UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE ACABAMENTO NO APLAINAMENTO DA FACE DE CABEÇOTE AUTOMOTIVO DE ALUMÍNIO UTILIZANDO PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN DESING*

Edu José Becker

Lajeado/RS, novembro de 2023

Edu José Becker

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE ACABAMENTO NO APLAINAMENTO DA FACE DE CABEÇOTE AUTOMOTIVO DE ALUMÍNIO UTILIZANDO PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN DESIGN*

Monografia, apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Me. Rafael Farias Garcia

Lajeado/RS, novembro de 2023

Edu José Becker

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE ACABAMENTO NO APLAINAMENTO DA FACE DE CABEÇOTE AUTOMOTIVO DE ALUMÍNIO UTILIZANDO PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN DESING*

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica:

Prof. Me. Rafael Farias Garcia - orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Rafael Crespo Izquierdo - avaliador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dra. Betina Hansen - avaliadora
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado/RS, novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por ter me dado forças, permitindo ultrapassar todos os obstáculos encontrados no decorrer da graduação.

Em especial ao meu professor orientador, Me. Rafael Farias Garcia, pelos ensinamentos, disponibilidade, dedicação e auxílio no desenvolvimento do meu trabalho.

A todos os professores pelas contribuições no meu processo de formação profissional.

A minha noiva, pela compreensão, troca de ideias e por estar sempre presente nos momentos mais difíceis com palavras de incentivo.

A minha família, que sempre me apoiou e nunca me deixou desistir.

A empresa Retificadora de motores Alto Taquari LTDA, pela doação do Corpo de Provas - CP, por ter disponibilizado máquina e ferramentas para desenvolver o trabalho e por compreenderem minhas ausências para me dedicar as atividades acadêmicas.

Ao retificador Marciano pelo auxílio durante os processos de usinagem.

A empresa J. A. Industrial Soluções em Componentes e ao supervisor Tiago por ter disponibilizado o rugosímetro para gerar os gráficos dos resultados deste trabalho.

RESUMO

O cabeçote é uma das partes mais desgastadas de um motor de combustão interna. Por conter todas as partes superiores da câmara de combustão, está constantemente sujeito a perturbações térmicas e mecânicas, podendo causar problemas como trincas, crateras, corrosão e empenamento de todo o conjunto, defeitos que podem ser oriundos de fadiga superficial. Neste sentido, o presente trabalho teve como principal objetivo a utilização do projeto de experimentos *Box-Behnken Design* (BBD) para a determinação da combinação ótima dos parâmetros de entrada variáveis independentes: (RPM) Rotações Por Minuto; (ap) Profundidade de Corte; e (vf) Velocidade de Avanço da Mesa, no processo de aplainamento da face do cabeçote de alumínio de um motor 1.0 com 8 válvulas. Para tanto, as variáveis dependentes deste processo de usinagem de acabamento foram mensuradas pelos parâmetros de rugosidade Ra e Rz. Para complementar os resultados, foram realizadas análises metalográficas das amostras para caracterização do material usinado. A influência de cada variável de entrada (variável independente) do processo, foi possível identificar através da análise de variância (ANOVA). A metodologia aplicada neste trabalho mostrou-se robusta e eficiente, pois foi possível a determinação da combinação ótima do processo de aplainamento de face de cabeçote de alumínio de um motor 1.0 8 válvulas. Pela combinação ótima do processo (RPM = 431 rpm, vf = 10 mm/min e ap=0,03 mm) foram encontrados os valores de Ra= 0,267 µm e de Rz= 1,741 µm, níveis de rugosidade melhores do que os encontrados nas 15 amostras iniciais.

Palavras-chave: Cabeçote de alumínio; Aplainamento; Acabamento; *Box-Behnken Design* (BBD); Otimização de processos.

ABSTRACT

The cylinder head is one of the most worn parts of an internal combustion engine. As it contains all the upper parts of the combustion chamber, it is constantly subject to thermal and mechanical disturbances, which can cause problems such as cracks, craters, corrosion and warping of the entire assembly, defects that may arise from surface fatigue. In this sense, the main objective of the present work was to use the *Box-Behnken Design* (BBD) experimental project to determine the optimal combination of input parameters independent variables: RPM (RPM): Rotations Per Minute; cd (ap): Cutting Depth and fs (vf): Forward Speed in the process of flattening the face of the aluminum cylinder head of a 1.0 with 8-valve engine. To this end, the dependent variables of this finishing machining process were measured by the roughness parameters Ra and Rz. To complement the results, metallographic analyzes of the samples were carried out to characterize the machined material.The influence of each input variable (independent variable) of the process was possible to identify through analysis of variance (ANOVA). The methodology applied in this work proved to be robust and efficient, as it was possible to determine the optimal combination of the aluminum cylinder head face planing process of a 1.0 8 valve engine. Due to the optimal combination of the process (RPM = 431 rpm, vf = 10 mm/min and ap =0.03 mm), values of Ra= 0.267 µm and Rz= 1.741 µm were found, roughness levels better than those found in the 15 initial samples.

Keywords: Aluminum head; Planing; finishing; *Box-behnken design* (BBD); Process optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina de plaina de cabeçote……22
Figura 2 –Fabricante Peugeot Indica altura standard e mínima em cabeçotes……..22
Figura 3 – Ferramentas de corte plaina de cabeçotes……..……...23
Figura 4 – Suporte de ferramenta……..……23
Figura 5 – Inserto diamantado……..……24
Figura 6 – Aplainamento de cabeçote……...……...……..……25
Figura 7 – Desgaste do inserto RCGT 1003 MO AS IC20 tendo com velocidades de avanço: a) 20 mm/min, b) 30 mm/min e c) 40 mm/min……...26
Figura 8 – Desgaste do inserto RDMT 1003 M0 LT 3000 tendo como velocidade de avanço: a) 20 mm/min, b) 30 mm/min e c) 40 mm/min……...27
Figura 9 – Definições das ligas de alumínio……..28
Figura 10 – Classificação e composição de ligas de alumínio……...28
Figura 11 – Distribuição de energia em um motor de combustão interna……..…..31
Figura 12 – Mecanismos de desgastes……31
Figura 13 – Representação esquemática da textura de uma superfície……..32
Figura 14 – Representação da linha média para um dado comprimento de avaliação……33
Figura 15 – Definição parâmetro Ra……..34
Figura 16 – Parâmetro de rugosidade Rz (µm).....……..35
Figura 17 – Esquema utilização de rugosímetro……...……...36
Figura 18 – Pontos de cortes para ensaios……...……36
Figura 19 – Resultados obtidos nos ensaios de rugosidade……..37

Figura 20 – Passos para desenvolver um planejamento experimental adequado….38
Figura 21 – Projeto experimental de BBD para três fatores……...39
Figura 22 – Fluxograma etapas realizadas para ensaios metalográficos……...42
Figura 23 – Fluxograma das etapas da pesquisa……..….43
Figura 24 – Corpo de prova…….45
Figura 25 – Ferramenta para plaina de material de alumínio……..45
Figura 26 – Máquina análise de espectrometria.....46
Figura 27 – Composição química do (CP) ……..……47
Figura 28 – Composição química de peças fundidas de alumínio e lingotes……..47
Figura 29 – Suporte de ferramenta……..……..48
Figura 30 – Inserto de diamante……...……..…48
Figura 31 – Plaina de cabeçote……..49
Figura 32 – Fixação e centralização (CP).....…….51
Figura 33 – Rugosímetro portátil Digimess TR-200..……..52
Figura 34 – Captura das imagens do CP com microscópio……..53
Figura 35 – Local de retirada do corpo de prova……..……...53
Figura 36 – Amostra retirada do CP..……..……...54
Figura 37 – Microscópio metalográfico….……..……...54
Figura 38 – Comparação entre perfis de rugosidade, superfície usinada do CP nos maiores e menores níveis de Ra e Rz entre as 15 Amostras…….60
Figura 39 – Ensaio metalográfico do corpo de prova……..……...61
Figura 40 – Variância (ANOVA) para rugosidade Ra e Rz……...……...63
Figura 41 − Parâmetros de otimização multivariada.....……..……..65
Figura 42 – Perfis de rugosidade de otimização da superfície usinada no CP……...67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Desvio padrão de Ra (µm).....59
Gráfico 2 – Desvio padrão de Rz (µm).....59
Gráfico 3 – Gráfico de superfície de resposta Ra (µm): Vf x RPM……....64
Gráfico 4 – Gráfico de superfície de resposta Rz (µm): Vf x RPM……....64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros utilizados para realizar os ensaios…….....26
Quadro 2 – Especificações técnicas máquina plaina de cabeçotes Wasc 1.000…...50

Quadro 3 – Valores médios das rugosidades de Ra e Rz……...58
Quadro 4 – Resultados e média das três medições de rugosidade Ra e Rz, no passe de otimização…….66
Quadro 5 – Combinação ótima dos parâmetros de entrada obtidos na otimização do processo de usinagem do cabeçote de alumínio……67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de cortes ……..55
Tabela 2 – Sequência gerada pelo Minitab®……..56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ANOVA – Análise de variância

BBD – *Box-Behnken Design*

CP – Corpo de prova

DOE – *Design of Experiments*

FLEX – Flexibilidade de utilizar dois tipos de combustível

HT – *Heat-treatable aluminum alloys*

ISO – Organização Internacional de Padronização

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MFDP – Máquina, Ferramenta, Dispositivo de fixação e Peça

MQL – Mínima quantidade de Lubrificante

NBR – Norma Técnica

STD – *Standard*

TIG – *Tungsten Inert Gas*

V – Válvulas

VS – Versus

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Alfa

ap – Profundidade de corte

F – Carga aplicada

H0 – Hipótese nula

H1 – Hipótese não vazia

LE – Comprimento da amostragem

LM – Comprimento da avaliação

MÁX – Máximo

MM – Milímetros

MM/MIN – Milímetros por minuto

P – Probabilidade de significância

Pcon % – Percentual de contribuição

R^2 – Coeficiente de determinação, (%)

R^2aj. – Coeficiente de determinação ajustado, (%)

Ra – Rugosidade média

Rmax – Rugosidade máxima

RMR – Proporção relativa do material

RPM – Rotações Por Minuto

Rp – Altura máxima de pico

Rq – Rugosidade quadrática média

Rsm – Largura média

Rt – Rugosidade total

Ry – Rugosidade máxima

Rz – Altura máxima do perfil de rugosidade

R3z – Rugosidade média do terceiro pico e vale

S – Parâmetros de amplitude

Sk – Profundidade de rugosidade central

Sm – Parâmetro de medição

Tp – Fração de contato a determinada profundidade

µm – Unidade de medida microscópica

μ – Média geral

τj – Efeito do grupo

εij – Erro aleatório

Vf – Velocidade de Avanço da mesa

X – Variáveis controláveis (fatores independentes de entrada)

Y – Variáveis de resposta (fatores dependentes de saída)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 16
1.1 Tema..... 17
1.2 Delimitação do tema.....18
1.3 Problema de Pesquisa..... 18
1.4 Hipóteses..... 18
1.5 Justificativa.....19
1.6 Objetivos..... 19
1.6.1 Objetivo geral.....19
1.6.2 Objetivos Específicos..... 19
1.7 Estrutura.....20

2 REFERENCIAL TEÓRICO.....21
2.1 Processos de plaina de cabeçotes e ferramentas de corte..... 21
2.2 Ligas de alumínio..... 27
2.3 Usinagem a seco..... 29
2.4 Tribologia..... 30
2.5 Textura da superfície usinada..... 32
2.5.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade..... 33
2.5.2 Medição da rugosidade.....35
2.6 Projeto e análise de experimentos..... 37
2.6.1 Box-Behnken Design (BBD)..... 38
2.6.2 Análise de variância (ANOVA).....41
2.7 Ensaios metalográficos..... 41

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... 43
3.1 Método científico..... 43
3.2 Caracterização do corpo de prova.....44
3.3 Caracterização da máquina plaina de cabeçote e ferramenta de acabamento……...48
3.4 Centralização do cabeçote na máquina..... 50
3.5 Avaliação de rugosidade..... 52

3.6 Análise superficial qualitativa dos CPs.....52
3.7 Ensaios de Metalografia..... 53
3.8 Planejamento estatístico do experimento.....55

4 RESULTADOS..... 57
4.1 Análise da superfície usinada..... 57
4.2 Análise estática da rugosidade *Ra* e *Rz*..... 62
4.3 Testes de validação dos parâmetros otimizados..... 65

5 CONCLUSÃO..... 69
5.1 Sugestões para trabalhos futuros..... 70

REFERÊNCIAS.....71

ANEXOS..... 76
ANEXO A – Composição Química do Material..... 77
ANEXO B – Análise da microestrutura do material.....78
ANEXO C – Tabela ASM (1992).....79

1 INTRODUÇÃO

Um motor de combustão interna se constitui por diferentes componentes, que juntos garantem sua funcionalidade. O cabeçote é um dos componentes que mais sofre com desgaste de um motor de combustão interna. Por conter todas as partes superiores da câmara de combustão, ele está constantemente sujeito a perturbações térmicas e mecânicas e pode resultar no desenvolvimento de problemas, tais como rachaduras, crateras, corrosão e empenamento de todo o conjunto. Partes danificadas do motor, como o cabeçote, geralmente são enviadas para empresas denominadas de retificadoras. Nesses locais, são realizados processos de usinagem como aplainamento, retificação e soldagem, etapas que restauram a forma original do cabeçote em reparo (Benini; Rossi; Silva, 2019).

Castro e Rahde (2014), destacam que nas décadas de 80 e 90 todos os motores danificados apresentavam problemas por desgastes naturais, mau uso por parte do proprietário, fadiga de materiais, quebras repentinas de componentes, rompimento de algum sistema ou problemas de lubrificação dos componentes internos. Na atualidade, apesar dos avanços em processos de fabricação e aprimoramento da funcionalidade dos componentes de motores de combustão, estes problemas continuam ocorrendo. Frente a isso, muitos proprietários de veículos automotores, ao vivenciarem a danificação do motor de seu veículo, optam pela usinagem e retificação ao invés da aquisição de um motor novo. Faria (2015), menciona que a usinagem compreende um processo de retificação de motores para

reparar pequenos danos, causados pelo desgaste natural ou pela não realização das manutenções preventivas do motor.

Segundo Benini, Rossi e Silva (2019), as etapas que fazem parte do processo de recondicionamento de um cabeçote incluem o uso de ferramentas adequadas que visam simplificar o corte para garantir uma boa usinagem da face do cabeçote. Neste procedimento, as ferramentas de corte utilizadas para desbaste do alumínio no aplainamento de cabeçote a seco tendem a gerar uma superfície mais rugosa no cabeçote, devido ao ângulo do inserto. Desta forma, o processo subsequente na peça conta com a utilização de um inserto de diamante no suporte de ferramenta, para aplainar e dar o último acabamento na face do cabeçote, garantindo assim, planicidade e rugosidade padrão de fábrica. Combinar todos os fatores de entrada deste processo é indispensável para a obtenção de níveis aceitáveis de acabamento (rugosidade) da face de um cabeçote automotivo.

Os projetos de experimentos (DOE) são métodos de experimentação utilizados para combinar de forma adequada e robusta as variáveis de entrada de um processo de usinagem visando sua otimização. Um método de testagem que pode ser utilizado é o *Box-Behnken Design* (BBD), que experimenta todos os fatores previamente selecionados em três níveis (-1;0;+1), excluindo as interações em seus níveis mais severos e repetindo três vezes o ponto central. O BBD, quando aplicado de forma adequada, com um menor número de experimentos (15 amostras) é um método estatístico confiável que possibilita a otimização do processo (Carvalho, 2017).

Nessa perspectiva, baseando-se nos temas apresentados anteriormente, com o auxílio do projeto de experimentos *Box-Behnken Design* (BBD), a proposta do presente trabalho tem como objetivo a determinação da combinação ótima dos parâmetros de entrada do processo de aplainamento da face de um cabeçote de alumínio do motor 1.0 8 válvulas flex, visando o melhor nível de acabamento possível da face do cabeçote .

1.1 Tema

Otimização do processo de usinagem de acabamento da face de um cabeçote de alumínio, do motor 1.0 8 válvulas flex, utilizando o projeto de experimentos

Box-Behnken Design (BBD).

1.2 Delimitação do tema

Este trabalho delimita-se na caracterização da interação do par ferramenta/peça, visando a caracterização do processo de usinagem e a determinação da combinação ótima dos parâmetros do processo de usinagem aplainamento de acabamento da face de um cabeçote de alumínio, do motor 1.0 8 válvulas flex, com o auxílio da metodologia do projeto de experimentos *Box-Behnken Design (BBD)*. Demais informações técnicas, construtivas e metalúrgicas do cabeçote não fazem parte dos objetivos deste trabalho.

1.3 Problema de Pesquisa

Através do presente estudo pretende-se responder às seguintes questões:

a) Quais variáveis de entrada (parâmetros de usinagem) são significativas sobre as variáveis de saída (acabamento) de um processo de aplainamento da face de cabeçotes de alumínio?

b) A rigidez do conjunto MFDP (Máquina, Ferramenta, dispositivo de Fixação e Peça) está adequada para este trabalho?

c) É possível melhorar o processo de usinagem de ´ aplainamento a partir do projeto de experimento BBD proposto neste trabalho?

1.4 Hipóteses

Como possíveis hipóteses para o presente estudo de caso, teve-se:

a) A superfície usinada é diretamente influenciada pelos parâmetros de entrada do processo de usinagem proposta neste trabalho;
b) O conjunto MFDP (Máquina, ferramenta, dispositivo de Fixação e Peça) influenciam significativamente no acabamento superficial da face do cabeçote;

c) O BBD é um método adequado para a otimização do processo de aplainamento de face de cabeçotes automotivos.

1.5 Justificativa

Os processos de acabamento superficial geram uma demanda cada vez maior na otimização dos parâmetros de usinagem, visando obter texturas de superfície cada vez melhores. Muitas pesquisas são desenvolvidas para a determinação adequada dos melhores parâmetros de usinagem, com a finalidade de obter redução dos custos do processo produtivo e qualidade no produto final.

Em um processo de usinagem existem muitas variáveis independentes do processo, que associados com a rigidez do conjunto MFDP (Máquina, Ferramenta, Dispositivo de fixação e Peça) influenciam diretamente nas variáveis dependentes do processo, como, por exemplo no acabamento da superfície usinada que pode ser mensurado por parâmetros de rugosidade. Desta forma, a utilização de uma metodologia de projeto de experimentos (BBD) se faz necessária para a otimização do processo de usinagem de aplainamento da face de cabeçote de alumínio automotivo.

1.6 Objetivos

O presente estudo foi dividido em objetivo geral e objetivos específicos.

1.6.1 Objetivo geral

Determinar a combinação ótima dos parâmetros de entrada do processo de aplainamento da face de um cabeçote de alumínio do motor 1.0 8 válvulas flex.

1.6.2 Objetivos Específicos

Avaliar se a qualidade do acabamento da textura da superfície de um

cabeçote usinado com o auxílio de microscópio e perfis que caracterizam os processos realizados.

Realizar a média de três medições de rugosidade Ra e Rz, em cada passe de aplainamento realizado no cabeçote.

Comparativo através de gráficos do passe com maior rugosidade e menor rugosidade Ra.

Determinação da combinação ótima dos parâmetros de usinagem de aplainamento de um cabeçote de alumínio do motor 1.0 8 válvulas flex a partir da utilização do projeto de experimentos BBD.

1.7 Estrutura

O primeiro capítulo apresenta a introdução do tema desenvolvido e o interesse pelo estudo, descrevendo o tema da pesquisa, a delimitação do tema, justificativa, hipótese, objetivo geral e os objetivos específicos.

O segundo capítulo contempla o referencial teórico, com contribuições de autores que apresentam em seus estudos análises e conceituações relacionadas a este trabalho.

O terceiro capítulo constitui os procedimentos metodológicos que nortearam o desenvolvimento da pesquisa, detalhando os ensaios que foram realizados.

O quarto capítulo integra os resultados obtidos neste trabalho, a partir dos ensaios realizados.

O quinto capítulo elucida as conclusões deste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta etapa será apresentada uma revisão sobre as principais informações relevantes ao desenvolvimento deste estudo, sendo elas: (i) Processos de plaina de cabeçotes e ferramentas de corte; (ii) Ligas de alumínio; (iii) Usinagem a seco; (iv) Tribologia; (v)Textura da superfície usinada; (vi) Projeto e análise de experimentos.

2.1 Processos de plaina de cabeçotes e ferramentas de corte

Para Benini, Rossi e Silva (2019) o processo de usinagem da superfície do cabeçote utilizado para corrigir desvios de planicidade é muito semelhante à definição do processo de faceamento. Isso porque, nesse processo, o corte é realizado pelo movimento rotativo do disco porta-ferramenta que contém a aresta de corte, enquanto a peça se move linearmente.

Em um ambiente industrial, tal procedimento é chamado de aplainamento. Ele ocorre principalmente porque o processo de usinagem serve ao mesmo propósito que a maioria dos procedimentos convencionais de aplainamento, que é corrigir desvios de planicidade.

A Figura 1, ilustra a partir de dois ângulos, uma máquina de plaina de cabeçote. Ela tem como função aplainar e fazer o acabamento superficial da face do cabeçote, com o objetivo de fazer com que o cabeçote volte a ter planicidade.

Figura 1 – Máquina de plaina de cabeçote

Fonte: HK Máquinas (2023).

A norma NBR 13032 (ABNT,1996) define etapas para os processos de retificação, uma delas indicam medições para inspecionar altura de cabeçotes, conforme demonstrado abaixo Figura 2. É o fabricante quem define alturas std e mínimas em cabeçotes, para realizar o aplainamento, assim o profissional retificador deve analisar estes catálogos para ver se o cabeçote ainda tem altura para aplainamento. A norma NBR 13032 indica a troca do cabeçote caso o mesmo esteja com medida abaixo da mínima indicada pelo fabricante.

Figura 2 – Fabricante Peugeot Indica altura standard e mínima em cabeçotes

MOTOR	COMBUSTÍVEL	MATERIAL	STANDARD	MINIMO
PEUGEOT 106	GASOLINA	ALUMÍNIO	111,2	110,7
PEUGEOT 206	GASOLINA	ALUMÍNIO	111,3	110,8
PEUGEOT 307	GASOLINA	ALUMÍNIO	137	136,5
PEUGEOT 504	GASOLINA	ALUMÍNIO	90,15	89,45
PEUGEOT 16V 4 CIL			137	136,5
PEUGEOT XUD - 9 (JPX)	GASOLINA	ALUMÍNIO	115	114

Fonte: Adaptado de Mercado da retífica (2020).

Machado *et al*. (2009) citam que o processo de aplainamento da superfície do

cabeçote é executado por uma ferramenta de aresta monocortante. Portanto, a taxa de geração de cavaco é muito baixa. A ferramenta de corte possui um gume que entra em contato com a face de corte apenas durante parte de cada período. A Figura 3 ilustra as ferramentas usadas para este procedimento, são ferramentas de corte para desbastes de alumínio em um aplainamento de cabeçotes. A Figura 4 mostra um suporte de ferramenta para a plaina, onde é colocado o inserto de diamante e a Figura 5 ilustra este inserto que é utilizado para o acabamento da superfície da peça usinada.

Figura 3 – Ferramentas de corte plaina de cabeçotes

Corte tipo unha

Ferramenta de corte para plaina Tipo unha - Para usinar alumínio

CÓDIGO CR	Código	Diâmetro	Comprimento
CR-200	R.PAL1/2CD	Ø1/2"	70mm
CR-201	R.PAL16CD	Ø16mm	70mm

Tipo unha - Chanfro esquerdo

Ferramenta de corte para plaina tipo unha. Para usinar alumínio Chanfro lado esquerdo.

CÓDIGO CR	Código	Diâmetro	Comprimento
CR-202	R.900-1/2	Ø1/2"	70mm
CR-203	R.900-16	Ø16mm	70mm

Ferramenta de corte bico

Ferramenta de corte para plaina Tipo bico Para usinar ferro

CÓDIGO CR	Código	Diâmetro	Comprimento
CR-205	R.RH381	Ø1/2"	45mm
CR-207	R.RH258	Ø16mm	45mm

Corte Quebra cavaco

Ferramenta de corte para plaina Tipo quebra cavaco. Para usinar alumínio

CÓDIGO CR	Código	Diâmetro	Comprimento
CR-204	R.RH380	Ø1/2"	45mm
CR-206	R.RH259	Ø16mm	45mm

Fonte: Catálogo Remafe (2022).

Figura 4 – Suporte de ferramenta

Suporte para inserto especial

CÓDIGO CR	Diâmetro	Comprimento
CR-117	Ø1/2"	50mm
CR-118	Ø16mm	50mm

Fonte: Catálogo Remafe (2022)

Figura 5 – Inserto diamantado

Fonte: Catálogo Remafe (2022).

Segundo Amorim (2021), operações de usinagem devem seguir as seguintes etapas:

- Fixação de peças - Ao fixar as peças, é importante garantir que a mesa, o torno ou as peças estejam livres de limalhas, pois a presença delas pode impedir o encaixe correto das peças. O alinhamento deve ser verificado com uma régua ou relógio comparador.
- Fixação da ferramenta - A ferramenta é mantida no porta-ferramenta por um parafuso de fixação. Para evitar flexão e vibração, a distância entre a ponta da ferramenta e a ponta do cabo deve ser a menor possível.
- Altura da mesa - A altura da mesa deve ser ajustada de forma que a ponta da ferramenta fique a aproximadamente 5mm da superfície da plaina.
- Ajuste dos golpes por minuto (rpm) - Os ajustes dos golpes por minuto devem ser calculados usando os dados do fabricante. Igual ao valor da velocidade de corte.
- Regulagem do avanço automático da mesa - A regulagem do avanço automático da mesa é determinada pelo acabamento desejado na peça.

- Referência inicial para a primeira passagem (também conhecida como Tangente) - A referência inicial para a primeira passagem é feita por meio da regulagem, abaixando a ferramenta até tocar a peça e acionando a plaina para traçar a linha de referência. Para isso, o anel de escala do porta ferramentas deve ser zerado e estabelecida a profundidade do corte. Em seguida, a plaina está apta para a execução do processo de usinagem.
- Ajuste de Alinhamento - Para a realização do ajuste de alinhamento deve ser ajustado a ferramenta, de forma que ao final de cada passe ela avance 20 mm para fora da peça e recue no máximo 10 mm antes de iniciar um novo passe. Na Figura 6 é possível observar um cabeçote sendo aplainado.

Figura 6 – Aplainamento de cabeçote

Fonte: Cmaq (2023).

Este processo de usinagem é realizado através de um rebolo com uma ferramenta de corte que avança sobre toda a superfície da peça, sendo necessário realizar uma medição com uma régua para verificar o empenamento do cabeçote, a partir disso com um relógio comparador determinar a profundidade de corte a ser

retirado do cabeçote. (Benini; Rossi; Silva, 2019).

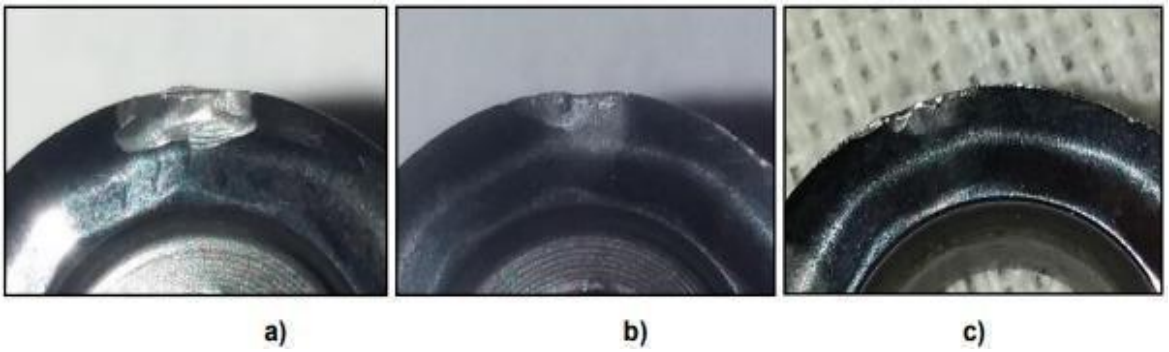
Becker (2017) realizou sua pesquisa na busca da solução de um problema recorrente no ramo das retíficas de motores, que o péssimo acabamento superficial em cabeçotes com antecâmara. Um inserto de corte que gerasse uma superfície com bom acabamento e sofresse o menor desgaste possível. Foram então realizados ensaios em dois modelos de insertos, RCGT 1003M0- AS IC20 e RDMT 1003 M0- LT 3000; o quadro a seguir (Quadro 1) mostra os parâmetros variáveis, profundidade de corte, rotação e número de passes utilizados neste processo. Após os ensaios foram captadas imagens das ferramentas e da superfície do cabeçote usinado, mostrando o comparativo entre os dois insertos tendo como melhor resultado a ferramenta RDMT 1003 M0- LT 3000, que demonstrou melhor resistência ao desgaste e ao acabamento superficial (Figuras 7 e 8).

Quadro 1 – Parâmetros utilizados para realizar os ensaios

INSERTO	NÚMERO DO ENSAIO (3 PASSES DE USINAGEM PARA CADA ENSAIO)	PARÂMETROS VARIÁVEIS	PARÂMETROS FIXOS		
		VELOCIDADE DE AVANÇO (mm/min)	PROFUNDIDADE DE CORTE (mm)	ROTAÇÃO (rpm)	NÚMERO DE PASSES
RCGT 1003 MO – AS IC 20	1	20	0,04	350	3
	2	30			
	3	40			
RDMT 1003 MO – LT 3000	1	20			
	2	30			
	3	40			

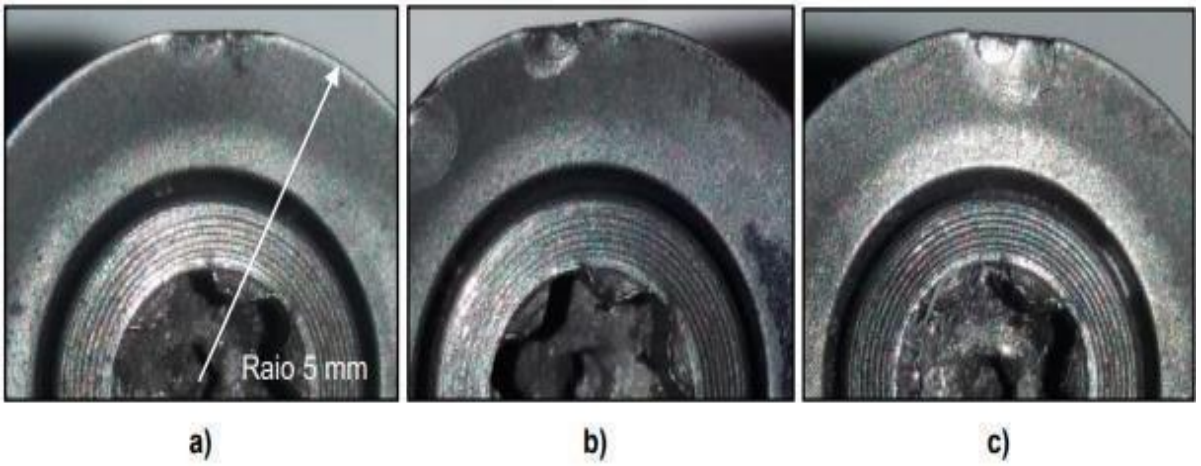
Fonte: Adaptado de Becker (2017).

Figura 7 – Desgaste do inserto RCGT 1003 MO AS IC20 tendo com velocidades de avanço: a) 20 mm/min, b) 30 mm/min e c) 40 mm/min



Fonte: Becker (2017).

Figura 8 – Desgaste do inserto RDMT 1003 M0 LT 3000 tendo como velocidade de avanço: a) 20 mm/min, b) 30 mm/min e c) 40 mm/min



Fonte: Becker (2017).

2.2 Ligas de alumínio

Para Nazari (2017), componentes de motores produzidos com materiais como ligas de alumínio proporcionam desempenho acústico e térmico superior por ter maior capacidade de absorção de ruídos, vibrações, dissipação de calor e melhorias no processo produtivo. Outro fator importante a se destacar é que com esse material é possível produzir peças com maior complexidade estrutural, maior precisão, tamanho e melhor usinabilidade sem a necessidade de pintura ou outros tratamentos de superfície, economizando custos e permitindo melhor acabamento e excelente resistência à corrosão. Conforme Cunha (2012), adições de elementos de liga de alumínio como antimônio, berílio, boro, cálcio, cromo, cobre, ferro, magnésio, manganês, níquel, fósforo, silício, sódio, estrôncio, titânio e zinco são usadas para melhorar as propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

As propriedades das ligas de alumínio dependem da complexa interação entre composição química e características microestruturais que se desenvolvem durante a solidificação, tratamento térmico e deformação durante o processamento em produtos moldados (Gonçalves, 2016). Segundo Cunha (2012), os tratamentos realizados nas ligas de alumínio são classificados pelos sufixos F, O, H e T. O Figura 9 demonstra estas definições.

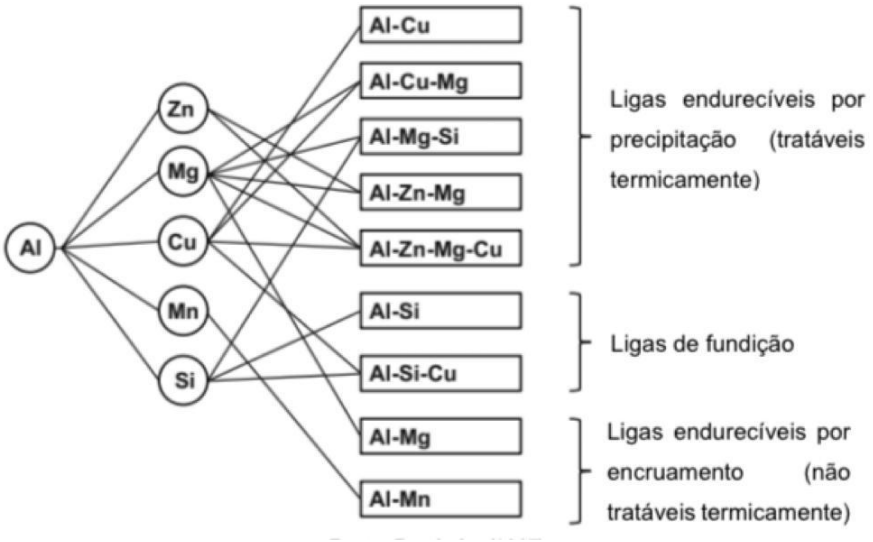
Figura 9 – Definições das ligas de alumínio

Sufixos	Definição
F	Como fabricado - São as ligas que não recebem nenhum tipo de tratamento
O	Recozimento - É um tratamento realizado em ligas conformadas a fim de aumentar a ductilidade e reduzir o limite de resistência
H	Encruamento - Ligas endurecidas por encruamento, essa terminologia é classificada como H1, H2 ou H3.
H1	Ligas que recebem apenas o endurecimento por encruamento
H2	Ligas encruadas e após parcialmente recozidas
H3	Ligas encruadas e envelhecidas naturalmente, para determinada dureza
T	Esse sufixo remete às ligas tratadas termicamente para aumento da resistência mecânica, é classificada com os dígitos de 1 a 10.
T1	Resfriamento iniciado na temperatura de conformação a quente e posterior envelhecimento natural para estabilizar a resistência mecânica
T2	Resfriamento a partir da temperatura de conformação a quente, encruamento e envelhecimento natural para manter a resistência mecânica estável
T3	Tratamento por solubilização, encruamento, e envelhecimento natural para resistência mecânica estabilizada
T4	Solubilização seguida de envelhecimento natural para obter estabilidade da resistência mecânica
T5	Liga resfriada a partir da temperatura de conformação a quente e envelhecimento artificial
T6	Solubilização e envelhecimento natural
T7	Ligas solubilizadas e super envelhecidas ou estabilizadas
T8	Liga solubilizada, encruada e envelhecida artificialmente
T9	Liga solubilizada, envelhecida artificialmente e encruada
T10	Resfriamento partindo da temperatura de conformação a quente, encruamento e envelhecimento artificial

Fonte: Heinrichs (2021).

A norma NBR ISO 209 (ABNT, 2010) é quem define e classifica as várias composições químicas do alumínio, tal como é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Classificação e composição de ligas de alumínio



Fonte: Gonçalves (2016).

As principais propriedades do alumínio são sua baixa densidade e alta resistência à corrosão em ambientes atmosféricos, meios líquidos aquosos e em alguns produtos químicos inorgânicos e orgânicos. A baixa densidade é considerada um fator importante, pois proporciona relação peso - estrutura e resistência do material favorável. Com alta resistência à corrosão nos meios mencionados, essa característica é ainda complementada pela vantagem de que o metal não precisa de tratamento superficial para funcionar dessa maneira. O alumínio não possui alta resistência mecânica, por isso tratamentos térmicos e adições de elementos de liga são usados para controlar essa propriedade, dependendo é claro de sua aplicação (Diogenes, 2011).

A melhor resistência mecânica em ligas de alumínio, segundo Padilha (2020), são as tratáveis termicamente: *Heat-treatable aluminum alloys* (HT). Para Heinrichs (2021), o principal tratamento térmico aplicado é a anodização seguida de endurecimento por precipitação. Este processo é resumido como dissolução da fase dura seguida de precipitação, também conhecida como envelhecimento. Este envelhecimento pode ser natural, à temperatura ambiente, ou artificial, quando a liga é aquecida a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura ambiente. É importante lembrar que mesmo com esse tratamento térmico, a ductilidade do material não se altera.

Para Cunha (2012), a utilização de alumínio em vez de ferro fundido em motores de combustão interna apresenta propriedades acústicas e térmicas superiores, pois possui maior capacidade de absorver ruídos, vibrações, dissipar calor e permitir uma maior flexibilidade, além de peças de material de alumínio tem uma maior complexidade estrutural, maior precisão dimensional e melhor usinabilidade.

2.3 Usinagem a seco

Segundo Paula (2021), as operações de usinagem que não utilizam fluidos de corte são chamadas de usinagem a seco. Isso significa eliminar o custo e as preocupações ambientais associadas à compra, gerenciamento e descarte de fluidos

de corte. A usinagem a seco é a escolha preferida da indústria, economizando custos associados à aplicação de lubrificantes de resfriamento e eliminando impactos ambientais negativos. Este processo tem boas aplicações em muitos campos de processamento de metais não ferrosos, ligas e outros materiais. O corte a seco requer que o material da ferramenta não só tenha alta dureza, tenacidade térmica, mas também tenha boa resistência ao desgaste, resistência ao choque térmico e aderência térmica.

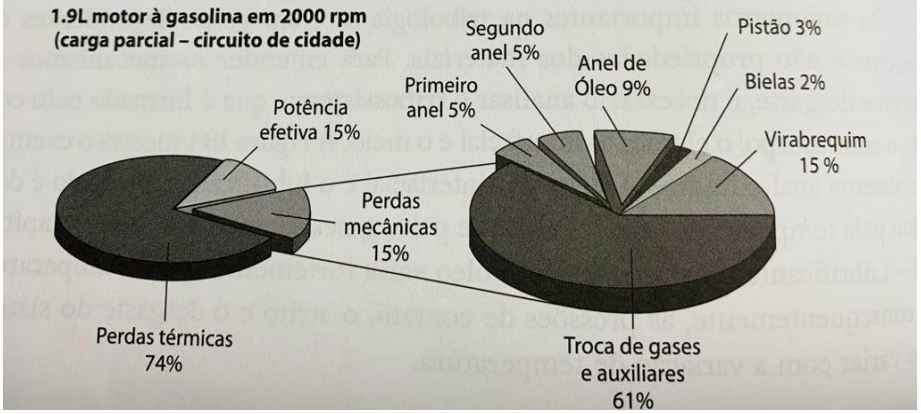
Para Möschbörcher (2023), as vantagens da usinagem a seco são peças mais limpas, processo sem resíduos, menores custos de ferramentas e menos custos de reciclagem. Portanto, para eliminar completamente o refrigerante, as ferramentas usadas neste processo de usinagem devem ter revestimentos que melhorem seu desempenho, ter características livres de fluidos refrigerantes ou ter uma microestrutura mais resistente à corrosão. Na usinagem a seco, as ferramentas de corte precisam ter melhor desempenho em altas temperaturas, tendo como fator importante utilizar ferramentas adequadas com boa aderência, resistência e dureza.

A tendência mundial de usinagem sem fluidos de corte visa reduzir significativamente o custo de aquisição de fluidos de corte e sua destinação final, devido a preocupações ocupacionais, como doenças de pele e respiratórios. Existem preocupações ambientais devido o fluido de corte ser um grave poluente da água, do solo e do ar (Gomes, 2018).

2.4 Tribologia

Conforme Brunetti (2012), tribologia é uma disciplina que estuda os fenômenos e mecanismos de atrito e lubrificação. Como um motor é composto por dezenas de peças que giram ou deslizam umas contra as outras, é necessário um estudo cuidadoso da tribologia do sistema do motor para garantir a durabilidade e a eficiência exigidas pela indústria. O desgaste excessivo das peças pode resultar em folga e vibração inaceitáveis. Devido ao impacto no consumo de combustível e nas emissões do motor, há um foco crescente na redução das perdas por atrito. A Figura 11 demonstra a distribuição de energia em um motor de combustão interna.

Figura 11 – Distribuição de energia em um motor de combustão interna

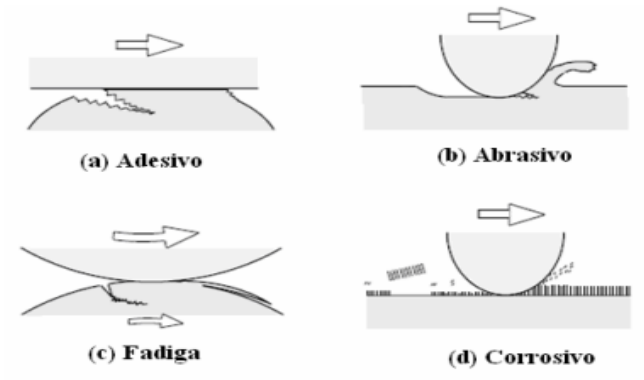


Fonte: Brunetti (2012).

Brunetti (2012) menciona que as perdas mecânicas causadas pelo atrito afetam o desempenho do motor. Embora estas perdas representam uma proporção relativamente pequena do consumo total de energia, representam uma fracção significativa da potência útil, especialmente em cargas parciais típicas de utilização urbana. Estima-se que uma redução de 10% nas perdas por atrito resultará em uma redução aproximada de 3% no consumo de combustível.

Para Holmberg, Erdemir (2017), 23% do consumo total de energia do mundo se origina de contatos tribológicos, sendo 20% para superar o atrito e 3% para reparar peças desgastadas. Com novas tecnologias nas áreas de revestimentos, materiais e lubrificação, estimam-se reduções de longo prazo de perdas da ordem de 40% ao longo de 15 anos e de 18% no curto prazo de 8 anos. Radi *et al*. (2007) destacam que existem, em tribologia, quatro maneiras de ocorrer desgastes, conforme apresentação da Figura 12.

Figura 12 – Mecanismos de desgastes



Fonte: Radi et al. (2007).

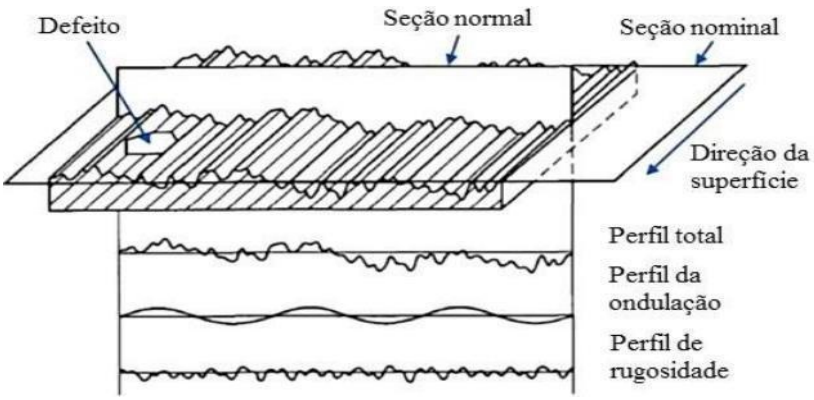
Conforme os mecanismos de desgastes descritos, as mudanças na superfície durante o movimento são complexas. De modo geral, o desgaste ocorre através de múltiplas maneiras, por isso torna-se importante compreender cada mecanismo de desgaste em cada modo.

2.5 Textura da superfície usinada

Segundo Möschbörcher (2023), a rugosidade se constitui no resultado dos processos de fabricação presentes na peça. Quando a fabricação for por meio da usinagem, os parâmetros de corte, máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e o ferramental utilizados afetam a rugosidade. Outro fator importante como a presença de vibração, desgaste da ferramenta e uso de fluido de corte também podem afetar a textura final da superfície.

Conforme Carvalho (2017), se a superfície de um material for analisada em alta ampliação, pode-se concluir que todas as superfícies são irregulares, pois juntas as irregularidades microscópicas da superfície formam uma topografia característica, chamada textura. A textura da superfície é produzida pelo processo de fabricação utilizado e tem forte influência no desempenho de um componente em serviço, como o de um motor de combustão interno, por exemplo. Como mostrado na (Figura 13), a textura de uma superfície é dividida em três componentes: forma, ondulação e rugosidade. O parâmetro Rz, é útil ao comparar superfícies do mesmo processo de fabricação, é mais sensível a picos ou vales locais associados a Ra.

Figura 13 – Representação esquemática da textura de uma superfície

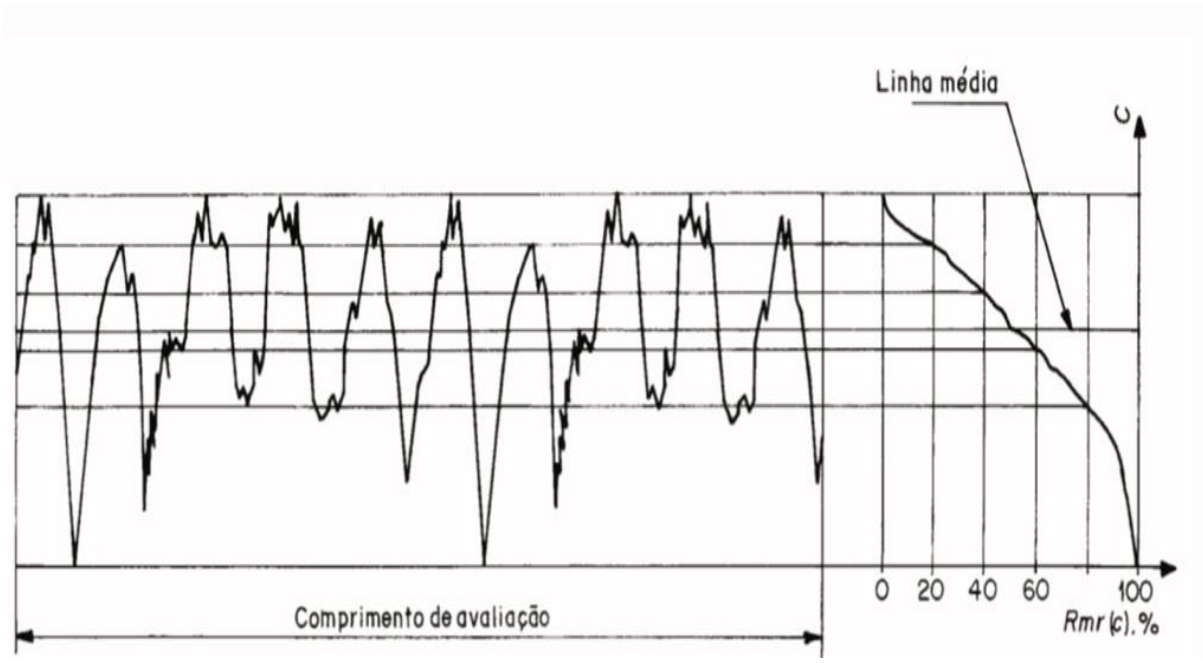


Fonte: Adaptado de ASME B46.1 (2002).

2.5.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade

No Brasil, a norma NBR 4287 (ABNT, 2002) fornece especificações para parâmetros de rugosidade superficiais. Para Marchiori (2013), diferentes parâmetros de rugosidade são adequados para diferentes situações; a sua escolha depende da aplicação da superfície e vários parâmetros que são recomendados para determinar as propriedades desejadas. O parâmetro de rugosidade média Ra é um parâmetro bem conhecido que tem sido usado por Engenheiros por décadas, essencialmente como um modelo de medição. Na figura 14 é representada a linha média da avaliação.

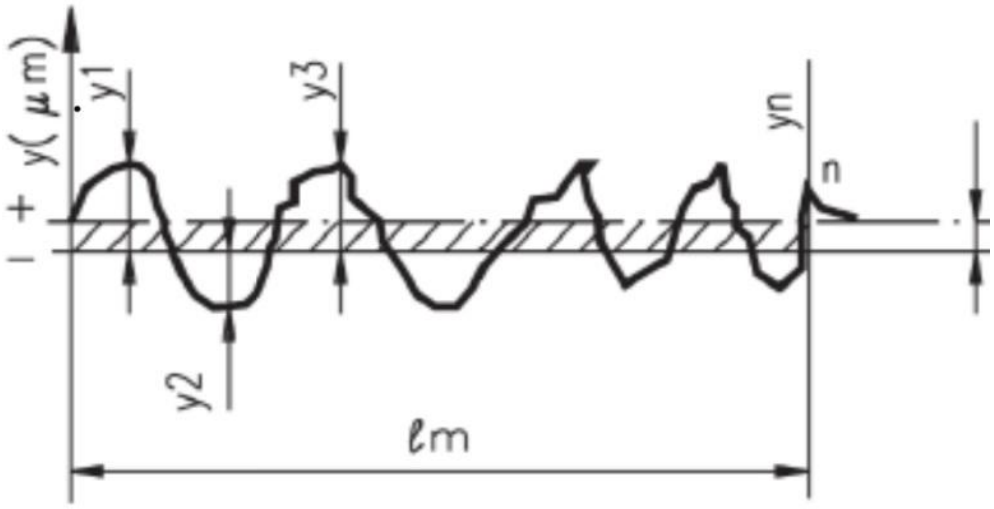
Figura 14 – Representação da linha média para um dado comprimento de avaliação



Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

Para Garcia (2019), a rugosidade média (Ra) é possível ser indicada analisando a média dos valores absolutos da ordenada no comprimento medido (µm) em relação a linha central do perfil primário, como pode ser visto na Figura 15 e na Equação 1. Este parâmetro é amplamente utilizado para controlar a produção em séries de picos que requerem pouca responsabilidade mecânica, isto é, peças que tenham apenas fins estéticos.

Figura 15 - Definição parâmetro Ra



Fonte: Garcia (2019).

$$Ra = \frac{y1 + Y2 + ...yn}{n} \quad (1)$$

Onde:

Ra =Rugosidade média
y = Comprimento da amostra
n = Média

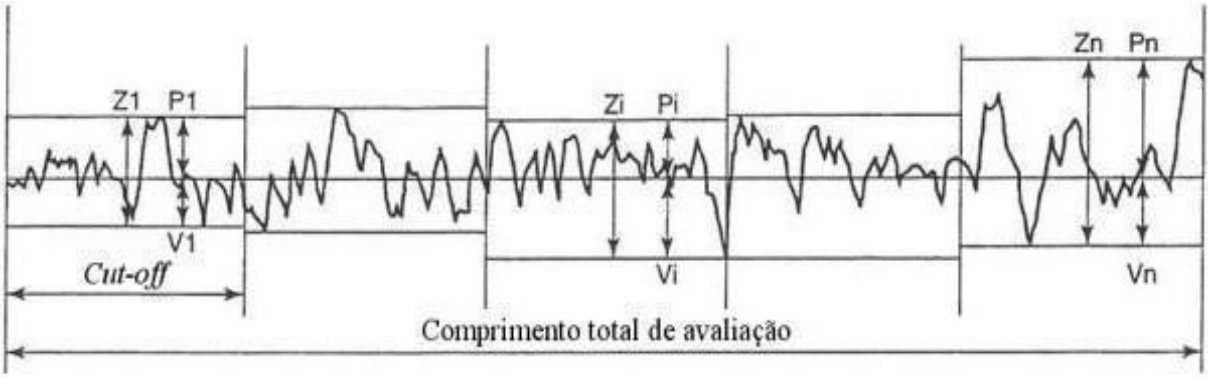
O parâmetro Rz é determinado medindo a distância vertical do pico mais alto ao vale mais profundo dentro de cada um dos cinco comprimentos de amostragem (Le). O valor de Rz é a média aritmética entre os cinco valores obtidos, calculado a partir da Equação 1. O parâmetro Rz, é útil ao comparar superfícies do mesmo processo de fabricação, é mais sensível a picos ou vales locais associados a Ra. A Figura 16, ilustra parâmetro de Rz e a Equação 2 mostra um perfil de exemplo com cinco comprimentos de amostra *(cut-off)* (Nicola, 2008).

$$Rz = \frac{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4+Z_5}{5} \quad (2)$$

Onde:

Rz = Média aritmética
Z = Comprimento da amostra

Figura 16 – Parâmetro de rugosidade Rz (µm)



Fonte: Nicola (2008).

Além disso, segundo Garcia (2019), há outros parâmetros que representam os perfis de rugosidade além dos citados, sendo eles:

- Rugosidade quadrática média (rq): tem objetivo de detecção de picos e vales.
- Rugosidade máxima Ry estabelece o valor máximo entre o Zi no comprimento de medição (lm)
- Rugosidade total Rt define o comprimento vertical entre o pico mais saliente e o vale mais profundo.

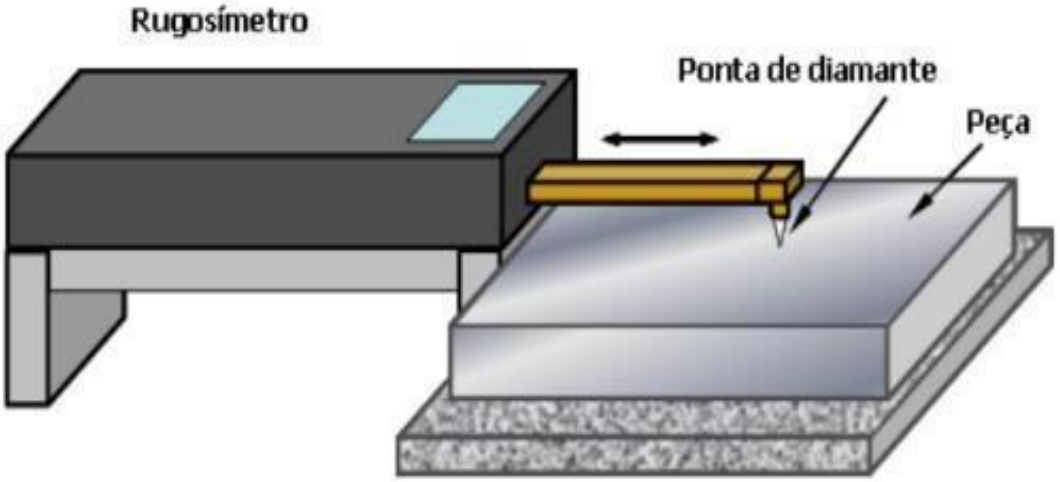
2.5.2 Medição da rugosidade

Para poder quantificar a rugosidade das superfícies usinadas, são frequentemente utilizados dispositivos de contato mecânico chamados medidores de rugosidade. Eles funcionam com base no princípio de deslocamento da ponta de contato sobre a superfície da área de medição. Esse movimento é traduzido em impulsos elétricos e exibidos no *display* do aparelho, podendo até ser registrado em gráficos.

A rugosidade é medida em termos do número de picos e depressões que uma superfície exibe. Se esses picos e vales tiverem grandes desvios em profundidade e altura em relação à superfície média, é considerado rugoso, se tiverem pouco desvio, é considerado liso. A rugosidade da superfície consiste em pequenas irregularidades ou erros microgeométricos produzidos pelo processo de corte

(Marchiori, 2013). Na figura 17, pode-se observar um esquema para medição com um rugosímetro.

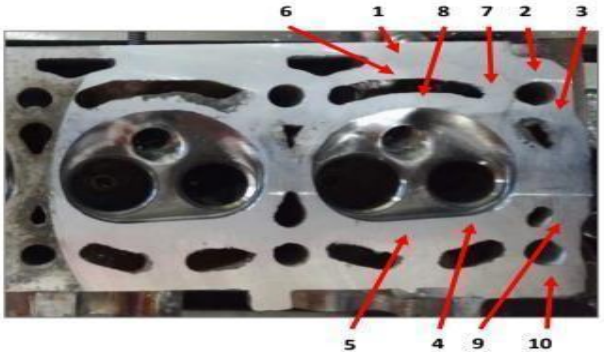
Figura 17 – Esquema utilização de rugosímetro



Fonte: Catapan (2013).

Com ensaios de rugosidade, metalografia e dureza, Benini, Rossi e Silva (2019) analisaram a textura superficial da face de um cabeçote de alumínio que foi soldado e posteriormente aplainado. Eles realizaram medições nas regiões não ocupadas e ocupadas pelo processo de soldagem TIG e posteriormente aplainadas. Detectaram que a presença de metal de adição não afeta o acabamento da superfície usinada e que as regiões que receberam preenchimento apresentaram maior ductilidade e defeitos de porosidade. Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os pontos cortados para análise e resultados obtidos nos ensaios de rugosidade, respectivamente.

Figura 18 – Pontos de cortes para ensaios



Fonte: Benini, Rossi e Silva (2019).

Figura 19 – Resultados obtidos nos ensaios de rugosidade

Região	Ra (µm)	Rq (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)
1 (não preenchida)	0,654	0,81	6,17	4
2 (não preenchida)	0,65	0,82	5,41	4,08
3 (não preenchida)	0,78	0,94	4,91	4,24
4 (não preenchida)	0,54	0,65	4,39	3,42
5 (não preenchida)	0,62	0,77	5,31	3,93
6 (preenchida)	0,765	0,93	5,37	4,41
7 (preenchida)	0,64	0,82	6,37	4,32
8 (preenchida)	0,54	0,67	4,58	3,35
9 (preenchida)	0,63	0,8	5,09	4,15
10 (preenchida)	0,75	0,97	6,37	5,18
Média	**0,65**	**0,81**	**5,39**	**4,10**
Desvio Padrão	0,08	0,10	0,70	0,51
Desvio Padrão (% da média)	**12,96**	**13,10**	**13,12**	**12,56**

Fonte: Benini, Rossi e Silva (2019).

Para Diehl (2023), fatores como vc, ap e Vf também podem afetar as condições de acabamento da superfície da peça usinada causando deformações, trincas, aquecimentos, vibrações e até mesmo em alguns casos reações químicas.

2.6 Projeto e análise de experimentos

Segundo Garcia (2019), *Design of Experiments* (DOE) é uma ferramenta estatística que ajuda a estruturar uma série de testes. A abordagem é projetada para otimizar o planejamento, a execução, a análise de dados, reduzir os custos ao longo do tempo e recursos que possam efetivamente atingir os objetivos originalmente formulados. Para um bom DOE, os envolvidos devem ter uma compreensão clara do objetivo do experimento, determinar exatamente quais fatores devem ser estudados, como deve ser feito e pelo menos entender como analisar os dados.

O planejamento experimental visa verificar a relação entre os parâmetros do processo e suas correspondentes variáveis de resposta, identificando assim os parâmetros-chave que contribuem significativamente para a função de resposta.

Nesse contexto, o método de planejamento experimental DOE é um método viável, que não apenas fornece uma grande quantidade de informações com o menor número de tentativas, mas também estabelece a relação funcional entre as variáveis de entrada e saída.

Dessa forma, o DOE permite avaliar a relevância e a significância estatística dos efeitos e das interações dos fatores em estudo, possibilitando estabelecer condições ótimas, com a finalidade de alcançar uma melhor resposta (Ferreira *et al.,* 2007). Na Figura 20 descreve passos para desenvolver este planejamento.

Figura 20 – Passos para desenvolver um planejamento experimental adequado

Regras gerais
1) Estabelecer o problema e o objetivo de estudo.
2) Escolher os fatores (variáveis de entrada que se tem controle).
3) Escolher as variáveis de saída (resposta que se tem interesse).
4) Determinar a região de operação (faixa de valores para cada fator em que o sistema pode operar).
5) Especificar a região de interesse (uma sub-região do campo operacional dentro do qual é possível realizar o experimento).
6) Escolher o modelo estatístico (ANOVA, regressão, correlação espacial).
7) Selecionar o critério para escolher o DOE (por exemplo: variância mínima).
8) Escolher um projeto experimental apropriado (*Latin square - quadrado* latino, fatorial, composição central).
9) Selecionar os níveis dos fatores para cada teste.
10) Realizar os testes e coletar os dados.
11) Analisar os dados e verificar a adequação do modelo estatístico.
12) Conclusões e recomendações.

Fonte: Almeida (2007).

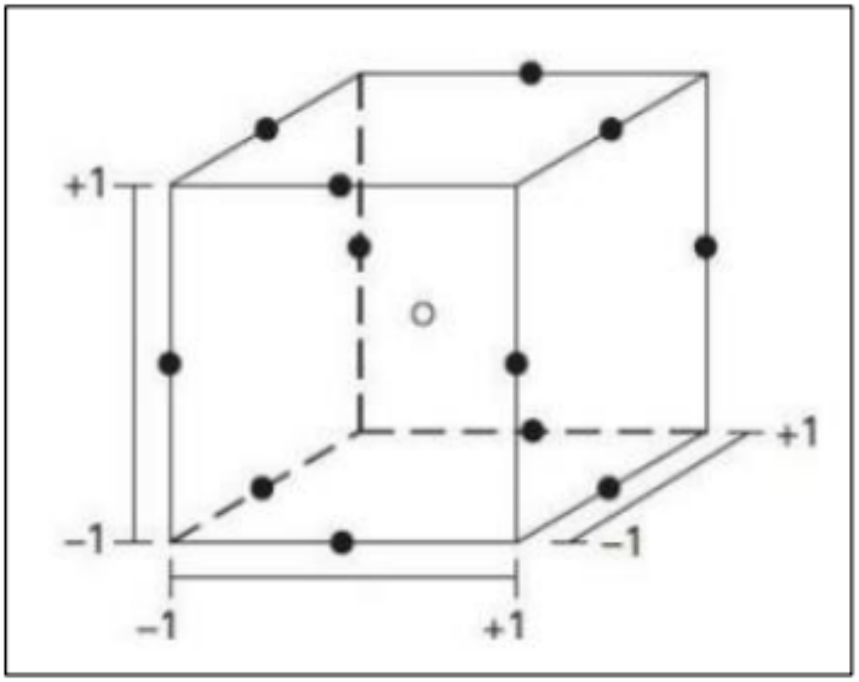
2.6.1 *Box-Behnken Design* (BBD)

Entre 1958 e 1960, George E. P. Box e Donald Behnken desenvolveram o projeto experimental *Box-Behnken Design* (BBD). O BBD pertence a uma classe de projetos de segunda ordem baseados em modelos fatoriais incompletos de três níveis. Um planejamento de experimentos *Box-Behnken* encontra condições ótimas

para os parâmetros em estudo, usando métodos estatísticos para avaliar a influência de fatores relevantes no processo. Um dos métodos matemáticos mais comumente usados para projetar experimentos de processamento é a metodologia de superfície de resposta, que permite encontrar os níveis ideais de cada fator em sua análise. (Feix, 2019).

Segundo Garcia (2019), o modelo de design BBD representa um design fatorial com três níveis de fator de segunda ordem incompletos, relacionando uma superfície de resposta a um gráfico de contorno. Em comparação com outros métodos de projeto experimental, o BBD pode analisar dados de forma confiável e requer apenas um pequeno número de experimentos, conforme mostrado na Figura 21, uma modelagem esquemática de um projeto experimental BBD usando três fatores.

Figura 21 – Projeto experimental de BBD para três fatores



Fonte: Möschbörcher (2023).

Conforme Garcia (2019), o projeto experimental (BBD) envolve as seguintes etapas:

1. Estabelecimento do problema (definição dos objetivos);
2. Formular uma hipótese;

3. Desenho experimental (variável de resposta (Y), fatores controláveis (X), número; níveis de cada fator, restrições experimentais, modelos estatísticos, etc.);

4. Execução do experimento;

5. Análise dos resultados (gráficos, tabelas e análise de significância);

6. Otimização de processos.

Para Feix (2019), no BBD, cada fator é avaliado em três níveis, cada um com o objetivo de identificar as interferências deste sobre a variável de resposta do processo com vista a otimizá-lo, sendo eles: baixo (-1), centro (0) e altura (+1), em cada nível esses fatores são representados por um plano. Uma grande vantagem de usar um design experimental BBD é que não há necessidade de combinar os níveis mínimo e máximo de todos os fatores em um experimento, o que evita condições extremas que podem levar a resultados abaixo do ideal. Perveen e Jahan (2018) apontam a Equação 3 como possibilidade para analisar a variável de entrada.

$$N = 2k \cdot (k - 1) + C_0 \quad (3)$$

sendo:

N = Números de experimentos;

k = Número de fatores;

C_0= Número de repetições do ensaio no ponto central.

Segundo Garcia (2019), o método pode ser utilizado em funções como otimização, análise da contribuição individual de cada fator na variável de resposta, interações entre fatores e efeitos quadráticos na relação entre parâmetros e variáveis de saída. Para fazer isso, executa - se uma análise de variância (ANOVA) usando uma tabela de coeficientes de regressão e probabilidades de significância (valores-p). Os valores P indicam a significância estatística de cada fator de entrada (X), considerando fatores com valores especificados abaixo do nível de significância especificado são considerados significativos.

Conforme Ferreira *et al.* (2007), BBD é recomendado para o aprimoramento em processos de fabricação, pois necessita de um número reduzido de combinações de fatores, reduzindo o tempo e os recursos necessários para a aplicação. Assim, esta situação acaba por reduzir os custos de pesquisa.

2.6.2 Análise de variância (ANOVA)

Segundo Han (2015), para detectar quaisquer alterações no desempenho médio dos experimentos, analisar dados e tomar decisões importantes, utiliza-se a análise de variância, que é um bom método estatístico. Pontes (2011), para determinar fatores importantes e combinações ideais de fatores, a ferramenta ANOVA é satisfatória pois fornece uma medida de confiança, determinando e analisando a variação nos dados.

De acordo com Feix (2019), a ANOVA é amplamente utilizada para testar hipóteses com diversas áreas de aplicação, incluindo a engenharia. Ela constitui um modelo estatístico que verifica se as médias de três ou mais grupos diferem. Se os pressupostos de normalidade e homogeneidade não forem cumpridos, as conclusões da análise serão imprecisas e aproximadas. A atividade pode não ser satisfatória em alguns casos esporádicos (Möschbörcher,2023). A Equação 4 para essa construção é descrita abaixo:

$$Yij = \mu + \tau j + \varepsilon ij \tag{4}$$

Sendo:

μ = Média geral

τj = Efeito do grupo

εij = Erro aleatório

Num teste ANOVA, assumindo que há uma mudança na média amostral, o resultado é a hipótese nula (H0), a mudança observada na média amostral. Quando a hipótese não é vazia (H1), ela é entendida como determinante. A estatística F é estabelecida como a relação entre as médias amostrais, que pode ser determinada pela equação. Quando o resultado de FF>1 rejeita H0, quando $FF \simeq 1$ H0, não deve rejeitar (Carpinetti, 2012). Assim se apresenta a Equação 5:

$$F = \frac{\text{variância entre grupos}}{\text{variância dentro do grupo}} \tag{5}$$

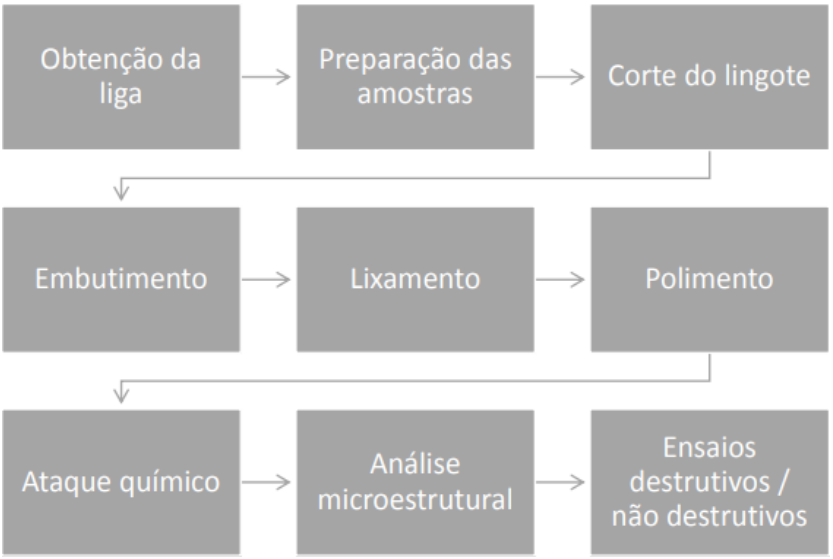
2.7 Ensaios metalográficos

Segundo Bogado (2014), os ensaios metalográficos envolvem a preparação

de uma superfície polida plana, atacando-a adequadamente com os reagentes apropriados, observando e interpretando a estrutura e obtendo uma documentação para reproduzir os resultados obtidos durante a inspeção. A estrutura dos metais pode ser compreendida em três níveis: estrutura cristalina, microestrutura e macroestrutura. A metalografia tradicional estuda os metais nos níveis microestrutural e macroestrutural, enquanto a metalografia moderna estuda os metais nos níveis cristalina e sub - microscópica.

Para Rohde (2010), durante o corte, deve-se ter cautela para não modificar a estrutura da peça. Precisa ter cuidado para que o corte não seja contínuo e para que não ocorra superaquecimento acima de 100 ºC por falta de sagacidade do líquido refrigerante. Rebarbas nas extremidades cortadas devem ser evitadas para não interferir no embutimento, portanto, é necessário atentar para o uso do disco certo, dependendo do material a ser cortado. A construção a seguir (Figura 22) apresenta um fluxograma com as etapas a serem seguidas nos ensaios metalográficos.

Figura 22 – Fluxograma etapas realizadas para ensaios metalográficos

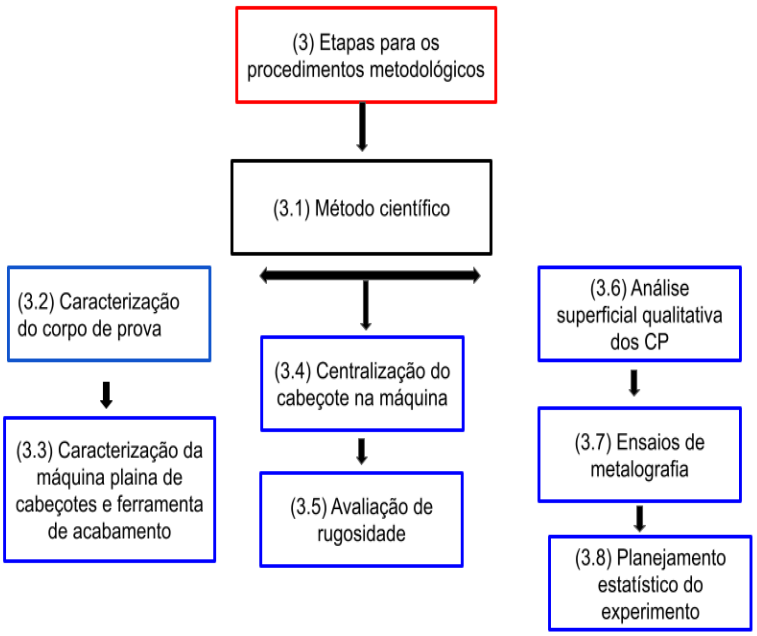


Fonte: Bogado (2014).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo contempla os procedimentos metodológicos da presente pesquisa. Tais procedimentos embasam as análises realizadas no processo de usinagem de acabamento superficial do cabeçote de alumínio. As etapas do percurso da pesquisa estão estruturadas na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.1 Método científico

A presente pesquisa se caracteriza como quantitativa, de cunho exploratório e

descritivo, constituindo um processo de natureza aplicada. Para Fonseca (2002), a pesquisa quantitativa se centra na objetividade e recorre a linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre as variáveis, enfatizando o raciocínio dedutivo, as regras da lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana.

Malhotra (2006) explica que esse tipo de pesquisa se foca em análises estatísticas, onde o pesquisador se detém a identificar um problema e entender a dimensão dele, buscando conclusões. O desenho da pesquisa é fechado, contemplando um raciocínio lógico e dedutivo, que esboça resultados embasados em variáveis e generalizações.

Em relação ao cunho exploratório, Gil (2008) destaca que este tipo de estudo permite ao pesquisador ampliar suas experiências acerca de determinado problema, pesquisar as dimensões do objeto de estudo, além de explorar possibilidades e por meio de suas percepções obter novas ideias, podendo assim, aprimorar os fenômenos estudados. No que diz respeito ao estudo descritivo, pode-se afirmar que ele permite observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos. Este estudo procura descobrir, com uma maior precisão, a frequência com que determinado fenômeno ocorre, sua natureza e características e a conexão e relação que estabelece com outros fenômenos (Gil, 2008).

Por sua vez, a pesquisa aplicada segundo Boaventura (2004) possibilita a resolução de problemas práticos e concretos, demandando aplicação prática do conhecimento produzido. Mediante as contribuições dos autores, é possível afirmar que a presente pesquisa quantitativa, de cunho exploratório e descritivo, define sua natureza como aplicada. Para a construção da análise foram realizados 15 processos de usinagem de acabamento da face de um cabeçote de alumínio, com diferentes Vf, RPM e ap . Além destes, para conclusão, foi realizado um processo adicional de usinagem visando a otimização, já que considera-se esta uma condição ideal para a usinagem de acabamento da face de cabeçotes de alumínio.

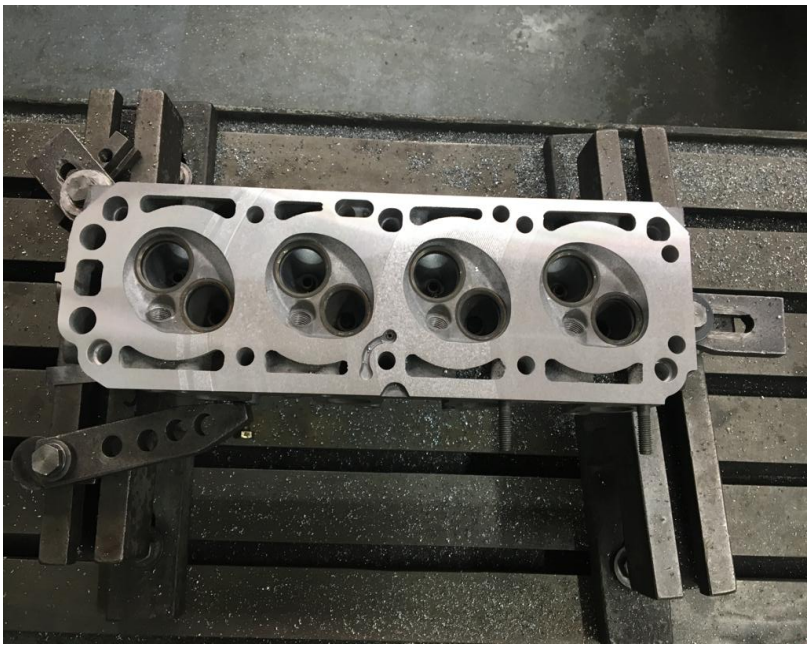
3.2 Caracterização do corpo de prova

Para a realização da presente trabalho, foi indicado um cabeçote de alumínio

de motor 1.0 8v flex, apresentado na Figura 24, que foi doado por uma retificadora de motores do Vale do Taquari -RS. A execução dos experimentos se deu mediante uso de 1 corpo de prova (CP), onde primeiramente foi feito um desbaste no CP com uma aresta de corte para plaina tipo quebra cavaco para usinar alumínio, contendo 45 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro conforme a Figura 25.

Os processos de usinagem do cabeçote foram realizados em uma Retificadora de Motores do Vale do Taquari-RS. Todas as ações de usinagem tiveram como base a norma para retifica de motores NBR 13032 (ABNT 1996) e a norma de usinagem NBR 6175 (ABNT 2015).

Figura 24 – Corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 25 – Ferramenta para plaina de material de alumínio

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

O relatório de análise da composição química do material, foi realizado por CQS laboratório de ensaio e calibração localizado na cidade de São Leopoldo RS, (Anexo A). A Figura 26 ilustra a máquina de Espectrômetro de emissão Óptica, fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro, que foi utilizada para verificar a composição química do corpo de prova, demonstrando que a liga do material é SAE 329. A análise foi realizada com base no método ASTM E1251, constituindo assim um corte no cabeçote, com as dimensões sugeridas de 15 mm de altura por 15mm de largura. A Figura 27 demonstra os resultados obtidos na composição química presente no material, sendo que os resultados evidenciados se aproximam, conforme a ASM 1988, da liga 328,1, como podem ser vistos na Figura 28 e (Anexo C).

Figura 26 – Máquina análise de espectrometria

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 27 – Composição química do (CP)

Elemento Químico *Chemical Elemen*	Valor Médio *Mean Value* (%)	Desvio padrão *Standard deviation* (%)
Elementos Químicos	Média(%)	Incerteza(%)
Alumínio (Al)	87,7	0,1156
Silício (Si)	6,77	0,0307
Ferro (Fe)	0,649	0,0116
Cobre (Cu)	3,3033	0,0232
Manganês (Mn)	0,3903	0,0043
Magnésio (Mg)	0,3590	0,0114
Zinco (Zn)	0,6020	0,0331
Cromo (Cr)	0,0155	0,0005
Níquel (Ni)	0,0381	0,0006
Titânio (Ti)	0,0323	0,0014
Berílio (Be)	0,0001	0,0003
Cálcio (Ca)	0,0013	0,0004
Lítio (Li)	0,0001	0,0003
Chumbo (Pb)	0,0372	0,0010
Estanho (Sn)	0,0117	0,0031

Elemento Químico *Chemical Elemen*	Valor Médio *Mean Value* (%)	Desvio padrão *Standard deviation* (%)
Elementos Químicos	Média(%)	Incerteza(%)
Estrôncio (Sr)	0,0051	0,0010
Vanádio (V)	0,0094	0,0011
Sódio (Na)	0,0001	0,0003
Bismuto (Bi)	0,0015	0,0003
Zircônio (Zr)	0,0005	0,0010
Boro (B)	0,0006	0,0006
Gálio (Ga)	0,0107	0,0005
Cádmio (Cd)	0,0009	0,0004
Cobalto (Co)	0,0010	0,0001
Prata (Ag)	0,0001	0,0003
Mercúrio (Hg)	0,0038	0,0005
Indio (In)	0,0010	0,0001
Antimônio (Sb)	0,0050	0,0001
Fósforo (P)	0,0020	0,0001

Fonte: Laboratório MQS (2023).

Figura 28 – Composição química de peças fundidas de alumínio e lingotes

Grade designation			Product[c]	Composition, wt%													
Aluminum Association[a]	UNS. No.	ISO[b]		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Unspecified other elements		Al, min[d]
														Each	Total	
						0.6		0.7								
324.2	A03242	. . .	Ingot	7.0-8.0	0.6	0.40-0.6	0.10	0.45-0.7	. . .	0.10	0.10	. . .	0.20	0.05	0.15	rem
328.0	A03280	. . .	S	7.5-8.5	1.0	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5	. . .	0.25	. . .	0.50	rem
328.1	A03281	. . .	Ingot	7.5-8.5	0.8	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5	. . .	0.25	. . .	0.50	rem
332.0	A03320	. . .	P	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.50	0.50-1.5	. . .	0.50	1.0	. . .	0.25	. . .	0.50	rem
332.1	A03321	. . .	Ingot	8.5-10.5	0.9	2.0-4.0	0.50	0.6-1.5	. . .	0.50	1.0	. . .	0.25	. . .	0.50	rem
332.2	A03322	. . .	Ingot	8.5-10.0	0.6	2.0-4.0	0.10	0.9-1.3	. . .	0.10	0.10	. . .	0.20	. . .	0.30	rem
333.0	A03330	. . .	P	8.0-10.0	1.0	3.0-4.0	0.50	0.05-0.50	. . .	0.50	1.0	. . .	0.25	. . .	0.50	rem
333.1	A03331	. . .	Ingot	8.0-10.0	0.8	3.0-4.0	0.50	0.10-0.50	. . .	0.50	1.0	. . .	0.25	. . .	0.50	rem

Fonte: Remafe (2022).

3.3 Caracterização da máquina plaina de cabeçote e ferramenta de acabamento

O CP analisado passou pela ação de plaina, compreendendo nessa etapa o uso de ferramentas que fazem o corte em singularização, com a finalidade de garantir o processamento da superfície do cabeçote. Na sequência, foi realizado o acabamento superficial da face aplainada. A Figura 29 apresenta o suporte de ferramenta onde se coloca o inserto de diamante. Para finalizar a etapa de acabamento do CP, o inserto diamantado PCD (diamante policristalino), exposto na Figura 30, foi utilizado para dar o último acabamento na face do cabeçote, demonstrando que não houve quebra da ferramenta atestando assim sua planicidade e rugosidade com 16 diferentes processos, sendo um deles o processo de otimização.

Figura 29 – Suporte de ferramenta

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Figura 30 – Inserto de diamante

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

O cenário de funcionamento da máquina retificadora que foi utilizada nesse estudo, pode ser descrito como uma mesa móvel e um fuso com um rebolo que retifica o cabeçote até que fique suficientemente plano. Durante o processo de retificação, o rebolo é avançado sobre a superfície, removendo o material do cabeçote até que o empenamento desapareça.

A Figura 31 permite a visualização da máquina modelo Wasc 1000 plaina de cabeçote utilizada e o Quadro 2 ilustra especificações técnicas da mesma. Para a análise foi imprescindível considerar que os parâmetros de corte e vibrações afetam diretamente a eficiência da produção e qualidade de acabamento das peças usinadas, já que tais parâmetros estão relacionados ao conjunto da MFDP.

Figura 31 – Plaina de cabeçote

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Quadro 2 – Especificações técnicas máquina plaina de cabeçotes Wasc 1.000

ESPECIFICAÇÕES	
Superfície da mesa	400 x 1000 mm
Comprimento máximo para a usinagem	1000 mm
Largura máxima para para usinagem	350 mm
Altura máxima para usinagem	520 mm
Velocidade variável do cabeçote	100 - 1000 RPM
Velocidade variável da mesa	10 - 1000 mm/min
POTÊNCIA	
Motor do cabeçote retificador	5 cv
Moto - redutor de avanço de mesa	0,75 cv
Motor do avanço rápido do cabeçote	1 cv
DIMENSÕES	
Largura	2820 mm
Altura	1910 mm
Profundidade	1005 mm
Peso Aproximado	1050 Kg

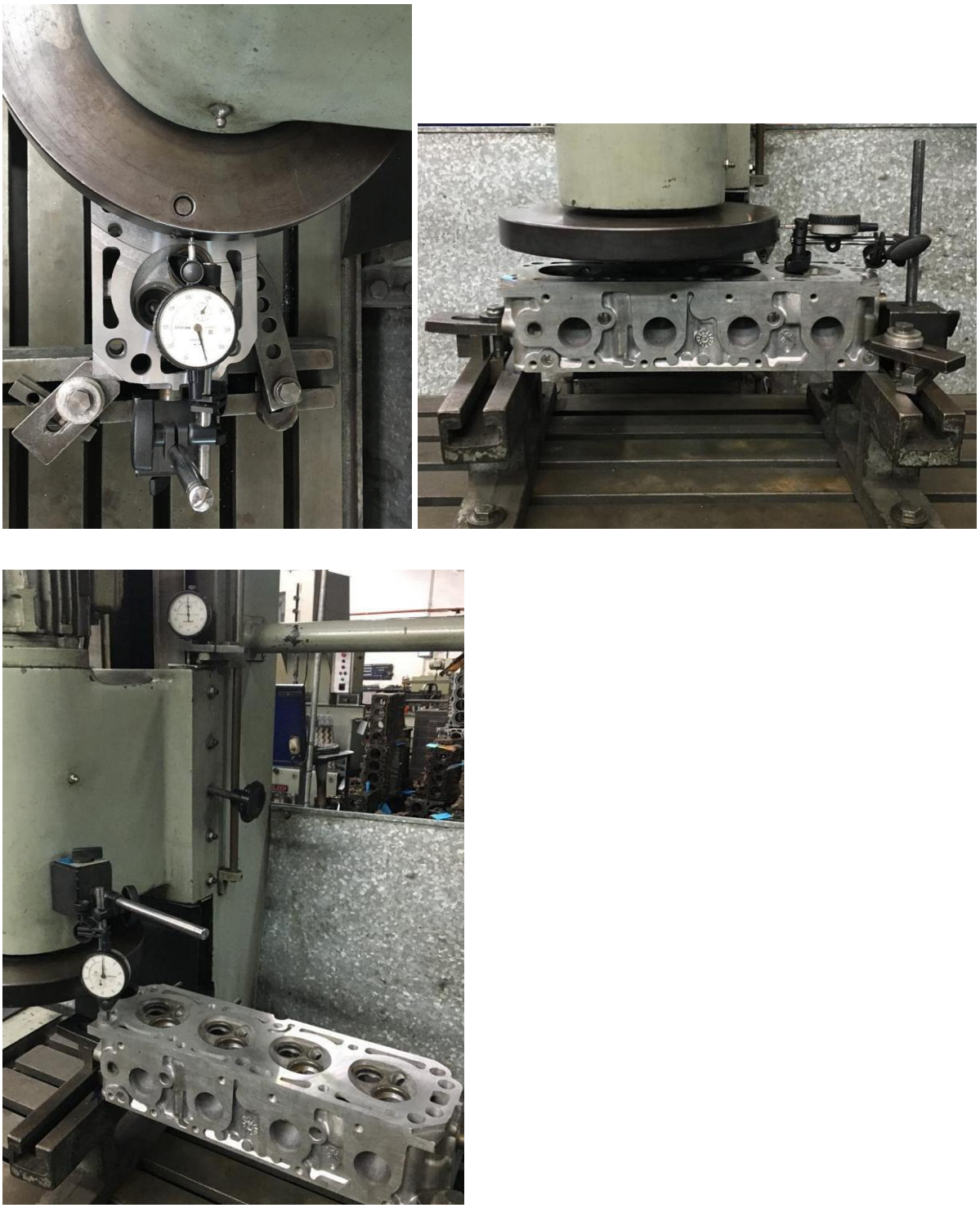
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.4 Centralização do cabeçote na máquina

Para fixação do CP na máquina, utilizou-se gabaritos que, por meio de encaixes, tornam a peça firme, centralizada e imobilizada, conforme mostra a Figura 32. Após essa fixação foi possível estabelecer a profundidade de corte retirada do CP, utilizando um relógio comparador Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e exatidão de ±13 µm. Essa medida está dentro da recomendação da norma NBR

6409 (ABNT 1997), que define valores abaixo de (40 µm). Antes de iniciar o processo foi verificado os parâmetros da máquina, além de testes de rotação, avanço e usinagem para observar o grupo MFDP (máquina, ferramenta, dispositivo de fixação e peça).

Figura 32 – Fixação e centralização (CP)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.5 Avaliação de rugosidade

A Figura 33, mostra o rugosímetro portátil Digimess TR 200. Ele foi utilizado para realizar os ensaios de rugosidade nas superfícies dos cabeçotes em análise. Os parâmetros de medição deste equipamento são Ra, Rz, Ry, Rq, Rp, Rsm, Rt, R3z, Rmax, Sk, S, Sm e Tp. Sua escala de medições é de 160 mm com raio de ponta de 2mm, é preciso de aproximadamente 10%, tendo repetibilidade de mais ou menos 6%. A avaliação de rugosidade foi analisada nos 16 processos, sendo um deles a otimização. Para esse estudo, considerou-se como parâmetros de medições, apenas Ra e Rz.

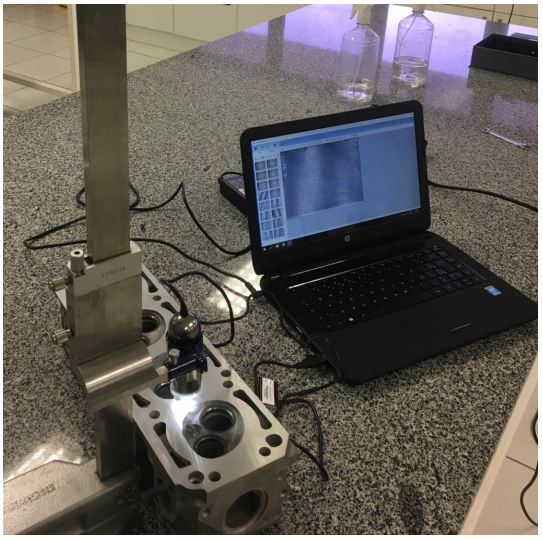
Figura 33 – Rugosímetro portátil Digimess TR-200

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.6 Análise superficial qualitativa dos CPs

Além dos gráficos de variação de rugosidade, estabelecidos pelo rugosímetro, foi possível realizar a análise superficial qualitativa do CP para verificação de sua integridade. Ela ocorreu por meio de imagens capturadas da superfície usinada, com o auxílio de um microscópio portátil Dino Lite de 5 MP, com aumento ajustável entre 30x e 100x. Para estabelecer uma melhor visualização nesse estudo, as imagens foram capturadas com uma ampliação de 50x. A Figura 34 demonstra o procedimento utilizado para realizar a captura das imagens na superfície usinada no CP.

Figura 34 – Captura das imagens do CP com microscópio

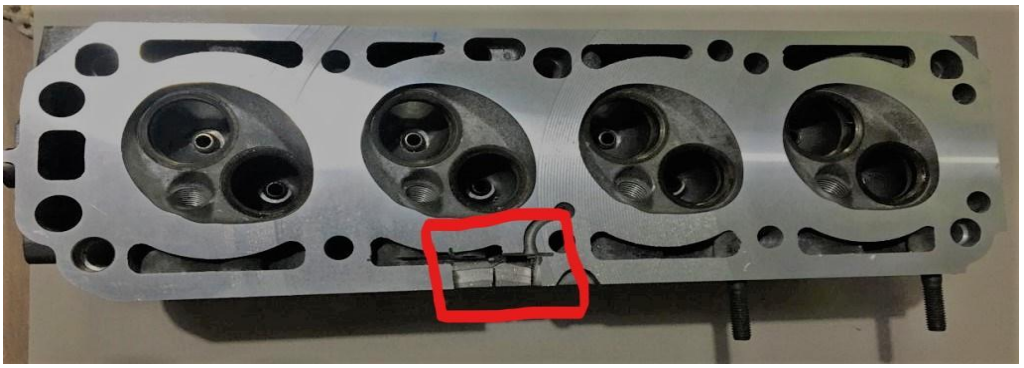


Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

3.7 Ensaios de Metalografia

As análises com microscopia óptica nos ensaios metalográficos, Cqs Laboratório De Ensaio e Calibração, (Anexo B). Todos os procedimentos foram conforme a norma ASTM E3 e ASTM E407[1]. Na Figura 35 é possível visualizar o local de retirada do corpo de prova e na Figura 36 a amostra retirada do CP para a análise de metalográfica.

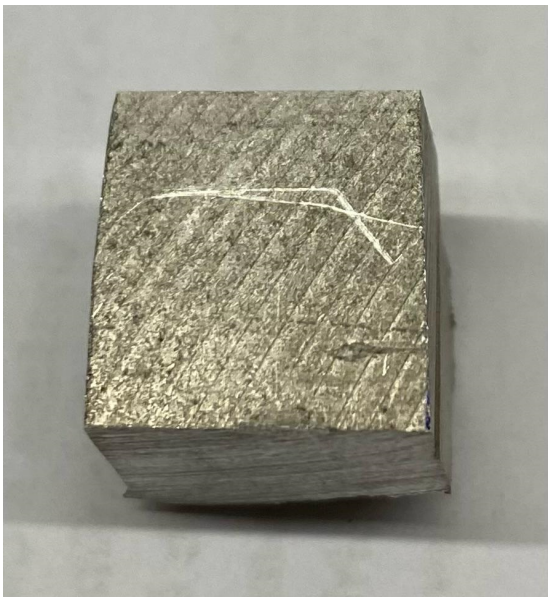
Figura 35 – Local de retirada do corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

[1] O tamanho retirado do CP foi de 15/15 mm conforme a norma ABNT NBR 13284.

Figura 36 – Amostra retirada do CP



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A amostra foi fotografada, observada e analisada com e sem ataque químico. A figura 37 evidencia o microscópio metalográfico Olympus, identificação CQS-MI-002, com uma câmera acoplada, que possibilitou a observação do aumento da peça em 100 e 400 vezes e realizou a captura das imagens.

Figura 37 – Microscópio metalográfico

Fonte: Leco empowering results (2023).

3.8 Planejamento estatístico do experimento

O planejamento do processo foi construído com base no método *Box-Behnken design* (BBD), no software Minitab®. Nele os parâmetros foram colocados em sequência para serem testados sobre a face usinada, conforme os resultados. Os intervalos dos parâmetros foram determinados de acordo com as recomendações do fabricante da máquina. Para dar andamento às análises, os valores da Tabela 1, foram substituídos pelas entradas de valores da Tabela 2, tendo como parâmetros:

- (A) RPM, Rotações por minuto;
- (B) Vf, Velocidade de Avanço da mesa;
- (C) ap, Profundidade de corte;

Tabela 1 – Parâmetros de cortes

Fatores (parâmetros independentes	**Notação**	**Unidade**	**Níveis dos Parâmetros**		
Níveis Codificados	**-**	**-**	**Baixo (-1)**	**Central (0)**	**Alto (+1)**
Rotações Por Minuto	RPM	**rpm**	100	300	500
Velocidade de Avanço da mesa	Vf	**mm/min**	10	20	30
Profundidade de corte	ap	**mm**	0,01	0,03	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Dando sequência ao processo, a Tabela 2 mostra a ordem de usinagem. Na qual é possível observar a combinação dos parâmetros de entrada RPM, Vf e ap. Tal sequência foi gerada pelo software Minitab®.

Tabela 2 – Sequência gerada pelo Minitab®

Sequências dos passes gerados	**A**	**B**	**C**
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no processo de acabamento da superfície usinada do cabeçote de alumínio. Os resultados obtidos serão com relação; (i) Análise da superfície usinada; (ii) Análise estatística da rugosidade Ra e Rz; (iii) Testes de validação dos parâmetros otimizados.

4.1 Análise da superfície usinada

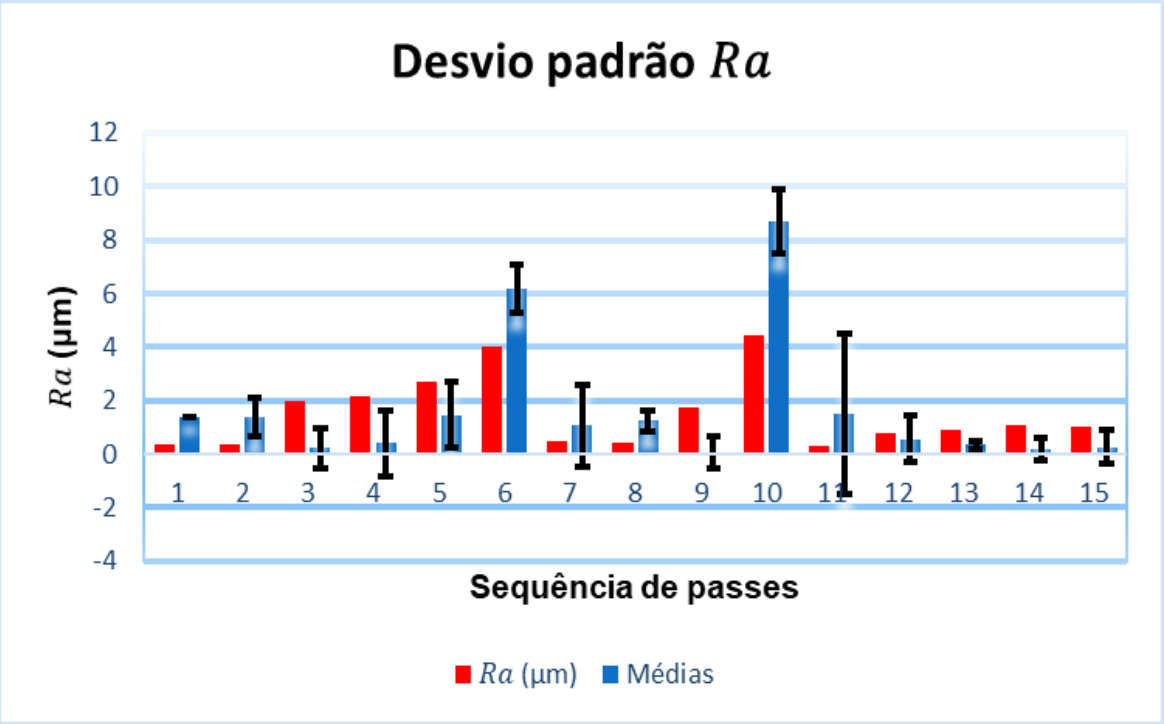
A análise da superfície usinada inicia na explanação do Quadro 3. Ele contém a sequência de passes da amostra, com os valores médios de rugosidade de Ra e Rz. Os dados coletados foram colocados em cada faixa de variável de resposta, representando a média aritmética de três medições feitas na superfície de cada processo de usinagem realizado. Importante destacar que para essa etapa, todas as medições foram feitas no centro da amostra (região estável do processo de usinagem). A análise foi produzida com base nos valores mínimo e máximo de (Ra e Rz). Para um melhor entendimento, apresenta-se logo abaixo do Quadro 3, o Gráfico 1 que contempla o desvio padrão de Ra e o Gráfico 2 que integra o desvio padrão de Rz.

Quadro 3 – Valores médios das rugosidades de Ra e Rz

Sequência de passes (amostra)	**RPM (rpm)**	**Vf (mm/min)**	**ap (mm)**	**Média Ra (µm)**	**Média Rz (µm)**
1	300 rpm	10 mm/min	0,01 mm	0,337 µm	2,019 µm
2	300 rpm	10 mm/min	0,05 mm	0,335 µm	2,035 µm
3	300 rpm	30 mm/min	0,01 mm	1,992 µm	7,864 µm
4	300 rpm	30 mm/min	0,05 mm	2,150 µm	8,243 µm
5	100 rpm	20 mm/min	0,01 mm	2,723 µm	11,270 µm
6	100 rpm	20 mm/min	0,05 mm	3,998 µm	15,147 µm
7	500 rpm	20 mm/min	0,01 mm	0,485 µm	2,668 µm
8	500 rpm	20 mm/min	0,05 mm	0,401 µm	2,374 µm
9	100 rpm	10 mm/min	0,03 mm	1,772 µm	7,074 µm
10	100 rpm	30 mm/min	0,03 mm	4,460 µm	15,023 µm
11	500 rpm	10 mm/min	0,03 mm	0,283 µm	1,837 µm
12	500 rpm	30 mm/min	0,03 mm	0,764 µm	3,560 µm
13	300 rpm	20 mm/min	0,03 mm	0,927 µm	4,468 µm
14	300 rpm	20 mm/min	0,03 mm	1,072 µm	4,945 µm
15	300 rpm	20 mm/min	0,03 mm	0,996 µm	4,799 µm

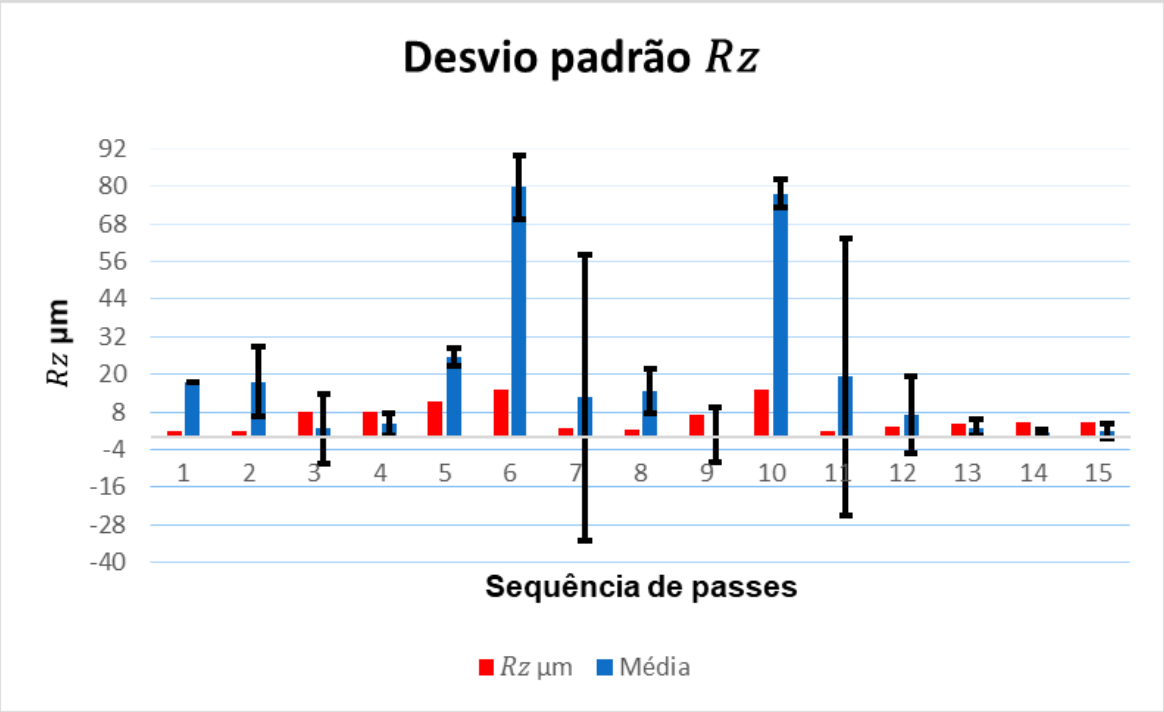
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Gráfico 1 – Desvio padrão de Ra (µm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

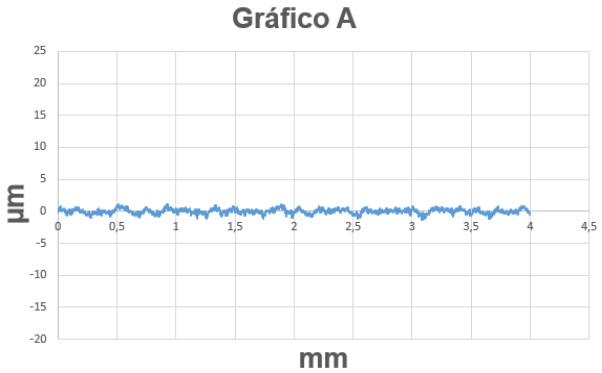
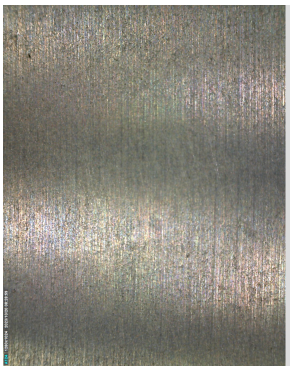
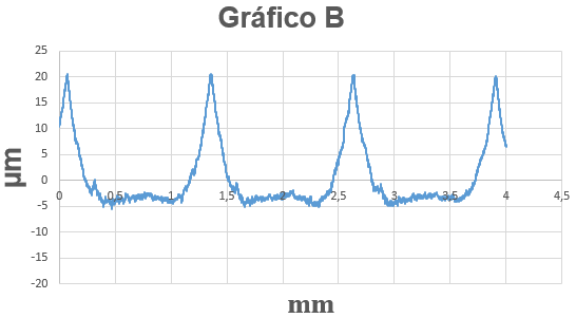
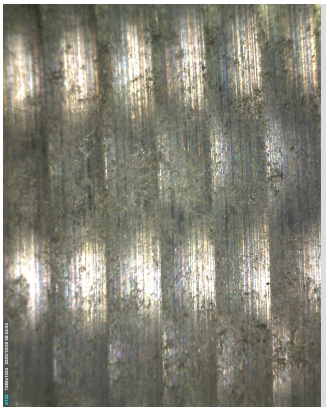
Gráfico 2– Desvio padrão de Rz (µm)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na sequência do processo de análise da superfície usinada, por meio da Figura 38 (A), ilustra-se a imagem relacionadas ao CP passe 11, onde foi obtido o menor valor de Ra e Rz, através dos parâmetros de entrada (RPM= 500 rpm, Vf= 10 mm/min, ap= 0,03 mm). A imagem foi ampliada 50 vezes pelo microscópio. A Figura 38 gráfico A, complementa a explanação da análise, apresentando o resultado de rugosidade, que foi obtido durante a medição produzida pelo rugosímetro portátil Digimess TR-200, com a média Ra 0,283 µm e Rz 1,837 µm. Nesse processo constitui-se a média de três medições de rugosidade para cada sequência de passes da amostra. Dessa forma, pelos resultados do gráfico A, é possível perceber nas etapas de medição, uma baixa amplitude de rugosidade com relação a linha de base.

Figura 38 – Comparação entre perfis de rugosidade, superfície usinada do CP nos maiores e menores níveis de Ra e Rz entre as 15 Amostras

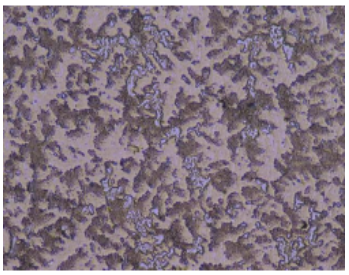
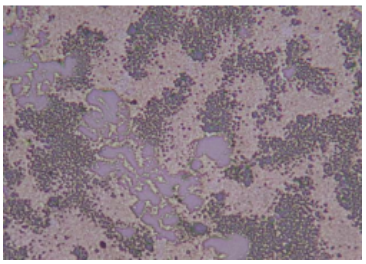
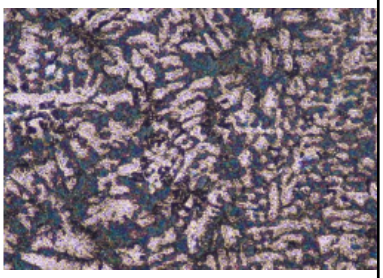
Perfil rugosidade (A)	Superfície aplainada (A)
	
Perfil de rugosidade (B)	Superfície aplainada (B)
	

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Ainda na Figura 38, a superfície aplainada (B) ilustra a imagem relacionada ao CP passe 10, que obteve o maior valor de rugosidade Ra, através dos parâmetros de entrada (RPM= 100 rpm, Vf= 30 mm/min, ap= 0,03 mm). Esta imagem também foi ampliada 50 vezes pelo microscópio. Por sua vez, o gráfico B, da figura 38, apresenta o resultado de rugosidade, que foi obtido durante a medição realizada pelo rugosímetro portátil Digimess TR-200 com a média Ra 4,460 µm e Rz 15,023 µm. O processo supracitado contou com a média de três medições de rugosidade para cada sequência de passes da amostra. Em sua explanação, pode-se contemplar uma variação expressiva nas etapas de medição, com relação a linha de base. A sequência de passes que teve maior nível de rugosidade Rz = 15,147 µm, pode ser conferida no Quadro 3 na amostra de número 6, tendo como parâmetros de entrada RPM= 100 rpm, Vf = 20mm/min, ap= 0,05 mm.

A Figura 39 apresenta a microestrutura do material, resultante do ensaio metalográfico no CP. Através da análise da composição química do material, realizada em laboratório de ensaios e calibração, identificou-se a liga do material como sendo SAE 329. A partir disso, o ensaio metalográfico ocorreu com ataque e sem ataque químico na amostra.

Figura 39 – Ensaio metalográfico do corpo de prova

Microestrutura do material		
100x	400x	100x atacada
		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A primeira imagem contém uma ampliação de 100 vezes no microscópio, sem ataque químico. A segunda imagem constitui uma ampliação de 400 vezes no microscópio, sem ataque químico e a terceira imagem contempla uma ampliação de 100 vezes no microscópio, com ataque químico. Através das imagens, o laboratório identificou uma matriz eutética de alumínio e silício. No entanto, a análise não possibilitou a identificação do tamanho do grão, já que a microestrutura se apresentou dendrítica.

4.2 Análise estática da rugosidade Ra e Rz

Mediante a finalização da análise de rugosidade do corpo de prova, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), conforme mostrado na Figura 40. A análise de variância possibilitou uma compreensão detalhada do impacto (% de contribuição) de cada variável independente (RPM, Vf e ap) nas variáveisl dependente (Ra e Rz), do processo de usinagem, sob suas determinadas condições. Em todas as análises foi considerado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa (α) menores de 5%, a variável em questão foi considerada significativa sobre a resposta.

A Figura 40 demonstra que o parâmetro que teve maior significância de rugosidade em Ra e Rz foi o RPM, tendo como percentual de contribuição (Pcon%) de Ra de 60,81% e Rz de 63,42%, além de estabelecer um valor médio (valor p ≤ 0,05). Somado a isso, o avanço de mesa constituiu resultados significativos, (p-valor ≤ 0,05) com percentuais de contribuição (Pcon%) de 22,07% para Ra e 20,64% para Rz

Nessa conjuntura, é possível perceber, pelos resultados da ANOVA, que no estudo, RPM e Vf foram determinantes, para resultar em menor rugosidade em Ra e Rz. Esta conclusão pode fundamentar a tese de que a interação de RPM e Vf possibilitam um melhor resultado de acabamento do conjunto MFDP (máquina, ferramenta, dispositivo de fixação e peça), gerando assim um processo com menores vibrações, o que contribui para a produção de uma peça usinada com a superfície menos rugosa. Em complemento a eficácia da análise do projeto BBD, os

coeficientes de determinação R² e R² ajustado, demonstraram resultados satisfatórios, tanto para Ra e Rz, apresentando valores superiores a 95,27%. Montgomery (2013), destaca o modelo estatístico como adequado tendo um coeficiente de determinação R² acima de 70%.

Figura 40 – Variância (ANOVA) para rugosidade Ra e Rz

	Ra					*Rz*				
Fator	*SS*	*DF*	*MS*	*Valor-P*	*PCon(%)*	*SS*	*DF*	*MS*	*Valor-P*	*Pcon(%)*
ap	0,226	1	0,226	0,067	0,00%	1,978	1	1,978	0,212	0,69%
Vf	5,509	1	5,509	0,000	22,07%	58,99	1	58,99	0,001	20,64%
RPM	15,18	1	15,18	0,000	60,81%	181,2	1	181,2	0,000	63,42%
ap^2	0,076	1	0,076	0,0235	0,30%	1,546	1	1,546	0,262	0,54%
vf^2	0,014	1	0,014	0,587	0,05%	0,437	1	0,437	0,531	0,15%
RPM^2	2,131	1	2,131	0,001	8,53%	22,71	1	22,71	0,005	7,94%
$ap \times vf$	0,006	1	0,006	0,711	0,02%	0,033	1	0,033	0,861	0,01%
$ap \times RPM$	0,461	1	0,461	0,021	1,84%	4,349	1	4,349	0,087	1,52%
$vf \times RPM$	1,217	1	1,217	0,003	4,87%	9,691	1	9,691	0,025	3,39%
Erro	0,208	5	0,0417		0,83%	4,830	5	0,966		1,69%
Total	24,96	14			100%	285,7	14			100%
	R^2 = 99,16%		R^2_{Ajust} = 97,66%			R^2 = 98,31%		R^2_{ajust} = 95,27%		

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

As equações de regressão para previsão de rugosidade obtidas com o software Minitab® (versão de teste gratuita), podem ser visualizadas abaixo, nas Equações 6 e 7.

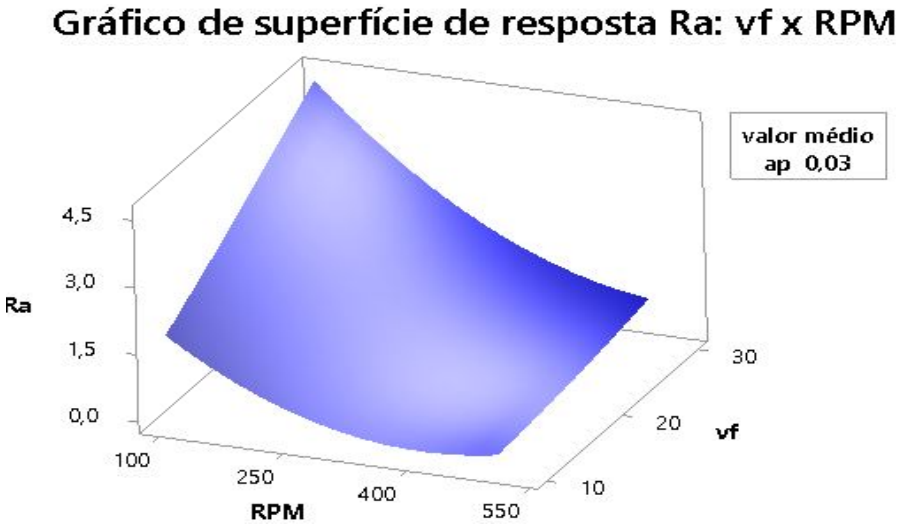
Ra = 1,132 + 8,4 ap + 0,1351 Vf - 0,01022 RPM + 359 ap * ap+ 0,00062 Vf * Vf + 0,000019 RPM * RPM + 0,200 ap* Vf - 0,0849 ap* RPM - 0,000276 Vf * RPM (6)

Rz = 4,62 - 3,1 ap + 0,629 Vf - 0,03762 RPM + 1618 ap* ap- 0,00344 Vf * Vf + 0,000062 RPM * RPM + 0,45 ap* Vf - 0,261 ap* RPM - 0,000778 Vf * RPM (7)

A combinação ótima dos parâmetros foi observada na interação entre Vf e RPM, mostrando-se significativa tanto para Ra quanto para Rz. Os resultados de Ra

(µm) podem ser conferidos no Gráfico 3, onde o menor valor de rugosidade é percebido quando tiver a combinação de maior RPM e menor Vf.

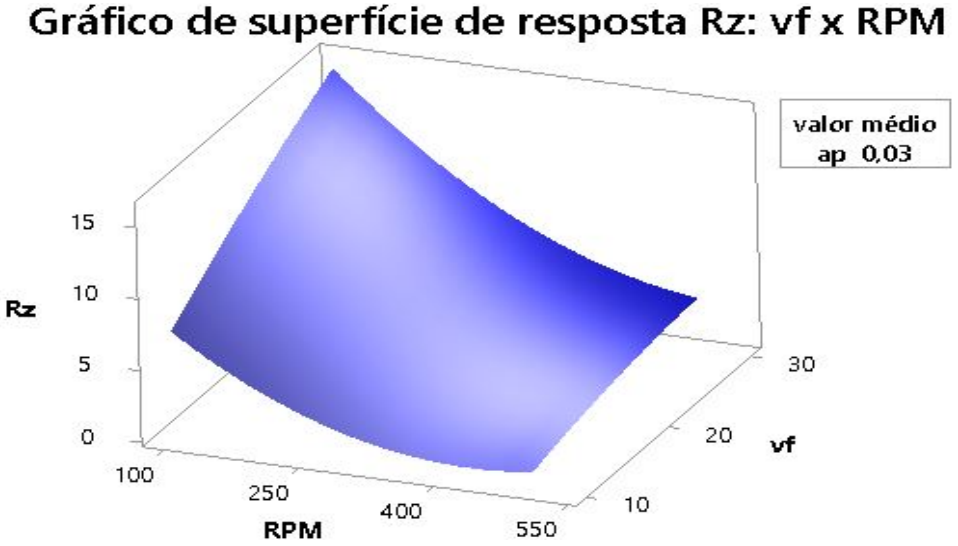
Gráfico 3 – Gráfico de superfície de resposta Ra (µm): Vf x RPM



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados de Rz (µm) podem ser visualizados no Gráfico 4, apresentado na sequência. A análise gerou a mesma combinação, dado que quando constituiu-se a maior RPM e menor Vf, obteve-se o menor valor de rugosidade para Rz (µm).

Gráfico 4 – Gráfico de superfície de resposta Rz (µm): Vf x RPM



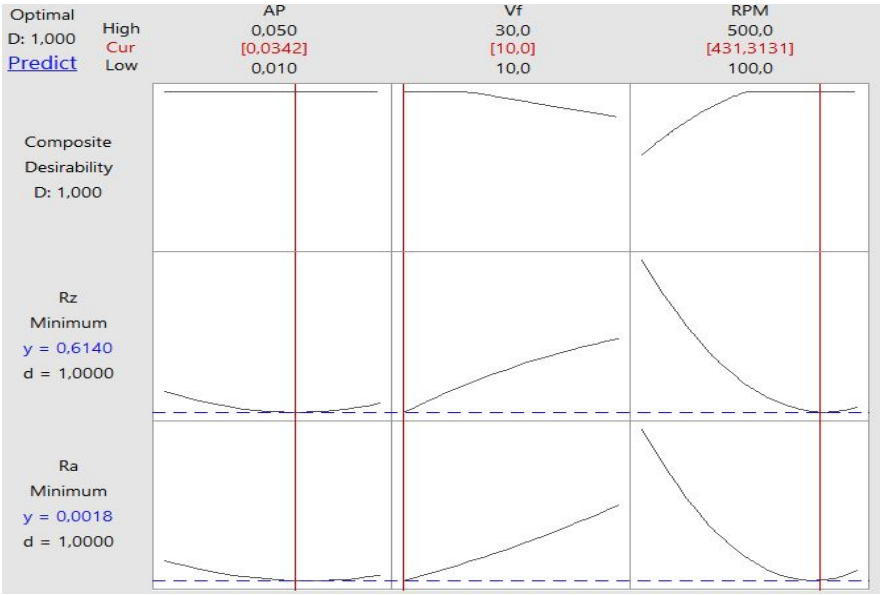
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Assim, é possível concluir que em ambos, considerando um ap médio de 0,03 mm, pode-se perceber que os fatores de Vf *vs* RPM, tanto em Ra como Rz, encontraram menores níveis de rugosidade na peça, quando estabeleceram maior RPM e menor Vf.

4.3 Testes de validação dos parâmetros otimizados.

Através do software Minitab® (versão gratuita), calculou-se a função de desejabilidade ("Individual Desirability"d). Para o cálculo é importante considerar em relação a Resposta (d), que quanto mais próxima da meta ideal, mais próxima do valor de um (1) ela estará. O software calcula cada resposta e então combina a "desejabilidade" para formar uma desejabilidade composta (D). Com a ajuda do cálculo, a combinação ótima de ajustes ótimos dos fatores controláveis (X), é gerada através de algoritmos. Assim, neste estudo, cada resposta (Y) dentro da faixa de parâmetros estabelecida foi minimizada, tal como pode ser visualizado na figura 41, que demonstra os parâmetros de otimização para menores níveis de rugosidade em Ra e Rz.

Figura 41 – Parâmetros de otimização multivariada



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Nas condições do processo D = 1, tendo uma combinação de parâmetros de RPM = 431 RPM, Vf = 10 mm/min e ap= 0,03 mm, foi possível encontrar a combinação ótima. Dessa forma, a melhor combinação de fatores controláveis X do conjunto de otimização multivariável de variáveis de resposta Y é encontrada. Tendo uma rugosidade Ra=0,0018µm Rz=0,6140µm, porém devido ao MFDP esses valores de rugosidade não se confirmaram. As combinações tiveram o fator RPM nível alto (+1), Vf nível baixo (-1) e ap central (0).

Para o passe de otimização foi aplicado o mesmo método utilizado para medir a rugosidade dos passes anteriores. No CP foram efetuadas três medições, verificando média para gerar os valores de Ra e Rz, tendo como base a média das três medições, o valor de rugosidade do acabamento superficial CP, Ra=0,266 µm, Rz=1,741 µm, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados e média das três medições de rugosidade Ra e Rz, no passe de otimização

Rugosidade Ra (µm)	**Rugosidade Rz (µm)**
0,270 µm	1,740µm
0,261µm	1,776µm
0,267µm	1,708µm
Média Ra = 0,266 µm	Média Rz = 1,741 µm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

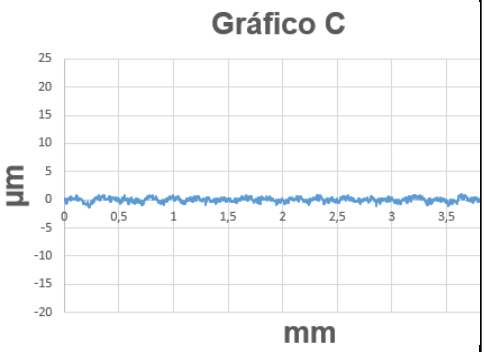
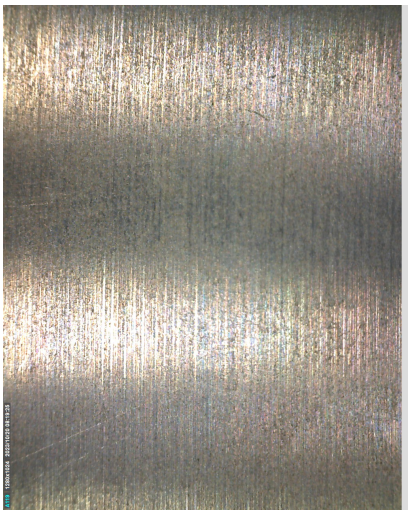
O Quadro 5 expõe os parâmetros de finalização deste estudo. Nesta etapa foi constituída a análise de otimização da superfície usinada. Nela obteve-se a combinação ótima, que evidenciou o menor valor de Ra, através dos parâmetros de entrada (RPM = 431 rpm, Vf = 10 mm/min, ap= 0,03 mm). Tal resultado está constituído na Figura 42 (C).

Quadro 5 – Combinação ótima dos parâmetros de entrada obtidos na otimização do processo de usinagem do cabeçote de alumínio

Sequência de passes (Amostra)	RPM (rpm)	Vf (mm/min)	ap(mm)	Ra (µm)	Rz (µm)
16	431 rpm	10 mm/min	0,03 mm	0,266 µm	1,741 µm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 42 – Perfis de rugosidade de otimização da superfície usinada no CP

Perfil rugosidade (C)	Superfície aplainada (C)
	

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A superfície aplainada (C) apresenta a imagem do CP com uma ampliação de 50 vezes pelo microscópio. O gráfico C (Figura 42), complementa a explanação da análise de otimização, elucidando a rugosidade que foi obtida durante a medição produzida pelo rugosímetro portátil Digimess TR-200 com a média Ra 0,266 µm e Rz 1,741 µm. Nesse processo, verificou-se a média de três medições de rugosidade para cada sequência de passes da amostra. Dessa forma, pelos resultados do gráfico C (Figura 42), é possível perceber nas etapas de medição uma baixa variação de rugosidade com relação a linha de base. Através destes resultados,

justifica-se a implantação desta combinação ótima de acabamento superficial na face do CP.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, através do projeto de experimentos BBD, foi encontrar a combinação ótima dos parâmetros de entrada (RPM, Vf e ap), para obter um melhor acabamento superficial da face de um cabeçote de alumínio 1.0 8v flex. A partir disso, algumas conclusões podem ser descritas:

Através de BBD e ANOVA, pode-se destacar que a velocidade de corte (RPM) é a variável de entrada mais significativa para os valores médios de Ra e Rz, contribuindo com 60,81% para Ra e 63,42% para Rz. Além disso, a análise de variância (ANOVA) mostrou que o parâmetro Vf tem uma interação significativa neste processo, atuando consideravelmente para um melhor acabamento superficial da peça usinada, com uma contribuição de 22,07% para Ra e uma contribuição de 20,64% para Rz .

Ao considerar um ap médio de 0,03 mm, percebe-se que os fatores de Vf vs RPM, tanto em Ra como Rz, encontraram menores níveis de rugosidade na peça quando estabeleceram maior RPM e menor Vf. No entanto, é importante destacar que a combinação dos três parâmetros (RPM, Vf e ap) afetou significativamente na rugosidade da superfície usinada.

A combinação otimizada para o menor valor de rugosidade gerada pelo projeto de experimentos BBD apresentou RPM= 431 rpm, Vf = 10 mm/min e ap = 0,03 mm. Com essas combinações, tais parâmetros mostraram menor rugosidade que os outros 15 processos analisados, apresentando resultados de rugosidade em Ra = (0,267) µm e Rz = (1,741) µm.

O resultado esboçado certifica a importância do conhecimento estatístico para aplicações industriais, pois mostra que BBD e ANOVA são ferramentas muito úteis,

além de constituírem agilidade, permitindo otimização dos fatores com diferentes níveis de resposta tanto em usinagem como em outro campo aplicável. Além disso, futuros estudos acerca do tema, podem compreender a morfologia dos cavacos através do MEV, o que não foi possível incluir no presente trabalho, devido a demanda de tempo para sua conclusão.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Trabalhos futuros direcionados a otimização do processo de usinagem de acabamento da face de um cabeçote de alumínio, podem direcionar-se a:

Comparação da usinagem a seco com MQL (Mínima quantidade de Lubrificante);

Avaliação da influência de diversos raios de ponta do inserto no acabamento;

Avaliação da morfologia dos cavacos gerados, visando identificar vibração no processo e;

Avaliação do acabamento de cabeçotes soldados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 3 - 95**, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. United States. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 407**, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. United States. 2007.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B 46-1**: Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). United States. 2002.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B 46-1**: Surface texture (surface roughness, waviness, and lay). United States. 2002.

AMORIM, Daniella de M. B. **Trabalho em Oficina Mecânica**. 2021. Relatório de Estágio Supervisionado (Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, abr. 2021.

ASM Handbook. **Properties and selection:** Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10 ed, v.2. Metals Handbook. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 209:** Alumínio e suas ligas – Composição Química. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287:** Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6175:** Usinagem – Processos mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6409.** Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13032:** Execução de retífica de motores – Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284:** Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BECKER, Anderson. **Estudo do fresamento de cabeçotes de motor mistos de alumínio e aço com diferentes ferramentas de corte.** 2017. Monografia (Departamento Acadêmico de Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 27 out. 2017.

BENINI, Lucas; ROSSI; Guilherme, C. R.; SILVA, Charles. L. da. Interferência dos processos de manutenção da face de um cabeçote de motor automotivo em sua qualidade superficial. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. *5*, n.4, p. 367-378, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/8778>. Acesso em 02 abr. 2023.

BOAVENTURA, Edivaldo M. **Metodologia da Pesquisa:** monografia, dissertação, tese. São Paulo: Atlas, 2004.

BOGADO, Maximiliano S. B. **Avaliação da microestrutura, dureza e impacto de uma liga do sistema AL - CU.** 2014. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Marabá, PA, 2014.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2012.

CARPINETTI, Luiz C. R. **Gestão da qualidade:** Conceitos e técnicas. 2.ed. São Paulo:Editora Atlas, 2012.

CARVALHO, Derek M. L. **Análise de superfícies usinadas de materiais sinterizados autolubrificantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.

CASTRO, Fabio D. de.; RAHDE, Sérgio B. **Motores automotivos:** evolução, manutenção e tendências [recurso eletrônico]. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014. Disponível em: <https://editora.pucrs.br/livro/488/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CATAPAN, Márcio. F. Apostila de Desenho Mecânico 1 – Parte III. **Apostila de aula.** Disciplina: Expressão Gráfica. Agosto 2013 a dezembro de 2013, 42 f. 2013. Disponível em: <http://www.exatas.ufpr.br/portal/degraf_marcio/wp-content/uploads/sites/13/2014/10/Apostila-Desenho-Mecanico-1-III-Parte-Copy.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos:** planejamento, elaboração e apresentação. 4. ed. Lajeado, RS; Univates, 2020.

E-book. Disponível em: <https://www.univates.br/biblioteca>. Acesso em: 26 mai. 2023.

CUNHA, Rodrigo P. **Caracterização mecânica e metalográfica de uma liga de alumínio empregada para cabeçote de motor flex**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

DIOGENES, Anderson C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio.** 2011. Dissertação (Faculdade de Engenharia) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, SP, dez. 2011.

FARIA, Jéssica C. P. **Modelo para controle de custos em uma retífica.** Monografia (Graduação em Engenharia de Produção da Fundação de Ensino "Eurípides Soares da Rocha") – Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, Marília, 2015.

FEIX, Everton Cristiano. **Otimização do torneamento de acabamento a seco e com MQL nas ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 utilizando Box-Behnken 73 Design.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FERREIRA, Sérgio L. C. et al. Box-Behnken desing: An alternative for the optimization of analytical methods, **Analytica Chimica Acta**, v. 597, p. 179-186, 2007.

FONSECA, João J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

GARCIA, Rafael. **Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex dx 2205 e ldx 2101.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 15 fev. 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Hezry dos S. **Ensaio de Usinabilidade a seco da liga Inconel 718.** 2018. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS). Alegrete- RS, 2018.

GONÇALVES, Ricardo A. **Influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351.** Orientador Márcio Bacci da Silva. 2016. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, MG, 2016.

HAN, Henrique H. **Utilização da função desirability na otimização do processo de usinagem da superliga NIMONIC 80A.** 2015. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - SP, 2015.

HEINRICHS, Darlei. **Estudo da influência dos parâmetros de corte e utilização de fluido biodegradável pelo método MQF e a seco no torneamento da liga de alumínio 6351-T61.** 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, RS, 2021.

HK MÁQUINAS. **Máquina de plaina de cabeçote**. Hortolândia, SP, 2023. Disponível em:<https://www.hkmaquinas.com.br/>. Acesso em: 28 abril. 2023.

HOLMBERG, Kenneth. ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction, (S.I.), ***Springer Nature***, v. 5, n. 3, p.263-284, set. 2017.

JUNIOR, Jorge M. TORREZAN, Bruno E. CORRER, Ivan. DOE – Estudo de Caso em um Processo de Usinagem. **III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.** Ponta Grossa, PR, Brasil, 04 a 06 de dezembro de 2013.

MACHADO, Alisson. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MARCHIORI, Marcelo M. **Estudo de um sistema de medição a laser na análise da textura da superfície gerada por torneamento.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, Porto Alegre, RS, 28 mai. 2013.

MERCADO DA RETÍFICA. **Tabela de altura de cabeçote.** Balneário Camboriú, SC, 2020. Disponível em: <https://www.mercadodaretifica.com.br/tabela-de-altura-de-cabecote/>. Acesso em: 28 abr. 2023.

MÖSCHBÖRCHER, Roger. **Análise do acabamento no fresamento frontal de rasgos de chavetas no Aço 4140 utilizando o Projeto de experimento Box-Behnken Design.** 2023. Monografia (Engenharia Mecânica) ─ Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado-RS, jul. 2023.

NAZARI, Giorgio A. **Aplicação de ligas de alumínio em motores à combustão interna.** 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2017.

NICOLA, Gerson L. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço aisi h13 endurecido.** 2008. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 25 abr. 2008.

PADILHA, Angelo F. **O desenvolvimento de ligas de alumínio de ultra-alta resistência mecânica:** qual é o limite superior de resistência? São Paulo: EPUSP, 2020.

PAULA, Marcelo A. de. **Aspectos da usinagem a seco com ferramenta cerâmica experimental (Al2O3+MgO) no aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido.** Orientador Marcos Valério Ribeiro. 2021. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - SP, 2021.

PERVEEN, Asma; JAHAN, Muhammad. P. Modeling and optimization of crater size generated during micro- EDM of Ti alloy using Response surface method. **Materials Today: Proceedings**, v.5, p. 18307-18314, 2018.

PONTES, Fabrício J. **Projeto otimizado de redes neurais artificiais para predição da rugosidade em processos de usinagem com a utilização da metodologia de projeto de experimentos.** Orientador Messias Borges Silva. 2011. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá - SP, 2011.

RADI, Polyana; SANTOS; Lúcia, BONETTI; Luiz, AIROLDI; Vladimir. Tribologia, conceitos e aplicações. **Anais**. Anais do 13 encontro de Iniciação científica e pós-graduação do ITA. XIII ENCITA. 2007.

REMAFE, ferramentas especiais. **Catálogo de produtos.** Maringá-PR: Casa da Retífica, 2023.

RIOMAQ. **Especificações técnicas máquina plaina de cabeçotes.** Rio do Sul, SC, 2023. Disponível em:<https://www.riomaq.com.br/>. Acesso em: 28 abril. 2023.

ROHDE, Regis A. **Metalografia e preparação de amostras:** Uma abordagem prática. Santo Ângelo: LEMM, 2010.

ANEXOS

ANEXO A – Composição Química do Material

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

Rua Metalurgica Guidalli, n°. 85 - São Leopoldo/RS - (51) 3081-5600
cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br

Relatório de Ensaio de Análise Química - 5860/23

Chemical Analysis Test Report - 5860/23

Rede Metrologica RS
Laboratório reconhecido segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025
Certificado de Reconhecimento n°. 17403 Ensaios Metalográficos

OS: 11088

Cliente *Client* : Edu José Becker
Informações complementares *Additional information* : Rua Roberto Fridolino kolling , 275 - Lajeado - RS
Interessado *Interested* : - - - -

1 - INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE ***INFORMATION PROVIDED BY THE APPLICANT***

Identificação: Amostra 1

2 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES ***ADDITIONAL INFORMATION***

Método - Method: ASTM E1251 – Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry.
Condições Ambientais: Temperatura 23°C (±5°C) / Umidade relativa ≤70% *Ambient Conditions: Temperature 23°C (±5°C) / Relative humidity ≤70%.*
Local da Atividade: Instalações fixas do Laboratório "CQS Laboratório" *Place of Activity: Fixed installations of the Laboratory "CQS Laboratory".*

3 - RASTREABILIDADE METROLÓGICA ***METROLOGICAL TRACEABILITY***

Descrição *Description*	**Identificação** *Identification*	**Certificado** *Certified*	**Emitido** *Issued*	**Validade** *Validity*
Termohigrômetro - Thermohygrometer	TH-03	W20L8G21	Metrosul	out/23

Espectrômetro de Emissão Ótica, fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro, padrões de calibração - Optical Emission Spectrometer, manufacturer Oxford Instruments, Foundry Master Pro model, calibration standards SUS RA 10/27, RA 18/136, RA 19/98 fabricante Ulrich Nell, Alemanha.

4 - RESULTADOS ***RESULTS***

Elemento Químico *Chemical Elemen*	**Valor Médio** *Mean Value* **(%)**	**Desvio padrão** *Standard deviation* **(%)**
Elementos Químicos	Média(%)	Incerteza(%)
Alumínio (Al)	87,7	0,1156
Silício (Si)	6,77	0,0307
Ferro (Fe)	0,649	0,0116
Cobre (Cu)	3,3033	0,0232
Manganês (Mn)	0,3903	0,0043
Magnésio (Mg)	0,3590	0,0114
Zinco (Zn)	0,6020	0,0331
Cromo (Cr)	0,0155	0,0005
Niquel (Ni)	0,0381	0,0006
Titânio (Ti)	0,0323	0,0014
Berílio (Be)	0,0001	0,0003
Cálcio (Ca)	0,0013	0,0004
Lítio (Li)	0,0001	0,0003
Chumbo (Pb)	0,0372	0,0010
Estanho (Sn)	0,0117	0,0031

Elemento Químico *Chemical Elemen*	**Valor Médio** *Mean Value* **(%)**	**Desvio padrão** *Standard deviation* **(%)**
Elementos Químicos	Média(%)	Incerteza(%)
Estrôncio (Sr)	0,0051	0,0010
Vanádio (V)	0,0094	0,0011
Sódio (Na)	0,0001	0,0003
Bismuto (Bi)	0,0015	0,0003
Zircônio (Zr)	0,0005	0,0010
Boro (B)	0,0006	0,0006
Gálio (Ga)	0,0107	0,0005
Cádmio (Cd)	0,0009	0,0004
Cobalto (Co)	0,0010	0,0001
Prata (Ag)	0,0001	0,0003
Mercúrio (Hg)	0,0038	0,0005
Indio (In)	0,0010	0,0001
Antimônio (Sb)	0,0050	0,0001
Fósforo (P)	0,0020	0,0001

5 - NOTAS ***NOTES***

SAE 329

William Martins Rodrigues

Data de Ensaio ***Testing date:*** *05/10/2023*
Data de Emissão ***Issue date:*** *05/10/2023*

William Martins Rodrigues
Signatário Autorizado - *Authorized Signatory*

FIM DO RELATÓRIO *END OF REPORT*

Este relatório atende aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. O laboratório é reconhecido pela RMRS sob o número 17403, a qual avaliou sua competência e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. This report meets the requirements of ABNT NBR ISO / IEC 17025. The laboratory is recognized by the RMRS under number 17403, which assessed its competence and proved its traceability to national standards of measurement.
A amostragem enviada para análise é realizada pelo próprio cliente. As informações contidas nesse documento referem-se intrinsicamente às amostras ensaiadas/analisadas; as mesmas foram analisadas criticamente e autorizadas antes de sua liberação pelo signatário responsável pela emissão. Sampling sent for analysis is performed by the customer. The information contained in this document refers intrinsically to the samples tested / analyzed; they were analyzed critically and authorized prior to their release by the signatory responsible for the issue.
Este documento não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido na íntegra. This document may not be reproduced without the approval of the laboratory unless it is reproduced in its entirety.

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br / (51) 3081-5600

Página 1 de 1

ANEXO B – Análise da microestrutura do material

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

Rua Metalurgica Guidalli, nº. 85 - São Leopoldo/RS - (51) 3081-5600
cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br

Rede Metrologica RS
Certificado de Reconhecimento nº. 17403 Ensaios Metalográficos

Relatório de Ensaio de Micrografia - Micrograph Test Report 5906/23

Determinação da Microestrutura de Metais e Ligas Metálicas - ***Determination of the Microstructure of Metals and Metal Alloys***

OS: 11092

Cliente *Client*: EDU JOSÉ BECKER
Informações complementares *Additional information*: Rua Roberto Fridolino Kolling, 275 Bairro Floresta - Lageado - RS
Interessado *Interested*: - - - -

1 - INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE *INFORMATION PROVIDED BY THE APPLICANT*

Descrição: AMOSTRA 1

2 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES *ADDITIONAL INFORMATION*

Método: ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys
Condições Ambientais: Temperatura 23°C (±5°C) / Umidade relativa ≤70% *Ambient Conditions: Temperature 23°C (±5°C) / Relative humidity ≤70%.*
Local da Atividade: Instalações fixas do Laboratório "CQS Laboratório" *Place of Activity: Fixed installations of the Laboratory "CQS Laboratory ".*

3 - RASTREABILIDADE METROLÓGICA *METROLOGICAL TRACEABILITY*

Descrição *Description*	**Identificação** *Identification*	**Certificado** *Certified*	**Emitido** *Issued*	**Validade** *Validity*
Termohigrômetro - Thermohygrometer	TH-03	W20L8G21	Metrosul	out/23

Microscópio Metalográfico: Olympus, identificação CQS-MI-002, Em conformidade com ASTM E1951:2014 e padrão de referência RG 04. - Metallographic Microscope: Olympus, identification CQS-MI-002, Conforms to ASTM E1951: 2014 and reference standard RG 04.

4 - RESULTADOS *RESULTS*

FOTOMICROGRAFIAS ***PHOTOMICROGRAPHIES***

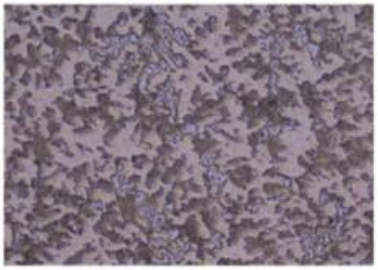


Foto 01 *: Amplação 100x*

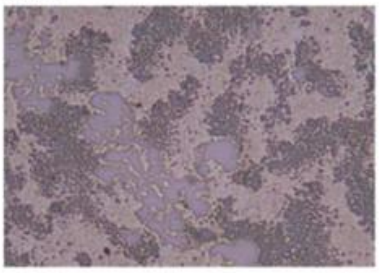


Foto 02 *: Ampliação 400x.*

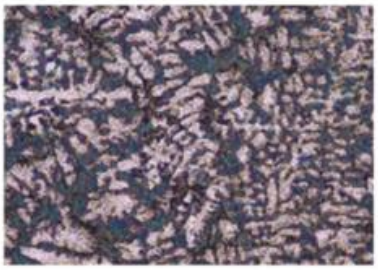


Foto 03 *: Ampliação 100x atacada.*

5 - NOTAS *NOTES*

Informativo - Informative.

Data de Ensaio ***Testing date:*** *06/10/2023*
Data de Emissão ***Issue date:*** *06/10/2023*

Luiz Fernando Fernandes Bosquerolli
Signatário Autorizado - *Authorized Signatory*

FIM DO RELATÓRIO *END OF REPORT*

Este relatório atende aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. O laboratório é reconhecido pela RMRS sob o número 17403, a qual avaliou sua competência e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. This report meets the requirements of ABNT NBR ISO / IEC 17025. The laboratory is recognized by the RMRS under number 17403, which assessed its competence and proved its traceability to national standards of measurement.

A amostragem enviada para análise é realizada pelo próprio cliente. As informações contidas nesse documento referem-se intrinsicamente às amostras ensaiadas/analisadas; as mesmas foram analisadas criticamente e autorizadas antes de sua liberação pelo signatário responsável pela emissão. Sampling sent for analysis is performed by the customer. The information contained in this document refers intrinsically to the samples tested / analyzed; they were analyzed critically and authorized prior to their release by the signatory responsible for the issue.

Este documento não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido na íntegra. This document may not be reproduced without the approval of the laboratory unless it is reproduced in its entirety.

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br / (51) 3081-5600

Folha 1 de 1

ANEXO C - Tabela ASM (1992)

Grade designation			Product[c]	Composition, wt%												
Aluminum Association[a]	UNS. No.	ISO[b]		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti	Unspecified other elements		Al, min[d]
														Each	Total	
						0.6		0.7								
324.2	A03242	...	Ingot	7.0-8.0	0.6	0.40-0.6	0.10	0.45-0.7	...	0.10	0.10	...	0.20	0.05	0.15	rem
328.0	A03280	...	S	7.5-8.5	1.0	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5	...	0.25	...	0.50	rem
328.1	A03281	...	Ingot	7.5-8.5	0.8	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5	...	0.25	...	0.50	rem
332.0	A03320	...	P	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.50	0.50-1.5	...	0.50	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
332.1	A03321	...	Ingot	8.5-10.5	0.9	2.0-4.0	0.50	0.6-1.5	...	0.50	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
332.2	A03322	...	Ingot	8.5-10.0	0.6	2.0-4.0	0.10	0.9-1.3	...	0.10	0.10	...	0.20	...	0.30	rem
333.0	A03330	...	P	8.0-10.0	1.0	3.0-4.0	0.50	0.05-0.50	...	0.50	1.0	...	0.25	...	0.50	rem
333.1	A03331	...	Ingot	8.0-10.0	0.8	3.0-4.0	0.50	0.10-0.50	...	0.50	1.0	...	0.25	...	0.50	rem

UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09