

GABRIEL AUGUSTO MALVÃO SILVA

**Influência da rotação no processo de brunimento do alumínio A357.0 T6 utilizando
régua abrasivas de diamante**

Gabriel Augusto Malvão Silva

Influência da rotação no processo de brunimento do alumínio A357.0 T6 utilizando réguas abrasivas de diamante

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

S586i	Silva, Gabriel Augusto Malvão Influência da rotação no processo de brunimento do alumínio A357.0 T6 utilizando réguas abrasivas de diamante / Gabriel Augusto Malvão Silva – Guaratinguetá, 2022. 68 f : il. Bibliografia: f. 66-68 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Ligas de alumínio - silício. 3. Aspereza de superfície. I. Título. CDU 621.9
-------	--

**GABRIEL AUGUSTO MALVÃO
SILVA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO
RIBEIROUNESP-FEG


MSc. EMANUELE SCHNEIDER
CALISSAYAUNESP-FEG

Dedico este trabalho, de modo especial, à meus pais e minha noiva que jamais deixaram de me incentivar e apoiar durante toda a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que nunca me desamparou nas minhas necessidades e esteve ao meu lado durante toda a minha caminhada. A Ele toda a minha honra, meu louvor e meu amor;

aos meus pais *Wellington e Angela*, que me deram a vida e desde pequeno me educaram e incentivaram a estudar. Sem eles este trabalho não seria possível.

a minha noiva *Karen*, que sempre esteve ao meu lado nas alegrias e tristezas, acreditou em mim quando eu não acreditei e transformou meu sonho em seu próprio sonho;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves* que me incentivou desde a graduação. Sem a sua orientação e amizade o estudo a realização deste trabalho seria impossível;

aos amigos *Marco Santos, Alberto Pereira, Diego Lucena, Ezequiel Salvador, Wagner Silvestre e Gil Naves* que me auxiliaram e apoiaram no desenvolvimento deste estudo;

“Dê-me Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.”

São Tomás de Aquino

RESUMO

O material A357.0 é uma liga de alumínio-silício com adição de cobre e magnésio fundida, altamente utilizada na indústria automotiva e aeronáutica. Este material é extremamente poroso devido ao processo de fabricação sendo necessário um acabamento superficial refinado para algumas aplicações. O brunimento é um processo de usinagem por abrasão à baixa velocidade, sendo utilizado para acabamentos superficiais finos e correções de erros geométricos em superfícies cilíndricas. É utilizado, por exemplo, no acabamento de camisas de motores à combustão e peças para sistemas de arrefecimento de aeronaves. O processo de brunimento trabalha com três parâmetros básicos para a usinagem da superfície: velocidade tangencial, velocidade axial e pressão de corte. Assim a proposta deste estudo, foi avaliar a influência da rotação da ferramenta, que produz a velocidade tangencial, no processo de brunimento da liga de alumínio A357.0, tratada termicamente na condição T6, utilizando o diamante como abrasivo. Foram observadas as rugosidades Ra e Rz da superfície, bem como a circularidade do diâmetro processado como variáveis de saída dos testes. O delineamento experimental consistiu na utilização de quatro rotações distintas, 200, 400, 600 e 800 RPM, sendo realizadas duas repetições com este conjunto de parâmetros. É importante ressaltar que foram mantidas constantes a velocidade axial e a pressão de corte, além de ser utilizado óleo mineral para lubrificação do processo. Os dados coletados foram tratados estatisticamente pela análise de variância, sendo também realizado o teste de Tukey nos mesmos. Por fim concluiu-se que a rotação apresenta uma leve influência nos valores de rugosidade Ra, porém não apresenta influência na rugosidade Rz, bem como no erro de circularidade. Foi observado também que os valores de rugosidade média Rz e de circularidade apresentam similaridade como uso de qualquer uma das quatro rotações utilizadas, sendo estatisticamente iguais. A tendência observada no processo foi uma melhoria no acabamento superficial com o aumento da rotação, porém um aumento do erro de circularidade na mesma condição. Enfim os resultados obtidos no trabalho foram coerentes com observado no estudo bibliográfico e os objetivos devidamente alcançados.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Abrasão. Liga de Alumínio-Silício. Velocidade tangencial. Rugosidade. Circularidade.

ABSTRACT

A357.0 material is a aluminum-silicon alloy with copper and magnesium, highly used in the automotive and aeronautics industry. This material is extremely porous due to the manufacturing process and for some applications it is necessary refined surface finish. Honing is a low speed abrasion machining process, used for fine surface finishes and geometric error corrections on cylindrical surfaces. It is used, for example, in the finishing of combustion engine liners and in parts for aircraft cooling systems. The honing process works with three basic parameters for surface machining: tangential velocity, axial velocity and cutting pressure. Thus, the purpose of this study was to evaluate the influence of the tool rotation, which produces the tangential velocity, on the honing process of A357.0 aluminum alloy, heat treated in condition T6, using diamond as abrasive. Surface roughness Ra and Rz were observed, as well as the processed diameter circularity as test output variables. The experimental design consisted in the use of four distinct rotations, 200, 400, 600 and 800 RPM, and two repetitions were performed with this set of parameters. Importantly, axial velocity and cutting pressure were kept constant, and mineral oil was used for process lubrication. The collected data were statistically treated by analysis of variance, and also performed the Tukey test on them. Finally it was concluded that the rotation has a slight influence on the roughness values Ra, but has no influence on the roughness Rz, as well as the error of circularity. It was also observed that the mean Rz roughness and circularity values are similar as the use of any of the four rotations used, being statistically equal. The trend observed in the process was an improvement in surface finish with increasing rotation, but an increase in circularity error in the same condition. Finally the results obtained in the work were consistent with what was observed in the bibliographic study and the objectives properly achieved.

KEYWORDS: Machining. Abrasion. Aluminum-Silicon alloy. Tangential velocity. Roughness. Circularity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de abrasão.....	19
Figura 2 – Micro-corte na usinagem por abrasão	20
Figura 3 – Forças no processo de usinagem por abrasão	21
Figura 4 – Brunimento em cilindro de motor	22
Figura 5 – Tipos de Brunimento	23
Figura 6 – Erros geométricos corrigidos	23
Figura 7 – Brunimento interno	24
Figura 8 – Cross Hatch	25
Figura 9 – Componentes da velocidade de corte.....	26
Figura 10 – Pressão de corte	29
Figura 11 – Ferramenta de brunimento	30
Figura 12 – Relação da cunha de expansão	31
Figura 13 – Régua de brunimento	32
Figura 14 – Codificação para réguas de brunimento Nagel	32
Figura 15 – Dureza dos materiais abrasivos	34
Figura 16 – Classificação dos grãos abrasivos de diamante	35
Figura 17 – Grãos de diamante	36
Figura 18 – Máquinas de brunimento	40
Figura 19 – Rugosidade Ra	41
Figura 20 – Rugosidade Rz	41
Figura 21 – Circularidade	42
Figura 22 – Corpos de prova	44
Figura 23 – Diâmetro ensaiado.....	45
Figura 24 – Medição do diâmetro com relógio comparador	45
Figura 25 – Máquina de brunimento BHG 90AC	46
Figura 26 – Mecanismo de expansão da ferramenta	47
Figura 27 – Ferramenta Nagel.....	48
Figura 28 – Fixação da peça no dispositivo	50
Figura 29 – Máquina de contorno 1900SD3	52
Figura 30 – Áreas de medição de circularidade	52
Figura 31 – Máquina 3D Prismo	53
Gráfico 1 – Rugosidade média Ra (μm) versus Rotação (RPM)	54

Gráfico 2 – Teste de Tukey da Rugosidade média Ra (μm).....	56
Gráfico 3 – Principais efeitos para Rugosidade média Ra (μm)	57
Gráfico 4 – Rugosidade Rz (μm) versus Rotação (RPM)	58
Gráfico 5 – Teste de Tukey da Rugosidade Rz (μm).....	59
Gráfico 6 – Principais efeitos para Rugosidade Rz (μm)	60
Gráfico 7 – Circularidade (mm) versus Rotação (RPM).....	61
Gráfico 8 – Teste de Tukey da Circularidade (mm)	62
Gráfico 9 – Principais efeitos para Circularidade (mm).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série de ligas de alumínio forjadas	16
Tabela 2 – Série de ligas de alumínio fundidas	16
Tabela 3 – Composição química Liga A357.0.....	17
Tabela 4 – Propriedades Liga A357.0 T6	18
Tabela 5 – Características dos materiais abrasivos.....	33
Tabela 6 – Propriedades dos ligantes.....	37
Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova pré-ensaio	46
Tabela 8 – Propriedades físico-químicas do lubrificante	49
Tabela 9 – Conjunto de parâmetros para ensaios	51
Tabela 10 – Análise de variância de Ra.....	55
Tabela 11 – Teste de Tukey rugosidade Ra	56
Tabela 12 – Análise de variância de Rz.....	58
Tabela 13 – Teste de Tukey rugosidade Rz	59
Tabela 14 – Análise de variância de Circularidade	61
Tabela 15– Teste de Tukey circularidade	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	ALUMÍNIO	15
3.1.1	Liga A357.0 T6	16
3.2	USINAGEM POR ABRASÃO	18
3.2.1	Brunimento	21
3.2.1.1	Brunimento interno	23
3.3	ELEMENTOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO INTERNO	25
3.3.1	Velocidade de corte	25
3.3.2	Pressão de corte	27
3.3.3	Ferramenta de brunimento	29
3.3.3.1	Régua de brunimento	31
3.3.4	Materiais abrasivos	33
3.3.4.1	Diamante	35
3.3.4.2	Materiais ligantes	36
3.3.5	Fluidos de corte	38
3.3.6	Máquina de brunimento	39
3.4	RUGOSIDADE	40
3.5	CIRCULARIDADE	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	CORPOS DE PROVA	44
4.2	MÁQUINA	46
4.3	FERRAMENTA	48
4.4	LUBRIFICAÇÃO	49
4.5	PROCESSAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	49
4.6	RUGOSIDADE	51
4.7	CIRCULARIDADE	52
4.8	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	RUGOSIDADE MÉDIA (RA)	54
5.2	RUGOSIDADE RZ	57

5.3	ERRO DE CIRCULARIDADE	60
6	CONCLUSÕES	64
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

O brunimento é um processo de usinagem por abrasão aplicada em superfícies cilíndricas internas e externas com dois principais objetivos, dar um acabamento superficial fino e melhorar características geométricas da peça processada. Este processo é de extrema utilidade na indústria, sendo um dos motivos a sua velocidade de corte baixa evitando problemas, como por exemplo, as queimas de superfície causadas pela retificação. Mesmo com esta característica o acabamento gerado na superfície brunida é extremamente satisfatório atingindo rugosidades muito baixas.

Este processo é amplamente utilizado nas indústrias automotiva e aeronáutica. Na indústria automotiva o uso mais popular é nos cilindros de motores à combustão e na indústria aeronáutica é utilizado, por exemplo, em peças que compõe sistemas de arrefecimento e pressurização de aeronaves. O brunimento pode ser utilizado tanto em materiais metálicos como aços endurecidos e ligas de alumínio, quanto em materiais cerâmicos.

Por ser um processo abrasivo, o brunimento tem por objetivo principal, na maioria das aplicações, melhorar o acabamento de uma superfície, sendo esta já previamente processada ou não. Quando se tem uma superfície rugosa antes da realização do brunimento, o acabamento superficial muito fino pode ser mais difícil de ser alcançado.

O material A357.0 é uma liga de alumínio-silício fundida com adição de cobre e magnésio utilizada nas indústrias automotiva e aeronáutica para fabricação de componentes, como rodas, cabeçotes, conexões, entre outros. Este material apresenta muitos poros em sua estrutura, bem como uma baixa usinabilidade. Os poros propiciam que a rugosidade seja considerável após a fundição, sendo necessária a realização de algum processo para melhorar o acabamento superficial, logo, para atingir um acabamento fino nas peças, o brunimento torna-se uma opção viável.

A remoção do material no processo de brunimento ocorre pela ação de uma ferramenta abrasiva, que é expandida com uma pressão de corte determinada. Também se dá devido a combinação de dois movimentos um axial e um tangencial, que resultam na velocidade de corte do processo.

As máquinas convencionais e mais simples de brunimento, geralmente não permitem aos operadores um fácil controle dos três parâmetros de corte do processo, sendo muitas vezes possível apenas o controle preciso do movimento tangencial. O movimento axial, que se resume na oscilação da peça ao longo da ferramenta, acaba sendo constante controlado pela máquina ou realizado manualmente pelo operador.

O movimento tangencial do brunimento é resultante da rotação da ferramenta, assim em um maquinário mais simples, este se torna o único e principal parâmetro para controle do processo. Para garantia de um acabamento superficial satisfatório e o atendimento das características geométricas de projeto é necessário o entendimento da influência da rotação nas variáveis de saída.

Outro ponto que contribui para o acabamento superficial de uma superfície brunida é o tipo de grão abrasivo utilizado, bem como o tamanho do mesmo. Quanto menor o tamanho do grão melhor é o acabamento superficial. Um dos principais abrasivos utilizados é o diamante. Por ser extremamente duro e resistente ao desgaste é geralmente utilizado para o brunimento de aços endurecidos e materiais cerâmicos não sendo geralmente aplicado para ligas de alumínio.

Isto posto, pode-se concluir que o estudo da influência da rotação no brunimento, principalmente de ligas porosas e com baixa usinabilidade são extremamente necessários, uma vez que não se tem muitos estudos avaliando este processo neste tipo de material. Ainda mais com a utilização do diamante como abrasivo.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da rotação no processo de brunimento interno para a liga fundida de alumínio A357.0 T6, utilizando ferramenta abrasiva diamantada. Para isso foram avaliadas as características superficiais e geométricas resultantes do processo sendo estas: rugosidade média Ra, rugosidade Rz e o erro de circularidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ALUMÍNIO

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante no mundo de acordo com a ASM (1990), entretanto não é encontrado livre na natureza, sendo obtido a partir de minérios, sendo o principal deles a Bauxita. O alumínio se destaca por sua versatilidade podendo produzir desde objetos simples como molduras de espelho e utensílios de cozinha, como em peças estruturais de aeronaves e componentes de satélites espaciais.

As propriedades do alumínio e de suas ligas são as responsáveis por tornar este material economicamente atraente, tanto em termos de aparência e leveza quanto em propriedades físicas e mecânicas. As principais vantagens do alumínio e suas ligas são: boa condutividade térmica, boa condutividade elétrica, adequabilidade para tratamentos de superfície, possibilidade da geração de diversas ligas, facilidade de reciclagem, entre outras (VARGEL, 2004).

Em termos de densidade, o alumínio apresenta $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente um terço da densidade do aço ($7,83 \text{ g/cm}^3$), o que justifica a utilização destes materiais para produção de peças estruturais mais leves. A condutividade elétrica do alumínio também é um fator considerável para seleção deste material, sendo o dobro da apresentada pelo cobre e a condutividade térmica varia de 50 a 60% da apresentada pelo cobre sendo vantajosa em determinadas aplicações com trocadores de calor e evaporadores (ASM, 1990).

As ligas de alumínio são divididas em dois grandes grupos as ligas fundidas e as ligas forjadas, sendo que os principais elementos presentes nestas ligas são magnésio, zinco, manganês e silício. As ligas fundidas são aquelas em que a modelagem ou conformação por meio da deformação é impossível de ser realizada, enquanto as ligas forjadas são suscetíveis a deformações mecânicas (CALLISTER, 2013).

De acordo com Vargel (2004), as ligas de alumínio compreendem em:

- Elementos de liga: são adicionados às ligas forjadas em quantidades que variam de 1 a 7% (em massa por cento), e em maiores quantidades, até 20% de silício, a ligas fundidas. São eles que determinam as propriedades básicas comuns das ligas pertencentes à mesma série. A designação de uma liga de alumínio está ligada ao elemento de liga da mesma, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Série de ligas de alumínio forjadas

Série	Principal Elemento de Liga
1XXX	Composições não puras controladas
2XXX	Cobre (podem conter outros elementos como Magnésio)
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco (podem conter outros elementos como Cobre, Magnésio, Cromo)
8XXX	Inclui Estanho e/ou Lítio

Fonte: Adaptado ASM (1990)

Tabela 2 – Série de ligas de alumínio fundidas

Série	Principal Elemento de Liga
1XX.X	Composições não puras controladas
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício (podem conter outros elementos como Cobre e Magnésio)
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
7XX.X	Zinco (podem conter outros elementos como Cobre e Magnésio)
8XX.X	Estanho

Fonte: Adaptado ASM (1990)

- Aditivos: são apresentados nas ligas de alumínio em menores quantidades, menores que 1%. São responsáveis por melhorar algumas propriedades como por exemplo diminuição do tamanho de grão após a fundição e a soldabilidade. Os principais aditivos são o cromo, manganês, níquel, titânio, berílio e zircônio.
- Impurezas: As principais impurezas presentes nas ligas de alumínio são o ferro e dependendo da liga o silício, sendo que a concentração das mesmas varia de acordo com a liga. O nível de impurezas das ligas de fundição pode ser maior para as ligas baseadas em alumínio secundário.

3.1.1 Liga A357.0 T6

A liga de alumínio A357.0 é uma liga fundida, que por as quais são utilizadas para a produção de produtos com geometrias complexas. As peças fabricadas com este tipo de liga exibem extrema integridade, tolerâncias dimensionais estreitas e propriedades mecânicas controladas (ASM, 1990).

O material A357.0 é uma liga de alumínio-Silício com adição de cobre e magnésio, que vem sendo cada vez mais utilizada nas indústrias automotiva e aeronáutica. Esta liga se caracteriza por possuir um excelente comportamento durante o processo de fundição, por apresentar um considerável teor de silício em sua composição (MOUSAVI et al., 2012). A composição da liga é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química Liga A357.0

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
6,5 – 7,5%	0,2%	0,2%	0,1%	0,4- 0,7%	0,1%	0,04-0,2%

Fonte: Adaptado ASM (1990)

A concentração de silício nas ligas fundidas de alumínio pode variar de 4% a 22%. O teor de silício está diretamente relacionado à necessidade do material em se deformar plasticamente, assim quanto maior a quantidade de silício na matriz de alumínio menor a capacidade de deformação plástica do material (ZOLOTOREVSKY; BELOV; GLAZOFF, 2007). Como nos ensina Vargel (2004), a presença do silício diminui a usinabilidade da liga, por se tratar de um elemento duro e abrasivo.

O magnésio é adicionado na liga também para atingir o nível de plasticidade necessário. De todos os elementos é o que mais influencia nas propriedades mecânicas do material, por isso apresenta concentração restrita. O ferro, por sua vez, entra na composição da liga como uma impureza e apresenta influencia negativa nas ligas de alumínio-silício, fazendo com que as mesmas percam suas propriedades mecânicas (ZOLOTOREVSKY; BELOV; GLAZOFF, 2007).

Por se tratar de uma liga fundida, este material possui uma resistência à fadiga reduzida devido à existência de poros e óxidos no material no momento da fundição (SERRANO-MUNOZ et al., 2015).

O tratamento térmico T6 corresponde à solubilização seguida envelhecimento artificial para atingir a máxima resistência. A solubilização acontece a uma temperatura de 540°C por 8 horas e após o resfriamento em água, passa pelo envelhecimento artificial a 170°C por 5 horas. Apesar de um aumento na resistência após o tratamento, existe uma redução considerável no alongamento de ruptura (ASM, 1990).

A s propriedades da liga de alumínio A357.0 T6 são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades Liga A357.0 T6

Propriedade	Valor
Densidade	2,7 g/cm ³
Dureza	100HB
Módulo de Elasticidade	71,7 GPa
Módulo de Cisalhamento	26,8 GPa
Tensão de Escoamento	248 MPa
Tensão de Ruptura	317 MPa
Elongamento de Ruptura	3%

Fonte: Adaptado ASM (1990)

3.2 USINAGEM POR ABRASÃO

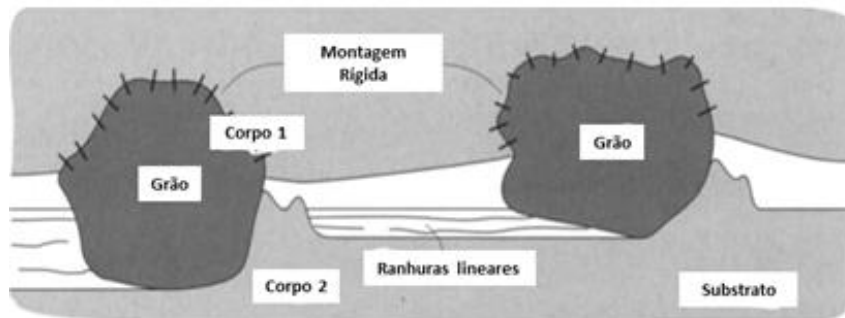
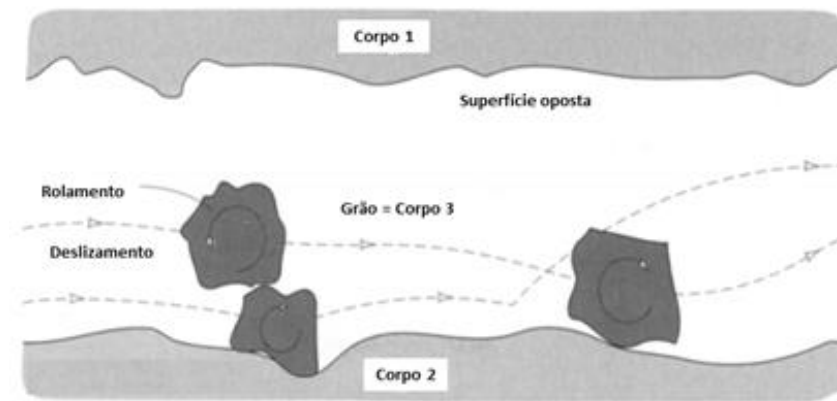
O processo de usinagem consiste na remoção de material de uma peça dando a mesma forma, acabamento superficial e dimensões, gerando por sua vez uma porção de material irregular removido, denominado cavaco (FERRARESI, 2013).

Para a produção de peças que necessitam de alta precisão dimensional, precisão geométrica ou acabamento superficial fino, como por exemplo, pistões, válvulas, engrenagens e rolamentos, um dos processos mais utilizados é a usinagem por abrasão (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

A usinagem por abrasão consiste em empregar partículas granulares de alta dureza com arestas múltiplas e formato indefinido, comumente chamado de grãos abrasivos, para modificar a forma de uma peça ou a característica superficial da mesma. Assim o principal objetivo deste processo consiste em minimizar o desgaste dos grãos abrasivos enquanto o desgaste abrasivo da peça de trabalho é maximizado (MARINESCU et al., 2013).

Existem basicamente dois tipos de abrasão: Abrasão entre dois corpos e abrasão entre três corpos, ambos podendo caracterizar o processo de usinagem, conforme observado na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de abrasão

a) Abrasão entre dois corpos**b) Abrasão entre três corpos**

Fonte: Hutchings e Shipway (2017)

A abrasão entre dois corpos, comumente denominada abrasão deslizante, é caracterizada pelas partículas, de maior dureza, encontrarem-se fixas em uma das superfícies, que precisa ser deslizada sob a outra para que haja o desgaste abrasivo. Por sua vez, a abrasão entre três corpos, também conhecida como abrasão rolante, se caracteriza pelas partículas se encontrarem livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies gerando assim o desgaste abrasivo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2005), pensava-se que o desgaste abrasivo por grãos, assemelhava-se corte por uma série de máquinas-ferramenta. No entanto, avaliações microscópicas revelaram, que o processo de corte é apenas um dos mecanismos, existindo outros indiretos que também estão envolvidos. Assim os grãos abrasivos podem remover o material por micro corte, micro fratura, arrancamento de grãos individuais ou fadiga acelerada.

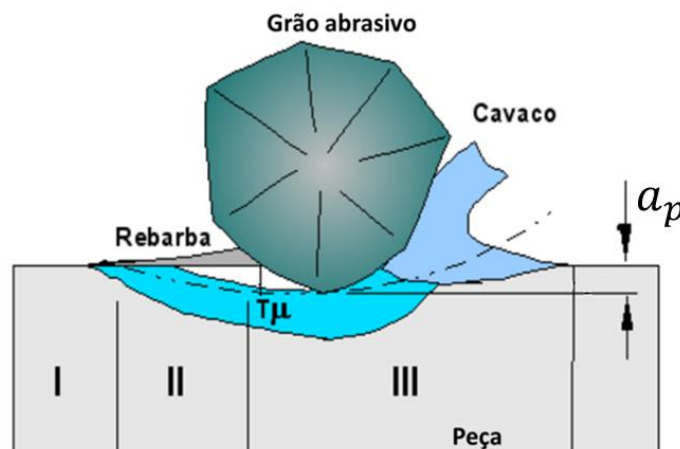
No processo de usinagem por abrasão, o principal mecanismo de desgaste observado é o micro corte, sendo este o que irá reger as características do processo. Este mecanismo

caracteriza-se pela remoção de uma porção do material mais dúctil realizada pelo grão abrasivo, mais duro e afiado. Assim a porção de material removida se torna o cavaco do processo (LAVRINENKO; SOLOD, 2018).

As diferentes fases para a formação do cavaco no processo de usinagem e consequentemente a remoção do material estão apresentadas na Figura 2. No início do contato entre a peça e o grão abrasivo (Zona I) existe apenas a deformação elástica, assim não se tem o início da formação de cavaco, apenas a formação de rebarbas. Quando a aresta do grão abrasivo penetra suficientemente na superfície da peça (Zona II) com uma espessura de corte a_p , tem-se o início da formação do cavaco, nesta região tem-se a presença de deformação elástica e plástica (STOETERAU, 2006).

Abaixo da superfície do material removido (Zona III), ocorre uma zona de deformação plástica considerável o que resultará na formação de um sulco na superfície, um endurecimento do material nesta região e uma diminuição da resistência ao desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

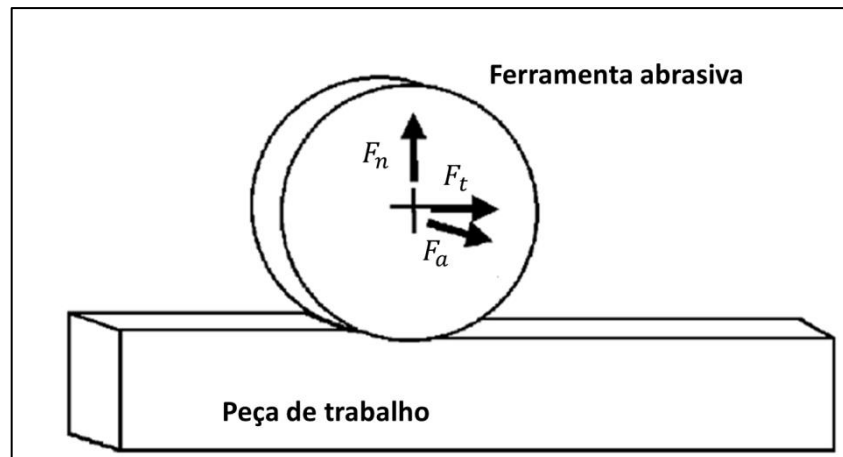
Figura 2 – Micro-corte na usinagem por abrasão



Fonte: Adaptado Stoeterau (2006)

Como nos ensina Marinescu et. al (2013), na usinagem por abrasão a força atua entre o grão abrasivo e a peça de trabalho. Esta força pode ser dividida em três componentes, que têm funções distintas e possuem diferentes efeitos no processo. Os componentes desta força são a força normal (F_n), a força tangencial (F_t) e força axial (F_a) como pode-se observar na Figura 3.

Figura 3 – Forças no processo de usinagem por abrasão



Fonte: Marinescu et. al (2013)

A força tangencial, F_t , atua tangentemente a superfície da ferramenta abrasiva, enquanto a força normal, F_n , atua perpendicularmente a mesma. A força normal é em módulo maior que a força tangencial e depende diretamente do grão utilizado, bem como da força aplicada na ferramenta para o contato com a peça. Entretanto a força axial, F_a , surge quando há um movimento lateral da ferramenta abrasiva. (MARINESCU et al., 2013).

Os processos de usinagem por abrasão estão divididos em quatro grupos principais: retificação, brunimento, lapidação e polimento. A retificação e o brunimento envolvem abrasão entre dois corpos, enquanto lapidação e o polimento são considerados processos de abrasão entre três corpos (MARINESCU et al., 2013).

3.2.1 Brunimento

O brunimento é um processo de usinagem por abrasão, onde uma ferramenta expansiva com pedras abrasivas é utilizada para remover material da superfície interna ou externa de cilindros. Este processo tem por objetivo aprimorar características geométricas, garantir precisão dimensional e acabamento superficial de peças usinadas em operações anteriores. Para tanto a ferramenta necessariamente realiza um movimento de rotação, enquanto esta ou a peça de trabalho realizam o movimento de oscilação (BUJ-CORRAL; RODERO-DE-LAMO; MARCO-ALMAGRO, 2017).

O processo de brunimento é utilizado para o acabamento de cilindros de motores (Figura 4), camisas de bielas, furos de mancais de virabrequins, peças para sistema de pressurização de

aeronaves, cilindros de freios, cilindros de embreagem, canos de canhão, entre outras aplicações. Este pode ser aplicado em diversos materiais como ferro fundido, aço temperado, aço mole, bronze, latão, cromo duro, cerâmica, alumínio, entre outros.

A remoção do material neste processo ocorre pela ação da abrasão deslizante, onde as partículas abrasivas de maior dureza, fixas na ferramenta de brunimento, atuam sob a superfície da peça de trabalho (MARINESCU et al., 2013).

Figura 4 – Brunimento em cilindro de motor

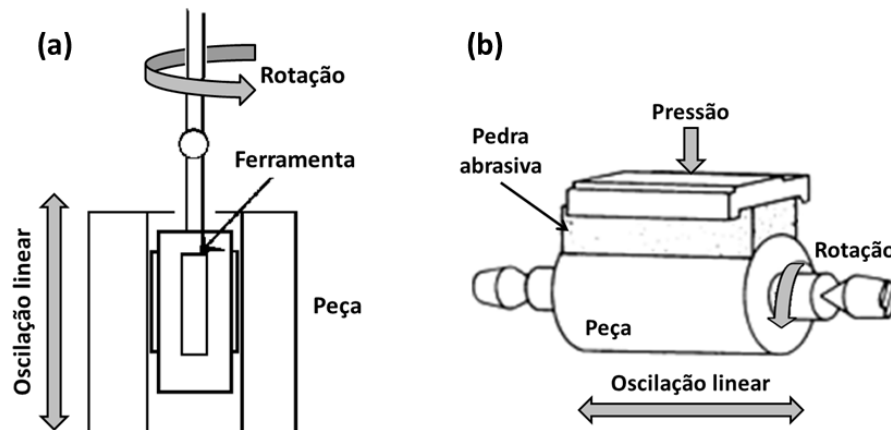


Fonte: Nagel (2019)

Por ser um processo de usinagem por abrasão as arestas de corte da ferramenta, ou seja, as arestas de corte dos grãos abrasivos são indefinidas geometricamente. Durante o processo esses grãos abrasivos permanecem em contato contínuo com a superfície da peça (MOOS; BÄHRE, 2015).

O brunimento realizado em superfícies cilíndricas internas é caracterizado pela ferramenta realizar o movimento de rotação em relação a peça trabalho, sendo também conhecido como brunimento de curso longo. Além de superfícies cilíndricas internas, inúmeras superfícies externas também podem receber o processo de brunimento, entretanto este é denominado brunimento de curso curto ou “*microhoning*”. A principal diferença deste processo é que a peça de trabalho realiza o movimento de rotação com um curso curto de trabalho e uma alta frequência. Ambos os tipos de brunimento podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de Brunimento: a) Brunimento de curso longo; b) Brunimento de curso curto



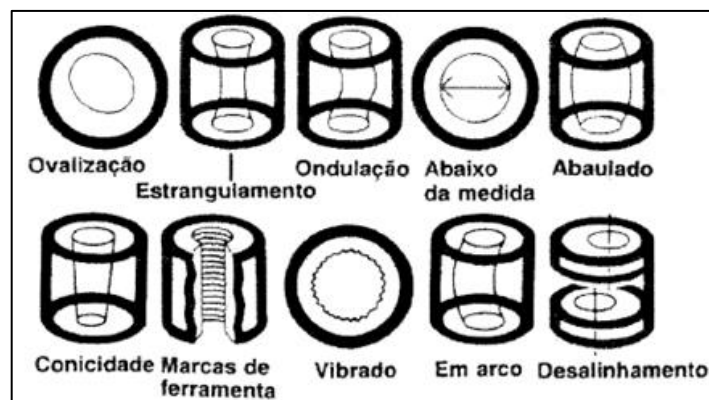
Fonte: Adaptado ASM (1989) e Marinescu et al. (2013)

3.2.1.1 Brunimento interno

O brunimento interno ou brunimento de curso longo é realizado em furos cilíndricos, onde os grãos abrasivos presentes na ferramenta permanecem em contato constante com a superfície da peça, descrevendo trajetórias helicoidais e consequentemente removendo material.

O brunimento interno gera características funcionais no furo sendo estas: precisão geométrica, precisão dimensional e acabamento superficial. No que diz respeito à precisão geométrica, de acordo com ASM (1989), existem dez tipos de erros comuns em furos, apresentados na Figura 6, causados por processos anteriores. Estes erros são corrigidos pelo processo de brunimento com a menor quantidade de remoção de material possível.

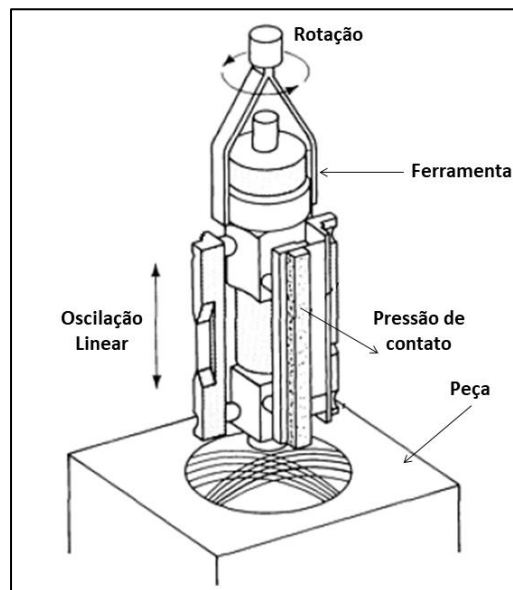
Figura 6 – Erros geométricos corrigidos



Fonte: ASM (1989)

A remoção do material ocorre pela combinação de dois movimentos realizados simultaneamente: (1) Movimento de rotação da ferramenta em torno de seu próprio eixo e (2) oscilação linear da peça em relação à ferramenta ou oscilação linear da ferramenta em relação à peça conforme mostrado na Figura 7. Além dos dois movimentos, a pressão expansiva da ferramenta de brunir influencia diretamente na remoção do material, uma vez que é ela que garante o contato dos grãos abrasivos da ferramenta com a peça.

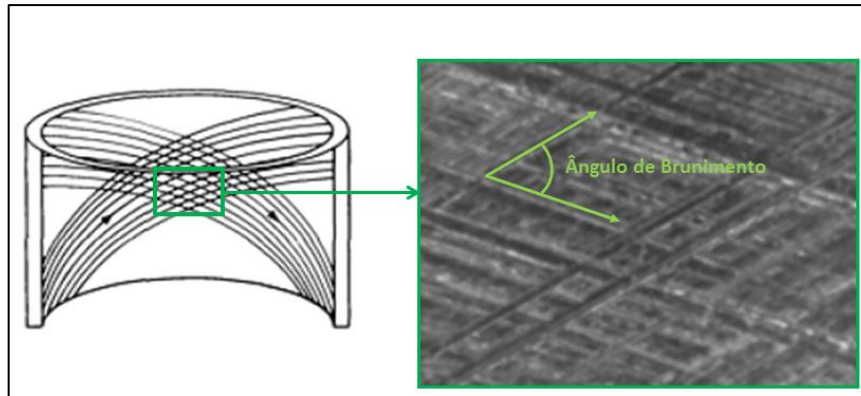
Figura 7 – Brunimento interno



Fonte: ASM (1989)

Uma das características do processo de brunimento é a baixa velocidade que a ferramenta abrasiva se move em relação à peça de trabalho, sendo esta entre 0,2 m/s e 2 m/s. Combinando os movimentos de rotação e oscilação é obtida a taxa de remoção de material na superfície da peça (MARINESCU et al., 2013).

Durante o processo são gerados, na superfície dos furos cilíndricos, sulcos que apresentam uma disposição cruzada, este aspecto visual é comumente chamado de “*cross-hatch*”. Esta característica é consequência dos movimentos simultâneos de rotação e oscilação, bem como da trajetória helicoidal constante dos grãos abrasivos na superfície. O ângulo formado pelos sulcos perpendiculares ao eixo longitudinal do cilindro é conhecido como ângulo de brunimento (LAWRENCE; RAMAMOORTHY, 2016).

Figura 8 – *Cross Hatch*

Fonte: Adaptado ASM (1989)

Grabon et al. (2016) ensinam que o ângulo de brunimento é substancial do ponto de vista funcional, por exemplo, em pistões de motores de combustão, ele está diretamente relacionado ao consumo de óleo. Sendo que estudos indicam que o consumo de óleo pode ser reduzido com o aumento do ângulo.

As principais vantagens do brunimento interno são a alta taxa de remoção do material em relação a outros processos de usinagem por abrasão, como por exemplo a lapidação. Além disso, a pressão utilizada para este processo é mais baixa do que nos processos de retificação, permitindo um melhor controle dimensional das peças, bem como a superfície. As principais desvantagens do processo são a baixa velocidade de corte utilizada, não permitindo a correção de desalinhamento dos diâmetros, e a área de aplicação reduzida (BUJ-CORRAL; RODERO-DE-LAMO; MARCO-ALMAGRO, 2017).

No processo de brunimento interno vários fatores influenciam a rugosidade superficial e a taxa de remoção de material. Estes fatores podem ser relacionados à máquina de brunimento como velocidade linear, a velocidade tangencial, a pressão de pedras abrasivas na superfície das peças ou tipo de fluídos de corte usado. Também podem estar ligados as ferramentas abrasivas como tipo de abrasivo, tamanho de grão do abrasivo, tipo de ligante ou densidade do abrasivo (BUJ-CORAL; VIVANCOS-CALVET; COBA-SALCEDO, 2013).

3.3 ELEMENTOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO INTERNO

3.3.1 Velocidade de Corte

A cinemática do processo de brunimento compõe dois movimentos básicos e um movimento resultante. Assim a velocidade de corte (V_c) é a resultante entre a velocidade axial (V_a) gerada pelo movimento de oscilação da ferramenta ou oscilação da peça e a velocidade tangencial (V_t) gerada pela rotação da ferramenta (MOOS; BÄHRE, 2015). O comportamento destas velocidades é apresentado na Figura 9.

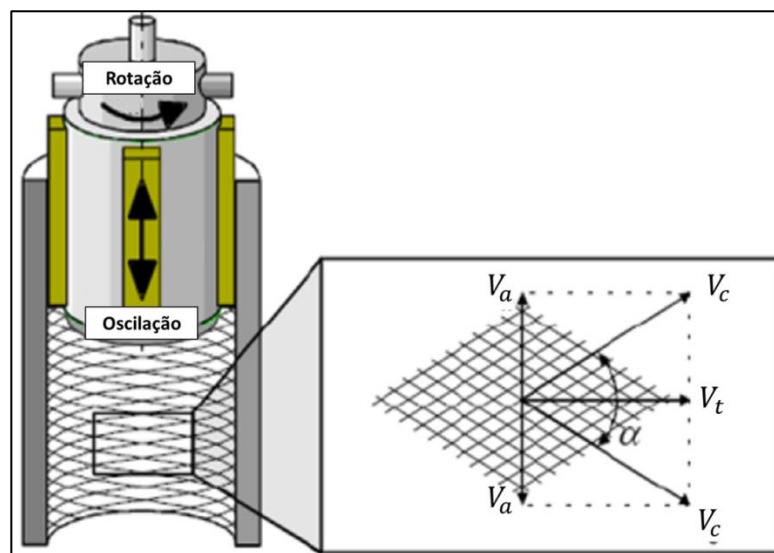
Por se tratar de uma resultante entre a velocidade axial (V_a) e a velocidade tangencial (V_t), a velocidade de corte (V_c) pode ser representada como a soma vetorial de ambas, podendo assim ser representada conforme equação 1:

$$V_c = \sqrt{V_a^2 + V_t^2} \quad (1)$$

Onde:

- V_c é a velocidade de corte;
- V_a é a velocidade axial;
- V_t é a velocidade tangencial;

Figura 9 – Componentes da velocidade de corte



Fonte: Adaptado Sabri e Mansori (2009)

Sendo assim é possível concluir que quanto maiores as velocidades de corte, maiores serão as taxas de remoção de material na superfície da peça. Entretanto, o aumento excessivo da velocidade de contribui para diminuir a precisão dimensional, superaquecer a peça de trabalho e gerar o empastamento do abrasivo. Sendo que o último causa a quebra do fluido de

brunimento e a distorção da peça de trabalho, afetando as características geométricas da peça (ASM, 1989).

É importante ressaltar que durante o brunimento o mesmo grão abrasivo realiza o microcorte em dois planos diferentes, isto é, a cada inversão de direção da velocidade de corte uma face diferente do grão abrasivo atua na superfície da peça. Este fenômeno é responsável pelo reavivamento constante das arestas de corte durante o processo.

De acordo com Polyanchikov et al. (2008) a variação na velocidade de corte no processo de brunimento permite uma utilização mais completa do potencial da ferramenta, além de reduzir o desgaste da mesma e melhorar a qualidade da superfície.

3.3.2 Pressão de corte

A pressão de corte (P_c), juntamente com a velocidade de corte (V_c), é o principal parâmetro que rege os esforços gerados no processo de brunimento. Como nos ensina Moos e Bähre (2015), a pressão de corte irá definir a profundidade da penetração dos grãos abrasivos na superfície da peça e consequentemente a formação de cavacos, a taxa de remoção de material e a qualidade da superfície da peça brunida.

Quando se tem uma pressão de corte abaixo do necessário, a tendência da taxa de remoção do material é diminuir consideravelmente. Entretanto se a pressão de corte é excessiva tem-se um acabamento superficial mais rugoso, além de gerar um desgaste excessivo nas pedras abrasivas, aumentando a frequência de troca das mesmas e consequentemente um aumento no custo do brunimento (ASM, 1989).

A pressão de corte atua nas pedras abrasivas presentes na ferramenta de brunimento que tem seu contato contra a superfície da peça de trabalho regido pela força normal. A geometria das pedras abrasivas também é um fator decisivo para determinação da pressão de corte. A área de contato da pedra com a peça de trabalho é dada pela largura da pedra abrasiva e o comprimento da mesma (MOOS; BÄHRE, 2015). Assim a pressão de corte, pode ser definida conforme equação 2:

$$P_c = \frac{F_N}{b_a * l_a} \quad (2)$$

Onde:

- P_c é a pressão de corte;

- F_N é a força normal;
- b_a é a largura da pedra abrasiva;
- l_a é o comprimento da pedra abrasiva;

A força normal por sua vez depende intimamente da pressão hidráulica, proveniente da máquina de brunir, e da área do pistão do cilindro de alimentação, bem como do ângulo de expansão da ferramenta e da quantidade de pedras abrasivas na ferramenta (MOOS; BÄHRE, 2015). Assim define-se a força normal de acordo com equação 3:

$$F_N = \frac{P_H * A_H}{m * \tan \gamma} \quad (3)$$

Onde:

- F_N é a força normal;
- P_H é a pressão hidráulica;
- A_H é a área do pistão do cilindro de alimentação;
- m é a quantidade de pedras abrasivas;
- γ é o ângulo de expansão da ferramenta;

Substituindo a equação 3, na equação 2 obtém-se a equação 4 que determina a pressão de corte (P_C) na superfície da peça de trabalho.

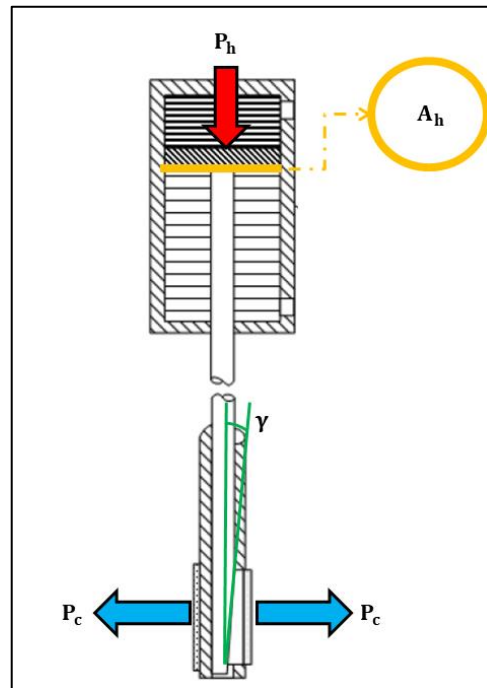
$$P_C = \frac{P_H * A_H}{b_a * l_a * m * \tan \gamma} \quad (4)$$

Onde:

- P_C é a pressão de corte;
- b_a é a largura da pedra abrasiva;
- l_a é o comprimento da pedra abrasiva;
- P_H é a pressão hidráulica;
- A_H é a área do pistão do cilindro de alimentação;
- m é a quantidade de pedras abrasivas;
- γ é o ângulo de expansão da ferramenta;

A relação entre a pressão hidráulica do cilindro com a pressão de corte exercida na superfície da peça de trabalho é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Pressão de corte



Fonte: Adaptado Moos e Bähre (2015)

3.3.3 Ferramenta de Brunimento

No processo de brunimento a ferramenta tem uma função extremamente importante, uma vez que a relação entre as faces desta e a superfície do furo da peça de trabalho é o que permite que o processo seja realizado. O comportamento da ferramenta influencia na força normal na superfície do furo e consequentemente na pressão de corte (MOOS; BÄHRE, 2015).

As ferramentas de brunimento distribuem a pressão igualmente em toda superfície do furo, independente da máquina, da vibração apresentada na peça ou até mesmo do ambiente em que se encontra (ASM, 1989).

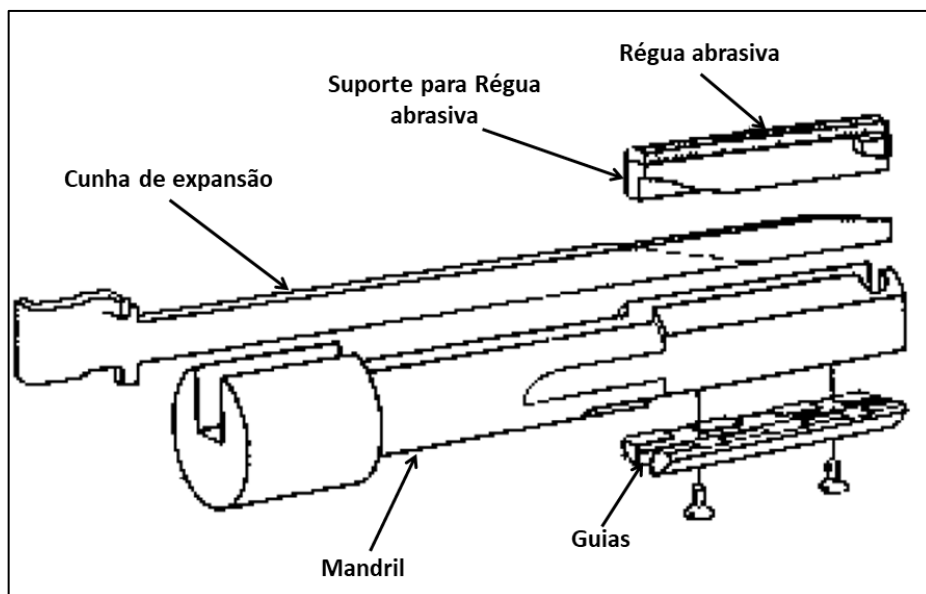
O centro da ferramenta de brunimento deve seguir o eixo do furo estabelecido nas operações anteriores, portanto a ferramenta ou a peça de trabalho deve flutuar de modo que o centro do furo e o centro da ferramenta possam se alinhar no momento da expansão da ferramenta (ASM, 1989).

De acordo com a ASM (1989), o design da ferramenta de brunimento depende da forma que este será realizado: automático ou manual. A ferramenta para brunimento manual gira em torno de um eixo fixo, enquanto a peça de trabalho apresenta um movimento lateral para que possa ser guiada e alinhada pela ferramenta durante o processo. Basicamente esta ferramenta é composta pelos componentes abaixo, que são indicados na Figura 11.

- Mandril (corpo da ferramenta);
- Cunha de expansão, também conhecida como cone de expansão;
- Guias;
- Suporte de réguas abrasivas;
- Réguas abrasivas;

A Figura 11 apresenta os elementos que compõe uma ferramenta de brunimento.

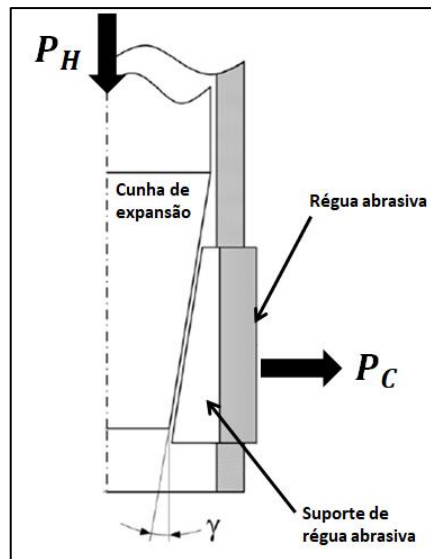
Figura 11 – Ferramenta de Brunimento



Fonte: ASM (1989)

O mandril é o corpo rígido da ferramenta de brunimento fabricado com material tratado e posteriormente retificado. Acoplado ao mandril tem-se a cunha de expansão, sendo esta quem controla o avanço das réguas abrasivas, geralmente são fabricadas de aço temperado e posteriormente retificadas (ASM, 1989). A relação de acoplamento e movimentação entre a cunha de expansão e a régua abrasiva é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Relação da cunha de expansão



Fonte: Adaptado Moos e Bähre (2015)

A cunha expansiva é a responsável pela transferência da pressão hidráulica (P_H) para as réguas abrasivas gerando assim a pressão de corte (P_C). É ela que determina o ângulo de expansão da ferramenta de brunimento (γ), buscando os melhores resultados em termos de estabilidade e força na expansão das réguas.

Completando o sistema de expansão do processo de brunimento, tem-se o suporte das réguas abrasivas, que também desempenham um papel fundamental no sistema. Como pode se observar na Figura 12, os suportes das réguas apresentam a mesma angulação da cunha expansiva para que o contato possa ser efetivo.

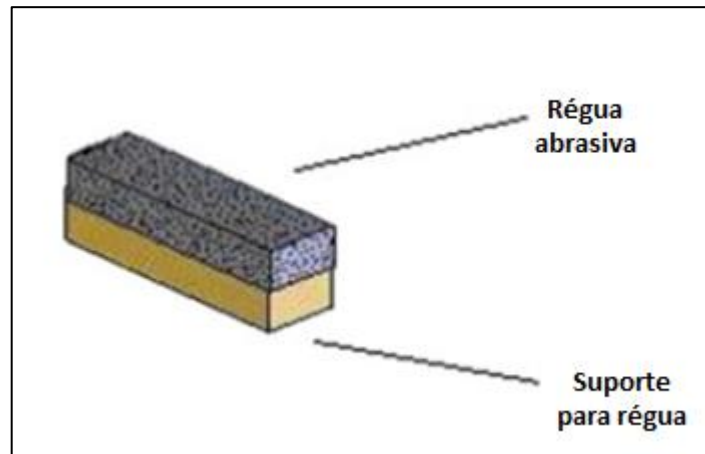
Para desviar as forças resultantes do corpo da ferramenta para a peça de trabalho, em ferramentas de brunimento, são acopladas as guias. Estas guias não são móveis (radialmente ou axialmente) e não participam da remoção do material, entretanto são utilizadas na maioria das vezes quando se tem apenas uma régua abrasiva na ferramenta (MOOS; BÄHRE, 2015).

3.3.3.1 Régua de Brunimento

As réguas de brunimento, de acordo com Wu e Funkenbusch (2010), são compósitos constituídos de um abrasivo e uma matriz, também chamada de ligante. O ligante tem como função reter e manter os grãos abrasivos fixos para que o mecanismo de abrasão entre dois corpos seja permitido.

Estes elementos também são conhecidos como pedras ou réguas abrasivas, e são as responsáveis pelo resultado do processo em termos de remoção e qualidade superficial. Elas são coladas individualmente em suportes metálicos para serem acopladas na ferramenta de brunimento como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Régua de Brunimento

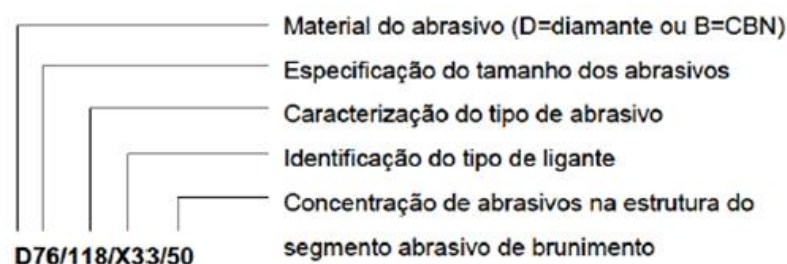


Fonte: Adaptado Buj-Corral e Vivancos-Calvet (2011)

O comprimento, largura e espessura das réguas abrasivas, são extremamente importantes, uma vez que irão ditar o comportamento da ferramenta para correção de elementos geométricos. Por exemplo, quanto maior o comprimento das réguas abrasivas, mais eficiente é a correção da cilindricidade em furos longos.

As réguas abrasivas são classificadas basicamente pelo material abrasivo e sua granulação, material ligante e a concentração abrasiva (WU; FUNKENBUSCH, 2010). A codificação para as réguas de brunimento variam de acordo com o fabricante. Um exemplo de codificação é o utilizado pela empresa Nagel apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Codificação para réguas de brunimento Nagel



Fonte: Barros (2018)

3.3.4 Materiais Abrasivos

Os materiais abrasivos podem ser naturais ou sintéticos e são considerados ferramentas de corte com geometria não definida, sendo caracterizados por apresentar alta dureza, arestas cortantes e boa capacidade de corte (MARINESCU et al., 2013).

Além da dureza, a friabilidade também é uma característica importante dos materiais abrasivos. Como ensinam Kalpakjian e Schmid (2009), a capacidade dos grãos abrasivos de se dividirem em pedaços menores é denominada friabilidade. É esta propriedade que permite a estes materiais terem a capacidade de se auto-afiar durante os processos e manterem-se constantemente cortantes. Assim um material abrasivo com alta friabilidade possui uma baixa resistência à fratura, o que significa que ele fragmenta mais facilmente sob as forças do processo.

A indústria de abrasivos se baseia, basicamente, em cinco materiais, sendo estes: carbetto de silício (SiC), alumina (Al_2O_3) e Garnet, que são denominados abrasivos convencionais, além do diamante e do nitreto cúbico de Boro (CBN) que são denominados superabrasivos (MARINESCU et al., 2013). A diferença entre os dois tipos de abrasivos consiste principalmente na dureza, sendo que os superabrasivos recebem este nome por se tratarem de materiais extremamente duros.

São apresentadas na Tabela 5 as principais características dos materiais abrasivos. Por sua vez é apresentado na Figura 15 um gráfico comparativo da dureza dos materiais abrasivos e alguns outros materiais utilizados.

Tabela 5 – Características dos materiais abrasivos

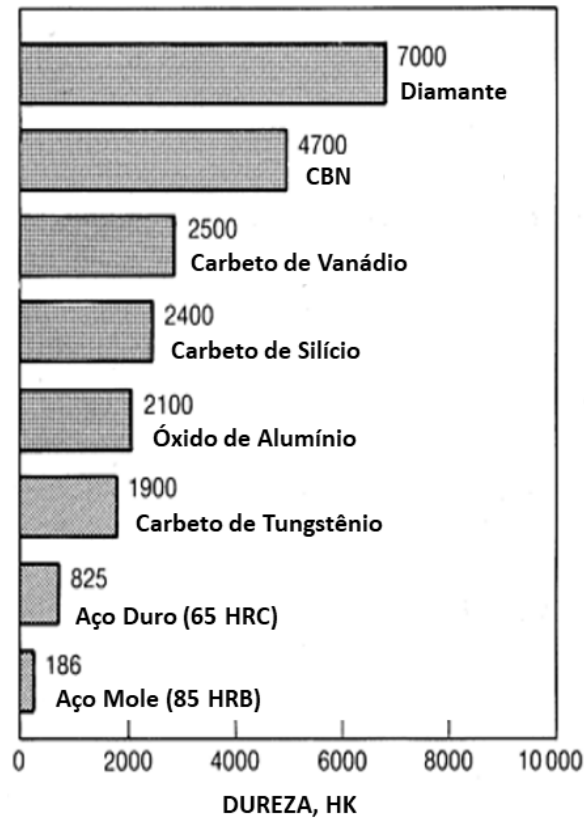
Característica	Superabrasivo		Convencional	
	Diamante	CBN	Al_2O_3	SiC
Densidade (g/cm^3)	3,52	3,48	3,92	3,21
Dureza (HK)	60-110	40-70	21	24
Condutividade térmica	100-350	35-120	1	10
Coefficiente Expansão térmica ($10^{-6}\text{mm/mm/}^\circ\text{C}$)	4,8	5,6	8,6	4,5

Fonte: Adaptado ASM (1989)

Além do material do abrasivo, a granulometria, ou seja, o tamanho do grão abrasivo é de extrema importância para a definição de um processo, bem como os resultados do mesmo. O tamanho de um grão abrasivo é identificado por um número que corresponde à malha de triagem usada para dimensionamento. O tamanho dos grãos pode ser identificado na escala “*mesh*”, que

representa o número de fios por polegada linear da tela, através dos quais os grãos passam enquanto são retidos na próxima tela de tamanho mais fino.

Figura 15 – Dureza dos materiais abrasivos



Fonte: ASM (1989)

De acordo com Stemmer (1993), para os grãos de CBN e diamante geralmente é utilizada a classificação da Federação Europeia dos Fabricantes de Abrasivos, também conhecida como FEPA para identificação do tamanho do grão. A classificação da FEPA especifica o tamanho do grão pela abertura da malha da peneira em micrometros. As classificações da FEPA ISO 6106-1979 e da DIN 848-1965 correlacionadas com a dimensão dos grãos de diamante em micrometros e “*mesh*” estão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Classificação dos grãos abrasivos de diamante

FEPA	DIN	GRANULOMETRIA	
		em μm	em MESH
D 7	D 7	5...10	
D 15	D 15	10...20	
D 20	D 20	15...25	
D 30	D 30	20...40	
D 46	D 40	38...45	325...400
D 54	D 50	45...53	270...325
D 64	D 60	53...63	230...270
D 76	D 70	63...75	200...230
D 91	D 80	75...90	170...200
D 107	D 100	90...106	140...170
D 126	D 120	106...125	120...140
D 151	...	125...150	100...120
D 181	D 150	150...180	80...100
D 213	D 200	180...212	70...80
D 251	D 250	213...250	60...70

Fonte: Barros (2018)

A dependência entre o desgaste e o tamanho do grão abrasivo é uma característica importante nos processos de abrasão, pois o desgaste aumenta consideravelmente com o tamanho do grão até um diâmetro crítico e então reduz a velocidade do desgaste ou permanece constante. Portanto, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste diminuem rapidamente com a diminuição do diâmetro do grão (SIN; SAKA; SUH, 1979).

3.3.4.1 Diamante

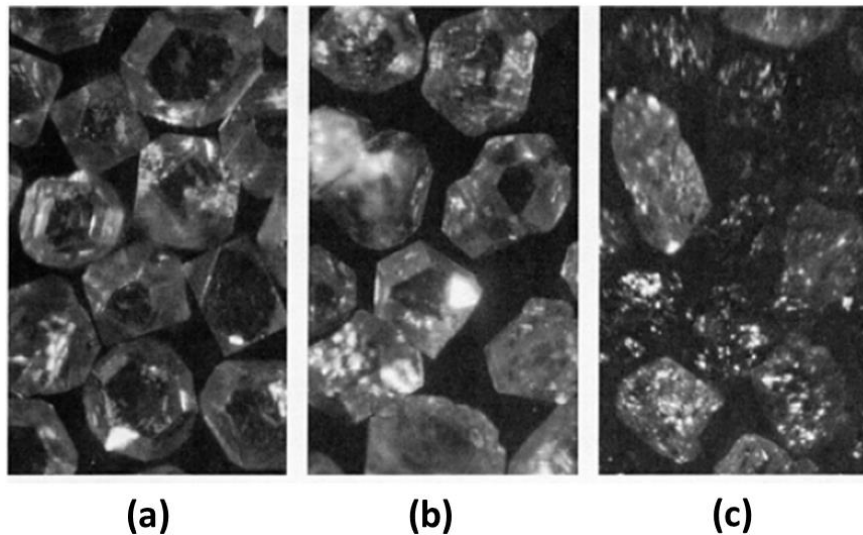
Atualmente o diamante é o material mais duro que se tem ciência, sendo ele natural ou sintético. O diamante natural, utilizado para fabricação de abrasivos, é derivado de cristais que são impróprios para fabricação de joias e tem sido utilizado na indústria desde antes do século XX. Entretanto com o desenvolvimento dos diamantes sintéticos na década de 1950, o uso do mesmo foi amplificado em uma variedade de aplicações abrasivas, como por exemplo, o brunimento.

De acordo com Malkin e Guo (2008), a estrutura, a forma e o tamanho dos diamantes naturais usados na indústria são determinados por sua formação geológica, enquanto os diamantes sintéticos usados na indústria de abrasivos podem ter sua estrutura alterada pelas diversas condições de processo para a obtenção dos mesmos. Estes materiais são obtidos pela sujeição do grafite a temperaturas elevadas em altas pressões na presença de um solvente catalisador,

como o níquel por exemplo. As variações de temperaturas e pressões no processo geram diamantes com estruturas, formas e tamanhos diferentes.

Três diferentes tipos de grãos abrasivos de diamantes são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Grãos de diamante. (a) grão forte e resistente; (b) grão de resistência intermediária; (c) grão frágil e friável.



Fonte: ASM (1989)

Além de sua alta dureza e possuir uma grande resistência ao desgaste, o diamante é um excelente condutor térmico e possui um coeficiente de expansão extremamente baixo. Como o diamante é uma estrutura formada de carbono, as interações com materiais ferrosos são esperadas, podendo facilitar um atrito químico que tende a causar o desprendimento prematuro dos grãos de diamante (MARINESCU et al., 2013). Outro ponto que deve ser ressaltado é que o diamante quando submetido a calor por longos período se degrada com uma velocidade maior.

As aplicações dos abrasivos diamantados estendem-se a aplicações na construção civil como o polimento e modelagem de pedras e mármore e corte de concreto para reparar prédios, rodovias e pistas de aeroportos. Estes tipos de abrasivos são usados na área da mineração em operações de perfuração de rochas e perfuração de poços de petróleo. O diamante é utilizado também em processos de acabamento superficial finos, como lapidação, brunimento e polimento (ASM, 1989).

3.3.4.2 Materiais ligantes

A função básica do material ligante na estrutura de uma ferramenta abrasiva é segurar os grãos abrasivos durante o processo, entretanto, de acordo com Marinescu et. al (2013), esta capacidade de retenção de grãos deve cumprir as seguintes funções:

- Proporcionar uma retenção de grão adequada, sem retirada prematura da superfície do abrasivo.
- Permitir a erosão controlada das ligações, levando a uma exposição gradual de novos pontos de corte.
- Fornecer força suficiente para garantir a transferência ideal das forças de processo do fuso para a peça de trabalho.
- Fornecer a dissipação de calor adequada.

Para os superabrasivos são utilizados três tipos de ligantes, são eles: os vitrificados, os resinoides e os metálicos (MALKIN; GUO, 2008). As propriedades mecânicas destes tipos de ligantes são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades dos ligantes

Propriedade Mecânica	Resinoide	Vitrificado	Metálico
Dureza (HB)	228	380	278
Tensão de Ruptura (psi)	1,046	1,243	2,073
Módulo de Elasticidade (psi)	173,5	599,5	792,0

Fonte: ASM (1989)

- Ligantes vitrificados: é o ligante mais comum e amplamente utilizado na indústria. Essencialmente é fabricado pela sinterização a alta temperatura de feldspato ou bórax e argilas. Suas características são sua alta estabilidade de temperatura, fragilidade, rigidez e sua capacidade de suportar altos níveis de porosidade. Este ligante misturado com o abrasivo e um aglutinante, tal como dextrina e água, é prensada num molde usualmente à temperatura ambiente. Os ligantes vitrificados para diamantes têm requisitos diferentes dos abrasivos convencionais. O diamante não apresenta ligação química significativa com os componentes de uma ligação vítrea, portanto, deve-se confiar na ligação mecânica. O diamante reage com o ar a temperaturas acima de 650 ° C (1.200 ° F), logo, as ferramentas abrasivas diamantadas devem ser acionadas a baixas temperaturas ou em atmosfera inerte ou redutora (MARINESCU et al., 2013).

- Ligantes resinoides: são produzidos por uma mistura de grãos abrasivos com resinas fenólicas termorrígidas ou plastificantes, sendo moldadas e curadas a 150-200 °C. Este tipo de ligante é amplamente utilizado para operações agressivas por sua alta resistência e resiliência. Os ligantes resinoides são os mais utilizados para os superabrasivos, sendo que os fabricados com resinas fenólicas termorrígidas são os mais difundidos, sendo aplicados em operações com alta velocidade e necessidade de precisão.
De acordo com Malkin e Guo (2008), ferramentas com ligantes resinoides são suscetíveis a ataques químicos alcalinos provenientes do fluido de corte. Isto afeta a resistência, principalmente quando exposto a um longo tempo e a altas temperaturas, além de enfraquecer a ligação do abrasivo com o ligante.
- Ligantes metálicos: amplamente utilizado com superabrasivos, sendo o principal proveniente do bronze sinterizado pela metalúrgia do pó. Os ligantes metálicos mantêm os grãos mais firmes que os ligantes resinoides. A excelente retenção de grãos e a alta resistência ao desgaste abrasivo produzem ferramentas para a utilização em materiais frágeis, como vidro e cerâmica. Uma desvantagem deste tipo de ligante é a alta temperatura de sinterização necessária para derreter a fase metálica, o que leva a altos custos de fabricação.

O volume dos grãos abrasivos presente na matriz ligante é conhecido como concentração. Este parâmetro é extremamente importante, pois é quem determina o desempenho e comportamento das ferramentas abrasivas. O efeito da concentração de partículas abrasivas influencia na taxa de remoção de material, na taxa de remoção de material por partícula e a qualidade superficial da operação. Resultados experimentais mostraram que a taxa de remoção de material aumenta linearmente com o aumento da concentração abrasiva (ZHANG; LIU; SONG, 2010). Em tamanhos de grãos maiores, são utilizadas concentrações mais elevadas, e para tamanhos de grãos menores são utilizadas concentrações mais baixas, assim é mantida uma quantidade constante de grãos abrasivos por área de ferramenta.

3.3.5 Fluidos de corte

Os fluidos de corte são utilizados nas operações de usinagem para duas principais funções: Resfriamento da ferramenta e da peça e lubrificação durante o processo. O uso de fluido de corte no processo possibilita o aumento da produtividade e a redução de custos. Além disso, a aplicação de fluidos de corte também pode aumentar a vida útil da ferramenta, diminuir a

rugosidade da superfície, aumentar a precisão dimensional e diminuir a quantidade de energia consumida em comparação ao corte a seco (ASM, 1989).

De acordo com Marinescu *et. al* (2013), como a usinagem abrasiva apresenta um alto teor de atrito entre a peça e a ferramenta, em geral, os fluidos de corte para este processo tem como principal intuito diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, reduzindo o desgaste e propiciando a remoção do material. Especificamente no processo de brunimento, o fluido de corte além da lubrificação e do o resfriamento, também tem a função de auxiliar na remoção e transporte dos cavacos da superfície da peça.

A temperatura localizada no ponto de contato entre o grão abrasivo e a peça é relativamente baixa quando comparada aos outros processos de usinagem, apresentando um valor entre 100 e 200°C. A refrigeração promovida pelo fluido de corte, deve ser suficiente para evitar erros de forma e precisão causados pela temperatura (GROOSE *et. al*, 2015).

A capacidade do fluido de corte de remover os cavacos da superfície da ferramenta é de extrema importância, pois uma vez que não há acúmulo de cavaco sob a superfície da pedra abrasiva, o processo atinge uma alta qualidade superficial e uma alta taxa de remoção de material, sendo que a viscosidade do fluido influencia tanto neste aspecto quanto na capacidade de lubrificação.

3.3.6 Máquina de Brunimento

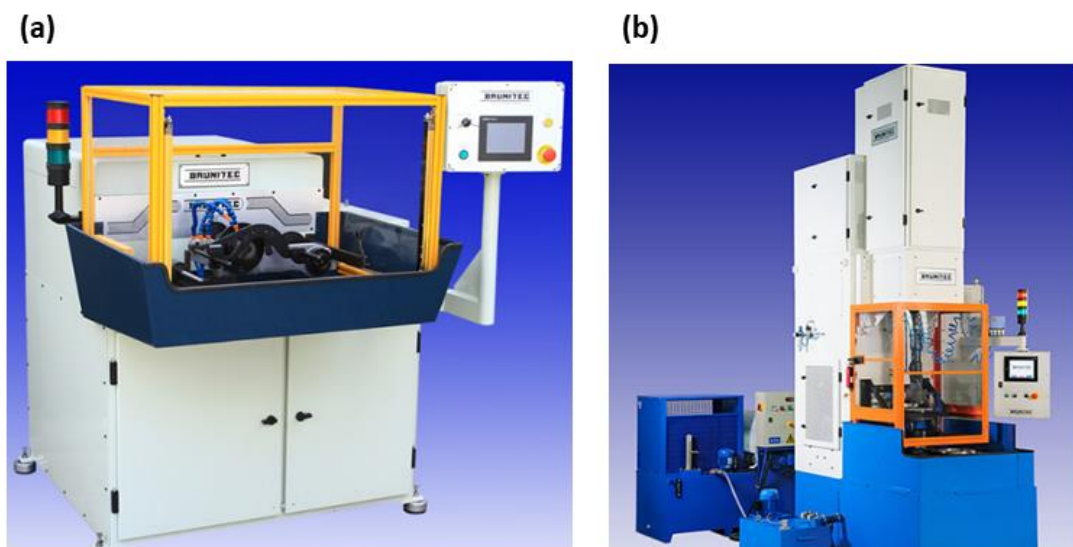
As máquinas de brunimento interno se diferenciam basicamente pela orientação em que o fuso da ferramenta se encontra, sendo horizontal ou vertical. São apresentadas na Figura 18 duas máquinas com orientação de processos diferentes.

Além da orientação do fuso da ferramenta, as máquinas de brunimento se diferenciam pelo modo que o movimento linear é realizado, podendo ser manual ou automático.

As máquinas de curso manual apresentam a ferramenta fixa com uma velocidade de rotação determinada, enquanto a peça de trabalho apresenta liberdade para realizar o movimento linear ao longo da ferramenta realizado pelo operador. No geral este tipo de equipamento apresenta orientação horizontal, além disso apresenta ainda mecanismos para o controle da expansão da ferramenta de brunimento. As máquinas de oscilação manual devem ser utilizadas para fabricação de peças que são facilmente manuseáveis pelo operador. Por se tratar de um processo manual, a correção de irregularidades do diâmetro é facilitada, bem como a proximidade da dimensão na tolerância necessária, uma vez que o operador pode medir periodicamente a peça de trabalho (ASM, 1989).

As máquinas de curso automático apresentam a peça de trabalho fixa, enquanto a ferramenta realiza os movimentos de rotação e o deslocamento linear ao longo da peça de trabalho. A orientação do equipamento, vertical ou horizontal, é determinada pelo comprimento do furo a ser brunido, em geral para furos até 1,8 metros de comprimento são utilizadas máquinas verticais e acima deste comprimento máquinas horizontais. Sendo os equipamentos verticais preferidos por permitirem uma fixação mais simples, além de favorecerem a obtenção de furos com características geométricas mais apuradas (ASM, 1989).

Figura 18 – Máquinas de brunimento. (a) horizontal; (b) vertical



Fonte: Brunitec (2019)

3.4 RUGOSIDADE

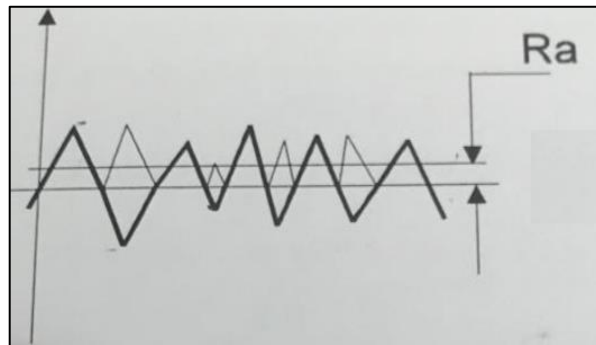
Um dos principais motivos em que se utiliza o brunimento nos dias de hoje é a possibilidade que esse processo permite de se obter uma alta qualidade superficial. Esta qualidade superficial apurada para garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado. A qualidade de uma superfície está diretamente relacionada a sua rugosidade.

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), a rugosidade é definida como sendo desvios irregulares próximos e espaçados em pequena escala, sendo resultantes da ação inerente do processo de corte.

O principal método de análise de rugosidade é conceituado como média aritmética dos valores absolutos no comprimento de amostragem, conhecida como rugosidade Ra, identificada

na Figura 19. Esta apresenta uma característica estável, uma vez que não é influenciada por efeitos ocasionais (MACHADO *et al*, 2009).

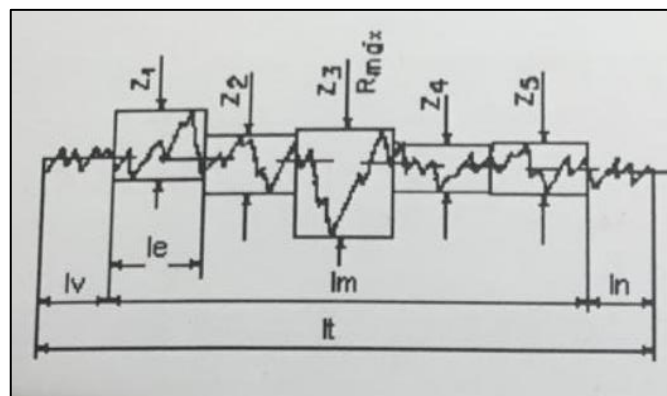
Figura 19 – Rugosidade Ra



Fonte: Novaski (1994)

Outro parâmetro comumente utilizado para medição da rugosidade de superfícies brunidas é o Rz, identificada na Figura 20. Este parâmetro se caracteriza por ser a média aritmética entre os cinco maiores picos e os cinco maiores vales no comprimento de amostragem. Este valor graficamente representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem.

Figura 20 – Rugosidade Rz



Fonte: Novaski (1994)

A rugosidade no processo de brunimento é influenciada por diversos parâmetros sendo eles: a pressão de corte, velocidade tangencial e linear da ferramenta, tipo de óleo utilizado e temperatura de trabalho, bem como a pedra abrasiva utilizada. É sabido que quanto menor o tamanho do grão abrasivo, menor é a rugosidade no processo de brunimento e vice e versa. Além disso, uma maior pressão de corte causa um aumento da rugosidade superficial e um

aumento da velocidade tangencial diminui a mesma (BUJ-CORRAL; VIVANCOS-CALVET, 2011).

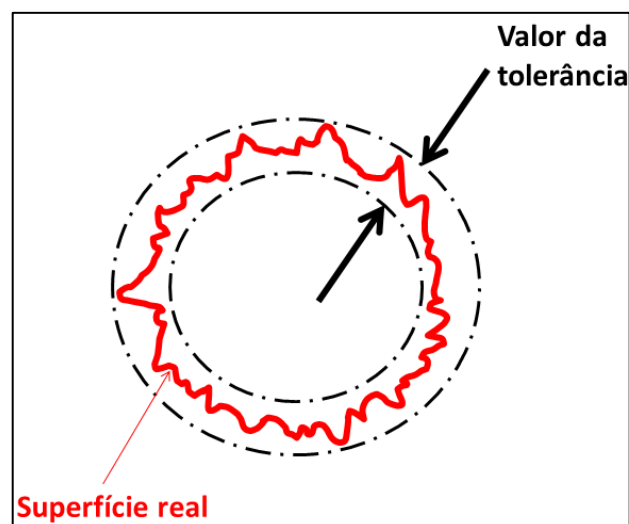
De acordo com Buj-Corral e Vivancos-Calvet (2011), no processo de brunimento a medição de rugosidade geralmente apresenta uma alta variabilidade, ocorrida devido à distribuição de tamanho do grão abrasivo na fabricação da ferramenta. O fato de alguns grãos abrasivos, removidos da superfície da régua abrasiva, permanecerem embutidos na superfície da peça produzindo uma microcratera na superfície da peça influenciando na rugosidade.

3.5 CIRCULARIDADE

A circularidade pode ser definida, como a condição de uma superfície cilíndrica que interceptada por um plano perpendicular apresenta todos os pontos equidistantes do seu eixo (GONÇALVES FILHO; CARPINETTI, 1996).

A tolerância da circularidade corresponde a uma zona circular, limitada por dois círculos concêntricos, onde os pontos da superfície real devem estar contidos. O valor desta tolerância corresponde exatamente a diferença dos raios dos dois cilindros concêntricos, portanto é considerada uma tolerância radial. A faixa determinada pela diferença dos raios dos círculos corresponde ao valor da tolerância de circularidade, como indica a Figura 21.

Figura 21 – Circularidade



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Como ensinam Filho e Carpinetti (1996), alguns pontos devem ser levados em conta com respeito à tolerância de circularidade:

- A tolerância de circularidade é independente da tolerância dimensional, entretanto a primeira deve sempre estar dentro do limite imposto pela última;
- A tolerância de circularidade não necessita de um elemento de referência, uma vez que realiza o controle de uma forma circular perfeita;
- A medição desta tolerância independe da concentricidade das superfícies circulares ao longo de um cilindro;

A circularidade no processo de brunimento é afetada principalmente pela força de contato entre a ferramenta de brunimento e a peça de trabalho. A força excessiva pode acabar causar vibração e estresse térmico durante o processo, afetando assim a precisão dimensional e consequentemente influenciando em tolerâncias geométrica como circularidade (KIM; SHOI, 1997).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Em seguida são apresentadas as etapas de desenvolvimento da pesquisa: o material e os equipamentos utilizados nos ensaios, os sistemas de aquisição de dados, o método do delineamento experimental e a forma de análise dos resultados.

4.1 CORPOS DE PROVA

O material utilizado nos ensaios deste trabalho foi o alumínio A357.0 fundido em molde de cera perdida, solubilizado e envelhecido artificialmente na condição T6. Foram utilizados oito corpos de prova no formato de uma peça aeronáutica utilizada no sistema de arrefecimento de aeronaves. O corpo de prova foi previamente usinado e recebeu o tratamento de superfície em sua totalidade com uma camada menor que dois micrometros. Um exemplo do corpo de prova utilizado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Corpos de prova

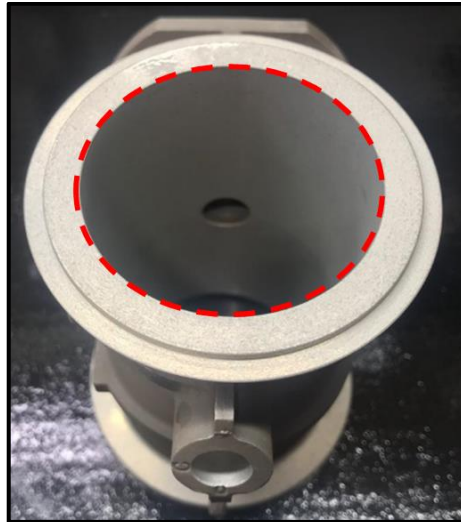


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

A área da peça ensaiada foi o furo passante com diâmetro interno de $50,47 \pm 0,03$ mm e comprimento de 50 mm, indicado na Figura 23. Este furo foi processado anteriormente em uma operação de usinagem convencional e também foi tratado superficialmente com anodização crômica. Após o ensaio a condição atingida no corpo de prova deveria ser diâmetro interno de $50,54 \pm 0,01$ mm e uma rugosidade média (R_a) menor que 0,4. Estas condições se fizeram

necessárias para que posteriormente fosse aplicado nos corpos de prova o tratamento de anodização dura.

Figura 23 – Diâmetro ensaiado



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Antes do início dos ensaios foram medidos manualmente os oito diâmetros dos corpos de prova, utilizando-se um relógio comparador MarCator 1075R da fabricante Mahr acoplado a um súbito, conforme exemplificado na Figura 24. Os valores encontrados nas medições foram registrados conforme Tabela 7.

Figura 24 – Medição do diâmetro com relógio comparador



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Tabela 7 – Dimensões dos corpos de prova pré-ensaio

Corpo de prova	Diâmetro inicial mm
1	50,494
2	50,472
3	50,475
4	50,476
5	50,473
6	50,474
7	50,476
8	50,476

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

4.2 MÁQUINA

Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina brunimento interno horizontal de curso manual fabricada pela empresa Gammafer – Máquinas e Ferramentas, sendo o modelo BHG 90AC com 2,5 kW de potência, 200 V e 60 Hz. A máquina utilizada nos ensaios é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Máquina de Brunimento BHG 90AC



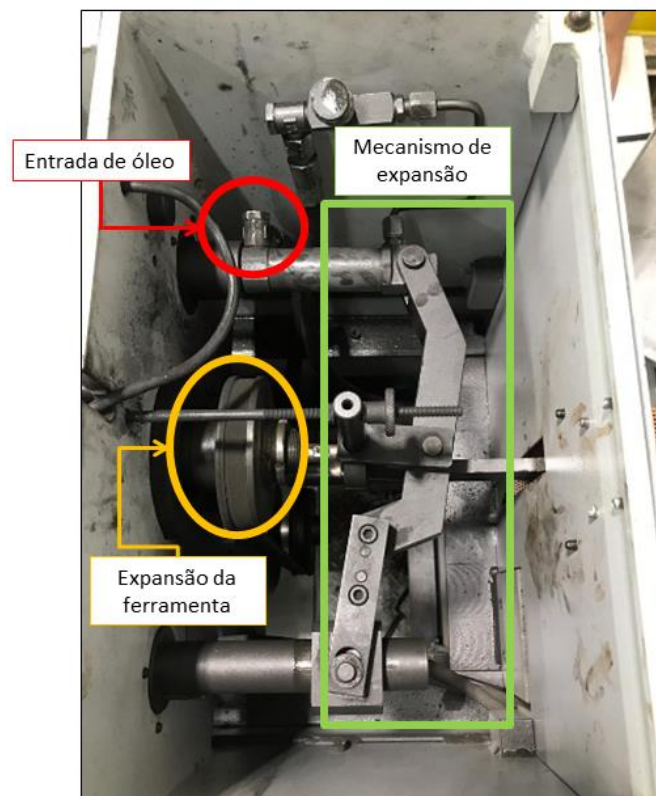
Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Apesar de ser uma máquina de curso manual, a mesma apresenta um sistema que realiza a oscilação automática da peça, ou seja, não é necessária a intervenção do operador para realizar o movimento linear do processo. Logo a máquina pode trabalhar das duas formas com curso automático ou manual, porém para ambos os casos é necessário que o operador realize as medições periódicas durante o processo para a avaliação do diâmetro brunido.

Quando o movimento linear da peça é realizado automaticamente é possível regular o comprimento do curso da peça, mas a quantidade de ciclos por minuto não é alterada independente do curso selecionado. Logo cada comprimento de curso tem sua velocidade linear, ou velocidade axial, definida não sendo possível alterá-la. Por sua vez a máquina possibilita a regulação da rotação da ferramenta, assim podendo variar a velocidade tangencial do processo.

A máquina apresenta a possibilidade de regulação da pressão hidráulica, que está diretamente relacionada com a pressão de contato exercida pela ferramenta. Entretanto o sistema de acionamento da expansão da ferramenta, não é dependente direto da pressão hidráulica aplicada na máquina, uma vez que, como pode se observar na Figura 26, a expansão da ferramenta é realizada por sistema mecânico que é acionado pela pressão hidráulica.

Figura 26 – Mecanismo de expansão da ferramenta



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

4.3 FERRAMENTA

A ferramenta utilizada para os testes foi fabricada pela empresa Nagel, possuindo um diâmetro sem expansão de 49,4 mm e 5 réguas de brunimento em torno dela. O material do corpo da ferramenta é o aço SAE 8640 temperado e as réguas abrasivas são de diamante. A ferramenta utilizada no processo é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Ferramenta Nagel



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

As réguas abrasivas utilizadas seguem a nomenclatura da Nagel indicada na figura 15, sendo estas apresentadas como D25/1/X44/75. Os dígitos “D25” indicam que os grãos abrasivos são de diamante e com dimensão de 20 a 30 μm . O dígito “1” indica que os grãos de diamante utilizados são sintéticos. Os dígitos “X44” indicam o ligante utilizado, neste caso de acordo com a informação do fornecedor é um ligante metálico, cuja formulação não pode ser divulgada. E por fim os dígitos “75” indicam a concentração de grãos abrasivos, neste caso correspondem a 3,3 quilates/ cm^3 ou 0,66 g/ cm^3 .

As cinco réguas de brunimento apresentam as seguintes dimensões: 40 mm de comprimento, 4 mm de largura e 3 mm de espessura, sendo dispostas com a mesma distância ao redor do corpo da ferramenta.

4.4 LUBRIFICAÇÃO

A máquina de brunimento utilizada apresenta bicos acoplados para lubrificação durante o processo. Os bicos foram direcionados nas duas extremidades da peça de trabalho a fim de garantir uma lubrificação uniforme em toda a superfície brunida.

Para o experimento foi utilizado o óleo Blasomill 10 da empresa Blaser Swissblue. Este é um óleo mineral paraafínico com ésteres e aditivos recomendado pelo fabricante para utilização em processo de usinagem abrasiva, bem como em usinagem convencional. Este é considerado um óleo de alta performance que garante alta qualidade superficial.

As propriedades físico-químicas do óleo lubrificante estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físico-químicas

Viscosidade (40°C)	10 mm ² /s
Densidade (20°C)	0,85 g/cm ³
Ponto de Fulgor	171°C (340°F)
Conteúdo de Éster	15%
Conteúdo de Cloro	0%
Conteúdo de Zinco	0%
Conteúdo de Enxofre	1,2%
Cor	Âmbar

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

4.5 PROCESSAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O processo utilizado nesta pesquisa foi o brunimento interno da superfície cilíndrica de diâmetro $50,47 \pm 0,01$ mm por 50 mm de comprimento. O objetivo do processo foi atingir a dimensão de $50,54 \pm 0,01$ mm e uma rugosidade média (Ra) menor que 0,4.

Para realização do processo de brunimento com movimento linear automático a peça foi fixada em um dispositivo de nylon conforme Figura 28.

Figura 28 – Fixação da peça no dispositivo



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

O comprimento do curso utilizado para o brunimento dos corpos de prova foi 36 mm com oscilação 95 ciclos por minuto, assim podendo-se determinar o valor da velocidade axial em 0,115 m/s, sendo esta mantida constante durante os testes. A pressão hidráulica utilizada foi 20 kgf/cm² e também foi mantida constante durante o processo.

Objetivando-se no trabalho avaliar a influência da velocidade tangencial da ferramenta de brunimento no processo foi essencial a manutenção da pressão e a velocidade axial constantes, variando-se apenas a rotação da ferramenta e consequentemente a velocidade tangencial.

Foram utilizadas quatro rotações diferentes nos testes e consequentemente quatro velocidades tangenciais. As rotações utilizadas foram 200, 400, 600 e 800 RPM. Utilizando-se os valores das rotações na equação 5 é possível calcular a velocidade tangencial do processo em metros por segundo.

$$V_t = \frac{\text{RPM} \cdot \pi \cdot D}{60} \quad (5)$$

Onde:

- V_t é a velocidade tangencial;
- RPM é a rotação da ferramenta;
- D é o diâmetro da rotação;

Obtendo-se os valores de velocidade tangencial e velocidade axial, por meio da equação 5 foi possível se calcular a velocidade de corte utilizada no processo conforme apresentado na Tabela 9.

Os ensaios foram realizados com repetibilidade de 2 ciclos de brunimento para cada conjunto de parâmetros de entrada, assim obtendo-se um total de 8. Os conjuntos de parâmetros utilizados nos testes estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Conjunto de parâmetros para ensaios

Ensaio	Diâmetro inicial [mm]	Pressão hidráulica [kgf/cm ²]	Velocidade axial [m/s]	Rotação da ferramenta [RPM]	Velocidade tangencial [m/s]	Velocidade de corte [m/s]
1	50,494	20	0,115	200	0,529	0,541
2	50,472	20	0,115	400	1,057	1,063
3	50,475	20	0,115	600	1,586	1,590
4	50,476	20	0,115	800	2,115	2,118
5	50,473	20	0,115	200	0,529	0,541
6	50,474	20	0,115	400	1,057	1,063
7	50,476	20	0,115	600	1,586	1,590
8	50,476	20	0,115	800	2,115	2,118

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

No caso da manutenção da pressão constante, o intuito foi evitar que a mesma influenciasse na obtenção dos resultados em termos de circularidade, uma vez que este é o principal parâmetro para afeta esta característica, bem como na taxa de remoção de material. Já em termos de rugosidade tanto a pressão de corte, quanto a velocidade axial influenciam na mesma.

4.6 RUGOSIDADE

Após o processamento dos corpos de prova foi analisada a rugosidade da superfície brunida em termos de Ra e Rz. A rugosidade foi medida em uma mesma peça em duas regiões opostas.

Para a medição da rugosidade foi utilizada uma máquina de contorno, modelo 1900SD3 da marca Zeiss apresentada na Figura 29.

Figura 29 – Máquina de contorno 1900SD3

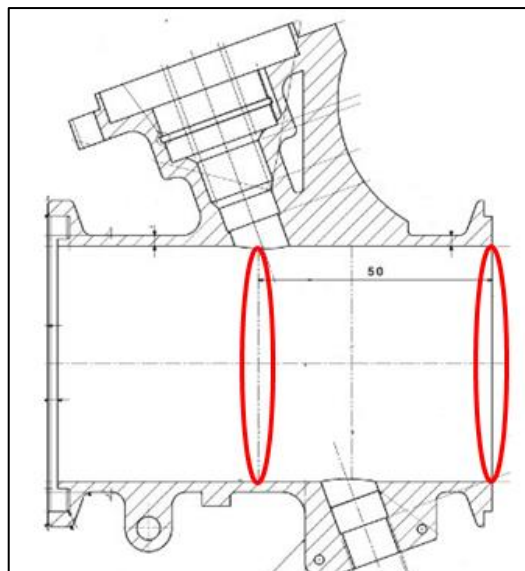


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

4.7 CIRCULARIDADE

A medição da circularidade foi realizada nas extremidades do diâmetro brunido de cada corpo de prova, conforme apresentado na Figura 30. A tolerância de circularidade utilizada foi 0,02 mm conforme projeto.

Figura 30 – Áreas de medição de circularidade



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Para avaliação da circularidade foi utilizada uma máquina de medição 3D, modelo Prismo da empresa Zeiss apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Máquina 3D Prismo



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

4.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Após os ensaios, os dados coletados (R_a , R_z e circularidade) foram tratados estatisticamente através da técnica de análise de variância com objetivo de analisar o efeito da rotação no processo de brunimento. Para tanto, utilizou-se o software Minitab-17, versão trial.

Importante ressaltar que a análise de variância é um método estatístico que avalia a hipótese de que as médias de duas ou mais populações sejam iguais, ou seja, verifica a influência de um ou mais fatores (rotação) comparando as médias de variáveis (rugosidade e circularidade) de resposta nos diferentes níveis de cada fator.

Para complementar o resultado da análise de variância foi realizado o teste de Tukey ou TSD (Tukey Significant Difference) sendo este um teste de comparação múltipla dos dados coletados, utilizando-se das médias dos mesmos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios e tratamentos estatísticos, bem como sua análise e discussão.

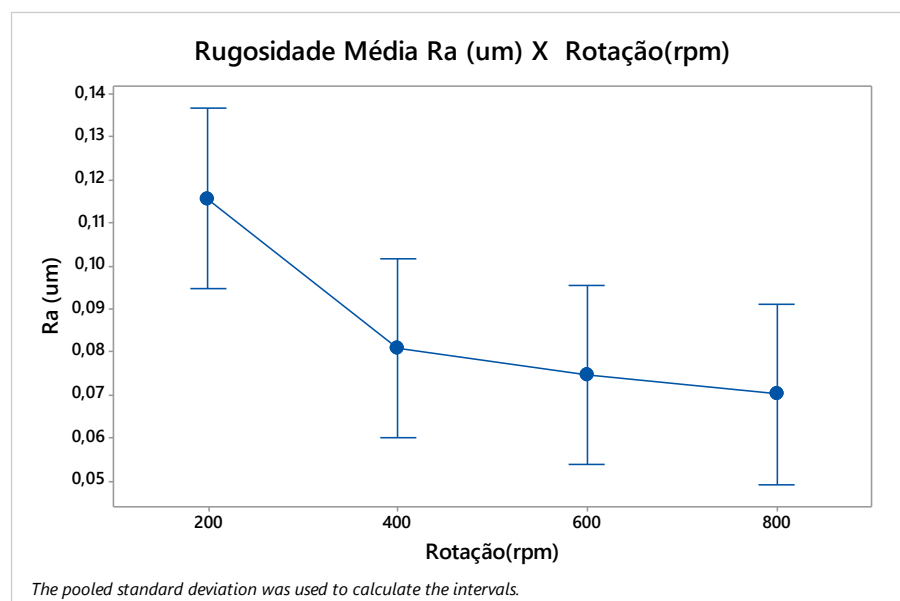
5.1 RUGOSIDADE MÉDIA (RA)

Para avaliar a influência da velocidade tangencial e consequentemente da rotação no processo de brunimento foi realizada primeiramente a análise de variância em termos dos resultados de rugosidade média (Ra).

É apresentado no Gráfico 1 o comportamento de Ra com relação a rotação empregada na ferramenta de brunimento durante os testes, podendo-se observar a variação dos valores de Ra para cada condição testada. É possível avaliar que para a rotação mais baixa empregada nos testes foram encontrados valores de rugosidade superiores às demais e a partir do aumento na rotação, o valor da rugosidade média diminui, consequentemente melhorando a qualidade superficial da peça. Entretanto não existe uma variação alta entre os valores, sendo que a diferença entre a maior e a menor rugosidade foi de 0,04 μm .

Mesmo com a rotação de 200 RPM apresentando uma rugosidade mais alta que as demais, este valor ainda está abaixo do máximo da especificação de projeto que é 0,4 μm , portanto a superfície está conforme.

Gráfico 1: Rugosidade média Ra (μm) versus Rotação (RPM)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

De acordo com análise de variância é possível observar, conforme apresentado na Tabela 10, que o p-value resultante foi de 0,022 indicando que a rotação da ferramenta tem influência no resultado da rugosidade média Ra. Entretanto, a análise estatística indica que a rotação influencia em apenas 17,69% nos resultados.

Tabela 10 – Análise de Variância de Ra

Fonte	DF	Adj SS	Adj M	F-Value	P-Value
Rotação (RPM)	3	0,005134	0,001711	4,64	0,022
Erro	12	0,004426	0,000369		
Total	15	0,009560			

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

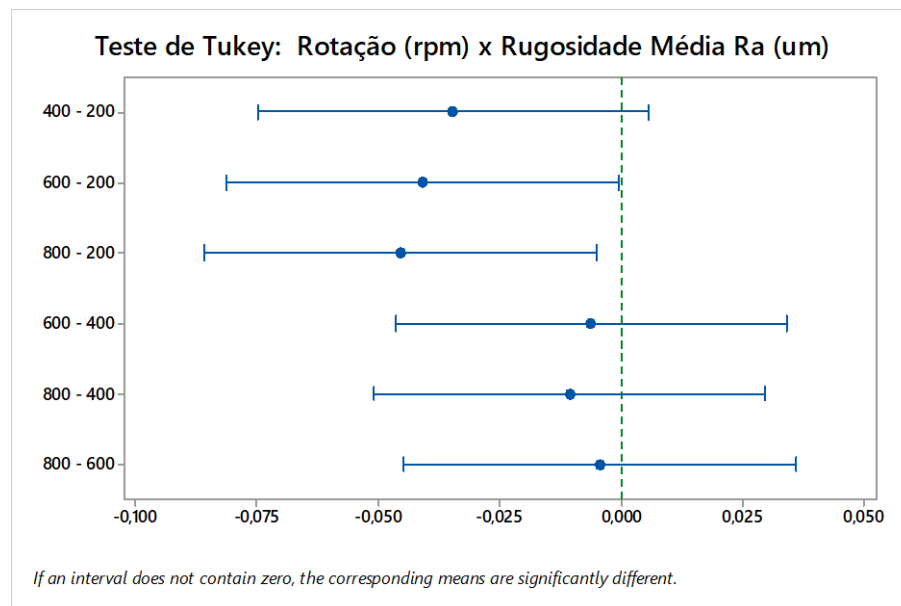
De acordo com Buj-Corral e Vivancos-Calvet (2010), a velocidade tangencial no processo de brunimento tem um efeito leve na rugosidade da superfície brunida, já outros parâmetros como a pressão de corte e o tamanho do grão abrasivo exercem uma influência maior neste resultado. Quando se tem um tamanho de grão abrasivo pequeno o aumento da velocidade tangencial apresenta uma influência baixa em termos de rugosidade, tanto média quanto total.

Coerentemente os resultados encontrados na análise de variância deste estudo demonstram que a velocidade tangencial, proveniente da rotação, influencia sim no valor de rugosidade Ra, porém não é tão significativa em termos de porcentagem, logo outros fatores podem influenciar mais nestes resultados como a dimensão do grão abrasivo, por exemplo.

Para realizar a comparação dos resultados de rugosidade com os diferentes valores de rotação do estudo foi utilizado o teste de Tukey. Como observado no Gráfico 2, as rotações 200 RPM e 400 RPM apresentam similaridade entre si, ou seja, possuem estatisticamente resultados médios similares de rugosidade, portanto são consideradas iguais.

Sendo os resultados de Ra para as duas rotações estatisticamente iguais significa que se qualquer uma delas for utilizada no processo os resultados de rugosidade média Ra serão similares, portanto não existe diferenciação de uso entre uma e outra.

A média de rugosidade da rotação de 200 RPM não pode ser considerada igual as médias de rugosidade das rotações de 600 RPM e 800 RPM, pois as mesmas de acordo com o Gráfico 2 não interceptam a linha zero. Entretanto as médias de rugosidade Ra das rotações 400, 600 e 800 [RPM] podem ser consideradas estatisticamente iguais, pois todas interceptam a linha zero.

Gráfico 2: Teste de Tukey da Rugosidade média Ra (μm)

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

É possível avaliar que mesmo os resultados de Ra com a rotação de 200 RPM serem diferentes dos resultados para as rotações 600 e 800 RPM as linhas médias entre elas estão bem próximas da linha zero, logo é possível observar que elas são diferentes, mas estão próximas de apresentarem igualdade.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do teste de Tukey, porém cada valor de rotação é pertencente a um ou mais grupos que indicam ou não a igualdade dos parâmetros. Os valores de rotação pertencentes ao mesmo grupo são considerados iguais estatisticamente em termos de rugosidade média Ra.

O resultados de Ra para as rotações de 200 e 400 RPM podem ser consideradas iguais, pois pertencem ao grupo A, bem como as rotações de 400, 600 e 800 RPM, pois pertencem ao grupo B. Entretanto o Ra para a rotação de 200 RPM é estatisticamente diferente do Ra para a rotação de 600 e 800 RPM.

Tabela 11 – Teste de Tukey rugosidade Ra

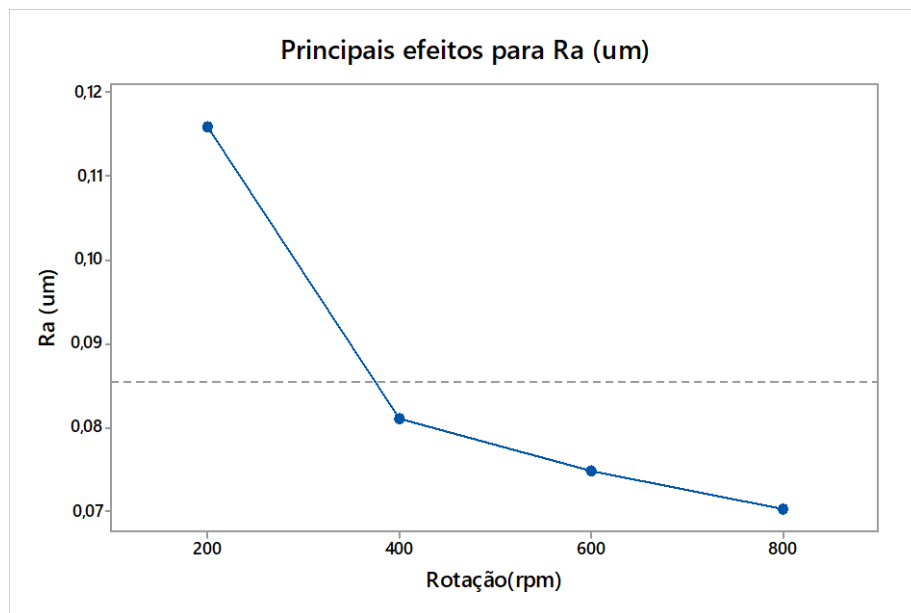
Rotação (RPM)	Média	Grupo
200	0,1157	A
400	0,0810	A B
600	0,07475	B
800	0,07025	B

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

São apresentados no Gráfico 3 os efeitos gerados pela rotação na rugosidade média da superfície brunida. Em termos gerais é possível avaliar que com o aumento da rotação da ferramenta de brunimento tem-se uma diminuição no valor da rugosidade média e consequentemente uma melhoria na qualidade da superfície acabada, fato já constatado no Gráfico 1.

Entretanto, mesmo a tendência sendo positiva em termos de qualidade, pelo teste de Tukey foi identificado que os valores de rugosidade para as rotações 400, 600 e 800 RPM são considerados estatisticamente iguais. Portanto mesmo o aumento da rotação tender a uma melhor qualidade superficial, os valores resultantes de rugosidade média Ra são iguais, logo não há diferença de uso de qualquer uma das três rotações.

Gráfico 3: Principais efeitos para Rugosidade média Ra (μm)

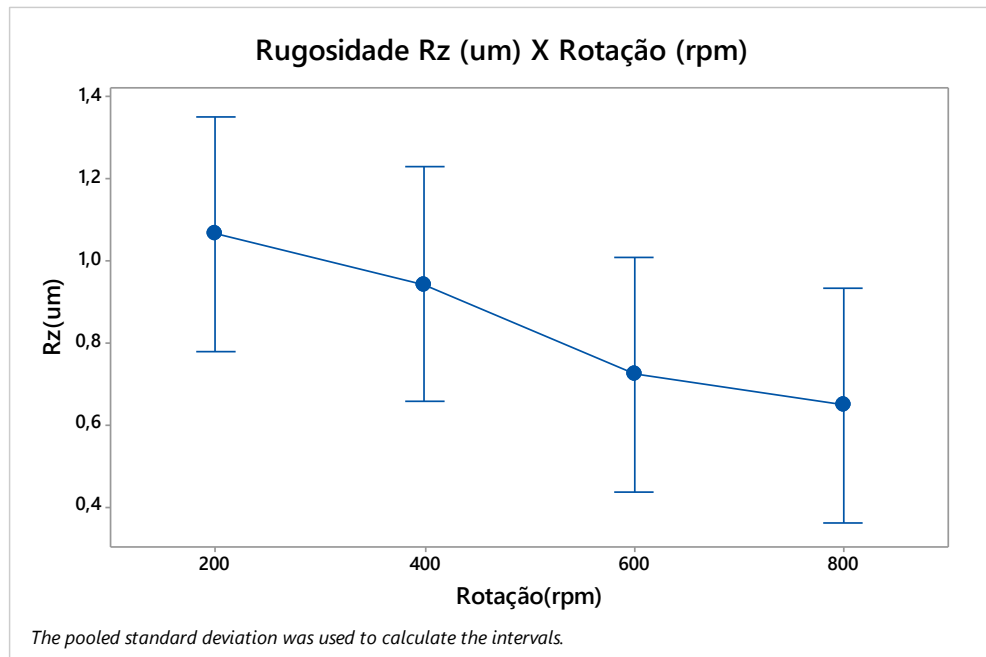


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

5.2 RUGOSIDADE RZ

A rugosidade Rz (média das 5 alturas máximas de cada comprimento de amostragem) da superfície brunida apresentou uma redução no valor à medida que a rotação foi aumentada conforme apresentado no Gráfico 4.

De acordo análise de variância é possível observar, conforme apresentado na Tabela 12, que o p-value resultante foi de 0,146 indicando que a rotação da ferramenta não influenciou na rugosidade Rz.

Gráfico 4: Rugosidade Rz (μm) versus Rotação (RPM)

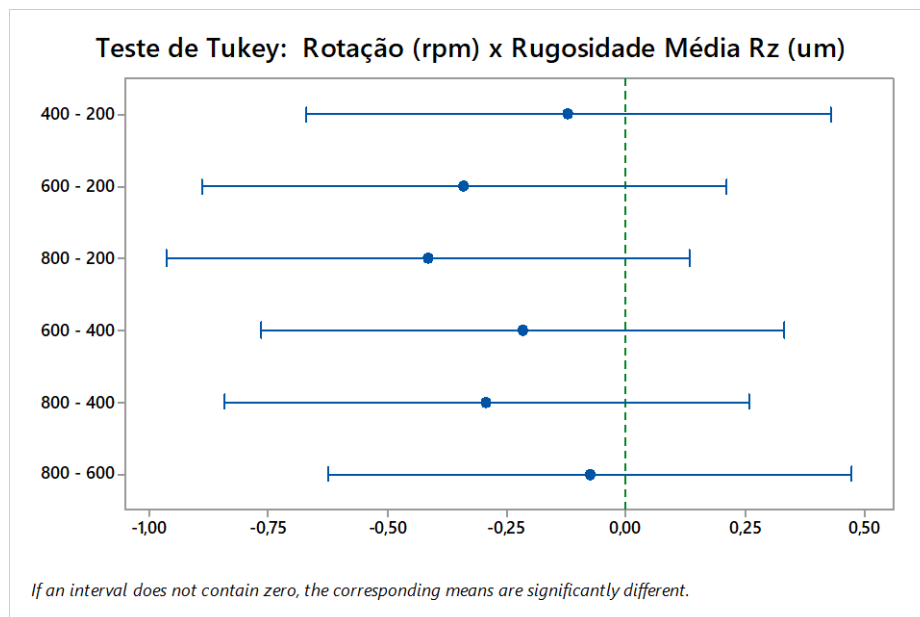
Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Tabela 12 – Análise de Variância de Rz

Fonte	DF	Adj SS	Adj M	F-Value	P-Value
Rotação (RPM)	3	0,4442	0,14805	2,16	0,146
Erro	12	0,8218	0,06848		
Total	15	1,2659			

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Realizado o teste de Tukey para rugosidade Rz, foi possível identificar que todas as rotações utilizadas são similares, visto que, conforme Gráfico 5, todos os intervalos entre as diferenças interceptam a linha zero. Conforme apresentado na Tabela 13 todas as quatro rotações são pertencentes ao mesmo grupo A, logo se conclui que são estatisticamente iguais.

Gráfico 5: Teste de Tukey da Rugosidade Rz (μm)

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

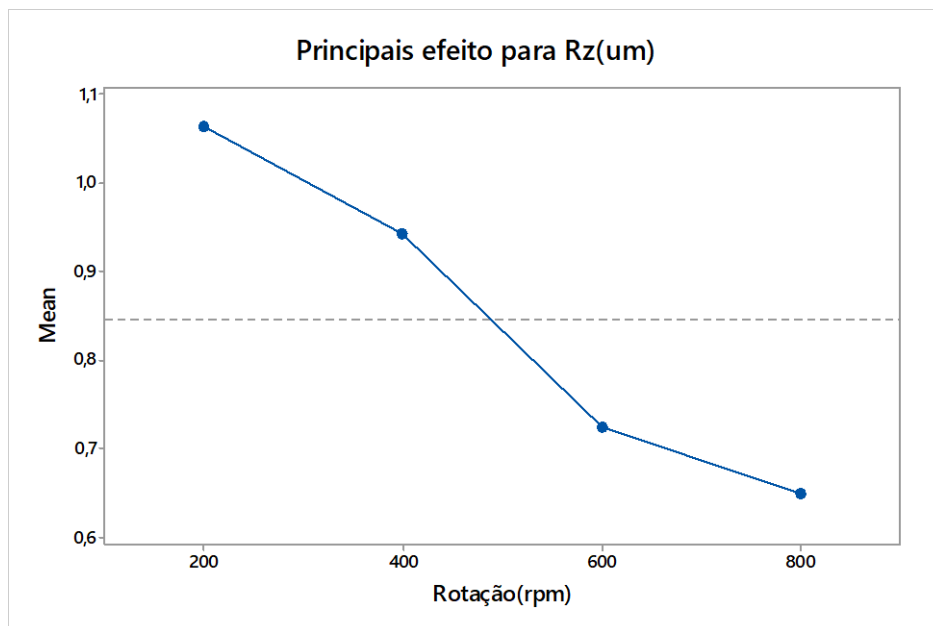
Tabela 13 – Teste de Tukey rugosidade Rz

Rotação (RPM)	Média	Grupo
200	1,065	A
400	0,942	A
600	0,724	A
800	0,648	A

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

O aumento da rotação da ferramenta de brunimento gera uma diminuição no valor da rugosidade Rz, assim como ocorrido com a rugosidade média Ra, sendo esta a tendência do processo, conforme apresentado no Gráfico 6.

É importante ressaltar que, mesmo a tendência sendo uma redução no valor da rugosidade Rz com o aumento da rotação, de acordo com o teste Tukey estes valores são estatisticamente iguais, logo não existe diferença de resultado quando utilizadas as rotações de 200, 400, 600 ou 800 RPM.

Gráfico 6: Principais efeitos para Rz (μm)

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

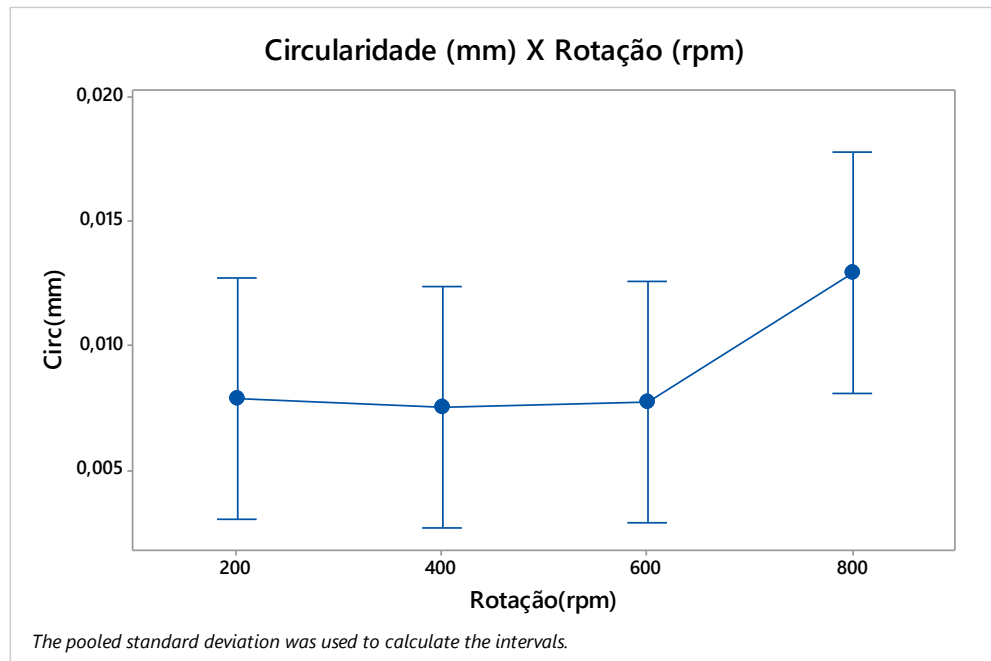
5.3 ERRO DE CIRCULARIDADE

No Gráfico 7 é apresentado o desvio de circularidade do diâmetro brunido onde notou-se um aumento no valor do erro à medida que a rotação foi aumentada. Outro ponto a ser observado é que o valor de circularidade do diâmetro brunido apresentou uniformidade com as rotações de 200, 400 e 600 RPM, uma vez que os valores médios e os intervalos se encontram muito próximos, formando quase uma reta. Entretanto com a rotação mais alta de 800 [RPM], a circularidade apresentou um aumento pequeno em seu valor.

Durante a realização dos testes foi observado visualmente que com a rotação de 800 [RPM] o conjunto peça-ferramenta apresentou uma vibração maior que nos demais testes. De acordo com Kim e Shoi (1997) a vibração no processo brunimento gera um efeito negativo na circularidade, logo, o teste com a rotação mais alta apresentou uma circularidade média maior que os demais.

Mesmo assim, de acordo com a análise de variância, apresentada na Tabela 14, é possível observar que o p-value resultante foi de 0,294, indicando que a rotação da ferramenta não influencia no valor da circularidade do diâmetro brunido.

Gráfico 7: Circularidade (mm) versus Rotação (RPM)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

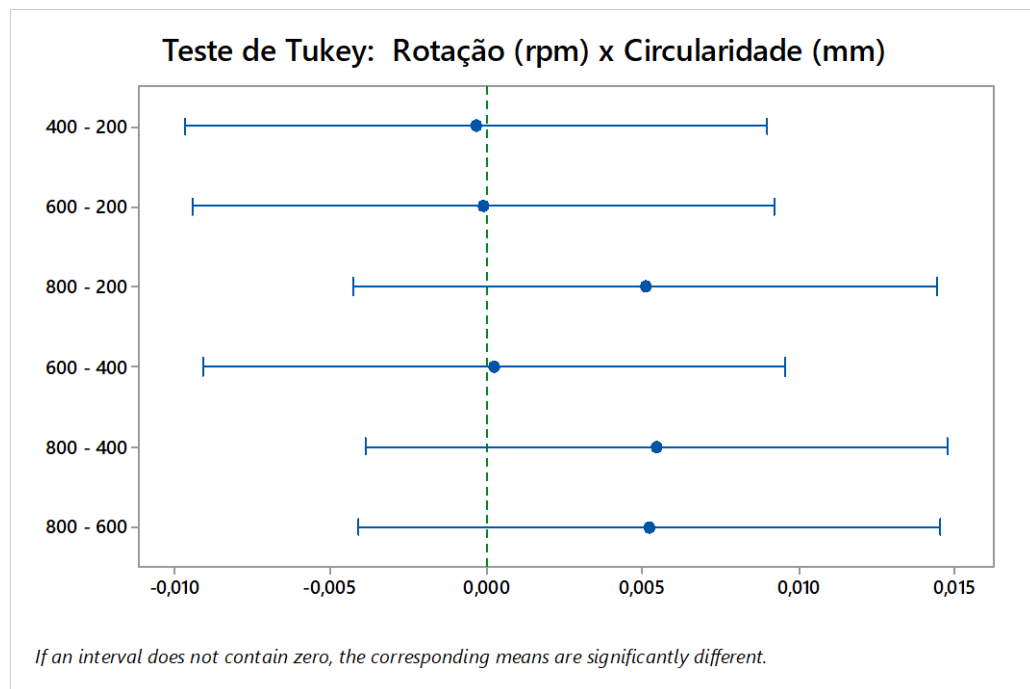
Tabela 14 – Análise de Variância da Circularidade

Fonte	DF	Adj SS	Adj M	F-Value	P-Value
Rotação (RPM)	3	0,000082	0,000027	1,39	0,294
Erro	12	0,000238	0,000020		
Total	15	0,000320			

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Realizado o teste de Tukey para circularidade foi possível identificar que todas as rotações utilizadas são similares, conforme gráfico 8, todos os intervalos entre as diferenças interceptam a linha zero. A Tabela 15 também demonstra que todas as quatro rotações são pertencentes ao mesmo grupo A, logo são consideradas estatisticamente iguais.

Gráfico 8: Teste de Tukey da Circularidade (mm)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Tabela 15 – Teste de Tukey Circularidade

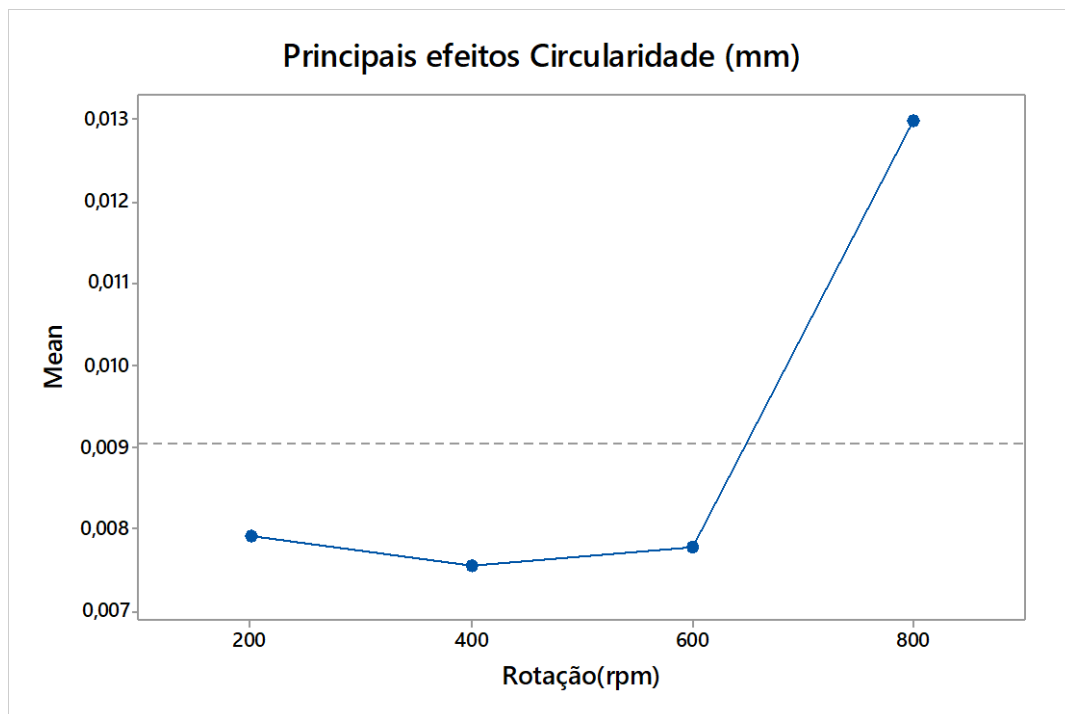
Rotação (RPM)	Média	Grupo
200	0,01298	A
400	0,00790	A
600	0,00778	A
800	0,007550	A

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

É apresentada no Gráfico 9 a linha de tendência da circularidade com relação a rotação. Observa-se que os valores de 200, 400 e 600 RPM são praticamente constantes e encontram-se abaixo da linha média. Entretanto com a rotação de 800 RPM a tendência apresentada é um aumento da circularidade acima da média. Conforme abordado anteriormente este fato pode ter ocorrido pelo aumento da vibração percebida visualmente ocasionada pelo aumento de velocidade tangencial.

Mesmo a tendência indicando uma piora da circularidade com o aumento da rotação, de acordo com o teste Tukey os quatro valores de rotação utilizados são estatisticamente iguais, logo não existe diferença de resultado em termos de circularidade.

Gráfico 9: Principais efeitos da Circularidade (mm)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

6 CONCLUSÕES

A partir de todo o estudo realizado e da análise dos resultados, é possível identificar que a rotação da ferramenta, ou seja, a velocidade tangencial do processo influencia diretamente nos resultados de rugosidade Ra da superfície brunida, sendo esta influência relativamente baixa. Entretanto para os resultados de rugosidade Rz e de circularidade conforme análise de variância realizada, este parâmetro não apresenta a mesma influência.

O tamanho do grão, 20 à 30 μm , utilizado para a realização dos testes contribui para que a velocidade tangencial exerça baixa influencia nos resultados de Ra e não apresente influencia nos resultado Rz, bem como o uso do diamante como abrasivo.

Mesmo o alumínio A357.0 fundido, utilizado para realização deste estudo, ser extremamente poroso os resultados de rugosidade média Ra foram abaixo de 0,2 μm mesmo com a rotação mínima, demonstrando que o brunimento é uma opção viável para a acabamentoo de superfícies destes tipos de materiais.

De acordo com o teste de Tukey realizado, pode-se avaliar que a rotação de 400 RPM apresenta similaridade com todas as outras três rotações utilizadas, logo apresentam resultados de rugosidades Ra e Rz estatisticamente iguais. A máquina utilizada para o teste é relativamente simples e por muitas vezes é utilizada de forma manual, ou seja, o operador realiza o movimento axial. Por uma questão de segurança, quanto menor a rotação, menos chances tem do operador sofrer qualquer dano, logo se deve sempre buscar esta premissa. Assim, para o brunimento manual de peças da liga A357.0, pode-se recomendar a utilização da rotação de 400 RPM, pois a mesma irá atingir níveis de rugosidade e circularidade satisfatórios.

Para processos automáticos, como o caso dos testes realizados, para atingir o máximo de qualidade de acabamentoo de superfície com uma circularidade assegurada e um tempo menor de processo pode-se recomendar a utilização de 600 RPM. Mesmo a rotação de 800 [RPM] sendo estatisticamente igual, sem uma análise aprofundada da vibração ocorrida durante o teste e sua influência na circularidade seria mais prudente a utilização de 600 [RPM].

Pode-se, por fim, avaliar que os objetivos deste trabalho foram concluídos, pois com os estudos foi possível observar de forma estatística a influência da rotação da ferramenta no processo de brunimento interno do alumínio A357.0 T6 utilizando réguas de diamantes como abrasivo. É importante ressaltar também que os resultados obtidos são coerentes ao estudo bibliográfico de forma a validar a pesquisa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a finalização deste trabalho foi possível identificar alguns pontos que podem ser abordados em estudos futuros.

Um dos pontos mais relevantes a serem estudados é a influência da velocidade axial e da pressão de contato no brunimento interno da liga fundida de alumínio A357.0 T6. Este estudo se torna importante para completar o entendimento da influência dos principais parâmetros de processo no acabamento superficial e características geométricas da peça de trabalho.

O tamanho do grão abrasivo, também é uma variável que influencia, principalmente, no acabamento superficial da peça, portanto um estudo que pode ser realizado futuramente é a comparação do acabamento superficial com diferentes tamanho de grãos abrasivos.

A vibração durante o processo de brunimento também pode ser avaliada em estudos futuros, visto que este fenômeno foi observado com a utilização de rotações mais altas e, de acordo com a teoria, influencia nas características geométricas das peças.

Por fim, um ponto não abordado neste trabalho, mas extremamente relevante é a comparação da utilização de óleo solúvel e óleo integral para lubrificação durante o brunimento.

REFERÊNCIAS

- ASM. **ASM handbook volume 2 proprieties and selection:** nonferrous alloys and special-purpose materials. Novelty: ASM International, 1990.
- ASM. **ASM handbook volume 16:** Machining. Novelty: ASM International, 1989.
- BARROS, G. H. C. **Brunimento flexível de cilindros de blocos de compressores herméticos: avaliação do efeito da granulometria e do número de golpes da ferramenta na rugosidade.** Orientador: Rosenda Valdés Arencibia. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- BRUNITEC. **Automatic horizontal honing machine BHASS-150.** Salto: Brunitec [2019]. Disponível em: <http://www.brunitec.com.br/eng/maquina-de-brunir-horizontal-automatica-BHASS150.php>. Acesso em: 20 out. 2019.
- BRUNITEC. **Automatic vertical honing machine BVASS 4,5-400 to drum brakes.** Salto: Brunitec [2019]. Disponível em: <http://www.brunitec.com.br/eng/maquina-de-brunir-vertical-automatica-BVASS45400.php>. Acesso em: 20 out. 2019.
- BUJ-CORRAL, I.; RODERO-DE-LAMO, L.; MARCO-ALMAGRO, L. Use of results from honing test machines to determine roughness in industrial honing machines. **Journal Of Manufacturing Processes**, Barcelona, v. 28, n. 1, p. 60-69, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.016>. Acesso em: 1 maio 2019.
- BUJ-CORRAL, I.; VIVANCOS-CALVET, J. Roughness variability in the honing process of steel cylinders with CBN metal bonded tools. **Precision Engineering**, Barcelona, v. 35, n. 2, p. 289-293, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.11.004>. Acesso em: 14 maio 2019.
- BUJ-CORRAL, I.; VIVANCOS-CALVET, J.; COBA-SALCEDO, M. Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing. **Precision Engineering**, Barcelona, v. 38, n. 1, p. 100-108, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.07.009>. Acesso em: 17 maio 2019.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 16. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2013.
- GRABON, W. *et al.* Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests. **Tribology International**, Rzeszow, v. 113, n. 1, p. 137-148, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.025>. Acesso em: 3 ago. 2019.

GROOSE, T. *et al.* Honing with polymer based cutting fluids. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Braunschweig, v. 11, p. 89-98, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.09.001>. Acesso em: 4 ago. 2019.

GONÇALVES FILHO, E. V.; CARPINETTI, L. C. R. **Tolerâncias Geométricas: desvios de forma**. São Carlos: Seção de Publicação da EESC-USP, 1996.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Cambridge: Elsevier, 2017.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. New Jersey: Pearson, 2009.

KIM, J.; CHOI, M. A study on the prediction of roundness variation in honing using hone dynamics. **Journal of Testing and Evaluation**, Taejon, v. 25, n. 6, p. 556-564, 1997. Disponível em: <https://www.astm.org/jte11495j.html>. Acesso em: 12 ago. 2019.

LAVRINENKO, V. I.; SOLOD, V. Y. The Process of abrasive machining as a friction interaction between dissimilar materials. **Journal of Superhard Materials**, Kamianske, v. 40, n. 2, p. 138-142, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3103/S1063457618020090>. Acesso em: 3 jun. 2019.

LAWRENCE, K. D.; RAMAMOORTHY, B. Multi-surface topography targeted plateau honing for the processing of cylinder liner surfaces of automotive engines. **Applied Surface Science**, Kerala, v. 365, n. 1, p. 19-30, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.245>. Acesso em: 4 maio 2019.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2008.

MARINESCU, I. D. *et al.* **Tribology of abrasive machining processes**. 2. ed. Nova Iorque: Elsevier, 2013.

MOOS, U.; BÄHRE, D. Analysis of process forces for the precision honing of small bores. **Procedia Cirp**, Saarbrücken, v. 31, n. 1, p. 387-392, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.066>. Acesso em: 17 maio 2019.

MOUSAVI, G. S. *et al.* The effect of mischmetal and heat treatment on the microstructure and tensile properties of A357 Al–Si casting alloy. **Materials Science And Engineering: A**, Tehran, v. 556, n. 1, p. 573-581, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.029>. Acesso em: 15 abr. 2019.

NAGEL. **About Nagel**. [Salto: Nagel do Brasil, 2019]. Disponível em: <http://www.nagel.com.br/>. Acesso em: 09 dez. 2019.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1994.

POLYANCHIKOV, Y. N. *et al.* Honing with increase in the cutting speed. **Russian Engineering Research**, Moscou, v. 28, n. 7, p. 727-728, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3103/S1068798X08070228>. Acesso em: 17 maio 2019.

SABRI, L.; MANSORI, M. E. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. **Surface and Coatings Technology**, Cedex, v. 204, n. 6, p. 1046-1050, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.013>. Acesso em: 31 maio 2019.

SERRANO-MUNOZ, I. *et al.* Influence of surface and internal casting defects on the fatigue behaviour of A357-T6 cast aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**, Lyon, v. 82, n. 1, p. 361-370, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.032>. Acesso em: 17 abr. 2019.

SIN, H.; SAKA, N.; SUH, N. P. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. **Wear**, Amsterdam, v. 55, p. 163-190, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90188-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90188-1). Acesso em: 27 jul. 2019.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. **Engineering tribology**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3 ed. Florianópolis: UFSC, 1993.

STOETERAU, R. L. Processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida. 26 set. 2014. Apresentação do power point. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS3.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2019.

VARGEL, C. **Corrosion of Aluminium**. Arvillard: Elsevier Science, 2004.

WU, Y.; FUNKENBUSCH, P. D. Microstructure and mechanical properties of commercial, bronze-bond, diamond-abrasive tool materials. **Journal of Materials Science**, New York, v. 45, n. 1, p. 251-258, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3927-4>. Acesso em: 27 jul. 2019.

ZHANG, Z.; LIU, W.; SONG, Z. Effect of abrasive particle concentration on preliminary chemical mechanical polishing of glass substrate. **Microelectronic Engineering**, Amsterdam, v. 87, p. 2168–2172, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.01.020>. Acesso em: 3 ago. 2019.

ZOLOTOREVSKY, V. S.; BELOV, N. A.; GLAZOFF, M. V. **Casting Aluminum Alloys**. Amsterdam: Elsevier, 2007.