade de 55 mm/s, a rugosidade se comportou como esperado para as três granulometrias em ambos os fluidos. Houve um decréscimo de acordo com o grão, sendo que o grão grosso apresentou maior rugosidade o grão médio uma

rugosidade intermediária e o grão fino uma rugosidade baixa, sendo ela de $0,28 \mu\text{m}$ quando empregado MQL como lubrificante, mesmo quando a profundidade de corte foi de $60 \mu\text{m}$.

Com o aumento da velocidade da peça e da profundidade de corte, o emprego do sistema de lubrificação por MQL não se mostrou tão eficiente mesmo para as cerâmicas de menor granulometria. A rugosidade medida nas cerâmicas retificadas com profundidade de corte de $60 \mu\text{m}$ e 55 mm/s foi de $0,28 \mu\text{m}$, enquanto que naquelas retificadas com velocidade de 240 mm/s foi de $0,54 \mu\text{m}$, quando o sistema MQL foi empregado.

Quando se compara a eficiência dos fluidos, observa-se um aproveitamento melhor para o MQL para velocidade de 55 mm/s .

Buscando interpretar melhor os resultados sobre quais parâmetros influenciaram o acabamento final das peças, empregou-se métodos estatísticos que auxiliaram na construção do diagrama de Pareto.

Este estudo inicialmente avaliou individualmente os parâmetros e depois fez combinações para ver qual combinação apresentou maior influência na rugosidade.

A Figura 27 mostra individualmente a influência de cada um dos parâmetros sobre a rugosidade.

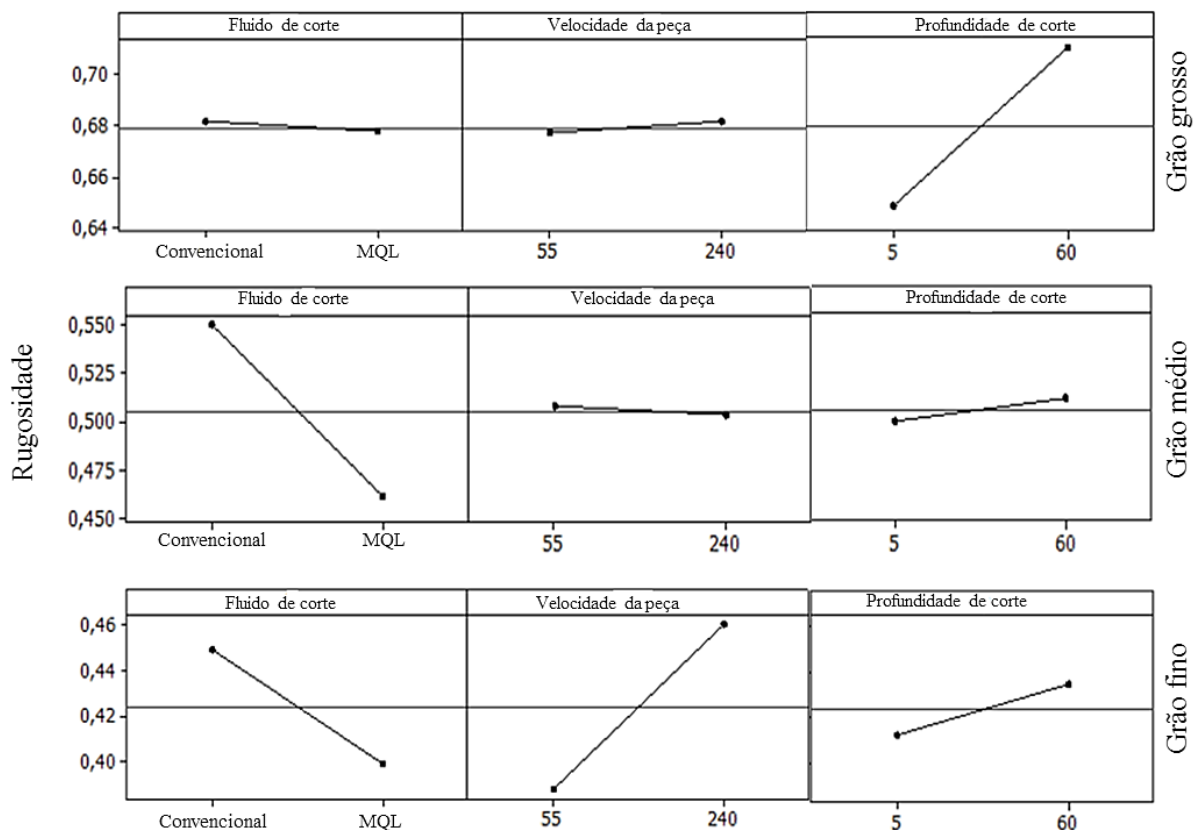


Figura 27 – Gráfico de efeitos principais sobre a rugosidade para cerâmicas de grão grosso, médio e fino.

É possível observar que para a cerâmica de grão grosso o parâmetro que mais influenciou foi a profundidade de corte de 60 μm . Comparando com os resultados da Tabela 9 e Figura 27, pode-se notar que a rugosidade para essa peça manteve-se alta, e também que esta apresentou o pico mais alto de rugosidade sendo esse de 0,73 μm , comportamento diferente para as outras cerâmicas.

Para a cerâmica de grão médio o fator que mais influenciou foi o fluido de corte, sendo o MQL o que apresentou menor rugosidade, associando os resultados é possível observar que o MQL para essa cerâmica só não se apresentou satisfatório para a profundidade de 60 μm na velocidade de 240 mm/s. Por esta cerâmica ser de grão médio quando comparada com as outras ela sempre se manteve no intermédio dos resultados.

Já para a cerâmica de grão fino todos os fatores influenciaram em sua rugosidade principalmente a velocidade da peça e o fluido de corte, o que também é observado nas Figuras 25 e 26 e na Tabela 9, esta cerâmica teve a menor rugosidade durante a condição mais branda, e teve rugosidade superior a cerâmica de grão médio na condição mais agressiva quando o fluido empregado foi o MQL.

O Diagrama de Pareto (Figura 28) mostra através dos efeitos padronizados que sempre acima de 2 existe mais de um fator que influencia diretamente na rugosidade, seja este a interação entre dois ou mais parâmetros de retificação ou apenas um parâmetro. O valor de 1,978 representa a taxa de referência utilizada, e o valor 2 é o valor dessa taxa arredondada, quem demonstrou esses valores foi o próprio *software*.

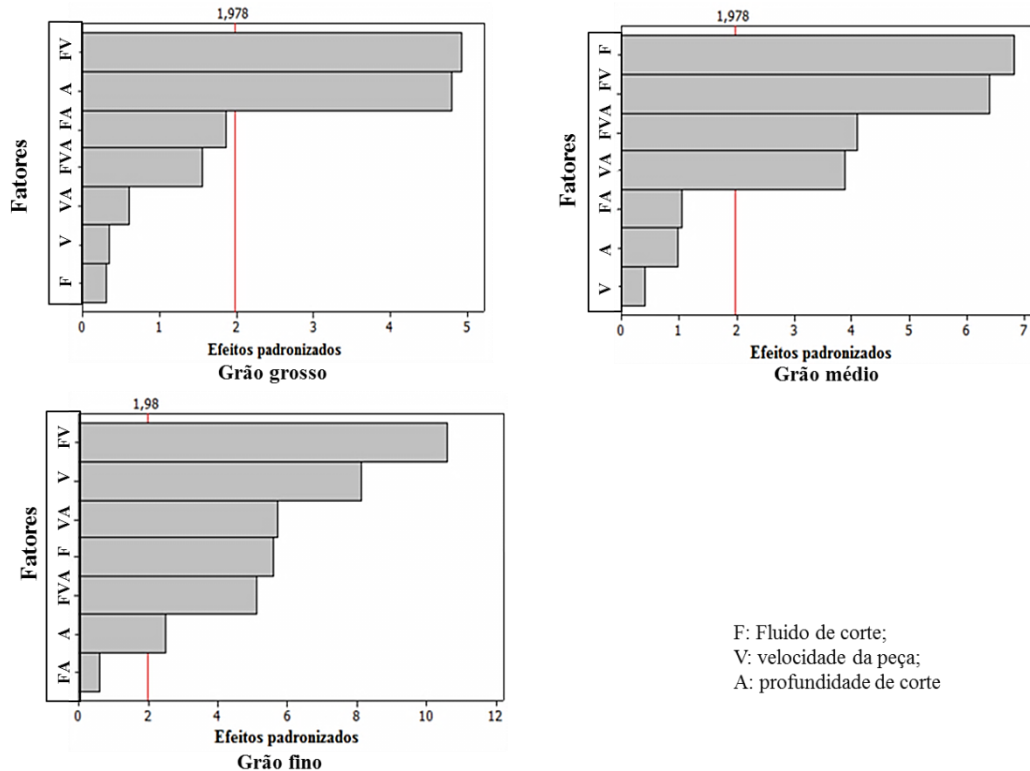


Figura 28 – Diagrama de Pareto para as cerâmicas de grão grosso, médio e fino.

Observando o diagrama é possível afirmar que para a cerâmica de grão grosso a combinação entre fluido de corte (seja ele convencional ou MQL) com a velocidade da peça e a profundidade de corte, foram os fatores que exerceram o impacto mais significativo sobre a rugosidade, o que já foi observado em resultados anteriores.

Já para a cerâmica de grão médio o diagrama mostra que os efeitos que menos influenciaram a rugosidade foram a velocidade da peça, a profundidade de corte e a combinação fluido e profundidade de corte. Como visto nos resultados anteriores, a cerâmica com granulometria média não mostrou alterações significativas quando comparada com as outras cerâmicas.

Quando o grão é fino o único fator que não influenciou significativamente na superfície retificada foi a combinação entre fluido e profundidade de corte.

Portanto, dos resultados obtidos nas Figuras 25 a 28 e na Tabela 9, nota-se que para o grão grosso, o fluido MQL apresenta resultados mais satisfatórios quando a velocidade é mais baixa, porém, com o aumento da velocidade, há um aumento da rugosidade medida. Entretanto, quando existe a aplicação convencional do fluido ocorre o fenômeno oposto, ou seja, ocorreu uma redução na rugosidade com aumento da velocidade da peça.

Com o aumento da profundidade de corte, há uma piora na qualidade superficial para ambos os fluidos de corte, havendo uma tendência maior para o aumento de rugosidade para o MQL.

Para ambas as velocidades da mesa há um aumento de rugosidade com o aumento da profundidade de corte. Prevalecendo também a remoção frágil de material, provocada pela presença de microtrincas.

Assim como ocorre no grão grosso, ocorre no grão médio, o aumento da velocidade da peça faz a rugosidade aumentar quando existe a aplicação do MQL. Isso se deve à baixa capacidade de refrigeração do MQL, gerando uma tendência de aumento de temperatura e piora no acabamento. Com o aumento da profundidade de corte não há alteração superficial significativa para nenhum dos fluidos, sendo também o melhor acabamento apresentado pelo MQL.

Para baixas profundidades de corte, a velocidade de 55 mm/s é mais vantajosa para o processo em termos de rugosidade, porém essa situação se inverte para profundidades mais altas, onde se torna mais vantajosa a velocidade de 240 mm/s. Isso pode ter ocorrido pelo fato de velocidades altas com profundidades baixas gerarem menores superfícies de contato entre o rebolo e peça, uma maior elevação da temperatura e conseqüentemente, um pior acabamento superficial.

Já para o grão fino o aumento da velocidade da peça, não há grande variação da rugosidade para o fluido convencional. Fato este, que não se repete para o fluido MQL, onde há um aumento expressivo da rugosidade superficial com o aumento da velocidade. Ocorrendo da mesma forma que na peça de grão médio, ou seja, mais uma vez a baixa refrigeração do MQL ocasionou aumento de rugosidade. Ao se analisar o aumento da velocidade da peça em relação à profundidade de corte, observa-se que não há mudança expressiva do acabamento superficial para nenhum dos dois tipos de métodos de aplicação de fluido.

Para profundidade de corte mais baixa não há grande diferença entre utilização de uma velocidade da peça mais baixa ou mais alta. Porém, com o aumento da profundidade de corte, a velocidade de 240 mm/s tende a gerar um aumento da rugosidade, enquanto a velocidade de 55 mm/s tende a reduzi-la. Para este tipo de peça, remoções de material mais agressivas ocasionaram um expressivo aumento de rugosidade, provavelmente pela remoção de material em regime frágil.

5.2.2 Parte B

Como enunciado em 4.5.2 os ensaios nessa parte foram feitos para observar o comportamento da cerâmica para a profundidade de corte mais branda (5 μm), intermediária (60 μm) e grosseira (110 μm).

A Tabela 10 traz os resultados de rugosidade medidas pelo rugosímetro.

Tabela 10 – Dados de rugosidade com repetibilidade.

Peça 3 – Grão Grosso							
V_w = 55 mm/s				V_w = 240 mm/s			
a _p	5 μm	60 μm	110 μm	a _p	5 μm	60 μm	110 μm
Padrão	0,811	0,914	0,947	Padrão	0,814	0,931	0,955
Repetibilidade	0,68	0,73	0,826	Repetibilidade	0,65	0,67	0,883
Peça 1 – Grão Médio							
V_w = 55 mm/s				V_w = 240 mm/s			
a _p	5 μm	60 μm	110 μm	a _p	5 μm	60 μm	110 μm
Padrão	0,595	0,623	0,691	Padrão	0,687	0,722	0,758
Repetibilidade	0,54	0,64	0,660	Repetibilidade	0,56	0,45	0,730
Peça 2 – Grão Fino							
V_w = 55 mm/s				V_w = 240 mm/s			
a _p	5 μm	60 μm	110 μm	a _p	5 μm	60 μm	110 μm
Padrão	0,456	0,489	0,592	Padrão	0,515	0,578	0,626
Repetibilidade	0,45	0,47	0,542	Repetibilidade	0,42	0,46	0,667

As Figuras 29 e 30 apresentam os gráficos dos resultados.

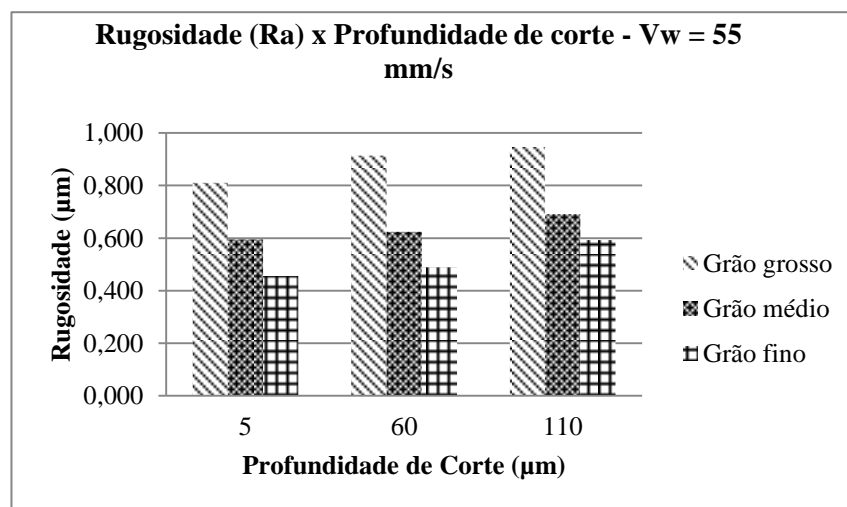


Figura 29 – Gráfico de rugosidade versus profundidade de corte.

A Figura 29 mostra que a rugosidade aumenta com a profundidade de corte para as cerâmicas com as três granulometrias.

É possível observar que houve um comportamento linear para as três profundidades de corte e que os grãos se comportaram de acordo com sua granulometria, ou seja, o grão grosso apresentou maior rugosidade e o fino menor, o mesmo é observado na Figura 30.

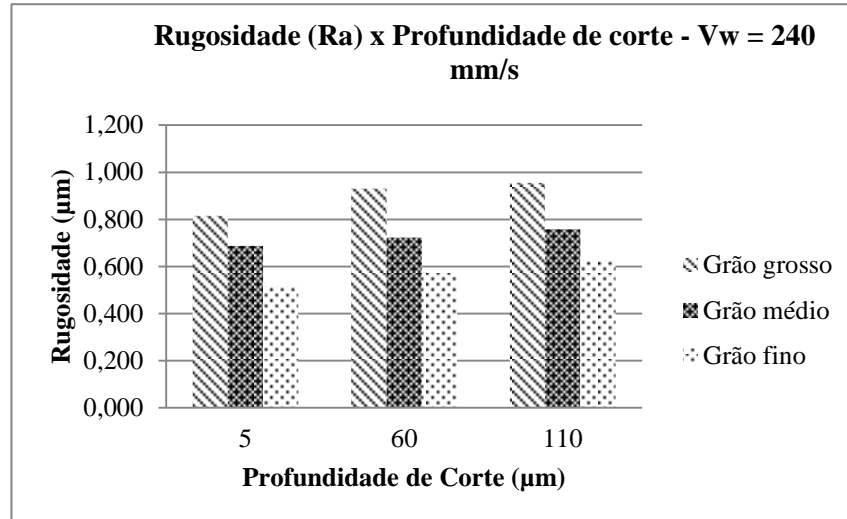


Figura 30 – Gráfico de rugosidade versus profundidade de corte.

Independentemente das profundidades de corte ou velocidades da mesa, as cerâmicas fabricadas com grãos de menor granulometria apresentaram sempre a menor rugosidade.

Pode-se afirmar que para ambas as velocidades de corte tanto de 55 mm/s quanto de 240 mm/s os valores da rugosidade média foram compatíveis, situando-se abaixo de 1 µm.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou informações sobre o processo de fabricação, processo de retificação e os efeitos causados no acabamento superficial de cerâmicas.

A retificação pode ser considerada como excessivamente agressiva às cerâmicas, provocando degradações muitas vezes irreparáveis a amostra.

No caso dos ensaios realizados, os danos podem ser atribuídos à vibração do equipamento, confecção dos corpos de provas, profundidade de corte, velocidade adotada à mesa bem como sistema de lubri-refrigeração adotado durante o processo.

Para a primeira etapa do trabalho foi possível concluir que as medidas de rugosidades efetuadas por dois métodos distintos, sendo um mecânico e um óptico que existiu uma inter-relação entre os parâmetros utilizados durante o processo de retificação dos corpos de prova de alumina e o acabamento superficial obtido nos mesmos.

As amostras quando foram retificadas com profundidades de corte de 50 e 105 μm apresentaram os menores valores de rugosidade principalmente em velocidades maiores de 125 mm/s. E quando a profundidade de corte foi elevada até 350 μm para ambas a velocidade existiu um aumento substancial da rugosidade, isso pode estar relacionado a defeitos superficiais irreparáveis como trincas e arrancamentos de aglomerados de grão. As imagens de MEV evidenciam claramente o que os resultados de rugosidade mostraram. As amostras com profundidade de corte de 50 μm quando comparada com as de 350 μm apresentam uma superfície com menos danos advindos do processo de retificação.

Fazendo uma abordagem geral, para os três tipos de peça analisados o fluido MQL apresenta inicialmente resultados satisfatórios, porém com o aumento da velocidade da peça de 55 mm/s para 240 mm/s os valores de rugosidade tendem a aumentar. Isso possivelmente ocorre devido a baixa capacidade de refrigeração deste tipo de fluido, ou seja, com o aumento da velocidade da peça existe um aumento do atrito entre a cerâmica e o rebolo e por consequência desse atrito há o aumento da temperatura do sistema. Este tipo de fluido apresenta uma excelente capacidade de lubrificação, mas baixa capacidade de refrigeração, pois o ar faz parte de sua composição diferente do fluido convencional que leva água na mistura. Sendo assim o fluido aplicado pelo método MQL apresenta baixa condutividade térmica tornando-se inviável para altas velocidades de retificação.

Além do mais os estudos estatísticos realizados nesta etapa do trabalho concluíram que houve uma redução na rugosidade das peças com granulometria média e fina quando se utilizou a refrigeração MQL. As cerâmicas de granulometria fina retificadas com velocidade de 55 mm/s e profundidade de 60 μm apresentaram rugosidade inferior a 0,28 μm usando o sistema de refrigeração MQL. Porém quando retificadas em velocidades maiores utilizando MQL as cerâmicas de granulometria mais fina apresentaram um aumento nos valores de rugosidade.

Como visto para a parte B, para cerâmica de alta alumina, foi possível observar um comportamento linear para as três profundidades de corte e que os grãos se comportaram de acordo com sua granulometria, ou seja, o grão grosso apresentou maior rugosidade que o grão mais fino. Independentemente das profundidades de corte ou velocidades da mesa, as cerâmicas fabricadas com grãos de menor granulometria apresentaram sempre a menor rugosidade.

Essa diferença de resultados entre a primeira e a segunda parte deve-se a diferença da granulometria e da composição de cada cerâmica, onde esses fatores influem diretamente no acabamento superficial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, S., RAO, P. V., “Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **48** 698–710, 2008;

ALVES, M.C.S.; NETO, L.D.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; FUJITA, H.; SILVA, E.J, “Retificação da alumina com reboło diamantado utilizando-se diferentes métodos de lubri-refrigeração”, **Cerâmica** **105-111**, 2010;

AZA, A.H., CHEVALIER J., Fantozzi G., Schehl M., Torrecillas, R., “Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses”, **Biomaterials** **23** (2002) 937–945;

BIANCHI, E. C., MONICINI, R. D., NETO, L. D., AGUIAR, A. R., GUERMANDI, L. G., “Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado”, **Cerâmica** **57**, 431-437, 2011;

BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., PEREIRA, M. G., SILVA NETO, J. F., AGUIAR, P. R., GUERMANDI, L. G., “Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL)”, **Cerâmica** **58** 270-274, 2012;

CALLISTER, W.D.Jr., RETHWISCH, D.G., “**Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**”, 8º ed. 2012, LTC;

CHEVALIER J., GREMILLARD L., “Ceramics for medical applications: A picture for the next 20 years”, **Journal of the European Ceramic Society** **29** (2009) 1245–1255;

CHEVALIER J., “What future for zirconia as a biomaterial?”, **Biomaterials** **27** (2006) 535–543;

DHANASEKAR, B.; MOHAN, N. K.; BHADURI, B.; RAMAMOORTHY, B. **Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing**. Precision Engineering, v. 32, n. 3, p. 196 – 206, 2008;

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N.L., “Tecnologia da usinagem dos materiais”, 7ª ed. 2010, Artliber Editora LTDA;

DONGKUN, Z., CHANGHE, L., DONGZHOU, J., YANBIN, Z.; “Investigation into Engineering Ceramics Grinding Mechanism and the Influential Factors of the Grinding Force”, **International Journal of Control and Automation** Vol.7, No.4, pp.19-34, 2014;

EMAMI, M.; SADEGHI, M.H.; SARHAN, A.A.D., “Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics.”, **Journal of Manufacturing Processes**, v.15, Issue 3, pp. 374–388, 2013a.

FILHO, P. A., “Rugosidade Superficial”, 3º Seminário de metrologia, Universidade de Brasília, 2011;

FORTULAN, C. A., PURQUEIRO, B. de M., “Projeto e desempenho de um moinho vibratório para cerâmica avançada.”, **ANAIS do IV Congresso de engenharia mecânica norte-nordeste**, v.1, n.1, Recife, Brasil, p.237-241, 1996;

FORTULAN, C. A., PEDROSO, M. P. G., PENAZZI, L. A., PURQUERIO, B. M., “Prensa isostática de vasos gêmeos: projeto.”, **Cerâmica** 60,199-204, 2014;

FUJITA, H., BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R., SANCHEZ, L.E. de A.,SILVA, C.E.Jr., “Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos”, **Cerâmica** 52(2006) 269-275;

FUJITA, H., “**Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração**”, 2007,Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista;

GUO, C.; CHAND, R.H. “A ceramic machining primer”.**Ceramic Industry**, 4, p.71-78, 1998;

HASSUI, A., **Estudo de Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho**, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas/SP, 2002.

HE, X., ZHANG, Y.Z., MANSELL, J.P., “Zirconia toughened alumina ceramic foams for potential bone graft applications: fabrication, bioactivation, and cellular responses”, **J Mater Sci:Mater Med** (2008) 19:2743–2749;

HENCH, L.L., “Bioceramics”, **Journal of the American Ceramic Society**, 81,1705–28 (1998);

HENCH, L.L., “An Introduction to Bioceramics”, 2^o ed 2013, Imperial College Press;

HING, K.A., “Bioceramic Bone Graft Substitutes: Influence of Porosity and Chemistry”, **Bioceramic Bone Graft Substitutes 2** [3] 184–199 (2005);

HUANG, H.; LIU, Y.C., “Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 43, p.811-23, 2003;

INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing**, New Jersey. Noyes Publications, p.205-236, 1998;

ISO 6474-1: 2010 “Implants for surgery -- Ceramic materials -- Part 1: Ceramic materials based on high purity alumina”;

JAHANMIR, S., “Ceramic machining research in the united states”, **Interceram**, v.46, n.2, p.90-96, 1997;

JAHANMIR, S.; XU, H.K.; IVES, L.K., “Mechanisms of material removal in abrasive machining of ceramics.” In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**, Marcel Dekker, Cap.2, 1999;

JAKOBUSS, M.; FIECOAT, J., “Choosing the right diamonds”, **Ceramic Industry** , v.150, n.5,p.41-45, 2000;

KOSHIMIZU, L., “Conformação Viscoplastica por Rolos a Frio e Caracterização de Substrato de Alumina.”, Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008;

MARCHI, M., “Monitoramento da queima da peça no processo de retificação plana baseado no estudo espectral do sinal de emissão acústica com implementação por hardware, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, 2012;

MALKING, S.; HWANG, T.W. “Grinding mechanism for ceramics.”, **Annals CIRP**, 45, p.569,1996;

MALKIN, S. **Grinding Mechanisms and Grinding Temperatures and Thermal Damage.**, In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989;

MANICONE, P.F., IOMMETTI, P.R., RAFFAELLI, L., “An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications”, **Journal of Dentistry** 35, 819-826, 2007;

MARINESCU, I.D., HITHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I., “**Handbook of machining with grinding wheels**”, 1ªed, 2007, Taylor and Francis Group, LLC;

MARINELLI, N., COELHO, R. T., OLIVEIRA, J. F. G., **Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina.**, Revista Máquinas e Metais, Maio/1998, pp. 56 – 73.

MESQUITA, F. A., MORELLI, M. R., “Plastic forming of Al₂O₃ ceramic substrates.”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143-144, p.232-236, 2003;

MEYER, H.R.; KLOCKE, F. Grinding tools. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.;

OIKAWA, M. H.; BIANCHI, E. C.; DESTRO, R. S.; SOUSA, R. M.; CANARIM, R. C.; SIMÕES, R. P.; AGUIAR, P. R.; “Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com rebolos diamantados com a técnica da mínima quantidade de lubrificação e refrigeração otimizada.”; **Cerâmica** 57, 263-273, 2011;

ORÉFICE, R.L., PEREIRA, M.M., MANSUR, H.S., “**Biomateriais, Fundamentos & aplicações**”, Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais – UFMG, MG, Editora Cultura Médica, 2008;

PANDOLFELLI, V.C., BALBO, J.B., CASARINI, J. R., “Influencia dos aditivos na obtenção de aluminas com alta densidade a verde”, **Cerâmica**, v.27, n.127, p. 403-410,1981;

PARK, J., “Bioceramics: Properties, Characterizations, and Applications”, 1ª ed., chapter 6, Iowa City, USA, Springer Science Business Media, LLC, 2008

RAMESH, K.; YEO, S.H.; GOWRI, S.; ZHOU, L., “Experimental evaluation of super high speed grinding of advanced ceramics.”, **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** , n.17, p.87-92, 2001;

REED, J., “Principles of ceramic processing.”, 2ª ed, John Wiley and Sons, 1995;

REGIANI, I., “**Usinagem abrasiva de cerâmicas avançadas**”, Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997;

RICHERSON, D. W., “Modern ceramic engineering, properties, processing and use in desing.”, Ed Marcel Dekker, Inc. New York, EUA, P.860, 1992;

SENA, L., **Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica.** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SHIBATA, J. The conditioning of grinding wheel and Wear mechanisms. In: MARINESCU, I.;

SOUSA, R. M., ICERI D. M., DESTRO, R. S., OIKAWA, M. H., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., FORTULAN, C. A.; “Retificação de cerâmica de alumina relacionada com diferentes técnicas de lubri-refrigeração: convencional e mínima quantidade de lubrificação.” **Cerâmica 57**, 76-84, 2011;

TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing**, New Jersey. Noyes Publications, p.237-257, 1998.

TÖNSHOFF, H.K.; LIERSE, T.; INASAKI, I., Grinding of advanced ceramics. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**, Marcel Dekker, Cap.3, 1999;

TRINO, L. D., “Desenvolvimento e otimização de materiais nanocristalinos para células solares sensibilizadas”, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Bauru, 2014;

XU, H. K.; JAHANMIR, S., “Microfracture and material removal in scratching of alumina”, **Journal of Materials Science** 30, 2235-2247, 1995;

WACHTMAN, J.B., CANNON, W.R., MATTHEWSON, M.J., “Mechanical Properties of Ceramics”, 2nd edition, Wiley, 2008;

WOLF, K., “Diamond machining of engineering ceramics”, **Industrial Diamond review**, v.55, n. 564, p.7-14, 1995;

XU, H.H.K., JAHANMIR, S., WANG, Y., “Effect of grain size on scratch interactions and material removal in alumina”, **Journal of American ceramic society**, 1995, v.78, n.9, p.2443-2448;

YIN, L.; HUANG, H.; RAMESH, K.; HUANG, T., “High speed versus conventional grinding in high removal rate machining of alumina and alumina-titania.”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 45, p.897-907, 2005.

ZHANG, D., LI, C., JIA, D., ZHANG, Y., “Investigation into Engineering Ceramics Grinding Mechanism and the Influential Factors of the Grinding Force”, **International Journal of Control and Automation Vol.7**, No.4, pp.19-34, 2014;

ZHENG, X., ZHAO, F., ZHANG, J., “Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Multilayer Alumina Composites”, **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.** www.jwutms.net Oct. 2015;