



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

SILVIO AMILCAR PUCCI JUNIOR

**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CAMISAS CERÂMICAS APLICADAS
EM BOMBAS DE PISTÃO DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS**

Bauru
2025

SILVIO AMILCAR PUCCI JUNIOR

**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CAMISAS CERÂMICAS APLICADAS
EM BOMBAS DE PISTÃO DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Cesar Renato Foschini

Bauru

2025

Pucci Junior, Silvio Amilcar.

Processos de fabricação de camisas cerâmicas aplicadas em bomba de pistão de pulverizadores agrícolas / Silvio Amilcar Pucci Junior. - Bauru, 2025
99 f.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Bauru, Engenharia Mecânica

Orientador: Cesar Renato Foschini

1. Cerâmica avançada. 2. Camisas cerâmicas. 3. acabamento superficial. 4. aplicações. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SILVIO AMILCAR PUCCI JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de agosto do ano de 2025, às 14h, no(a) Sala de Reuniões do Departamento de Engenharia Mecânica, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SILVIO AMILCAR PUCCI JUNIOR, intitulada **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CAMISAS CERÂMICAS APLICADAS EM BOMBAS DE PISTÃO DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista UNESP Faculdade de Engenharia Câmpus de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo/São Carlos. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força e sabedoria que me guiaram. Minha gratidão à minha esposa, Marcela Pucci, pelo amor, apoio incondicional e paciência. E, em especial, a nossa filha, que ainda na barriga de sua mãe, me inspira a buscar um futuro melhor. Ao meu orientador, Cesar Renato Foschini, pela valiosa orientação e constante incentivo. Aos meus colegas Felipe D. Faglioni, Cristian G. Barbosa, Breno Pagliuse e Tiago Venan, pela proveitosa parceria. Reconheço a generosidade da Máquinas Agrícolas Jacto ao disponibilizar seu laboratório da Qualidade e Validação, fundamental para esta pesquisa, e o apoio técnico essencial do seu Departamento de Cerâmica na fabricação das peças.

RESUMO

A pulverização agrícola, processo essencial para a proteção e nutrição de lavouras, depende crucialmente do desempenho de seus componentes, em especial da bomba de pistão e do conjunto êmbolo-camisa. A durabilidade e a precisão destes elementos impactam diretamente a eficiência da aplicação de defensivos e nutrientes, influenciando a saúde das culturas e os custos operacionais. O desgaste prematuro, frequentemente associado à qualidade do acabamento superficial das camisas de cerâmica, pode levar a aplicações imprecisas e aumento dos gastos com manutenção. Esta pesquisa busca compreender e otimizar os processos de fabricação das camisas de cerâmica, investigando a relação entre as etapas de produção e o acabamento superficial, com o intuito de reduzir a temperatura de trabalho das bombas, aumentar a vida útil dos êmbolos e, conseqüentemente, aprimorar a eficiência da pulverização no campo, equilibrando os custos industriais e de manutenção. Analisou-se a influência das variáveis de fabricação no acabamento superficial das camisas e a avaliação do impacto da temperatura de trabalho no desempenho do conjunto êmbolo-camisa, buscando métodos de usinagem, áreas de contato e posição de montagem que minimizem o atrito e a geração de calor. O estudo demonstrou que o êmbolo plano (EP) apresenta uma área de superfície 30% maior em comparação com o êmbolo copo (EC), resultando em um aumento significativo na capacidade de transferência de calor e, conseqüentemente, em uma elevação da temperatura de trabalho em 52%. Além disso, a análise da rugosidade superficial da camisa da bomba de pulverização revelou seu impacto no desempenho do sistema. Uma rugosidade de 1 μ m causou um aumento de temperatura de 24%, enquanto a redução para 0,1 μ m resultou em uma diminuição de temperatura de 34%. Esses resultados, obtidos com p-valor <0,05, confirmam sua significância estatística e estabelecem uma correlação direta entre a qualidade do acabamento superficial e a eficiência térmica e mecânica. Em conclusão, a melhoria do acabamento da camisa da bomba de pulverização, reduzindo a rugosidade, comprovadamente diminui o atrito, o que se traduz em maior eficiência energética e prolongamento da vida útil dos componentes.

Palavras-Chave: Cerâmica avançada, Camisas cerâmicas, acabamento superficial, aplicações.

ABSTRACT

Agricultural spraying, a crucial process for crop protection and nutrition, depends heavily on the performance of its components, especially the piston pump and the plunger-liner assembly. The durability and precision of these elements directly impact the efficiency of pesticide and nutrient application, affecting crop health and operational costs. Premature wear, often linked to the surface finish quality of ceramic liners, can lead to inaccurate applications and increased maintenance expenses. This research aims to understand and optimize the manufacturing processes of ceramic liners by investigating the relationship between production stages and surface finish. The goal is to reduce the operating temperature of the pumps, increase the service life of the plungers, and consequently, improve the efficiency of field spraying while balancing industrial and maintenance costs. The study analyzed the influence of manufacturing variables on the surface finish of the liners and evaluated the impact of operating temperature on the performance of the plunger-liner assembly. It also sought machining methods, contact areas, and mounting positions that would minimize friction and heat generation. The study demonstrated that the flat plunger (FP) has a 30% larger surface area compared to the cup plunger (CP), resulting in a significant increase in heat transfer capacity and, consequently, a 52% rise in operating temperature. Furthermore, the analysis of the spray pump liner's surface roughness revealed its impact on the system's performance. A roughness of $1\mu\text{m}$ caused a 24% temperature increase, while a reduction to $0.1\mu\text{m}$ resulted in a 34% temperature decrease. These results, with a p-value <0.05 , confirm their statistical significance and establish a direct correlation between the quality of the surface finish and the thermal and mechanical efficiency. In conclusion, improving the surface finish of the spray pump liner by reducing roughness is proven to decrease friction, which translates to greater energy efficiency and a prolonged service life for the components.

Keywords: Advanced ceramics, Ceramic liners, Surface finish, Applications.

Lista de Figuras

Figura 1 - Tipo de Ligação versus Tipo de Materiais	19
Figura 2 - Estrutura Cristalina da Alumina	20
Figura 3 - Processo de fabricação das camisas cerâmicas	22
Figura 4 - Influência da velocidade no movimento interno do moinho	23
Figura 5 - Processo de Spray Dryer.....	25
Figura 6 - Campos de densidade após prensagem	26
Figura 7 - Prensagem Uniaxial.....	27
Figura 8 - Prensagem Isostática	28
Figura 9 - Representação do processo de sinterização	30
Figura 10 – MEV de um compacto de pó de óxido de alumínio.....	31
Figura 11 - Retificação com avanço lento	33
Figura 12 - Fatores que proporcionam desgaste do rebolo.	35
Figura 13 - Parâmetros bidimensionais de rugosidade	37
Figura 14 - Esquema do processo de lampeamento e polimento	39
Figura 15 - Processo capaz e não capaz.....	45
Figura 16 - Árvore de Análises.....	49
Figura 17 - Fluxograma do processo de fabricação das camisas.	50
Figura 18 - Prensa Isostática	52
Figura 19 – Processo de sinterização	53
Figura 20 - Brunidora vertical Engis (Desbaste / Acabamento)	56
Figura 21 - Brunidora horizontal Brunitec (Polimento)	57
Figura 22 - Bancada Tridimensional CNC.....	58
Figura 23 – Rugosímetro de Bancada	59
Figura 24 - Vista lateral êmbolo do tipo copo (EC)	60
Figura 25 - Vista em corte êmbolo do tipo plano (EP).....	61
Figura 26 - Ilustração bomba JP 300	62
Figura 27 - Bancada de ensaios de bombas.....	63
Figura 28 - Câmera Térmica e Termômetro MT-350A.....	64
Figura 29 - Requisitos dimensionais êmbolo do tipo copo (EC).....	67
Figura 30 - Teste de normalidade diâmetro externo (EC).....	67
Figura 31 -Teste de normalidade espessura h (EC)	68

Figura 32 - Capacidade do processo diâmetro externo (EC)	68
Figura 33 - Capacidade do processo espessura h (EC)	68
Figura 34 - Requisitos dimensionais êmbolo do tipo plano (EP)	71
Figura 35 - Teste de normalidade diâmetro externo (EP)	71
Figura 36 - Teste de normalidade espessura h (EP)	72
Figura 37 - Capacidade do processo diâmetro externo (EP)	72
Figura 38 - Capacidade do processo espessura h (EP)	72
Figura 39 - Requisitos dimensionais camisa	77
Figura 40 - Teste de normalidade diâmetro interno (Camisa)	77
Figura 41 - Capacidade do processo diâmetro interno (Camisa)	78
Figura 42 - Coleta de temperatura	80
Figura 43 - Comportamento da temperatura pelo tempo (Área de Contato) ..	81
Figura 44 - Two-Sample t-test para Área de Contato (EP vs EC)	82
Figura 45 - Comportamento da temperatura pelo tempo (Rugosidade)	86
Figura 46 – ANOVA – Análise de Variância (Rugosidade)	87
Figura 47 - Comparações Múltiplas de Médias (Teste de Tukey)	88
Figura 48 - Análise de Resíduos ANOVA (Rugosidade)	89
Figura 49 - Posição de montagem das camisas	90
Figura 50 - Análise de Variância ANOVA – (Posição de Montagem)	91
Figura 51 - Análise de Resíduos ANOVA (Posição de Montagem)	91

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classes de Cerâmicas e Campos de Aplicação	16
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas da Alumina 99,5%	18
Tabela 3 - Caráter iônico (%CI).....	20
Tabela 4 - Elementos do processo de retificação.....	32
Tabela 5 - Fatores que influenciam o coeficiente de atrito	42
Tabela 6 -Possibilidades dos dois índices: Cp e Cpk.....	43
Tabela 7 -Classificação de processos quanto a sua capacidade	45
Tabela 8 - Tipos de Erros em testes de hipóteses	47
Tabela 9 - Propriedades Físicas das Camisas	49
Tabela 10 - Resultado dimensional êmbolo copo (EC)	66
Tabela 11 - Resultado dimensional êmbolo plano (EP)	70
Tabela 12 - Resultado dimensional camisa.....	74
Tabela 13 - Área de contato dos tipos de êmbolos	79
Tabela 14 - Temperaturas de operação dos êmbolos.....	79
Tabela 15 – Temperatura de operação em diferentes rugosidades	84

Lista de abreviações e símbolos

(%CI). *Caráter Iônico*
(H_A).. *Hipótese Alternativa*
 μ . *Média do processo*
Al(OH)₃. *Hidróxido de Alumínio*
Al(OH)₄⁻. *Íon tetraidroxialuminato*
Al₂O₃. *Óxido de Alumínio (Alumina)*
CBN. *Nitreto cúbico de boro*
Cp: Índice de capacidade potencial do processo. *Consulte*
Cpk. Índice de capacidade real do processo
EC. *êmbolo do tipo copo*
EP. *êmbolo do tipo plano*
Exp. *Exponencial*
H₀. *Hipótese Nula*
H₂O. *Água*
H_A. *Hipótese alternativa*
LIE. *Limite inferior de especificação*
LSE. *Limite superior de especificação*
MEV:.. *micrografia eletrônica de varredura*
Na⁺. *Íon de sódio*
OH⁻. *Íon hidroxila*
r.p.m. *Rotações por minuto*
Si₃N₄. *Nitreto de Silício*
SiC. *Carbeto de Silício*
SiO₂. *Dióxido de Silício (Sílica)*
Vc. *Velocidade Crítica*
 α . *nível de significância*
 μ m. *Micrómetro*
 σ . *Desvio do processo*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 <i>Materiais Cerâmicos</i>	15
3.2 <i>Alumina</i>	17
3.3 <i>Propriedades Mecânicas da Alumina</i>	18
3.3.1 <i>Ligações químicas</i>	18
3.3.2 <i>Caráter Iônico (%Cl)</i>	19
3.3.3 <i>Estrutura cristalina</i>	20
3.4 <i>Processos de Fabricação de materiais cerâmicos</i>	21
3.4.1 <i>Moagem</i>	22
3.4.2 <i>Secagem por spray (Atomização)</i>	24
3.4.3 <i>Processamento Verde</i>	25
3.4.3.1 <i>Prensagem Uniaxial</i>	26
3.4.3.2 <i>Prensagem Isostática</i>	27
3.4.3.3 <i>Usinagem Verde</i>	28
3.4.4 <i>Sinterização</i>	29
3.4.5 <i>Métodos Abrasivos</i>	31
3.4.5.1 <i>Retificação</i>	31
3.4.5.1.1 <i>Caracterização da retificação</i>	34
3.4.5.1.2 <i>Relação G</i>	34
3.4.5.1.3 <i>Rugosidade</i>	36
3.4.5.2 <i>Brunimento</i>	38
3.4.5.3 <i>Lapidação e Polimento</i>	38
3.5 <i>Atrito</i>	40
3.6 <i>Ferramentas Estatísticas</i>	43
3.6.1. <i>Capacidade do Processo (CP e CPK)</i>	43
3.6.2. <i>Testes de Hipóteses</i>	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1. <i>Fabricação das Camisas</i>	49
4.1.1. <i>Preparação da Massa</i>	51

4.1.2. Prensagem.....	51
4.1.3. Usinagem a Verde	52
4.1.4 Sinterização.....	52
4.1.5 Usinagem.....	53
4.1.5.1 Desbaste para rugosidade de 1,0 μm	54
4.1.5.2 - Desbaste e Acabamento para rugosidade de 0,5 μm	54
4.1.5.3 - Desbaste, Acabamento e Polimento - para rugosidade de 0,2 μm	54
4.1.5.4 - Desbaste, Acabamento e Polimento para rugosidade de 0,1 μm	55
4.2. Análise Dimensional dos componentes mecânicos	57
4.3. Determinação da área de contato superficial	59
4.3.1. Êmbolo do tipo copo (EC).....	59
4.3.2. Êmbolo do tipo plano (EP).....	60
4.4. Preparação para Ensaios Mecânicos.....	62
 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	 65
5.1 Resultados dimensionais.....	65
5.1.1. Êmbolo do tipo copo (EC).....	65
5.1.2. Êmbolo do tipo plano (EP).....	69
5.1.3. Camisa de Cerâmica	73
5.2 Influência da Área de Contato.	78
5.3. Influência da Rugosidade.....	83
5.4. Influência da Posição de Montagem	89
 6. CONCLUSÕES.....	 92
 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 94
 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 95

1 INTRODUÇÃO

A pulverização, processo fundamental na agricultura, é mais do que uma simples distribuição de líquidos, tornando-se um pilar na proteção e nutrição de lavouras. A eficácia com que agroquímicos e nutrientes são dispersos define a saúde e a produtividade das culturas, sublinhando a importância dos pulverizadores.

No coração desses equipamentos, a bomba de pistão assume um importante papel, recalcando defensivos agrícolas através de um circuito hidráulico que varia em complexidade, desde sistemas avançados com cortes de seção bico a bico até modelos mais simples com controles manuais. A durabilidade e o desempenho dessas bombas, particularmente dos êmbolos, são preocupações constantes para os produtores, dada a sua influência direta na eficiência da pulverização e nos custos de manutenção.

A precisão na aplicação de defensivos e nutrientes, ditada pela integridade dos componentes do pulverizador, especialmente o conjunto êmbolo-camisa, é um fator determinante para a saúde das lavouras e a otimização dos recursos agrícolas. O desgaste prematuro desses componentes, pode resultar em aplicações imprecisas, desperdício de insumos e aumento dos custos de manutenção. Nesse contexto, a qualidade do acabamento superficial das camisas de cerâmica aparece como um importante elemento. A rugosidade e as imperfeições na superfície interna da camisa podem gerar atrito excessivo, levando ao desgaste acelerado do êmbolo e comprometendo a eficiência da bomba devido a altas temperaturas de trabalho. Portanto, a busca por métodos de usinagem e acabamento que garantam superfícies com mínima rugosidade é fundamental para assegurar a longevidade dos componentes, a precisão da pulverização e, conseqüentemente, a produtividade agrícola.

Nesse contexto, a pesquisa proposta se destaca ao buscar um entendimento dos processos de fabricação das camisas de cerâmica e seu impacto no desgaste dos êmbolos. Ao explorar a relação entre matéria-prima, processamento do pó, sinterização e retificação com o acabamento superficial das camisas, o estudo visa otimizar a vida útil desses componentes, reduzindo a temperatura média de trabalho de bomba, buscando um ponto ótimo entre custos industriais e de manutenção, aumentando a eficiência dos pulverizadores no campo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar e otimizar os processos de fabricação das camisas de cerâmica utilizadas em bombas de pistão de pulverizadores agrícolas, visando aprimorar o acabamento superficial e reduzir a temperatura de trabalho do conjunto, de modo a aumentar a vida útil dos êmbolos e a eficiência da pulverização, equilibrando custos industriais e de manutenção em campo.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência das variáveis do processo de fabricação no acabamento superficial das camisas de cerâmica.
- Avaliar o impacto da temperatura de trabalho no desempenho do conjunto êmbolo-camisa, identificando métodos de usinagem, área de contato e posição de montagem que minimizem o atrito e a geração de calor.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos, compostos inorgânicos e não metálicos, caracterizam-se por ligações iônicas ou iônicas-covalentes. A etimologia do termo "cerâmica", derivada do grego "matéria queimada", reflete o processo de tratamento térmico em altas temperaturas, essencial para a obtenção de suas propriedades estruturais e funcionais (Callister; Rethwisch, 2013).

Esses materiais abrangem uma vasta gama de compostos, frequentemente óxidos, nitretos e carbeto, como o óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), dióxido de silício (Sílica, SiO_2), carbeto de silício (SiC) e nitreto de silício (Si_3N_4). Além destes, incluem-se as cerâmicas tradicionais, compostas por minerais de argila (porcelana), cimento e vidro. A classificação dos materiais cerâmicos divide-os em tradicionais e avançados, refletindo a evolução do campo. As cerâmicas tradicionais, oriundas de fontes naturais como argila, feldspato e sílica, possuem processamento relativamente simples e propriedades intrinsecamente ligadas à composição dessas fontes. Amplamente utilizadas em aplicações estruturais e decorativas desde a antiguidade, sua funcionalidade é limitada pela variabilidade das matérias-primas (Callister; Rethwisch, 2013).

Paralelo a isso, as cerâmicas avançadas representam um avanço tecnológico significativo. Produzidas por processos sintéticos controlados, permitem a manipulação precisa da microestrutura, otimizando propriedades como resistência mecânica, estabilidade térmica e condutividade. Essa precisão torna-as indispensáveis em setores de alta tecnologia, como eletrônica, biomateriais e energia, impulsionando o desenvolvimento em aplicações inovadoras (Ashby *et al.*, 2004; Callister; Rethwisch, 2013).

A evolução das cerâmicas para aplicações técnicas, que já existiam há mais de dois séculos, ganhou destaque na década de 1970 com o desenvolvimento de cerâmicas sintéticas avançadas. Diferentemente das cerâmicas tradicionais, derivadas de minerais naturais e processadas de forma simples, essas novas cerâmicas, exigem um processo de fabricação complexo, partindo de matérias-primas artificiais. Criadas para aplicações específicas onde materiais convencionais

falhavam, essas cerâmicas exibem uma vasta gama de propriedades, tornando-as indispensáveis em diversos setores industriais, especialmente nas indústrias eletrônica e de manufatura, bem como em tecnologias que demandam materiais capazes de suportar condições severas. A Tabela 1 demonstra de maneira sintética essas aplicações (Marinescu; Tonsho; Inasaki, 1999).

Tabela 1 - Classes de Cerâmicas e Campos de Aplicação

Grupo	Propriedade	Aplicação
Cerâmicas tradicionais	Resistência à Compressão	Tijolos
	Densidade + Resistência	Peças Ocas de Cerâmica
	Densidade + Resistência ao Desgaste	Produtos de Argila Estrutural
Cerâmicas avançadas	Resistência ao Calor e à Corrosão	Refratários
	Dureza	Rebolos e Discos de Retificação
	Resistência + Tenacidade	Cerâmicas de Engenharia
Cerâmicas Funcionais	Biocompatibilidade, Bioatividade	Biocerâmicas
	Propriedades Nucleares	Cerâmicas Nucleares
	Resistência à Corrosão	Quimiocerâmicas
	Resistividade Elétrica	Eletrocerâmicas
	Suscetibilidade Magnética	Magnetocerâmicas
	Propriedades Ópticas	Cerâmicas Ópticas

Fonte: Marinescu, Tonsho e Inasaki (1999).

Materiais cerâmicos são muito comuns em próteses, ferramentas de usinagem e componentes mecânicos, como camisas de cilindro e pastilhas de freio. Essa utilização está comumente associada à sua alta dureza, inércia química, elevado ponto de fusão e alto módulo de elasticidade. No entanto, sua aplicação é restrita pela fragilidade do material, que é quantificada por sua baixa tenacidade à fratura.

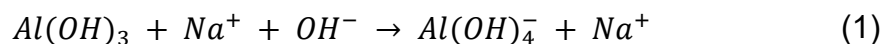
É possível aprimorar os compósitos de matriz cerâmica de forma eficaz, alcançando ganhos de mais de 60% na tenacidade à fratura quando nanopartículas de alótropos de carbono, como grafeno, óxido de grafeno ou qualquer Material à Base de Grafeno (MBG), são usados como material de reforço (Lee et al., 2014; Chen et al., 2022).

3.2 Alumina

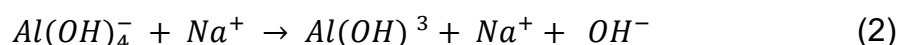
O óxido de alumínio, ou alumina, destaca-se na fabricação de próteses e dispositivos cirúrgicos devido à sua resistência à corrosão em ambientes biológicos. Sua compatibilidade com tecidos garante estabilidade a longo prazo. Encontrado na natureza em diversas formas minerais, a alumina é comercialmente extraída de minérios como a bauxita através do processo Bayer, sendo utilizado na produção de alumínio metálico. Além de suas aplicações médicas, sua dureza a torna um excelente abrasivo, e seu alto ponto de fusão, um material refratário importante para indústria metalúrgica (Ratner *et al.*, 2013).

Nesse sentido o processo de Bayer se divide em três etapas.

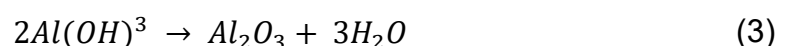
Inicialmente, o hidróxido de alumínio $Al(OH)_3$ pode se dissolver em um meio alcalino (contendo Na^+ e OH^-) para formar o íon $Al(OH)_4^-$ em solução, conforme a reação (1).



Em seguida, ocorre a precipitação, onde o hidróxido de alumínio $Al(OH)_3$ é formado novamente a partir do íon $Al(OH)_4^-$. Esta é uma reação de reversão da reação (1), que pode ser controlada por alterações no pH ou temperatura, conforme a reação (2).



Por fim, a calcinação do hidróxido de alumínio $2Al(OH)_3$ remove a água de sua estrutura, resultando na formação de alumina Al_2O_3 conforme a reação (3)



Essa etapa final é fundamental, pois determina as propriedades do produto (Ratner *et al.*, 2013).

3.3 Propriedades Mecânicas da Alumina

A α -alumina é um material denso, não poroso e quase inerte, conhecido por sua dureza e resistência à abrasão, superada apenas pelo diamante na escala de Mohs. As propriedades mecânicas da alumina, como resistência mecânica, à fadiga e à fratura, são influenciadas pelo tamanho do grão, porosidade e pureza do material.

Para minimizar o desgaste, em aplicações mecânicas, a rugosidade da superfície deve ser inferior a 0,02 μm com grãos menores que 4 μm e distribuição de tamanho estreita. Rugosidades maiores podem levar ao desprendimento de grãos e desgaste acelerado. A Tabela 2 detalha as propriedades mecânicas da alumina com 99,5% de pureza (Callister; Rethwisch, 2013; Ratner *et al.*, 2013).

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas da Alumina 99,5%

Propriedades Mecânicas	Resumo	Valor
Densidade	Mede a massa por unidade de volume.	3.97 g/cm ³
Resistência à flexão	Capacidade do material de resistir a forças de flexão.	345 MPa
Módulo de elasticidade	Mede a rigidez do material.	300 GPa
Módulo de cisalhamento	Mede a resposta do material a forças de cisalhamento.	124 GPa
Módulo de compressibilidade	Mede a resistência do material à compressão uniforme.	172 GPa
Coefficiente de Poisson	Descreve como um material se deforma em uma direção quando tracionado	0.21
Resistência à compressão	Capacidade do material de resistir a forças de esmagamento.	2100 MPa
Dureza	Resistência do material à abrasão	1000 kgf/mm ²
Tenacidade à fratura	Resistência do material à propagação de trincas.	3.5 MPa.m ^{1/2}

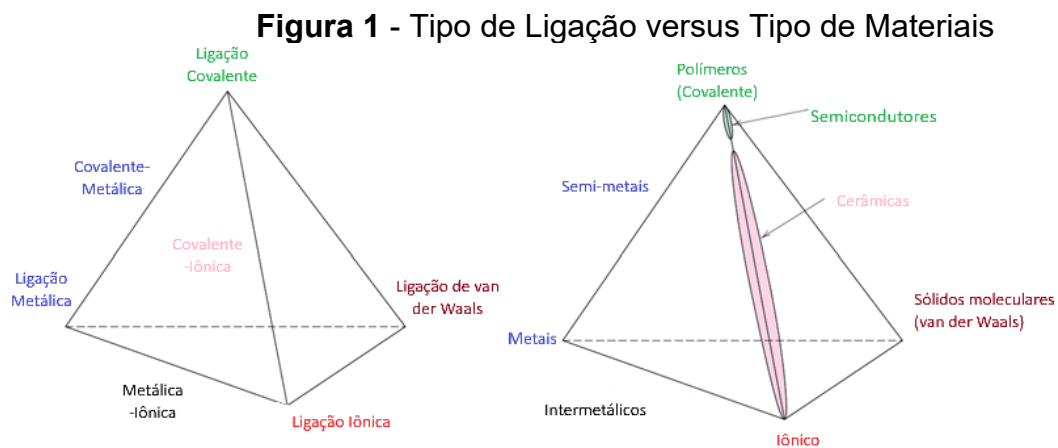
Fonte: Callister e Rethwisch (2013); Ratner *et al.*, (2013).

3.3.1 Ligações químicas

Metais geralmente têm estruturas cristalinas simples, com átomos do mesmo elemento organizados de maneira uniforme. Já as cerâmicas são compostas por pelo menos dois tipos de átomos, como por exemplo, alumínio e oxigênio em Al_2O_3 . Essa diversidade de átomos e suas interações resultam em estruturas cristalinas complexas. As ligações iônicas ocorrem quando elétrons são transferidos entre átomos, criando íons com cargas opostas que se atraem. A eletronegatividade é a

capacidade de um átomo de atrair elétrons em uma ligação química. A diferença na eletronegatividade entre os átomos em uma cerâmica determina o grau de caráter iônico da ligação. Uma grande diferença indica uma ligação mais iônica, enquanto uma pequena diferença indica uma ligação mais covalente. A natureza das ligações e a estrutura cristalina de uma cerâmica influenciam diretamente suas propriedades, como dureza, resistência, condutividade elétrica e térmica (Ashby *et al.*, 2004).

Posicionadas em uma das arestas do tetraedro da Figura 1, as cerâmicas apresentam ligações iônicas e covalentes, ou seja, são materiais que possuem ligações mistas contribuindo para as propriedades mecânicas (Ashby *et al.*, 2004).



Fonte: Adaptado de Ashby *et al.* (2004).

3.3.2 Caráter iônico (%CI)

Em contrapartida, a equação (4) calcula a porcentagem de caráter iônico (%CI) de uma ligação entre dois elementos (A e B) depende de suas eletronegatividades (X_A e X_B). A Tabela 3 mostra as cerâmicas versus o caráter iônico (Ashby *et al.*, 2004; Callister; Rethwisch, 2013).

$$\%CI = \{1 - \text{Exp}[-(0.25)(X_A - X_B)^2]\} \times 100 \quad (4)$$

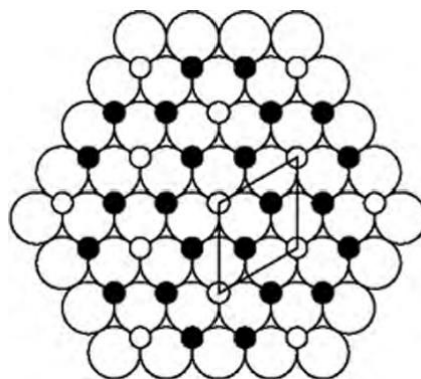
Tabela 3 - Caráter iônico (%CI)

Material		Caráter iônico (%CI)
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio	63
SiO ₂	Dióxido de Silício	51
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício	30
SiC	Carbeto de Silício	12

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013).

3.3.3 Estrutura cristalina

A alumina obtida através do processo de extração (processo Bayer) é recristalizada, adaptando-se às necessidades específicas de sua aplicação. A alumina manifesta-se em diversas fases cristalinas, variando conforme o tratamento térmico aplicado. A estrutura é determinada pelos íons Al³⁺, onde cada íon se liga a seis átomos de O⁻ em um octaedro. Cada octaedro compartilha uma face com outros nas camadas superior e inferior. A distorção observada é resultado da repulsão entre os íons Al³⁺ em octaedros adjacentes. Essa compactação densa dos átomos de alumínio (pontos brancos) e oxigênio (pontos pretos), conforme a Figura 2 confere à estrutura excelentes propriedades mecânicas e térmicas. (Ashby *et al.*, 2004; Ratner *et al.*, 2013).

Figura 2 - Estrutura Cristalina da Alumina

Fonte: Ratner *et al.* (2013).

3.4 Processos de Fabricação de materiais cerâmicos

Em linhas gerais, a produção de materiais cerâmicos compreende uma sequência, para determinar as propriedades finais do produto. O processo inicia-se com a preparação da matéria-prima, na qual os materiais precursores e aditivos são dosados para a formulação do pó cerâmico. Nesta fase, o processo de spray-dryer é empregado para secar a suspensão, resultando em um pó granulado com ótimas características. Este pó serve como base para a conformação das peças, realizada por métodos como colagem, prensagem ou extrusão, que lhes conferem a forma desejada (Ashby *et al.*, 2004; Callister; Rethwisch, 2013; Melo *et al.*, 2018)

Após a conformação, a usinagem a verde é realizada com o objetivo de obter as dimensões desejadas com menor consumo de energia. A etapa seguinte, a queima ou sinterização, é realizada para consolidar as propriedades mecânicas do material. Durante a sinterização, o material é densificado e sua microestrutura ajustada, garantindo resistência mecânica e desempenho funcional. Em alguns casos, etapas adicionais são necessárias para atender a requisitos específicos (Ashby *et al.*, 2004; Callister; Rethwisch, 2013; Melo *et al.*, 2018)

O acabamento, etapa complementar, concentra-se nos ajustes finais não alcançadas nos processos anteriores. Este processo pode incluir operações como polimento, corte, furação, usinagem e retificação, garantindo precisão dimensional e qualidade superficial (Ashby *et al.*, 2004; Callister; Rethwisch, 2013; Melo *et al.*, 2018; Niesz, 1996). A Figura 3, evidência de maneira sintética esse processo.

Figura 3 - Processo de fabricação das camisas cerâmicas

Fonte: Santos e Sousa (2024).

3.4.1 Moagem

A moagem, uma das etapas no processamento de materiais cerâmicos, tem como objetivo reduzir o tamanho das partículas da matéria-prima. Além de diminuir o tamanho das partículas, esse processo também ajuda a dispersar aglomerados e a misturar e homogeneizar os componentes da matéria-prima. A redução do tamanho das partículas contribui para a etapa de sinterização, onde as partículas se unem para formar um composto sólido. Os moinhos utilizados no processamento cerâmico variam em tamanho e capacidade. A escolha do tipo de moinho e de suas dimensões depende das características da matéria-prima, do tamanho de partícula desejado e da escala de produção (Santos; Sousa, 2024).

Um dos métodos mais utilizados na moagem são os moinhos de bolas. A operação de moagem é influenciada por variáveis como o tamanho e a velocidade do moinho, a relação entre o tamanho do meio de moagem e do material de alimentação, as propriedades físicas do meio (dureza, densidade), a presença de aglomerados no material inicial e, em moagem úmida, a viscosidade da suspensão. As bolas de moagem mais comuns são de Al_2O_3 . Óxido de Alumínio (Alumina) (Santos; Sousa, 2024).

A Figura 4 mostra como a velocidade de rotação do moinho influencia a moagem. A velocidade crítica (V_c), em r.p.m., para um moinho de bolas pode ser

calculada pela equação (5). A V_c é um ponto de referência importante nesse contexto, pois define o limite a partir do qual o comportamento do material dentro do moinho se altera.

$$V_c = 42,2/(D - d)^{0,5} \quad (5)$$

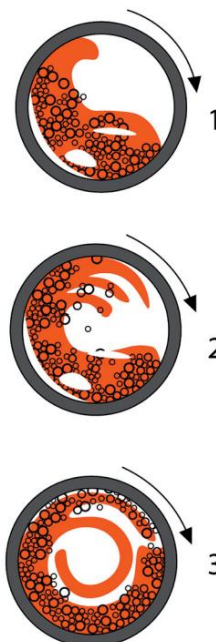
Onde:

VC = Velocidade Crítica;

D é o diâmetro interno do moinho;

d é o maior diâmetro do meio de moagem,

Figura 4 - Influência da velocidade no movimento interno do moinho



Fonte: Santos e Sousa (2024).

As velocidades do moinho abaixo da crítica são denominadas de cascata. (Figura 4.1) Nesse regime, o meio de moagem (bolas) e a suspensão cerâmica realizam um movimento de "cascata". Isso significa que as bolas sobem pelas paredes do moinho e, em seguida, deslizam e rolam pela carga. Esse movimento é ideal para a moagem a úmido, pois o atrito entre as bolas e entre as bolas e as paredes do moinho promove uma moagem eficiente. Em contra-partida, velocidades ligeiramente acima da crítica são denominadas de "catarata". (Figura 4.2). Nesse regime o

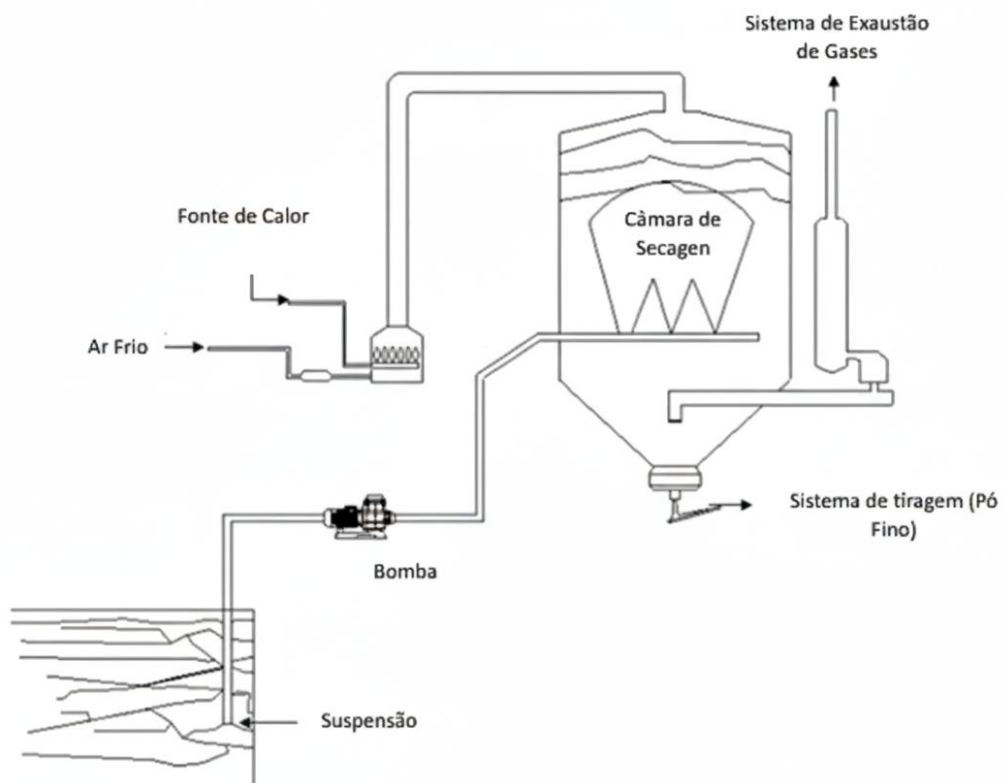
movimento se transforma em "catarata". As bolas, impulsionadas pela força centrífuga, são lançadas em queda livre dentro do moinho. Esse impacto vigoroso é mais adequado para a moagem a seco de pós, onde a fragmentação por impacto é desejada. Por último, velocidades excessivamente altas, quando a velocidade de rotação excede muito a velocidade crítica (Figura 4.3), a força centrífuga torna-se tão intensa que o meio de moagem e a suspensão são "colados" às paredes do moinho. Nessa situação, o movimento necessário para a moagem é prejudicado, resultando em uma moagem ineficiente (Santos; Sousa, 2024).

3.4.2 Secagem por spray (Atomização)

A secagem por spray, ou atomização, é um processo em que a suspensão é transformada em um pó seco e granulado através da atomização do fluido em um fluxo de gás quente, resultando em um pó com propriedades ideais para a prensagem.

Os secadores de spray são equipamentos utilizados em diversos processos industriais, incluindo os setores alimentício, farmacêutico, químico e cerâmico. A ampla utilização de secadores de spray em várias indústrias levanta questões sobre o consumo de energia. A secagem é responsável por aproximadamente 10-25% do consumo energético total em aplicações industriais, o que motiva o desenvolvimento de secadores de spray mais eficientes ou a adoção de soluções inovadoras para otimizar a eficiência energética (Caglayan; Şöhret; Caliskan, 2018). A Figura 5 representa de forma esquemática o processo de "Spray dryer".

Figura 5 - Processo de Spray Dryer



Fonte: Adaptado de Caglayan, Şöhret e Caliskan (2018).

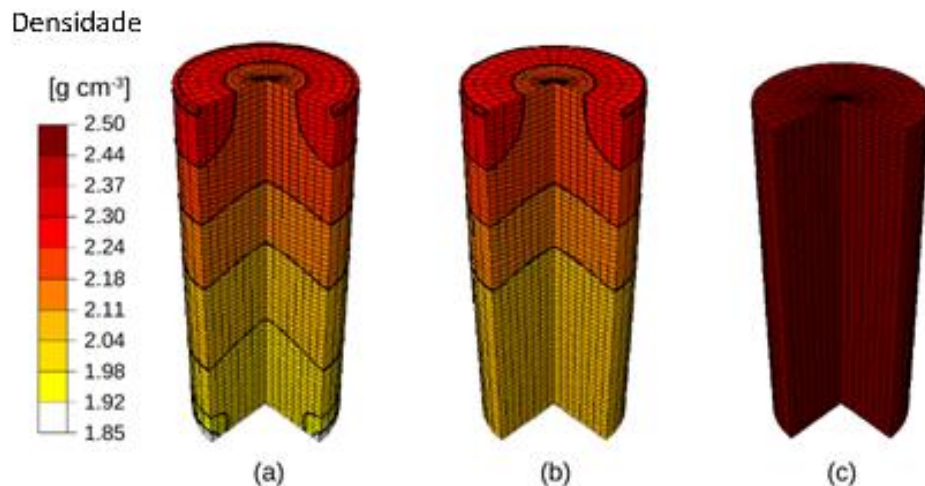
3.4.3 Processamento Verde

Os diversos processos de conformação buscam otimizar a produtividade com o menor custo possível, e cada um influencia de maneira distinta o acabamento superficial da peça cerâmica (Richerson, 1992). Os processos convencionais incluem colagem, injeção em moldes, gelcasting, prensagem uniaxial (simples e dupla ação), prensagem isostática (técnica do molde seco e úmido) (Albaro, 2001) conformação coloidal (colagem de barbotina, slip casting) e moldagem plástica (extrusão e moldagem por injeção) (Albaro, 2001).

A prensagem uniaxial (em matriz fechada) e a prensagem isostática são técnicas amplamente empregadas na conformação de peças cerâmicas a verde, devido ao custo relativamente baixo, alta velocidade de compactação e capacidade de produzir peças complexas (Melo *et al.*, 2018). A Figura 6 ilustra uma simulação

numérica da distribuição de densidade em um compacto a verde após o processo de compactação, onde o compacto foi inicialmente prensado uniaxialmente (para definir sua forma) e, em seguida, prensado isostaticamente duas vezes.

Figura 6 - Campos de densidade após prensagem

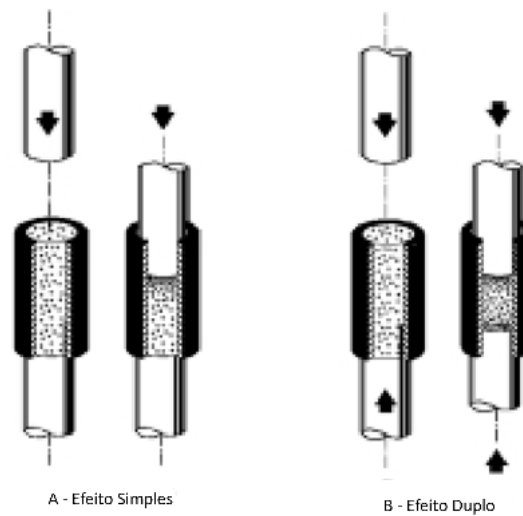


Fonte: Adaptado de Melo *et al.*, (2018).

Campo de densidade após: (a) prensagem e ejeção em matriz fechada (Uniaxial), (b) prensagem isostática a 25 MPa e (c) prensagem isostática á 200 MPa.

3.4.3.1 Prensagem Uniaxial

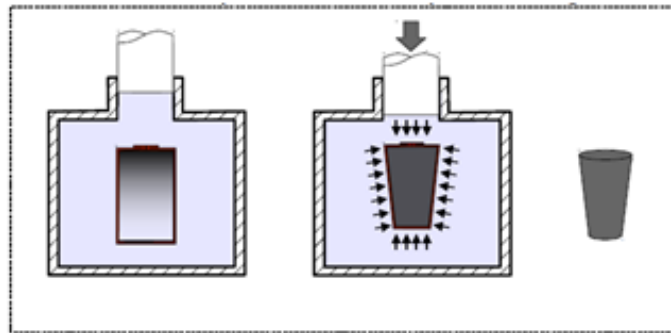
A compactação do pó ocorre em uma matriz rígida, através da aplicação de pressão axial por punções rígidos, conforme Figura 7. Esse processo é adequado para peças sem relevo superficial na direção da prensagem. Para peças finas e de geometria simples, a carga pode ser aplicada em apenas um sentido (ação simples). No entanto, para peças espessas e de geometria complexa, a uniformidade da compactação exige prensagem nos dois sentidos (dupla ação) ou o uso de um molde complexo com múltiplos punções. A força de atrito entre as partículas do pó e entre elas e a superfície do molde dificulta a transmissão integral e uniforme da pressão, resultando em gradientes de densidade nas peças conformadas (Albaro, 2001).

Figura 7 - Prensagem Uniaxial

Fonte: Adaptado de Albaro (2001).

3.4.3.2 Prensagem Isostática

A prensagem isostática é um processo de compactação de pó que utiliza um molde flexível e um fluido pressurizado para aplicar pressão uniforme em todas as direções, garantindo uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde, conforme Figura 8. Essa técnica é ideal para a fabricação de peças com geometrias complexas, incluindo relevos em múltiplas direções, e peças com alta relação de aspecto, como tubos e barras. Existem dois tipos principais de prensagem isostática: a frio, que ocorre à temperatura ambiente, e a quente, que ocorre em altas temperaturas, combinando pressão e calor para melhorar a densificação e as propriedades do material (Albaro, 2001).

Figura 8 - Prensagem Isostática

Adaptado de Melo *et al.* (2018).

3.4.3.3 Usinagem Verde

A usinagem de cerâmica, tradicionalmente focada no acabamento de peças sinterizadas, enfrenta desafios na produção de formas complexas devido ao risco de lascamento e trincas. Uma alternativa é a usinagem de cerâmica em estado verde, que explora a menor resistência mecânica do material para criar geometrias complexas com maior facilidade e eficiência. Essa técnica oferece vantagens significativas, como a redução de danos, alta taxa de remoção de material e flexibilidade na criação de formas complexas, superando as limitações dos métodos de conformação tradicionais. No entanto, o sucesso da usinagem a verde depende da seleção cuidadosa de aglomerantes, como álcool polivinílico e emulsões acrílicas, que influenciam a usinabilidade, resistência e plasticidade da peça, bem como do controle preciso dos parâmetros de corte, especialmente a velocidade, para evitar danos ao material. Em resumo, a usinagem de cerâmica em estado verde representa uma abordagem eficiente e versátil para a fabricação de peças cerâmicas complexas, desde que os aglomerantes e parâmetros de corte sejam rigorosamente controlados (Bukvic *et al.*, 2012).

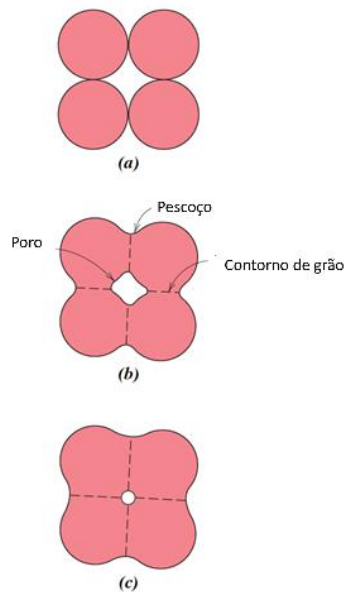
Paralelo a isso, esse processo é realizado antes da sinterização, busca precisão dimensional para evitar custos elevados da usinagem pós-queima. A qualidade da peça verde depende dos ligantes e da uniformidade da densidade, favorecida pela prensagem isostática. Ferramentas de diamante policristalino (PCD) ou nitreto de boro cúbico (CBN) são preferíveis devido à durabilidade superior em comparação com carbetos de tungstênio (WC) e cerâmicas, compensando o alto custo inicial. Diferente da usinagem de metais, a cerâmica verde fratura em vez de deformar,

gerando pó abrasivo influenciado pelos ligantes. A precisão é crucial para evitar trincas e tensões que comprometem a peça após a sinterização. A seleção de ferramentas de diamante ou CBN é essencial devido à abrasividade do pó cerâmico, garantindo maior durabilidade e qualidade do acabamento (Richerson; Lee, 2018).

3.4.4 Sinterização

Após a etapa de conformação, onde a cerâmica adquire sua forma final por meio de processos como prensagem ou moldagem e usinagem a verde, segue-se a sinterização. Essa fase confere ao material suas propriedades definitivas. A sinterização consiste no aquecimento controlado da peça cerâmica a temperaturas elevadas, mas abaixo do ponto de fusão. Esse tratamento térmico desencadeia um processo de coalescência, no qual as partículas individuais do material se fundem gradualmente, resultando em uma densificação significativa da estrutura, conforme ilustrado na Figura 9. Durante a sinterização, ocorre um fenômeno de difusão atômica, onde os átomos migram do interior das partículas para os pontos de contato entre elas. Esse movimento atômico leva à formação de "pescoços" entre partículas, que atuam como pontes de ligação, fortalecendo a união entre as partículas. À medida que a sinterização progride, esses "pescoços" crescem e se desenvolvem, culminando na formação dos contornos de grão que definem a microestrutura final da cerâmica. Esse processo transforma o pó compactado, inicialmente frágil e quebradiço, em um material sólido, rígido e estruturalmente robusto, adequado para diversas aplicações de engenharia.

Figura 9 - Representação do processo de sinterização



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013).

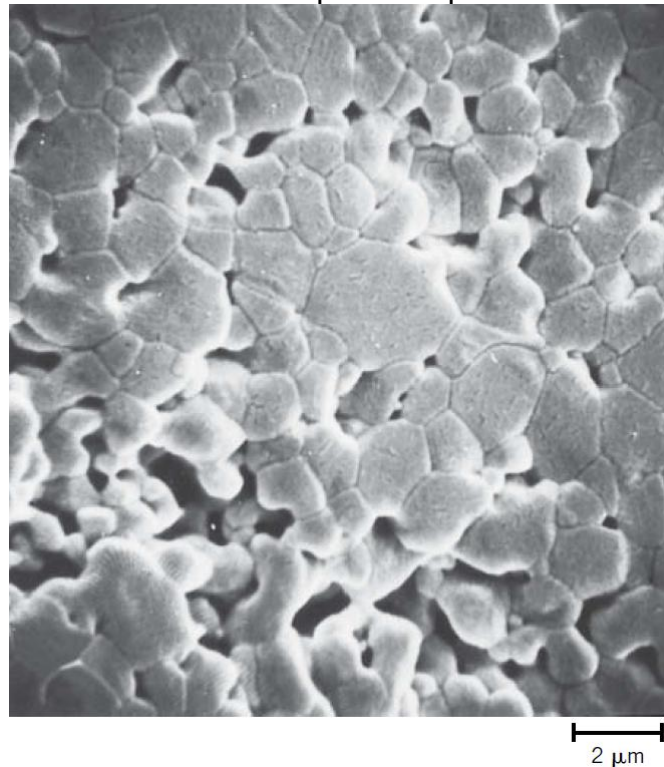
Mudanças microestruturais que ocorrem durante a sinterização de um compacto de pó

- a) Partículas de pó após a prensagem;
- (b) Início da sinterização: coalescência das partículas e formação de poros;
- (c) Progresso da sinterização: alteração no tamanho e forma dos poros seguido de retração do compacto cerâmico

A sinterização é realizada abaixo da temperatura de fusão. O transporte de massa necessário para efetuar as mudanças mostradas na Figura 9 é realizado por difusão atômica do interior das partículas para as regiões dos "pescoços" (Callister; Rethwisch, 2013).

Durante a sinterização, uma fronteira de grão se forma em cada "pescoço" de ligação, e cada interstício entre as partículas se torna um poro (Figura 9b). À medida que a sinterização progride, os poros diminuem de tamanho e se tornam mais esféricos (Figura 9c). Uma micrografia eletrônica de varredura (MEV) de um material de alumina sinterizado a 1700°C por 6 minutos ampliado em 5000x é mostrada na Figura 10 a força motriz para a sinterização é a redução da área superficial total das partículas; as energias de superfície são maiores em magnitude do que as energias de fronteira de grão (Callister; Rethwisch, 2013).

Figura 10 – MEV de um compacto de pó de óxido de alumínio



Fonte: Callister e Rethwisch (2013).

3.4.5 Métodos Abrasivos

3.4.5.1 Retificação

A retificação, um processo de usinagem, engloba diversos métodos, como a retificação plana, cilíndrica interna, cilíndrica externa, sem centros e de creep-feed. Todos esses métodos compartilham o princípio fundamental do uso de uma roda ou ferramenta circular que gira em torno do seu eixo, com sua borda em contato deslizante com a peça de trabalho. Essa ferramenta, que pode ser uma camada fina de alguns milímetros ou uma única camada de grãos abrasivos ligados, varia desde minúsculas ferramentas de perfuração revestidas com abrasivo até grandes rebois com mais de um metro de diâmetro. No processo de usinagem para metais, os abrasivos mais comuns são o óxido de alumínio e o carboneto de silício. No entanto, para cerâmicas avançadas, utilizam-se apenas superabrasivos como o diamante e o nitreto cúbico de boro (CBN), com o diamante sendo a principal escolha devido ao desgaste mais rápido do CBN (Jahanmir *et al.*, 1992).

A Tabela 4 apresenta ilustra os principais elementos e interações no processo de retificação. Ela está dividida em três seções principais: Dados de Entrada, Processo de Retificação e Resultado. como as características da máquina, da peça de trabalho, do rebolo, da ferramenta de dressagem e do fluido de arrefecimento influenciam o Processo de Retificação (através de dados como força, potência, desgaste e temperatura, além de perturbações como vibração e temperatura), resultando em determinadas características da peça de trabalho e do rebolo (Jahanmir *et al.*, 1992).

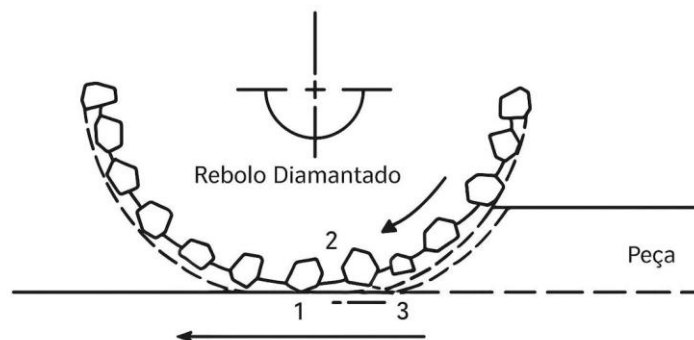
Tabela 4 - Elementos do processo de retificação

Entrada do Processo	Processamento	Saída do Processo
Máquina Tipo Propriedades	Dados do processo Força Potência Desgaste Temperatura Tempo de processo	Peça de Trabalho Precisão Dimensional Dimensão Acab. Superficial
Peça de Trabalho Geometria Material		
Rebolo Geometria Composição		
Ferramenta de Dressagem Tipo	Dados de perturbação Vibração Temperatura	Rêbolo Desgaste
Fluido de arrefecimento Tipo Aplicação		
		Fluido de Arrefecimento Contaminação

Fonte: Adaptado de Jahanmir et al., 1992.

Um modo de retificação para aplicação em cerâmicas avançadas é a retificação com alta profundidade de corte (creep-feed grinding). Com este método, pode-se obter uma taxa de remoção de material aumentada sem sacrificar a resistência e o acabamento superficial (Kong *et al.*, 1991). Na retificação com alta profundidade de corte, uma profundidade de corte muito grande é aplicada em baixas velocidades de avanço. Para materiais frágeis, utiliza-se a retificação concordante (down-grinding) para manter grande parte do material sob compressão, como ilustrado na Figura 11:

Figura 11 - Retificação com avanço lento



Fonte: Kong *et al.* (1991).

À medida que a peça de trabalho se move em direção ao rebolo, a maior parte do material é removida na frente do rebolo. As forças também são mais elevadas nessa localização. Progredindo em direção à parte inferior do rebolo, as forças diminuem rapidamente e a profundidade efetiva de retificação é reduzida. Desta forma, o dano é minimizado e a rugosidade da superfície é reduzida. Isso foi claramente demonstrado por König e Wemhoner (1989) em experimentos de retificação em carbetos de silício siliconizados. O efeito da profundidade de corte e da taxa de avanço no dano é ilustrado na Figura 11. Neste exemplo, a taxa de remoção de material foi mantida constante através do balanceamento da taxa de avanço e da profundidade de corte. A resistência característica é significativamente maior em grandes profundidades de corte e baixas taxas de avanço.

3.4.5.1.1 Caracterização da retificação

A natureza intrinsecamente dura e frágil dos materiais cerâmicos implica que o processo de retificação frequentemente introduz imperfeições na sua estrutura. Conforme observado por Zhang et al. (2003), defeitos como fissuras na superfície, danos subsuperficiais e tensões residuais podem ser gerados, impactando negativamente a resistência e a longevidade dos componentes cerâmicos.

Nesse contexto, um dos objetivos primordiais da retificação reside na atenuação desses danos processuais, buscando a minimização do parâmetro h_{max} (Guo; Chand, 1998). No entanto, essa abordagem, embora benéfica para a integridade do material, geralmente acarreta taxas de remoção de material mais lentas, o que se contrapõe ao desejo industrial de aumentar a produtividade.

Ademais, a relação G assume um papel de destaque econômico, visto que um valor elevado desse índice se traduz em maior vida útil do rebolo. Dessa forma, a busca pela maximização da relação G se configura como um objetivo crucial na aplicação da retificação em ambientes industriais, complementando a necessidade de altas taxas de remoção e a minimização dos danos induzidos durante o processo (Subhash *et al.*, 1999).

3.4.5.1.2 Relação G

O desempenho de um rebolo pode ser avaliado pela relação G , definida como a razão entre o volume de material removido (Z_w) e o volume de rebolo gasto (Z_s) (Ramesh *et al.*, 2001), conforme equação (6).

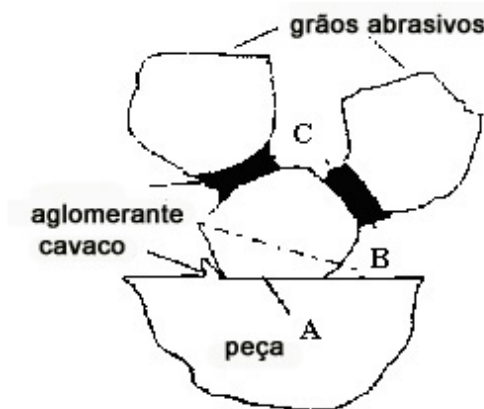
$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (6)$$

Os mecanismos de desgaste das partículas abrasivas acontecem em três tipos: desgaste por atrito, fratura dos grãos e remoção do grão da liga ("pullout"), conforme ilustrado na Figura 12 (Shibata, 1998 apud Fujita, 2007).

O aquecimento nas regiões periféricas do diamante pode favorecer a grafitização, acelerando o desgaste por atrito. Essas cargas térmicas podem ser causadas por ligas com alto poder de retenção (ligas metálicas), diamantes com elevada tenacidade (que não renovam as arestas de corte) ou elevadas velocidades de corte associadas à refrigeração deficiente (Meyer; Klocke, 1998)

A– Desgaste por atrito; B – Fratura do grão; C – Fratura da liga devido ao desgaste

Figura 12 - Fatores que proporcionam desgaste do rebolo.



Fonte: Shibata (1998) apud FUJITA (2007).

A relação G na retificação de cerâmicas é influenciada por alguns fatores, incluindo profundidade e velocidade de corte. Observou-se um aumento da relação G com a profundidade de corte em altas velocidades, mas um decréscimo ao comparar alumina e zircônia, atribuindo isso à diferença nos mecanismos de remoção (frágil para alumina e dúctil com maior desgaste por atrito para zircônia). Um aumento da relação G com a velocidade de corte para alumina, zircônia e carbeto de silício também foi reportado, explicando que velocidades maiores mantêm a força no grão abaixo do limite de arrancamento, maximizando a relação G . No entanto, uma redução da relação G com o aumento da velocidade de corte na retificação de nitreto de silício e zircônia foi encontrada, justificada pelo aumento da distância de deslizamento (L_s), que se correlaciona diretamente com o desgaste por atrito, especialmente em materiais com remoção predominantemente dúctil. A equação (7) define a distância de deslizamento (L_s) em função da velocidade de corte (V_s), profundidade de corte (t), diâmetro do rebolo (D_s) e espaçamento entre os grãos abrasivos (L_c) (Huang; Liu, 2003).

$$LS = \frac{Lc \times Vs \times t}{\pi \times Ds} \quad (7)$$

3.4.5.1.3 Rugosidade

A rugosidade da superfície retificada, que representa o desvio da sua forma ideal, é comumente avaliada por meio de analisadores de contato mecânico e sistemas ópticos. O parâmetro mais utilizado para quantificar a rugosidade é a média aritmética dos desvios (R_a). Em cerâmicas retificadas no modo dúctil, a rugosidade tende a ser anisotrópica, apresentando valores diferentes dependendo da direção da medição, ao contrário da rugosidade mais uniforme (isotrópica) observada no modo frágil. As diretrizes para a medição da rugosidade em materiais cerâmicos são detalhadas na norma ISO 4287/1 (Marinescu *et al.*, 1998; Kajornchaiyakul, 2000; blaedel *et al.*, 1999).

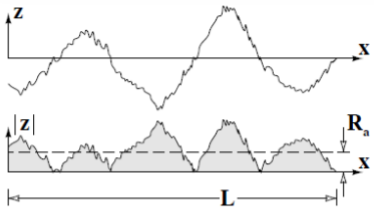
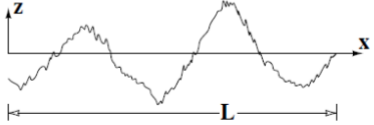
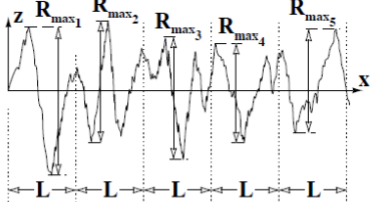
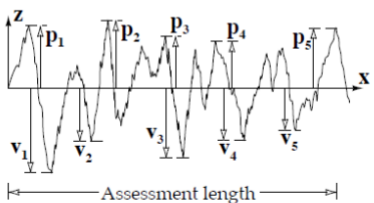
A rugosidade da superfície é diretamente influenciada pelas condições do processo de retificação e pelas características do material. Materiais cerâmicos mais dúcteis geralmente resultam em superfícies mais lisas, e a microestrutura do material, especialmente o tamanho dos grãos, desempenha um papel importante na determinação da rugosidade final. A escolha adequada do fluido refrigerante e do tipo de rebolo também são fatores determinantes. Estudos indicam que o aumento da velocidade de corte tende a reduzir a rugosidade da superfície. Contudo, em processos em que a remoção de material ocorre predominantemente por fratura frágil, a velocidade de corte pode não ter um impacto significativo na rugosidade, enquanto no modo dúctil, um aumento na velocidade de corte pode levar a uma diminuição da rugosidade (Tönshoff *et al.*, 1999; Jahanmir; *et al.*, 1999; Ramesh *et al.*, 2001; Huang; *et al.*, 2003).

A identificação clara da transição entre os modos de remoção frágil e dúctil na retificação é complexa, sendo dificultada por fatores como a variação na altura dos grãos abrasivos, a precisão do posicionamento das ferramentas e a ocorrência de vibrações. O aumento da velocidade de corte, embora possa ser benéfico em certos aspectos, também pode ser limitado pelo surgimento de vibrações que prejudicam o acabamento superficial. Na retificação de carbetos de silício, a velocidade da peça, a profundidade de corte e o tamanho dos grãos abrasivos são considerados os

principais fatores que afetam a integridade da superfície (Huang *et al.*, 2003; Tönshoff *et al.*, 1996; Gopal *et al.*, 2003).

Diversas técnicas e parâmetros foram estabelecidos para a caracterização topográfica de superfícies. Entre os mais conhecidos, destacam-se os parâmetros estatísticos destinados à quantificação de um valor de rugosidade. Em muitas aplicações de engenharia, o parâmetro de rugosidade média, R_a , é o mais amplamente utilizado. O R_a representa a média das alturas dos picos e das profundidades dos vales em relação a uma linha média, ao longo de um determinado comprimento de análise. Uma vantagem do R_a é que o impacto de um único pico ou vale atípico é minimizado no valor final devido ao cálculo da média. Contudo, essa mesma média constitui uma desvantagem, pois superfícies com perfis topográficos distintos podem apresentar valores de R_a idênticos. Além do R_a , outros parâmetros também são empregados, como a raiz quadrada da rugosidade média (R_q ou RMS), o valor médio da altura máxima entre picos e vales (R_t), a média da altura de dez pontos (R_z), e outros parâmetros que estão resumidos na Figura 13 (Souza, 2016).

Figura 13 - Parâmetros bidimensionais de rugosidade

Rugosidade média (R_a ou CLA)	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L z dx$	
Rugosidade média quadrática (R_q ou RMS)	$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$	
Rugosidade total (R_t)	Maior altura de pico à vale entre cinco períodos subsequentes $R_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{max_i}$	
Média de dez pontos (R_z)	Média dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos em um dado comprimento amostral $R_z = \frac{p_1 + \dots + p_5 + v_1 + \dots + v_5}{5}$	

Fonte: Souza (2016).

3.4.5.2 Brunimento

O brunimento, assim como a retificação, também utiliza abrasivos fixos; e para aplicação em cerâmicas avançadas, o diamante é o abrasivo de escolha. Grande parte da discussão sobre retificação também se aplica ao brunimento. A principal diferença entre brunimento e retificação é a velocidade superficial muito menor empregada no brunimento. Esse processo, em geral, não é usado para remover grandes quantidades de material. Sua principal aplicação é na obtenção de um acabamento superficial desejado e na correção de erros de tolerância dimensional deixados por outros métodos de usinagem mais rápidos. A aplicação mais frequente do brunimento é no acabamento de superfícies cilíndricas internas; o brunimento das paredes dos cilindros de motores de automóveis é um exemplo notável. Aplicações como esta podem ser altamente automatizadas com controle completo sobre todos os aspectos do processo, incluindo a medição automática das dimensões da peça. O brunimento também é aplicado a superfícies externas, por exemplo, no acabamento de dentes de engrenagens, válvulas e as superfícies externas de pistas de rolamentos de esferas e rolos.

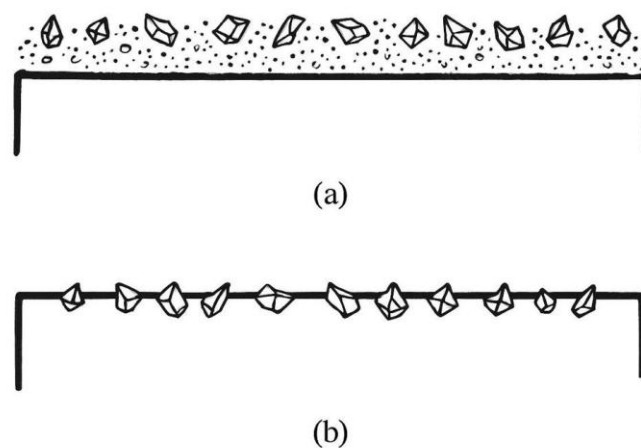
Uma vantagem que o brunimento tem sobre a retificação é a pequena quantidade de calor produzida, já que o brunimento é uma operação de baixa velocidade em comparação com a retificação. Assim, danos e distorção da peça associados ao aquecimento são minimizados. O fato de o brunimento envolver pouco aquecimento também influencia os requisitos do fluido de corte. Há menos preocupação com os requisitos de resfriamento; mas aditivos são necessários para conferir lubricidade. Assim como na retificação, não parece ter havido esforços especiais para desenvolver fluidos de brunimento especificamente para aplicação em cerâmicas avançadas (Jahanmir *et al.*, 1992).

3.4.5.3 Lapidação e Polimento

Similar ao brunimento, a lapidação configura-se amplamente como um processo de acabamento aplicado a peças que já alcançaram dimensões próximas às finais. A lapidação distingue-se do brunimento por empregar um processo abrasivo solto ou livre. A execução da lapidação envolve o pressionamento da peça de trabalho

contra uma superfície rígida, frequentemente confeccionada em ferro fundido e recoberta por uma pasta contendo partículas abrasivas. Uma parcela dessas partículas incrusta-se na superfície da ferramenta de lapidação, exercendo uma ação de corte sobre a peça. Outras partículas, ao rolar entre as duas superfícies, também participam do processo de remoção de material. Uma distinção, por vezes estabelecida, entre lapidação e polimento reside no emprego de uma superfície macia e flexível para o polimento, em contraposição a uma superfície mais dura e rígida para a lapidação (Jahanmir *et al.*, 1992 apud Fujita, 2007). A lapidação é utilizada para alcançar tolerâncias precisas, eliminar danos superficiais e aprimorar o acabamento. O polimento, por sua vez, destina-se primordialmente à remoção de danos e à obtenção de superfícies extremamente lisas. A Figura 14 ilustra esquematicamente esses processos (Jahanmir *et al.*, 1992).

Figura 14 - Esquema do processo de lampeamento e polimento



Fonte: Rostoker *et al.*, (1987) apud, Jahanmir *et al.*, (1992).

Desenvolvimentos no âmbito da lapidação e do polimento de cerâmicas avançadas têm direcionado seus esforços para o aprimoramento da classificação do tamanho do grão abrasivo, a integração de processos químico e mecânico combinados, e o refinamento do projeto de máquinas (Jahanmir *et al.*, 1992).

A relevância da uniformidade do tamanho do grão é inequívoca. Uma distribuição de tamanho restrita minimiza a probabilidade de ranhuras na superfície polida causadas por partículas abrasivas de dimensões excessivas. A uniformidade

do tamanho do grão revela-se igualmente crucial para a consecução de elevada precisão e planicidade nas operações de lapidação e polimento (Jahanmir *et al.*, 1992).

As evoluções no projeto de máquinas nos últimos anos têm priorizado a lapidação e o polimento com tolerâncias rigorosas e elevada produtividade de amostras. As modernas máquinas de lapidação de alta precisão enfatizam um substrato firme para o abrasivo, condição essencial para a manutenção de tolerâncias apertadas, o que também impõe a necessidade de um tamanho de abrasivo uniforme. A operação automatizada recebe destaque, e busca-se a simplificação da sequência usual de substituições de abrasivos, de tamanhos mais grossos para mais finos, visando otimizar a eficiência da produção (Jahanmir *et al.*, 1992).

3.5 Atrito

Em 1699, Guillaume Amontons formulou as duas leis clássicas do atrito: (a) a força de atrito é diretamente proporcional à carga normal aplicada e (b) a força de atrito é independente da área aparente de contato (Hutchings, 1992; Seireg, 1998).

Embora influentes, essas "leis" não se aplicam universalmente, especialmente sob condições extremas de alta velocidade ou grande variação de carga normal. Diversos cientistas contribuíram para a compreensão do atrito. Robert Hooke analisou o atrito de rolamento, identificando o escoamento da pista e a adesão como componentes. Leonhard Euler distinguiu o atrito estático do dinâmico e introduziu o coeficiente de atrito (μ). Charles August Coulomb investigou a influência da natureza dos materiais, da área de contato, da carga normal e do tempo de contato estático (Hutchings, 1992).

Atualmente, o efeito dessas e outras variáveis continua sendo estudado, sendo complexo isolar uma única variável em experimentos de atrito devido às suas interações. Por exemplo, o aumento da carga normal pode elevar a taxa de desgaste, assim como o aumento da velocidade de deslizamento pode elevar a temperatura na interface.

A Tabela 5 resume os fatores que influenciam o coeficiente de atrito, cuja importância relativa varia conforme o tribossistema. Dada a multiplicidade de

variáveis, conclui-se que o coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim do sistema como um todo.

O papel da rugosidade superficial no atrito permanece um tópico de pesquisa ativo. Em alguns sistemas, observa-se uma correlação direta entre a rugosidade inicial e o atrito. Contudo, em outros, o desgaste altera rapidamente a topografia da superfície, tornando inadequada qualquer tentativa de relacionar a rugosidade inicial com o coeficiente de atrito (Sedlacek, 2009).

Tabela 5 - Fatores que influenciam o coeficiente de atrito

Categoria	Fator
Mecânica	Geometria de contato: Macro, micro, nano
	Distribuição de carga e pressão de contato em diversas escalas
	Histórico de carregamento
	Dinâmica do sistema: Vibração, rigidez, amortecimento, histerese,
	Tipo de movimento e perfil de velocidade
Material	Afinidade dos materiais
	Composição química e pureza dos materiais
	Características adesivas
	Microestrutura e tamanho das características microestruturais em relação ao tamanho do tribocontato
	Propriedades elasto-plásticas dos materiais
	Gradiente de propriedade na região limítrofe de contato
	Propriedades termo-físicas: Condutividade térmica, expansão térmica, etc.
	Acabamento da superfície
Efeitos Térmicos	Tensão residual na região limítrofe de contato
	Aquecimento por atrito
	Aquecimento de fontes externas
	Instabilidade termo-elástica
	Transformação de fase induzido por calor: Amolecimento e Derretimento
	Ativação triboquímica
	Choque térmico durante o carregamento cíclico
Lubrificação	Quantidade
	Regime de lubrificação
	Propriedade do lubrificante
	Composição do lubrificante
	Envelhecimento do lubrificante
	Pureza do lubrificante
Triboquímica	Umidade relativa
	Reatividade da superfície
	Limpeza
	Composição do meio circunvizinho
	Tribopolimerização
	Formação de polímeros de atrito
Terceiro corpo	Filmes de óxido
	Transferência e formação de partículas
	Mecânica e lubrificação da camada triboformada
	Concentração e aglomeração de partículas de desgaste
	Tamanho, forma e morfologia das partículas
	Contaminantes externos
	Movimentação do terceiro corpo para dentro ou para fora do contato

Fonte: Souza (2016).

3.6 Ferramentas Estatísticas

3.6.1. Capacidade do Processo (CP e CPK)

Os índices Cp e Cpk são as principais métricas para avaliar a capacidade de um processo em atender às especificações do produto. O Cp foca exclusivamente na dispersão do processo em relação aos limites de especificação, medindo a capacidade potencial que o processo pode alcançar se estiver perfeitamente centralizado. Já o Cpk oferece uma avaliação mais realista, pois considera tanto a dispersão quanto o desvio do centro do processo em relação ao alvo das especificações, medindo a capacidade real do processo. Essa distinção é crucial porque uma dispersão excessiva dificulta a produção de peças conformes, mesmo que o processo esteja teoricamente capaz. Portanto, o Cp indica o potencial, enquanto o Cpk reflete o desempenho efetivo do processo, conforme a Tabela 6. (Rocha, 2019)

Tabela 6 -Possibilidades dos dois índices: Cp e Cpk

CPK	Alto	Não existe	Monitorar
	Baixo	Atuar no processo para reduzir dispersão (aumentar Cp) e somente depois atuar no Cpk	Centralizar processo para aumentar Cpk
		Baixo	Alto
		CP	

Fonte: Rocha (2019).

O cálculo do índice Cp, que avalia a dispersão do processo em relação às especificações, é feito comparando a largura da variação natural do processo com a largura da faixa de especificação. Um Cp ideal indica que a variação do processo é significativamente menor que a tolerância especificada, permitindo que o processo opere com folga dentro dos limites aceitáveis. O cálculo do índice Cpk, que avalia a dispersão do processo em relação às especificações, é feito comparando a largura da variação natural do processo com a largura da faixa de especificação. Um Cp ideal

indica que a variação do processo é significativamente menor que a tolerância especificada, permitindo que o processo opere com folga dentro dos limites aceitáveis. Por exemplo, se uma peça tem uma especificação de 9,90 mm a 10,10 mm (uma faixa de 0,20 mm) e a variação natural do processo está entre 9,90 mm e 10,02 mm (uma faixa de 0,12 mm), ao dividir a largura da especificação (LSE/LIE) pela largura da variação do processo (LNS/LNI) (0,20 mm / 0,12 mm), obtemos um valor de 1,67. Isso significa que a variação natural do processo cabe 1,67 vezes dentro da faixa de especificação, indicando uma boa capacidade potencial do processo, conforme equação 8 (Rocha, 2019).

$$CP = \frac{LSE - LIE}{LNS - LNI} \quad (8)$$

Visto que o afastamento total entre os limites naturais é de seis desvios-padrões (± 3 para cada lado), temos Cp conforme a equação 9.

$$CP = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (9)$$

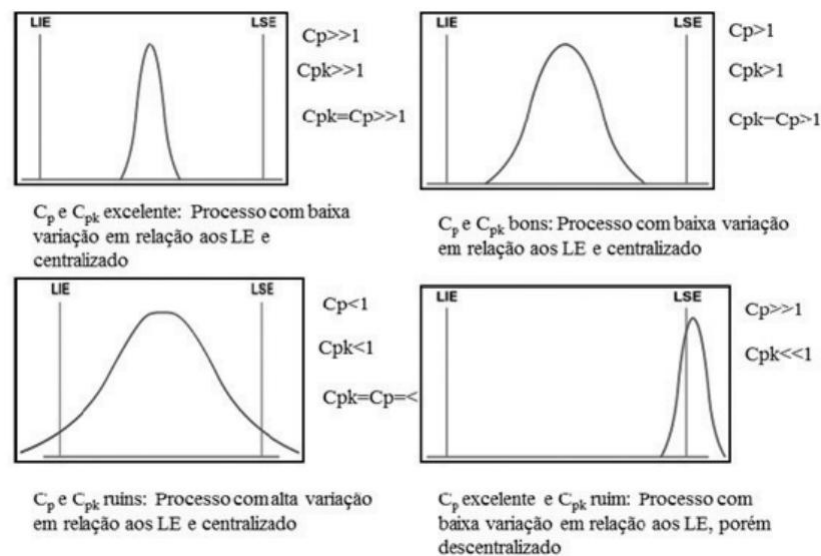
O índice Cpk, ao contrário do Cp, avalia a capacidade real de um processo, considerando não apenas a dispersão dos dados, mas também o quão bem o processo está centralizado em relação às especificações. Um processo com um Cp baixo inevitavelmente terá um Cpk baixo, indicando uma incapacidade fundamental de atender às especificações devido à sua ampla variação. No entanto, um Cp alto, que sinaliza uma boa capacidade potencial de dispersão, não garante um Cpk alto. Isso ocorre porque, mesmo com pouca variação, o processo pode estar deslocado do centro das especificações, resultando em muitos itens fora da conformidade. A lógica do cálculo do Cpk foca na "capacidade do processo para ambos os lados" das especificações. Em um processo descentralizado, um dos lados da distribuição dos resultados estará mais próximo do limite de especificação (inferior ou superior) do que o outro, representando o maior risco de produzir itens não conformes. A preocupação principal reside nesse lado mais crítico, com menor "folga" em relação ao limite. Calcula-se uma medida para o limite superior e outra para o limite inferior, e o valor final do Cpk é determinado pela pior dessas duas situações, conforme equação 10. Em um processo perfeitamente centralizado dentro das especificações, as distâncias

para ambos os limites serão iguais, e o cálculo do Cpk poderá ser feito em qualquer um dos lados. Em resumo, o Cpk oferece uma visão mais precisa da capacidade do processo em entregar consistentemente produtos dentro das especificações, levando em conta tanto a variabilidade quanto a centralização, conforme equação 10, onde μ = média do processo. e σ = desvio do processo (Rocha, 2019).

$$CPK = \text{Min} \left[\frac{LSE - \mu}{3\sigma} \right]; \left[\frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right] \quad (10)$$

A Figura 15 mostra a capacidade de um processo no que diz respeito a sua curva normal. Costa, Epprecht e Vasconcellos Aput Rocha (2019) estabeleceram uma classificação de processos com respeito à sua capacidade, como mostrado na Tabela 7.

Figura 15 - Processo capaz e não capaz



Fonte: Rocha (2019)

Tabela 7 -Classificação de processos quanto a sua capacidade

Classificação	Cpk	Itens fora da especificação (partes por milhão)	
		Especificação bilateral e processo centrado	Processo não centrado e/ ou especificação unilateral
Capaz	$\geq 1,33$	70	35
Razoavelmente capaz	$1 \leq Cpk < 1,33$	Entre 70 e 2.700 E	Entre 35 e 1.350
Incapaz	< 1	> 2.700	> 1.350

Fonte: Rocha (2019).

3.6.2. Testes de Hipóteses

Um teste de hipótese é uma regra objetiva de decisão estatística que ajuda pesquisadores a decidir se aceitam ou rejeitam uma afirmação (hipótese) sobre uma ou mais populações, com base em dados de amostras aleatórias. Ele calcula a probabilidade de os resultados observados serem devidos ao acaso, assumindo que a hipótese inicial (nula) seja verdadeira (Assis; Sousa; Linhares, 2020).

Inicialmente, um teste de hipóteses define a hipótese nula (H_0), frequentemente postulando a igualdade de um parâmetro a um valor de referência ou a ausência de diferença entre parâmetros comparados. Em essência, H_0 assume a inexistência de efeito, alteração ou disparidade no fenômeno investigado. Por exemplo, ao comparar os níveis de colesterol entre indivíduos ativos e sedentários, a hipótese nula seria a de que não há diferença entre os grupos. A decisão de aceitar ou rejeitar H_0 é balizada por um critério predefinido. Convém notar que o conceito de "igualdade" geralmente reside na formulação da hipótese nula, que é assumida como verdadeira a priori no processo de teste (Zanetta, 2022).

Após a formulação da hipótese nula (H_0), o próximo passo é o estabelecimento da hipótese alternativa (H_A). Como o próprio nome sugere, a hipótese alternativa se contrapõe diretamente à hipótese nula. Ela postula que um parâmetro populacional é diferente de um determinado valor ou que a diferença entre dois parâmetros populacionais não é zero, indicando, portanto, a existência de uma diferença real entre os grupos ou variáveis em estudo. Retomando o exemplo do parágrafo acima, enquanto a hipótese nula afirmava a igualdade nos níveis de colesterol entre indivíduos ativos e sedentários, a hipótese alternativa seria que o nível sérico de colesterol de pessoas que se exercitam é diferente do de pessoas sedentárias. Quando os dados amostrais coletados se mostram incompatíveis com a hipótese nula, levando à sua rejeição, a conclusão estatística é que os resultados da amostra fornecem suporte à hipótese alternativa.

Uma vez estabelecidas as hipóteses H_0 e H_A a etapa subsequente envolve a consideração dos possíveis erros inerentes ao processo de decisão em testes de hipóteses. Os erros do Tipo I (erro α) e Tipo II (erro β), são igualmente aplicáveis ao contexto dos testes de hipóteses, conforme ilustrado na Tabela 8, que relaciona esses tipos de erros com as possíveis decisões em um teste de hipóteses (Zanetta, 2022).

Tabela 8 - Tipos de Erros em testes de hipóteses

Decisão estatística	Natureza (estado verdadeiro e desconhecido)	
	Hipótese nula verdadeira	Hipótese nula falsa
Aceitar hipótese nula	Acerto	Erro Tipo II (β)
Rejeitar hipótese nula	Erro Tipo I (α)	Acerto

Fonte: Zanetta (2022).

Especificamente, se a decisão do teste for que o nível sérico de colesterol de pessoas ativas e sedentárias é diferente, mas essa diferença observada for unicamente atribuível ao acaso, ocorre um erro do Tipo I. Por outro lado, se a conclusão for que os níveis são iguais, quando na verdade existe uma diferença real entre os dois grupos na população, configura-se um erro do Tipo II (Zanetta, 2022).

O nível de significância (α) é um valor de probabilidade preestabelecido pelo pesquisador antes da coleta dos dados. Ele representa a probabilidade máxima de rejeitar a hipótese nula quando ela é, na verdade, verdadeira (erro do Tipo I). É o limiar que define o quão rara ou improvável uma amostra deve ser (sob a premissa de que a hipótese nula é verdadeira) para que se decida rejeitar H_0 . Valores comuns para α são 0,05 (5%) e 0,01 (1%). O p-valor (valor-p ou probabilidade crítica) é a probabilidade de obter uma estatística de teste (ou um resultado amostral) tão extrema quanto ou mais extrema do que a observada na amostra, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Em outras palavras, ele quantifica a evidência contra a hipótese nula fornecida pelos dados amostrais. A regra de decisão fundamental para um teste de hipóteses usando o nível de significância e o p-valor é: Se o p-valor for menor ou igual ao nível de significância ($p\text{-valor} \leq \alpha$), rejeita-se a hipótese nula (H_0). Isso indica que os dados amostrais fornecem evidências estatisticamente significativas contra H_0 . Se o p-valor for maior que o nível de significância ($p\text{-valor} > \alpha$), não se rejeita a hipótese nula (H_0). Isso não significa que H_0 seja verdadeira, apenas que os dados amostrais não fornecem evidências suficientemente fortes para rejeitá-la (Assis; Sousa; Linhares, 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

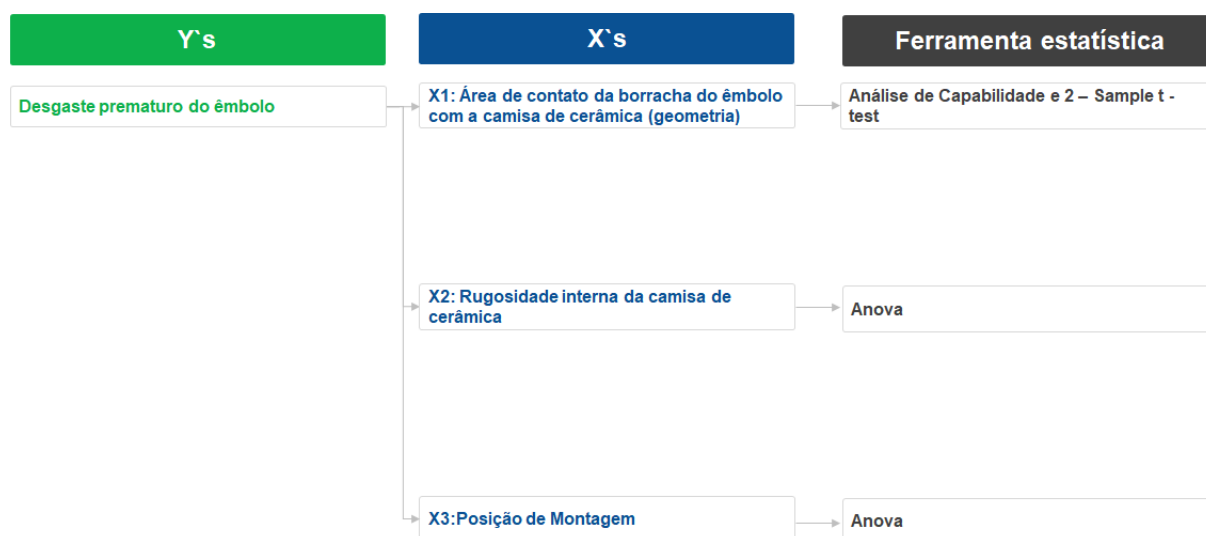
Este capítulo descreve os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados na primeira etapa desta dissertação. O objetivo principal desta fase consiste na fabricação de camisas cerâmicas com diferentes níveis de rugosidade superficial, seguida pela caracterização dimensional precisa tanto das camisas quanto dos êmbolos correspondentes, sob condições ambientais controladas. As amostras produzidas e caracterizadas nesta etapa servirão como base fundamental para os ensaios mecânicos subsequentes, que visam analisar o atrito e o aquecimento no conjunto êmbolo-camisa.

O primeiro ensaio realizado empregou camisas fabricadas conforme as especificações de projeto atuais, com uma rugosidade de 0,2 μm . Utilizando uma bomba do modelo JP da marca Jacto, com vazão de 300 L/min, o objetivo foi avaliar o impacto da área de contato de dois modelos distintos de êmbolos, fabricados em fluoroelastômero – Viton: o êmbolo do tipo copo (EC) e o êmbolo do tipo plano (EP). A análise focou no aquecimento e no desgaste dos referidos componentes.

O segundo ensaio utilizou o êmbolo com o melhor desempenho identificado no teste anterior, variando-se o acabamento superficial das camisas cerâmicas. O objetivo principal foi validar como diferentes níveis de rugosidade superficial da camisa influenciam e potencialmente aceleram o desgaste do êmbolo.

O terceiro ensaio utilizou novamente o êmbolo de melhor desempenho e as camisas com a menor rugosidade obtida. O objetivo foi avaliar a influência da posição de montagem dos componentes e validar a existência de diferenças estatísticas na montagem de cada êmbolo nas seis posições disponíveis nas camisas.

Para fins metodológicos, cada ensaio subsequente foi conduzido utilizando seis conjuntos mecânicos completos (camisa – êmbolo). As hipóteses levantadas foram validadas por meio de um teste estatístico do tipo teste t de duas amostras (2-Sample t-test), apropriado para conjuntos de dados com distribuição normal, comparando as médias dos grupos analisados. A figura 16 demonstra a árvore de análises utilizadas para embasamento. Esse método é frequentemente aplicado em projetos Six Sigma para a organização e o gerenciamento dos testes conduzidos.

Figura 16 - Árvore de Análises

Fonte: Autor.

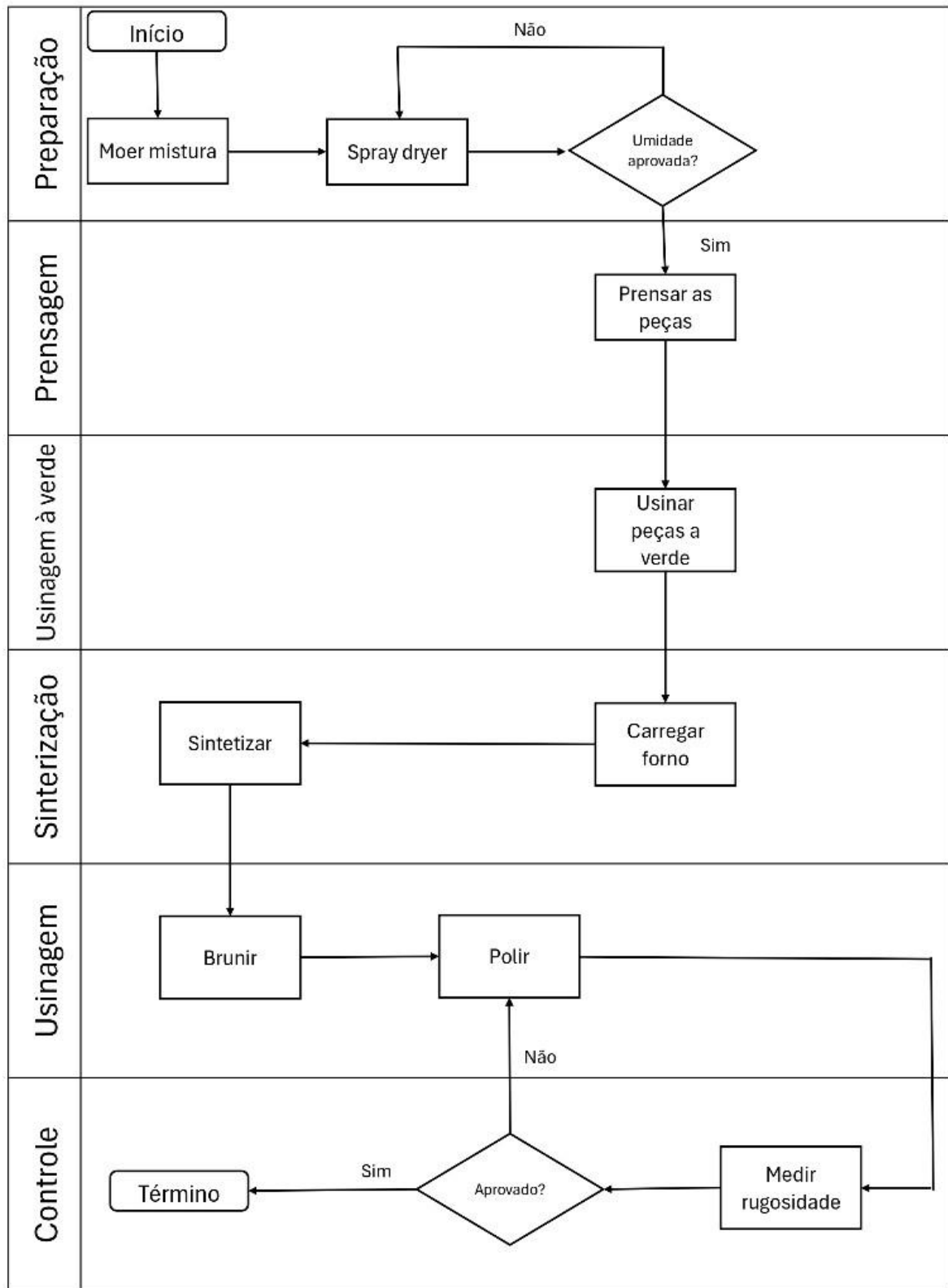
4.1. Fabricação das Camisas

As camisas cerâmicas foram fabricadas seguindo o fluxograma apresentado na Figura 17. Devido a sigilo industrial, os controles empregados no processo de fabricação das camisas cerâmicas e dos êmbolos de viton não serão totalmente informados, no entanto, esses componentes são de fácil obtenção em revendedores master da marca Jacto através dos códigos de referência 32139 e 322925. As camisas selecionadas foram caracterizadas e apresentaram resultados conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades Físicas das Camisas

Propriedades	Resultado
Matéria Prima	Alumina com adição de Caulin, Talco e Carbonato de Cálcio.
Densidade aparente	3,70 g/cm ³
Porosidade aparente	0,15%
Absorção d'água	0,05%
Resistência ao esmagamento radial	230 MPa
Dureza	1339 HV
Diâmetro do grão após sinterização	1,57 µm
Estrutura Cristalina	Alumina alfa que se cristaliza no sistema hexagonal compacto

Fonte: Autor.

Figura 17 - Fluxograma do processo de fabricação das camisas.

Fonte: Autor.

4.1.1. Preparação da Massa

Para a fabricação das camisas cerâmicas, a preparação do pó envolve a mistura de diversos materiais. A base é a alumina calcinada CT-800SG, que compõe a maior parte da mistura. A ela são adicionados caulim, talco, carbonato de cálcio e pequenas quantidades de outros aditivos como defloculantes, antiespumante, cera e corante. Após a combinação, a mistura é submetida a uma moagem de 72 horas em moinho de bolas. Nesse processo, as esferas cerâmicas reduzem o tamanho dos grãos do pó. O processo é rigorosamente controlado para assegurar que as características do material, como densidade, umidade, granulometria, fluidez e porosidade, estejam adequadas para a fabricação.

4.1.2. Prensagem

No processo de prensagem isostática, a busca pelo melhor parâmetro de conformação envolve testes de pressão que variam de 600 a 1000 bar. Durante esses testes, monitoramos a retração do material após a sinterização, o que nos permite compreender o comportamento de retração de cada lote de pó cerâmico. Essa análise é essencial para definir a pressão ideal que assegure as especificações geométricas necessárias para a etapa de usinagem pós-forno.

A prensagem isostática se distingue pela aplicação de uma força uniforme em todas as partes do material, promovida por um fluido que comprime o pó dentro de um molde flexível de borracha.

A dosagem de pó para a fabricação da camisa cerâmica é de 300 gramas, admitindo-se uma variação de ± 15 gramas. O ciclo de compactação para este produto é padronizado em 60 segundos. A prensagem foi realizada de acordo com a máquina ilustrada na Figura 18

Figura 18 - Prensa Isostática



Fonte: Autor

4.1.3. Usinagem a Verde

Através do torneamento CNC com inserto de carboneto de tungstênio VCGX, realiza-se a usinagem da camisa prensada. Este processo de remoção de material garante a correção das dimensões dentro das geometrias especificadas.

4.1.4 Sinterização

A sinterização no forno Nutec Bicley segue um ciclo térmico precisamente definido. Inicialmente, a temperatura é elevada para 150 °C, mantida por 0,1 hora, resultando em um tempo acumulado de 0,1 hora. A temperatura então sobe para 200 °C, com uma permanência de 1,3 horas (tempo acumulado de 1,4 horas). A próxima etapa envolve atingir 250 °C, com duas fases de manutenção: a primeira por 2,5 horas (tempo acumulado de 3,9 horas) e a segunda por 1 hora (tempo acumulado de 4,9 horas). Segue-se um aumento para 450 °C, mantido por 2 horas (tempo acumulado de 6,9 horas), e depois para 900 °C, com duas fases de manutenção de 3,6 horas (tempo acumulado de 10,5 horas) e 0,5 horas (tempo acumulado de 11

horas). A fase de alta temperatura prossegue com 1250 °C por 3 horas (tempo acumulado de 14 horas), seguido por 1500 °C por 2,3 horas (tempo acumulado de 16,3 horas) e, finalmente, 1550 °C á 1600 °C por 1,5 horas (tempo acumulado de 17,8 horas) e depois por 3 horas (tempo acumulado de 20,8 horas). O resfriamento ocorre em etapas, retornando a 1250 °C por 2,7 horas (tempo acumulado de 23,5 horas) e depois por 1 hora (tempo acumulado de 24,5 horas), seguido por 570 °C por 6,2 horas (tempo acumulado de 30,7 horas) e, por fim, o resfriamento para 200 °C por 4,1 horas (tempo acumulado de 34,8 horas). A sinterização foi efetuada com a máquina apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Processo de sinterização



Fonte: Autor.

4.1.5 Usinagem

Nesta seção, detalharemos os métodos de usinagem empregados para alcançar níveis de rugosidade (R_a) de 1,0, 0,5, 0,2 e 0,1 μm . O processo padrão atual visa a rugosidade de 0,2 μm . Para todos os ensaios, o sobre material foi de 0,6 mm, e o diâmetro nominal da peça foi de 57,01 mm.

4.1.5.1 Desbaste para rugosidade de 1,0 μm

No ensaio de desbaste, a brunidora vertical Engis utilizou óleo de corte ECOCOL sintético da "FUCHS" a 12%, e empregou uma bucha de diamante "single pass" com diâmetro de 1.6220", comprimento de 11.00" e altura do diamante de 151 μm . A remoção de sobrematerial ocorreu em 6 passes. O controle dimensional interno foi feito com súbito Mitutoyo (35-60) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com um parâmetro de brunimento de 500 r.p.m., que resultou em um diâmetro nominal da peça de 57.01mm e uma rugosidade de 1.0 μm .

4.1.5.2 - Desbaste e Acabamento para rugosidade de 0,5 μm

Para o ensaio de desbaste e acabamento, a brunidora vertical Engis utilizou o mesmo óleo de corte a 12%. A ferramenta de desbaste foi uma bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 151 μm), e a remoção de 0.1mm ocorreu em 5 passes. O controle dimensional interno foi realizado com súbito Mitutoyo (35-60) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com um parâmetro de brunimento de incremento de 3mm/s. Para a etapa de acabamento, a mesma brunidora e óleo foram utilizados, com uma bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 80 μm), e a remoção de 0.05mm ocorreu em 2 passes. O controle dimensional interno permaneceu com os mesmos equipamentos, e o parâmetro de brunimento de 500 r.p.m. resultou em um diâmetro da peça de 57.01mm e uma rugosidade de 0.5 μm .

4.1.5.3 - Desbaste, Acabamento e Polimento - para rugosidade de 0,2 μm

No ensaio de desbaste, acabamento e polimento, a brunidora vertical Engis e o óleo de corte a 12% foram utilizados. A ferramenta de desbaste foi a mesma bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 151 μm), e a remoção de 0.1mm ocorreu em 4 passes. O controle dimensional interno foi feito com súbito Mitutoyo (35-60) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com parâmetro de brunimento de incremento de 3mm/s. Para o acabamento, a mesma brunidora e óleo foram utilizados, com uma bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 80 μm), e a remoção de 0.05mm ocorreu

em 2 passes. A etapa de polimento empregou a brunidora horizontal Brunitec e o mesmo óleo, com uma pastilha expansiva diamantada (60mm x 5mm x 1mm, grão 5 μm), e a remoção de 0.01mm ocorreu em 10 passes. O controle dimensional foi realizado com súbito Mitutoyo (2-6) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com um parâmetro de brunimento de 15 oscilações por avanço, que resultou em um diâmetro da peça de 57.01mm e uma rugosidade de 0.2 μm .

4.1.5.4 - Desbaste, Acabamento e Polimento *para* rugosidade de 0,1 μm

O ensaio de desbaste, acabamento e polimento para atingir uma rugosidade de 0,1 μm iniciou com a brunidora vertical Engis e o óleo de corte a 12%. A ferramenta de desbaste foi a bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 151 μm), e a remoção de 0.1mm ocorreu em 4 passes. O controle dimensional interno foi feito com súbito Mitutoyo (35-60) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com parâmetro de brunimento de incremento de 3mm/s. Para o acabamento, a mesma brunidora e óleo foram utilizados, com uma bucha de diamante "single pass" (1.6220" x 11.00", 80 μm), e a remoção de 0.05mm ocorreu em 2 passes. A etapa final de polimento utilizou a brunidora horizontal Brunitec e o mesmo óleo, com uma ferramenta expansiva diamantada (60mm x 5mm x 1mm, grão 1 μm), e a remoção de 0.005 mm ocorreu em 20 passes. O controle dimensional foi realizado com súbito Mitutoyo (2-6) e rugosímetro Mitutoyo SJ-310, com um parâmetro de brunimento de 15 oscilações por

avanço, que resultou em um diâmetro da peça de 57.01mm e uma rugosidade de 0.1 μm .

As Figuras 20 e 21 ilustram os equipamentos empregados no processo de usinagem.

Figura 20 - Brunidora vertical Engis (Desbaste / Acabamento)



Fonte: Autor.

Figura 21 - Brunidora horizontal Brunitec (Polimento)



Fonte: Autor.

4.2. Análise Dimensional dos componentes mecânicos

As análises dimensionais foram conduzidas no laboratório de Qualidade das Máquinas Agrícolas Jacto, com a temperatura ambiente mantida sob rigoroso controle entre 19 °C e 21 °C, visando minimizar os efeitos da dilatação térmica. A verificação das dimensões foi realizada utilizando uma bancada tridimensional CNC, fabricada por Hexagon Metrology Spa modelo Global S Green 12-22-10, capaz de efetuar medições com tolerâncias na ordem de micrômetros (milésimos de milímetro), conforme ilustrado na Figura 22. Adicionalmente, para avaliar o acabamento superficial dos componentes, empregou-se um rugosímetro de bancada, conforme figura 23, fabricado Mitutoyopor modelo SJ-310. Este instrumento determina a rugosidade superficial Ra, um parâmetro que quantifica a textura da superfície através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos do perfil de rugosidade em relação a uma linha média, dentro de um comprimento de amostragem preestabelecido, nesse caso, utilizou-se 20mm, O método de medição envolve um apalpador com ponta de diamante que percorre a superfície, gerando um perfil de rugosidade a partir do qual o valor de Ra é calculado. No que se refere ao componente

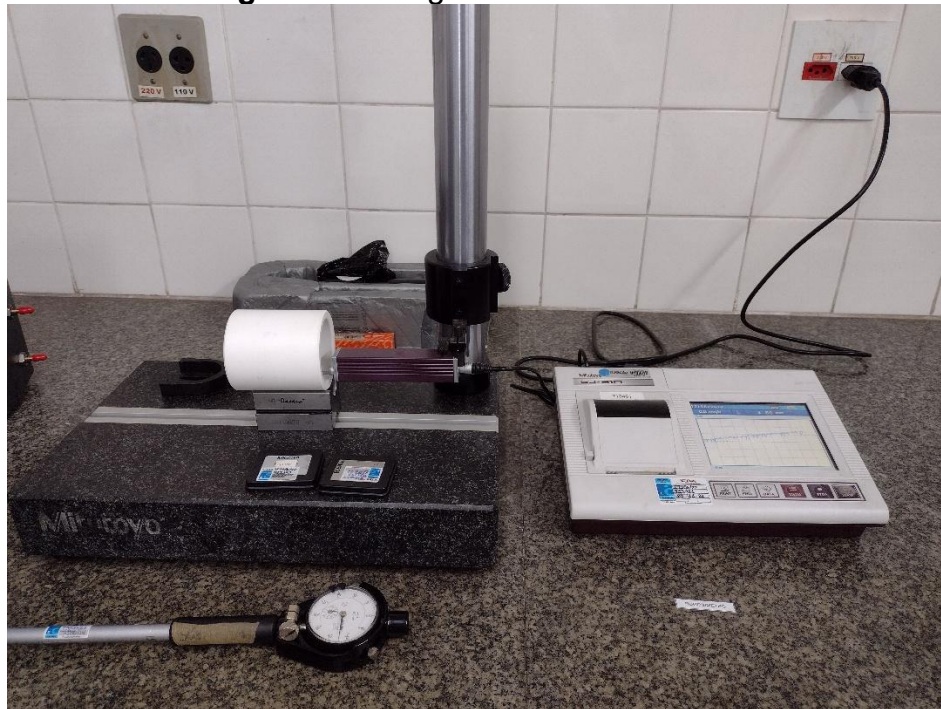
principal, as camisas, foram selecionadas 30 amostras para análise. Para os êmbolos, optou-se por analisar 10 amostras de cada modelo.

Figura 22 - Bancada Tridimensional CNC



Fonte: Autor

Figura 23 – Rugosímetro de Bancada



Fonte: Autor

4.3. Determinação da área de contato superficial

Nessa seção será apresentado a metodologia para definir a área de contato dos dois modelos de êmbolo empregados nessa pesquisa.

4.3.1. Êmbolo do tipo copo (EC).

Para determinar a área de contato superficial entre os componentes, especificamente para o êmbolo EC, considerou-se um sistema com êmbolo e camisa de formato cilíndrico e um encaixe perfeito, onde apenas a superfície lateral do êmbolo estabelece contato com a superfície interna da camisa. Nessas condições, a área de contato entre eles corresponde à área da superfície lateral do êmbolo, a qual pode ser calculada conforme a Equação 11.

$$A = 2\pi rH \quad (11)$$

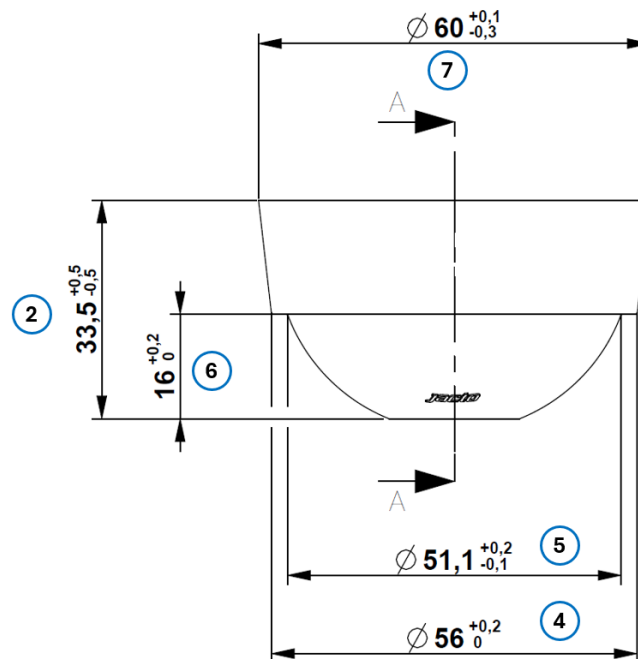
A Figura 21 ilustra a vista lateral do êmbolo do tipo copo (EC), onde:

(A) representa a área da superfície lateral do cilindro, expressa em mm².

(r) representa o raio da base circular do cilindro, definido como a distância do centro do círculo até qualquer ponto de sua borda. Este valor, dado em mm, é detalhado no requisito 7 da Figura 24.

(H) representa a altura do cilindro, definida como a distância perpendicular entre as duas bases circulares. Este valor, dado em mm, é obtido pela subtração dos valores correspondentes aos requisitos 2 e 6 da Figura 24.

Figura 24 - Vista lateral êmbolo do tipo copo (EC)



Fonte: Autor

4.3.2. Êmbolo do tipo plano (EP).

Para determinar a área de contato superficial entre os componentes, especificamente para o êmbolo do tipo plano (EP), considerou-se um sistema com êmbolo e camisa de formato cilíndrico e um encaixe perfeito, onde apenas a superfície lateral do êmbolo estabelece contato com a superfície interna da camisa. Nessas condições, a área de contato de um único êmbolo corresponde à área da sua superfície lateral, calculada pela Equação 12. É importante destacar que, como são

utilizados dois êmbolos por camisa, a área de contato total para o sistema EP é o dobro do valor obtido pela equação.

$$A = 4\pi rH \quad (12)$$

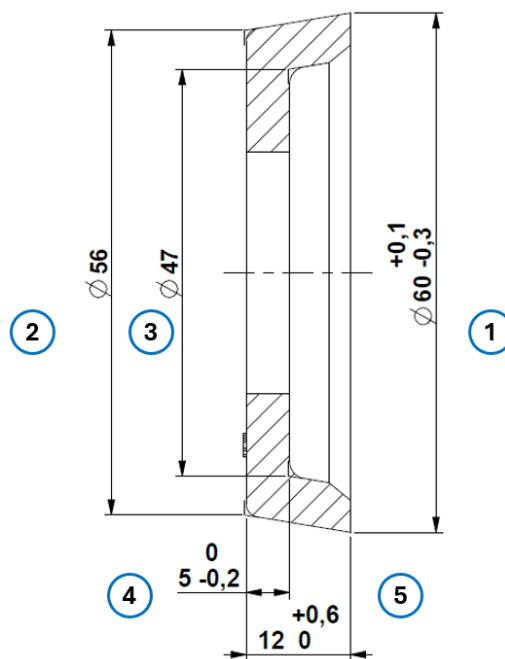
A Figura 22 ilustra uma das vistas do êmbolo do tipo plano (EP), onde:

(A) representa a área da superfície lateral do êmbolo, expressa em mm².

(r) representa o raio da base circular do cilindro, definido como a distância do centro do círculo até qualquer ponto de sua borda. Este valor, dado em mm, é detalhado no requisito 1 da Figura 25.

(H) representa a altura do cilindro, definida como a distância perpendicular entre as duas bases circulares. Este valor, dado em mm, é obtido pelo requisito 5 da Figura 25.

Figura 25 - Vista em corte êmbolo do tipo plano (EP)



Corte A-A

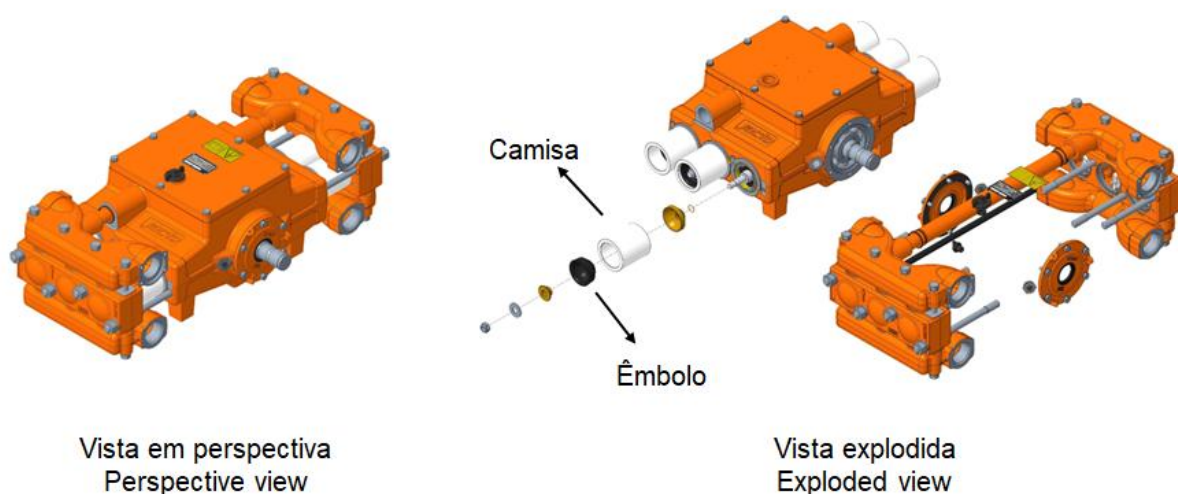
Section A-A

Fonte: Autor

4.4. Preparação para Ensaio Mecânicos

Após a caracterização dimensional, os conjuntos êmbolo-camisa fabricados com os diferentes níveis de rugosidade foram cuidadosamente limpos e preparados para a etapa subsequente de ensaios mecânicos. Estes ensaios visam caracterizar o aquecimento gerado na interface de contato sob diversas condições de operação e fabricação. Inicialmente, para os testes, montou-se uma bomba Jacto, modelo JP 300, utilizando 06 conjuntos êmbolo-camisa, conforme figura 26.

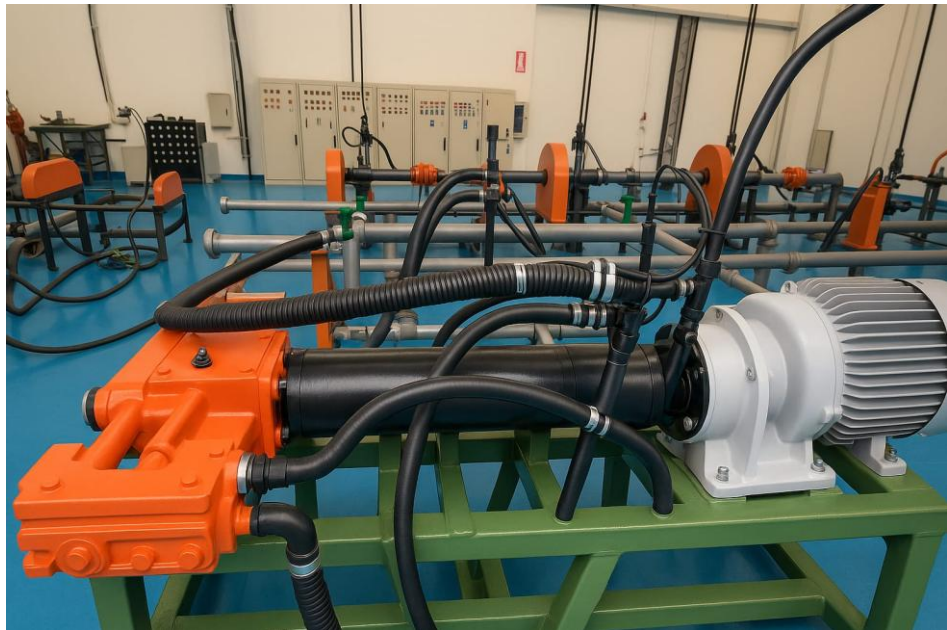
Figura 26 - Ilustração bomba JP 300



Fonte: Autor

Após as montagens dos componentes, a bomba foi aplicada em uma bancada de ensaios projetada pelo setor de validação de produtos da Máquinas Agrícola Jacto, composta por um motor trifásico, responsável por acionar a bomba e simular as condições de operação; um cardã do tipo convencional, utilizado como eixo de transmissão flexível para transferir o torque do motor para a bomba, tolerando desalinhamentos; um comando principal, que permite o controle e a operação da bancada, incluindo o acionamento do motor e o ajuste de parâmetros; e um reservatório de água com capacidade de 4000 litros, onde a água foi preparada com 1% de oxicloreto de cobre, simulando a composição de defensivos agrícolas, conforme figura 27.

Figura 27 - Bancada de ensaios de bombas



Fonte: Autor

A pressão de saída da bomba foi ajustada em 210 psi (limite máximo de trabalho). Este fluido pressurizado foi utilizado nos ensaios da bomba, garantindo um suprimento contínuo para a simulação das condições de bombeamento e a análise do desempenho dos componentes em contato com a solução sob condições extremas de pressão. Esse volume é importante para não aquecer a solução a ponto de influenciar no resultado do ensaio.

A coleta de dados de temperatura foi realizada de forma horária, ao longo de um período de 08 horas consecutivas, em cada uma das 6 camisas em teste simultaneamente. Para essa medição, foram utilizados dois instrumentos: uma câmera térmica Fluke Ti401 PRO, para obter uma visão geral da distribuição de temperatura na superfície dos componentes, e um termômetro MT 350, para leituras pontuais e mais precisas em áreas específicas de interesse, conforme figura 28.

Figura 28- Câmera Térmica e Termômetro MT-350A



Fonte: Autor

Devido à disponibilidade de apenas uma bancada de teste, que permitia a avaliação de uma variável por rodada, a temperatura ambiente foi considerada para fins comparativos. Em suma, o aquecimento foi avaliado subtraindo-se a temperatura ambiente da temperatura de trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios, conduzidos conforme a metodologia detalhada no item 4.

5.1 Resultados dimensionais.

5.1.1. Êmbolo do tipo copo (EC)

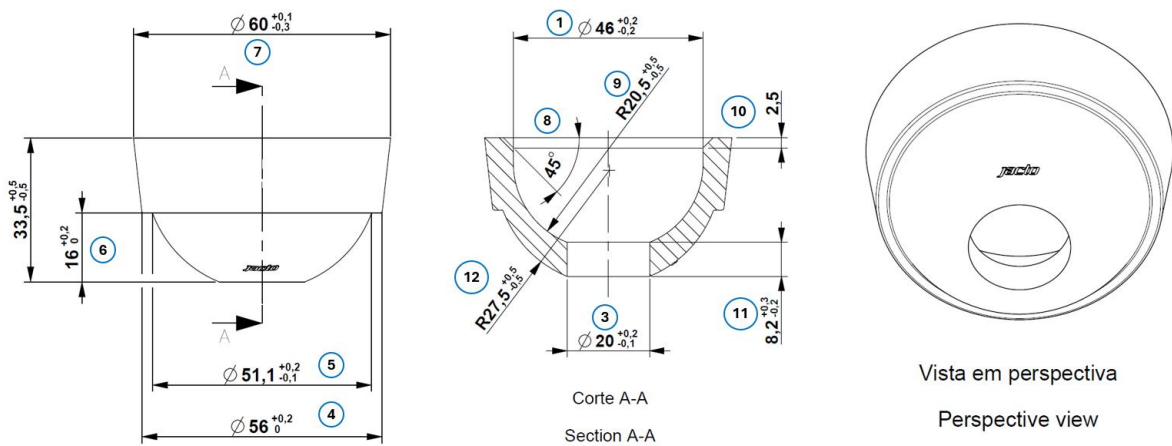
Os resultados dimensionais das 10 amostras ensaiadas estão apresentados na Tabela 10. A área de contato foi calculada com base na média dos valores obtidos nos requisitos da Figura 29.

Tabela 10 - Resultado dimensional êmbolo copo (EC)

Valores esperados				Instrumento de medição	Medições										Resultados			
Cota	Nominal	Tol -	Tol +		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Valor médio	Valor Mínimo	Valor máximo	Desvio
1	46,000	-0,200	0,200	Tridimensional	46,100	46,092	46,065	46,059	46,090	46,082	46,109	46,048	46,036	46,080	46,076	46,036	46,109	0,024
2	33,500	-0,500	0,500	Tridimensional	34,170	34,334	34,336	34,691	34,420	34,187	35,046	33,777	33,900	34,147	34,301	33,777	35,046	0,367
3	20,000	-0,100	0,200	Tridimensional	20,071	20,037	20,066	20,045	20,032	20,058	20,014	20,030	20,052	19,956	20,036	19,956	20,071	0,033
4	56,000	0,000	0,200	Tridimensional	56,124	56,268	56,034	56,181	56,260	56,158	56,168	56,189	56,094	56,194	56,167	56,034	56,268	0,071
5	51,100	-0,100	0,200	Tridimensional	50,981	50,992	50,930	51,531	51,539	50,997	51,547	50,975	50,974	50,962	51,143	50,930	51,547	0,274
6	16,000	0,000	0,200	Tridimensional	15,955	16,121	15,879	16,271	16,225	16,104	16,398	15,709	15,911	15,985	16,056	15,709	16,398	0,207
7	60,000	-0,300	0,100	Tridimensional	59,542	59,614	59,386	59,584	59,701	59,606	59,812	59,560	59,613	59,668	59,609	59,386	59,812	0,111
8	45°	-1°	1°	Tridimensional	45,639	45,922	46,310	46,273	45,216	45,805	45,420	46,109	45,349	45,372	45,741	45,216	46,310	0,403
9	20,500	-0,500	0,500	Tridimensional	20,238	19,979	20,064	20,418	20,047	20,134	20,059	20,170	20,405	20,208	20,172	19,979	20,418	0,149
10	2,500	-0,200	0,200	Tridimensional	2,496	2,534	2,536	2,578	2,530	2,522	2,568	2,537	2,492	2,582	2,538	2,492	2,582	0,031
11	8,200	-0,200	0,300	Tridimensional	9,696	9,828	9,710	10,031	9,892	9,752	10,513	9,378	9,450	9,715	9,796	9,378	10,513	0,316
12	27,500	-0,500	0,500	Tridimensional	26,893	26,941	26,855	27,354	27,356	26,925	27,414	26,945	26,906	26,913	27,050	26,855	27,414	0,226
h	17,500	-0,500	0,300	Medição indireta	18,215	18,213	18,457	18,420	18,195	18,083	18,648	18,069	17,989	18,162	18,245	17,989	18,648	0,203

Fonte: Autor

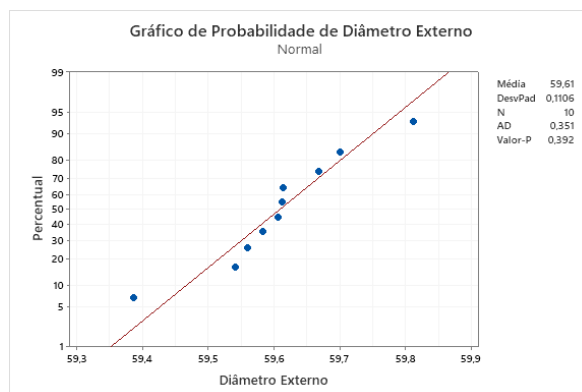
Figura 29 - Requisitos dimensionais êmbolo do tipo copo (EC)



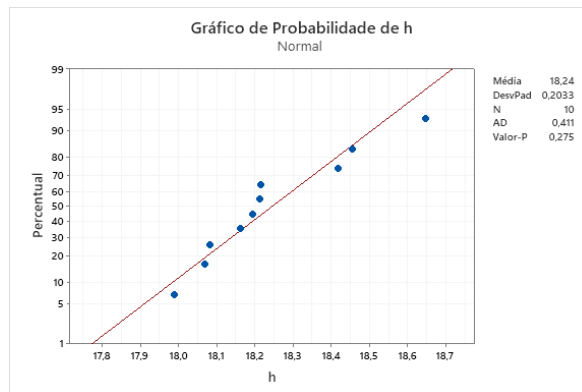
Fonte: Autor

A análise estatística demonstrou que tanto o diâmetro externo do êmbolo (requisito 7) quanto a espessura de contato (h), definida pela diferença entre os requisitos 6 e 2, apresentam distribuição normal (p -valor $> 0,05$ nas Figuras 30 e 31). No entanto, a baixa capacidade do processo (C_{pk}) identificada nas Figuras 32 e 33 indica uma ampla variação dimensional, sinalizando incerteza na fabricação dos êmbolos do tipo copo e demandando a medição individual de amostras para a avaliação da área de contato média de cada componente. Observa-se que o diâmetro interno tende a ser repuxado após a remoção do molde, resultando em uma curva normal deslocada para a esquerda, enquanto a espessura tende a apresentar excesso de material de contato, com uma curva normal deslocada para a direita.

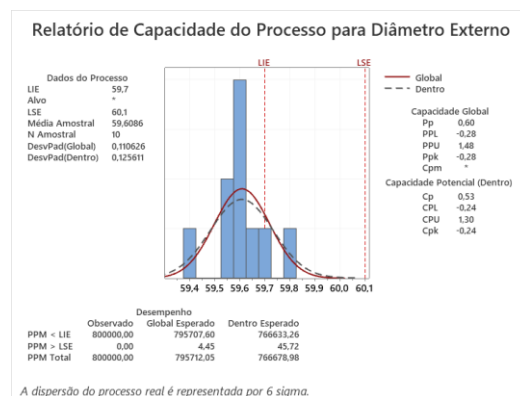
Figura 30 - Teste de normalidade diâmetro externo (EC)



Fonte: Autor

Figura 31 -Teste de normalidade espessura h (EC)

Fonte: Autor

Figura 32 - Capacidade do processo diâmetro externo (EC)

Fonte: Autor

Figura 33 - Capacidade do processo espessura h (EC)

Fonte: Autor

5.1.2. Êmbolo do tipo plano (EP)

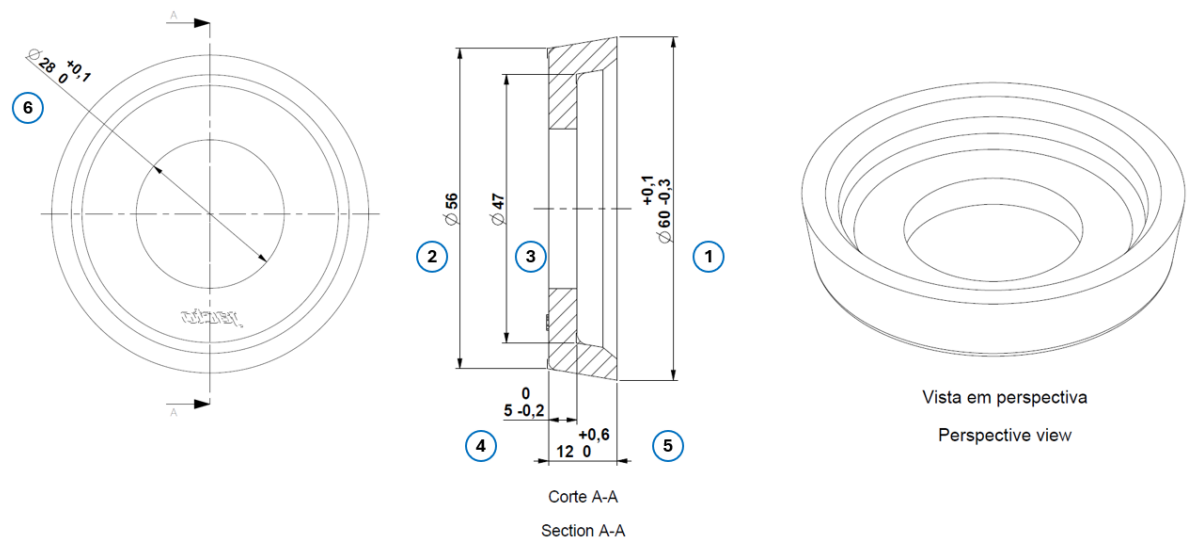
Os resultados dimensionais das 10 amostras ensaiadas estão apresentados na Tabela 11. A área de contato foi calculada com base na média dos valores obtidos nos requisitos da Figura 34.

Tabela 11- Resultado dimensional êmbolo plano (EP)

Valores esperados				Instrumento de medição	Medições										Resultados			
Cota	Nominal	Tol -	Tol +		Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7	Peça 8	Peça 9	Peça 10	Valor médio	Valor Mínimo	Valor máximo	Desvio
1	Ø60	-0,300	0,100	Tridimensional	59,400	59,500	59,100	59,200	59,100	59,150	59,000	59,100	59,300	59,050	59,190	59,000	59,500	0,161245155
2	Ø56	-0,300	0,100	Tridimensional	56,100	56,250	56,300	56,300	56,350	56,250	56,200	56,200	56,250	56,250	56,245	56,100	56,350	0,068516016
3	Ø47	0,100	0,000	Tridimensional	47,150	47,050	47,100	47,150	47,200	47,100	47,050	47,100	47,200	47,100	47,120	47,050	47,200	0,053748385
4	5	-0,200	0,000	Tridimensional	4,910	5,130	4,980	5,050	4,930	4,730	5,120	5,090	4,830	5,170	4,994	4,730	5,170	0,143619869
5 (h)	12	0,000	0,600	Tridimensional	12,100	12,250	12,050	12,150	12,000	11,900	12,200	12,200	11,950	12,300	12,110	11,900	12,300	0,132916014
6	Ø28	0,000	0,100	Tridimensional	28,100	28,050	28,100	28,100	28,050	28,100	28,150	28,100	28,050	28,100	28,090	28,050	28,150	0,031622777

Fonte: Autor

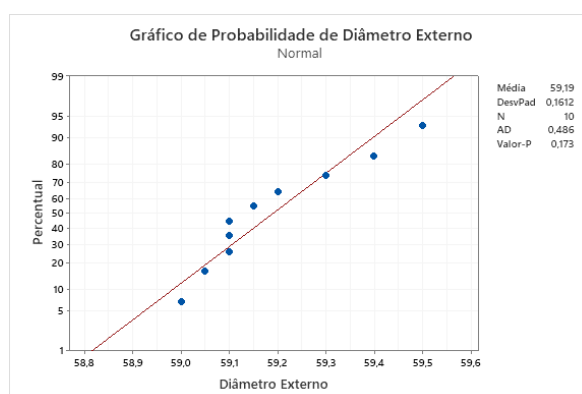
Figura 34 - Requisitos dimensionais êmbolo do tipo plano (EP)



Fonte: Autor

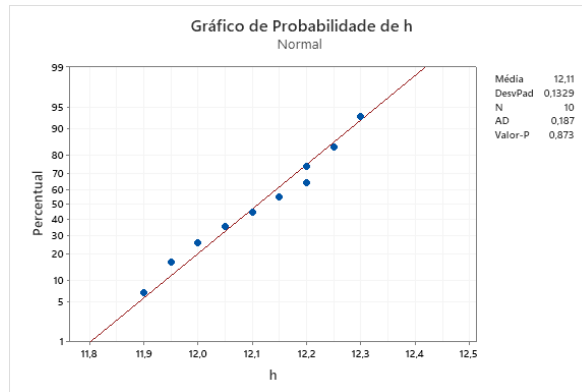
A análise estatística demonstrou que tanto o diâmetro externo do êmbolo (requisito 1) quanto a espessura de contato h (requisito 5), apresentam distribuição normal (p -valor $> 0,05$ nas Figuras 35 e 36). No entanto, a baixa capacidade do processo (C_{pk}) identificada nas Figuras 37 e 38 indica uma ampla variação dimensional, sinalizando incerteza na fabricação dos êmbolos do tipo plano e demandando a medição individual de amostras para a avaliação da área de contato média de cada componente. Observa-se que o diâmetro interno tende a ser repuxado após a remoção do molde, resultando em uma curva normal deslocada para a esquerda, enquanto a espessura tende a apresentar equilíbrio no material de contato, com uma curva normal centralizada.

Figura 35 - Teste de normalidade diâmetro externo (EP)



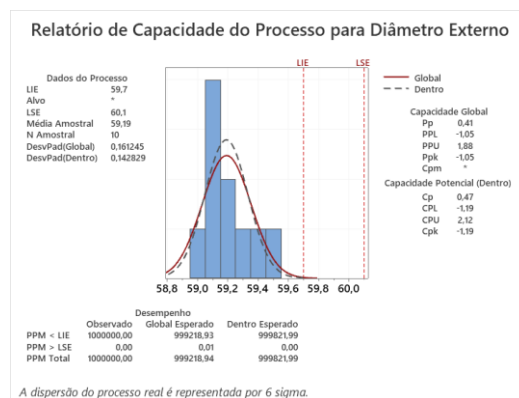
Fonte: Autor

Figura 36 -Teste de normalidade espessura h (EP)



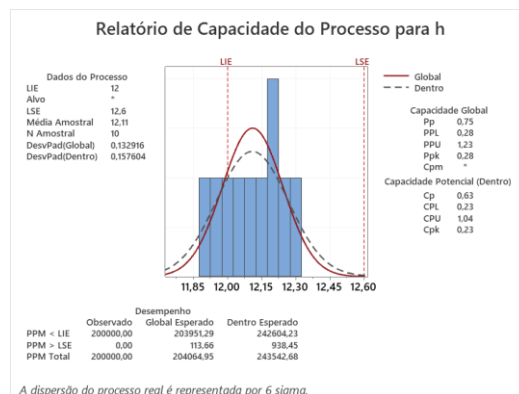
Fonte: Autor

Figura 37 - Capacidade do processo diâmetro externo (EP)



Fonte: Autor

Figura 38 - Capacidade do processo espessura h (EP)



Fonte: Autor

5.1.3. Camisa de Cerâmica

A camisa, componente principal deste estudo, foi submetida a ensaios estatísticos em uma amostra de 30 unidades. Os resultados dos requisitos testados são detalhados na Tabela 12 e ilustrados na Figura 39.

Tabela 12 - Resultado dimensional camisa

Valores esperados				Instrumento de medição	Medições					
Cota	Nominal	Tol -	Tol +		1	2	3	4	5	6
1	57	0	0,05	Tridimensional	57,025	57,028	57,021	57,030	57,024	57,019
2	Perfil	0,01		Tridimensional	0,018	0,009	0,013	0,010	0,013	0,012
3	Perpendicularidade	0,1		Tridimensional	0,074	0,021	0,032	0,071	0,033	0,047
4	82	0	0,3	Tridimensional	82,155	82,123	82,099	82,120	82,121	82,157
5	Paralelismo	0,1		Tridimensional	0,039	0,054	0,112	0,024	0,040	0,069
6	2	-0,5	0	Convencional	1,700	1,600	1,600	1,500	1,600	1,600
7	30°	0	15°	Convencional	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000
8	R2	-0,5	0,5	Convencional	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	Tridimensional	74,123	74,127	74,124	74,127	74,122	74,117
10	Posição	Ø0,15		Tridimensional	0,017	0,049	0,007	0,031	0,012	0,030
11	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,410	1,370	1,380	1,340	1,500	1,040
12	Rugosidade	0,2		Rugosimetro	0,260	0,240	0,220	0,200	0,210	0,190
13	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,360	1,140	1,350	1,190	1,220	1,260

Cota	Nominal	Tol -	Tol +		7	8	9	10	11	12
1	57	0	0,05	Tridimensional	57,022	57,026	57,031	57,023	57,027	57,020
2	Perfil	0,01		Tridimensional	0,016	0,013	0,009	0,014	0,016	0,022
3	Perpendicularidade	0,1		Tridimensional	0,050	0,053	0,083	0,028	0,016	0,045
4	82	0	0,3	Tridimensional	82,131	82,133	82,125	82,179	82,161	82,156
5	Paralelismo	0,1		Tridimensional	0,068	0,033	0,038	0,059	0,014	0,085
6	2	-0,5	0	Convencional	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
7	30°	0	15°	Convencional	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000
8	R2	-0,5	0,5	Convencional	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	Tridimensional	74,136	74,132	74,104	74,132	74,129	74,072
10	Posição	Ø0,15		Tridimensional	0,024	0,014	0,022	0,020	0,129	0,002
11	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,250	1,250	1,330	1,340	1,230	1,260

12	Rugosidade	0,2		Rugosimetro	0,220	0,210	0,210	0,260	0,270	0,250
13	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,060	1,430	1,170	1,190	1,290	1,350

Cota	Nominal	Tol -	Tol +		13	14	15	16	17	18
1	57	0	0,05	Tridimensional	57,029	57,025	57,026	57,022	57,028	57,024
2	Perfil	0,01		Tridimensional	0,017	0,012	0,013	0,013	0,017	0,014
3	Perpendicularidade	0,1		Tridimensional	0,033	0,031	0,005	0,038	0,041	0,065
4	82	0	0,3	Tridimensional	82,176	82,182	82,184	82,121	82,154	82,150
5	Paralelismo	0,1		Tridimensional	0,047	0,073	0,047	0,029	0,020	0,078
6	2	-0,5	0	Convencional	1,600	1,600	1,600	1,700	1,600	1,600
7	30°	0	15°	Convencional	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000
8	R2	-0,5	0,5	Convencional	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	Tridimensional	74,077	74,130	74,074	74,125	74,078	74,120
10	Posição	Ø0,15		Tridimensional	0,007	0,016	0,023	0,013	0,010	0,029
11	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,300	1,450	1,290	1,440	1,070	1,330
12	Rugosidade	0,2		Rugosimetro	0,240	0,270	0,260	0,210	0,220	0,220
13	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,280	1,190	1,310	1,360	1,210	1,400

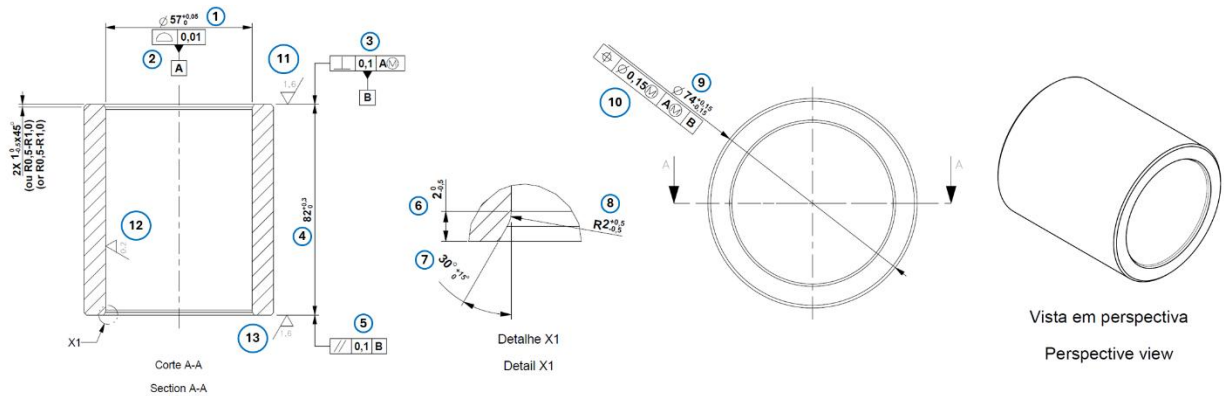
Cota	Nominal	Tol -	Tol +		19	20	21	22	23	24
1	57	0	0,05	Tridimensional	57,030	57,021	57,026	57,029	57,023	57,027
2	Perfil	0,01		Tridimensional	0,021	0,016	0,012	0,020	0,013	0,014
3	Perpendicularidade	0,1		Tridimensional	0,014	0,058	0,043	0,056	0,027	0,025
4	82	0	0,3	Tridimensional	82,165	82,169	82,196	82,197	82,129	82,173
5	Paralelismo	0,1		Tridimensional	0,011	0,067	0,032	0,053	0,026	0,051
6	2	-0,5	0	Convencional	1,700	1,700	1,700	1,500	1,600	1,700
7	30°	0	15°	Convencional	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000
8	R2	-0,5	0,5	Convencional	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	Tridimensional	74,074	74,069	74,077	74,104	74,075	74,079
10	Posição	Ø0,15		Tridimensional	0,007	0,014	0,014	0,009	0,028	0,013
11	Rugosidade	1,6		Rugosimetro	1,240	1,160	1,010	1,270	1,100	1,320
12	Rugosidade	0,2		Rugosimetro	0,210	0,230	0,190	0,250	0,220	0,200

13	Rugosidade	1,6		Rugosímetro	1,340	1,450	1,110	1,420	1,150	1,240
Cota	Nominal	Tol -	Tol +		25	26	27	28	29	30
1	57	0	0,05	Tridimensional	57,020	57,025	57,028	57,024	57,022	57,029
2	Perfil	0,01		Tridimensional	0,013	0,012	0,011	0,014	0,008	0,011
3	Perpendicularidade	0,1		Tridimensional	0,045	0,051	0,025	0,058	0,056	0,018
4	82	0	0,3	Tridimensional	82,183	82,167	82,177	82,175	82,168	82,183
5	Paralelismo	0,1		Tridimensional	0,049	0,032	0,033	0,066	0,054	0,032
6	2	-0,5	0	Convencional	1,500	1,500	1,700	1,600	1,500	1,600
7	30°	0	15°	Convencional	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000	38,000
8	R2	-0,5	0,5	Convencional	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	Tridimensional	74,121	74,129	74,125	74,073	74,104	74,064
10	Posição	Ø0,15		Tridimensional	0,012	0,025	0,013	0,021	0,009	0,006
11	Rugosidade	1,6		Rugosímetro	1,220	1,300	1,470	0,980	1,360	1,200
12	Rugosidade	0,2		Rugosímetro	0,200	0,210	0,190	0,220	0,210	0,200
13	Rugosidade	1,6		Rugosímetro	1,650	1,570	1,310	1,290	1,400	1,470

Resultados							
Cota	Nominal	Tol -	Tol +	Valor médio	Valor Mínimo	Valor máximo	Variância
1	57	0	0,05	57,009	56,998	57,027	0,009
2	Perfil	0,01		0,014	0,008	0,022	0,003
3	Perpendicularidade	0,1		0,041	0,005	0,083	0,019
4	82	0	0,3	82,157	82,099	82,197	0,026
5	Paralelismo	0,1		0,048	0,011	0,112	0,023
6	2	-0,5	0	1,607	1,500	1,700	0,064
7	30°	0	15°	38,000	38,000	38,000	0,000
8	R2	-0,5	0,5	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Ø74	-0,15	0,15	74,105	74,064	74,136	0,025
10	Posição	Ø0,15		0,021	0,002	0,129	0,023
11	Rugosidade	1,6		1,274	0,980	1,500	0,134
12	Rugosidade	0,2		0,223	0,190	0,270	0,024
13	Rugosidade	1,6		1,305	1,060	1,650	0,135

Fonte: Autor

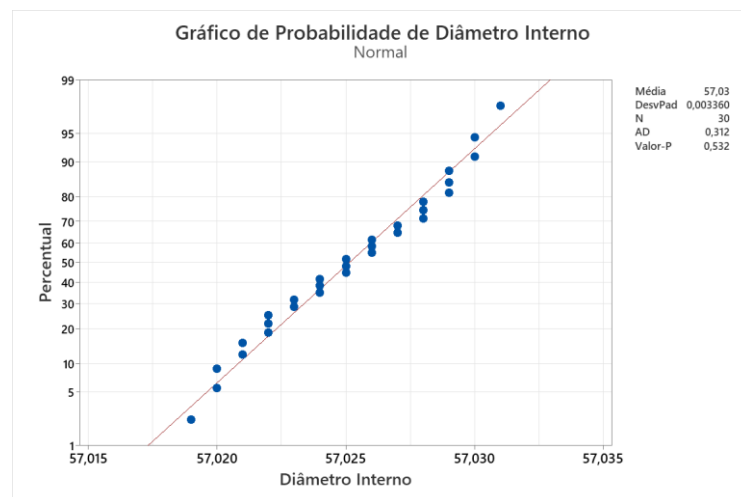
Figura 39 - Requisitos dimensionais camisa



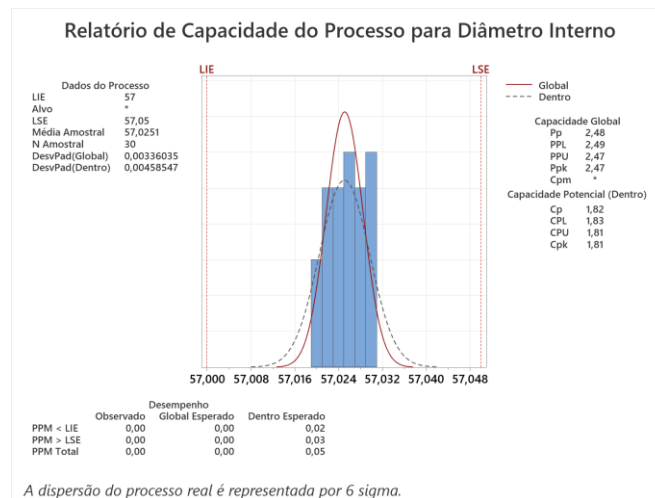
Fonte: Autor

A Figura 40 revela que os dados seguem uma distribuição normal ($p > 0,05$). Devido à alta capacidade do processo $cpk > 1,33$ (Figura 41), o diâmetro interno foi desprezível para análise da área de contato.

Figura 40 - Teste de normalidade diâmetro interno (Camisa)



Fonte: Autor

Figura 41 - Capacidade do processo diâmetro interno (Camisa)

Fonte: Autor

5.2 Influência da Área de Contato.

Os resultados estatísticos obtidos a partir da análise dos requisitos dimensionais constituíram a fundamentação para a avaliação da primeira hipótese desta dissertação. Inicialmente, foram calculadas as médias aritméticas de cada um dos requisitos de interesse para esta pesquisa: a espessura (denotada por h) e o diâmetro externo dos êmbolos (especificados pelas cotas 1 e 7, respectivamente). Em virtude da comprovada estabilidade do processo de fabricação das camisas, a variabilidade do diâmetro interno da camisa foi considerada desprezível para fins desta análise. Com base nos dados dimensionais dos êmbolos, foi possível estimar a área média de contato de cada tipo de êmbolo durante o seu funcionamento no interior da camisa, conforme detalhado na Tabela 13. A análise comparativa dessas áreas de contato revelou uma estimativa significativa: a área de contato média do êmbolo do tipo plano demonstrou ser aproximadamente 30% superior à área de contato média do êmbolo do tipo copo.

Tabela 13 - Área de contato dos tipos de êmbolos

Valores esperados (EC)				Resultados		
Cota	Nominal	Tol -	Tol +	Valor médio	Valor Mínimo	Valor máximo
7	Ø60	-0,3	0,1	59,609	59,386	59,812
H	17,5	-0,5	0,3	18,245	17,989	18,648
A (mm) ²				3416,66		

Valores Esperados (EP)				Resultados		
Cota	Nominal	Tol -	Tol +	Valor médio	Valor Mínimo	Valor máximo
1	Ø60	-0,3	0,1	59,19	59	59,5
H	12	0	0,6	12,11	11,9	12,3
A(mm) ²				4503,73		

Fonte: Autor

Os corpos de prova foram ensaiados conforme a metodologia da Seção 3. A temperatura média de trabalho, medida durante os ensaios de bancada está na Tabela 14 e evidenciada na figura 42.

Tabela 14 - Temperaturas de operação dos êmbolos

	Êmbolo Copo °C							Êmbolo Plano °C						Médias	
Tempo	Camisa 1ª	Camisa 2A	Camisa 3A	Camisa 4A	Camisa 5A	Camisa 6A	Camisa 1B	Camisa 2B	Camisa 3B	Camisa 4B	Camisa 5B	Camisa 6B	Êmbolo Plano °C	Êmbolo Copo °C	
08:00:00	5,10	3,00	4,30	6,80	6,80	14,70	22,30	30,20	40,20	29,30	34,40	35,50			
09:00:00	9,90	15,70	14,80	10,20	16,40	20,10	29,30	31,30	25,30	23,30	28,60	26,40			
10:00:00	16,00	18,00	20,80	19,60	5,90	29,40	39,30	50,20	44,60	43,10	51,00	63,40			
11:00:00	20,10	17,40	17,80	17,70	20,20	28,70	30,00	37,00	36,00	26,00	28,00	30,00			
12:00:00	20,60	21,30	25,60	24,10	25,50	27,10	28,30	28,30	27,20	23,60	27,60	32,10			
13:00:00	20,70	20,70	23,90	18,50	23,00	27,00	26,50	27,30	26,80	23,40	26,90	27,30			
14:00:00	15,50	14,40	20,80	19,10	23,10	27,90	22,80	23,90	21,30	22,10	20,90	21,40			
15:00:00	13,90	17,50	18,20	17,90	20,70	20,30	39,00	36,80	31,60	40,40	36,00	43,40			
16:00:00	19,60	17,50	19,00	11,30	16,00	19,00	32,50	27,20	24,20	29,00	29,40	32,20	27,54	18,12	
08:00:00	14,90	12,20	14,60	11,00	17,90	17,90	19,00	17,10	23,80	17,50	16,40	16,40			
09:00:00	19,00	17,60	17,30	17,40	20,50	21,40	19,80	16,60	23,80	18,30	17,90	16,10			
10:00:00	18,00	14,10	16,30	16,10	21,20	17,90	43,60	45,30	48,70	40,90	28,20	34,20			
11:00:00	16,60	18,00	19,90	20,00	20,70	16,60	41,00	29,90	28,20	26,90	21,20	27,10			
12:00:00	22,70	20,30	19,20	22,00	19,90	19,90	21,90	21,90	22,20	20,80	21,90	18,00			
13:00:00	20,30	19,30	17,50	21,60	25,90	20,80	27,00	24,80	25,10	25,60	27,70	22,60			
14:00:00	21,50	17,30	18,90	22,80	20,70	23,90	23,00	21,20	22,50	22,50	23,40	22,50			
15:00:00	15,30	17,80	21,80	21,00	23,60	16,20	19,30	18,10	17,60	17,80	18,80	19,30			
16:00:00	9,50	15,50	18,90	12,30	10,50	13,60	19,60	15,60	19,70	21,30	20,20	20,20			

Fonte: Autor

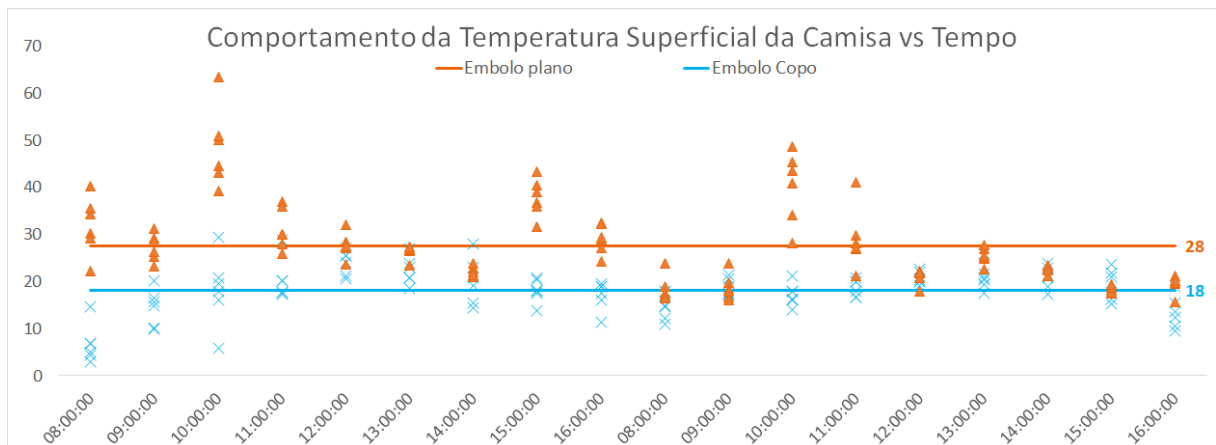
Figura 42 - Coleta de temperatura

Fonte: Autor

A análise da evolução da temperatura ao longo do tempo, conforme ilustrado na figura 43, revela de maneira numérica uma distinção significativa entre os modelos de êmbolos avaliados. Especificamente, os dados demonstram que a temperatura de trabalho do êmbolo plano apresenta uma elevação de aproximadamente 52% em relação à temperatura observada no êmbolo do tipo copo.

A análise experimental demonstrou uma clara correlação entre a área de contato, a temperatura de trabalho e o desempenho do êmbolo. A maior área de contato do êmbolo EP, combinada com a ausência de lubrificação de água com oxicloreto de cobre no êmbolo traseiro, promoveu uma significativa geração e retenção de calor durante a operação. Esse aumento de temperatura, por sua vez, influenciou negativamente o coeficiente de atrito na interface com a camisa. Um coeficiente de atrito elevado compromete a eficiência do componente em campo, o que pode levar a um maior desgaste, menor vida útil e aumento do consumo de energia do sistema.

Essa conclusão, pode parecer ir contra a segunda lei de atrito de Amontons e Coulomb, que afirma que a força de atrito é independente da área de contato aparente. No entanto, essa lei é uma simplificação para o nível macroscópico. Conforme a teoria da tribologia moderna, defendida por autores como Hutchings, o atrito é ditado pela área de contato real, que se resume aos pontos microscópicos (micro-asperezas) onde as superfícies realmente se tocam.

Figura 43 - Comportamento da temperatura pelo tempo (Área de Contato)

Fonte: Autor

Considerando que a análise primária se fundamentou na temperatura média de operação, procedeu-se a uma avaliação estatística para determinar se a temperatura superficial da camisa durante o trabalho é significativamente maior quando utilizada em conjunto com o êmbolo plano, em comparação com o êmbolo do tipo copo. Para essa análise comparativa, aplicou-se o teste estatístico de comparação de médias para duas amostras independentes (Two-Sample t-test), uma ferramenta estatística padrão para avaliar diferenças entre as médias de dois grupos distintos.

Formalmente, foram definidas as seguintes hipóteses estatísticas:

- Hipótese Nula (H_0): Não há diferença estatisticamente significativa entre a média da temperatura superficial da camisa quando em contato com o êmbolo do tipo copo e a média da temperatura superficial da camisa quando em contato com o êmbolo plano.
 - Matematicamente: $\mu_{EC} = \mu_{EP}$ (com um nível de significância $\alpha = 0.05$, espera-se um valor de $p > 0.05$ para aceitar esta hipótese).
- Hipótese Alternativa (H_A): A média da temperatura superficial da camisa é significativamente maior quando em contato com o êmbolo plano do que quando em contato com o êmbolo do tipo copo.
 - Matematicamente: $\mu_{EP} > \mu_{EC}$ (com um nível de significância $\alpha = 0.05$, espera-se um valor de $p < 0.05$ para suportar esta hipótese).

A análise estatística foi conduzida utilizando o software Minitab®. Os resultados obtidos através do Two-Sample t-test revelaram um valor de p (p-value) inferior ao

nível de significância predefinido de 0.05 ($p < 0.05$). Diante desse resultado estatisticamente significativo, a hipótese nula (H_0) foi rejeitada.

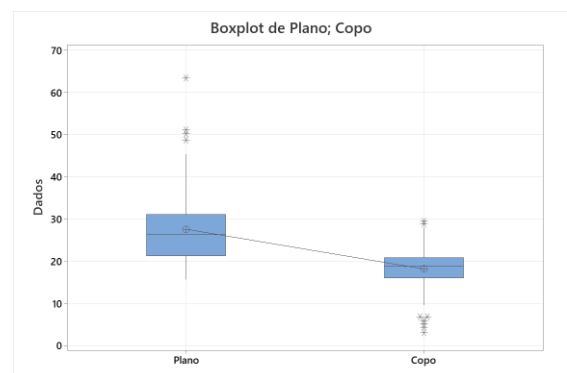
A rejeição da hipótese nula permite concluir, com um nível de confiança de 95%, que a média da temperatura superficial da camisa durante o trabalho é estatisticamente maior quando associada ao êmbolo plano em comparação com o êmbolo do tipo copo ($p < 0.05$).

A figura 44, que apresenta os resultados detalhados do cálculo realizado no software Minitab®, fornece o embasamento visual e numérico para essa afirmação, corroborando a significância estatística da diferença observada nas temperaturas superficiais da camisa em função do tipo de êmbolo utilizado.

Figura 44 - Two-Sample t-test para Área de Contato (EP vs EC)

Estatísticas Descritivas				
Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
Plano	108	27,54	8,89	0,86
Copo	108	18,12	5,02	0,48

Estimativa da diferença		Teste	
Limite inferior de 95% da Diferença		Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
		Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$
Diferença	diferença	Valor-T	GL Valor-p
9,420	7,795	9,59	168 0,000



Fonte: Autor

Em face dos resultados obtidos na análise da temperatura de trabalho, que demonstraram uma temperatura superficial da camisa significativamente menor quando utilizada em conjunto com o êmbolo do tipo copo em comparação com o êmbolo plano, optou-se por direcionar as análises subsequentes desta dissertação especificamente aquelas relacionadas ao acabamento superficial e a posição de montagem, utilizando o êmbolo do tipo copo como modelo de referência. Essa decisão visa investigar o comportamento desses parâmetros em uma condição de temperatura de operação mais favorável, buscando otimizar o desempenho e a durabilidade do sistema como um todo.

5.3. Influência da Rugosidade.

Com as camisas usinadas em diversas rugosidades, as bombas foram testadas seguindo a metodologia detalhada na Seção 4. Essa etapa visou analisar como as diferentes rugosidades afetavam o aquecimento e, por extensão, o desgaste dos componentes. Após montagem e ensaio, os resultados foram compilados na Tabela 15.

Tabela 15 – Temperatura de operação em diferentes rugosidades

Tempo	1 (µm)						Média
	Camisa 1A	Camisa 2A	Camisa 3A	Camisa 4A	Camisa 5A	Camisa 6A	
08:00:00	21,00	23,50	22,10	22,10	21,40	21,50	22,44
09:00:00	22,30	24,60	22,10	21,50	21,20	21,50	
10:00:00	23,00	26,70	24,10	23,70	22,90	23,10	
11:00:00	25,10	26,10	24,50	22,10	22,00	22,10	
12:00:00	23,20	25,10	27,20	23,40	23,10	23,30	
13:00:00	23,50	25,80	25,10	23,50	23,00	23,20	
14:00:00	25,50	25,40	24,50	21,80	21,90	22,00	
15:00:00	21,40	23,80	27,30	21,30	21,00	21,60	
16:00:00	21,60	23,40	23,20	20,60	20,80	20,80	
08:00:00	24,00	24,60	23,30	22,40	21,70	22,00	
09:00:00	22,10	21,80	21,20	20,10	19,80	20,10	
10:00:00	22,00	22,20	22,30	19,60	18,90	19,60	
11:00:00	18,90	22,00	22,00	20,10	20,00	17,50	
12:00:00	19,10	22,10	21,80	19,40	19,30	20,30	
13:00:00	20,40	22,00	23,50	21,00	25,00	21,90	
14:00:00	23,20	24,10	22,50	21,40	21,10	21,10	
15:00:00	20,80	24,70	24,80	23,10	22,00	22,30	
16:00:00	25,40	23,80	24,90	22,10	22,80	22,40	
Tempo	0,2 (µm)						Média
	Camisa 1B	Camisa 2B	Camisa 3B	Camisa 4B	Camisa 5B	Camisa 6B	
08:00:00	5,10	3,00	4,30	6,80	6,80	14,70	18,12
09:00:00	9,90	15,70	14,80	10,20	16,40	20,10	
10:00:00	16,00	18,00	20,80	19,60	5,90	29,40	
11:00:00	20,10	17,40	17,80	17,70	20,20	28,70	
12:00:00	20,60	21,30	25,60	24,10	25,50	27,10	
13:00:00	20,70	20,70	23,90	18,50	23,00	27,00	
14:00:00	15,50	14,40	20,80	19,10	23,10	27,90	
15:00:00	13,90	17,50	18,20	17,90	20,70	20,30	
16:00:00	19,60	17,50	19,00	11,30	16,00	19,00	
08:00:00	14,90	12,20	14,60	11,00	17,90	17,90	
09:00:00	19,00	17,60	17,30	17,40	20,50	21,40	
10:00:00	18,00	14,10	16,30	16,10	21,20	17,90	
11:00:00	16,60	18,00	19,90	20,00	20,70	16,60	
12:00:00	22,70	20,30	19,20	22,00	19,90	19,90	
13:00:00	20,30	19,30	17,50	21,60	25,90	20,80	
14:00:00	21,50	17,30	18,90	22,80	20,70	23,90	
15:00:00	15,30	17,80	21,80	21,00	23,60	16,20	
16:00:00	9,50	15,50	18,90	12,30	10,50	13,60	

Tempo	0,11 (µm)						Média
	Camisa 1C	Camisa 2C	Camisa 3C	Camisa 4C	Camisa 5C	Camisa 6C	
08:00:00	11,80	12,60	13,20	6,90	6,60	7,90	
09:00:00	17,00	16,70	16,30	11,40	8,50	8,20	
10:00:00	16,70	18,30	16,40	6,80	6,70	7,60	
11:00:00	7,50	15,40	13,70	10,20	7,30	7,80	
12:00:00	17,60	13,50	17,10	9,30	10,20	10,70	
13:00:00	12,00	12,70	16,00	9,70	7,60	7,50	
14:00:00	12,00	21,00	17,80	12,20	9,20	9,90	
15:00:00	12,00	21,90	16,20	10,90	9,30	14,60	13,49
16:00:00	10,10	18,20	16,90	10,80	8,70	8,90	
08:00:00	17,60	13,50	16,80	7,00	6,80	7,30	
09:00:00	21,30	22,90	25,50	8,00	7,40	8,50	
10:00:00	9,30	17,50	15,30	8,30	6,90	6,90	
11:00:00	11,10	20,60	28,70	9,10	9,70	9,80	
12:00:00	21,60	17,70	25,40	8,20	8,80	9,10	
13:00:00	23,10	22,20	29,30	8,70	8,90	9,30	
14:00:00	13,40	24,80	24,30	10,70	10,80	10,40	
15:00:00	13,60	25,50	21,40	12,70	10,30	11,70	
16:00:00	11,00	23,30	23,30	21,90	12,50	10,80	

Fonte: Autor

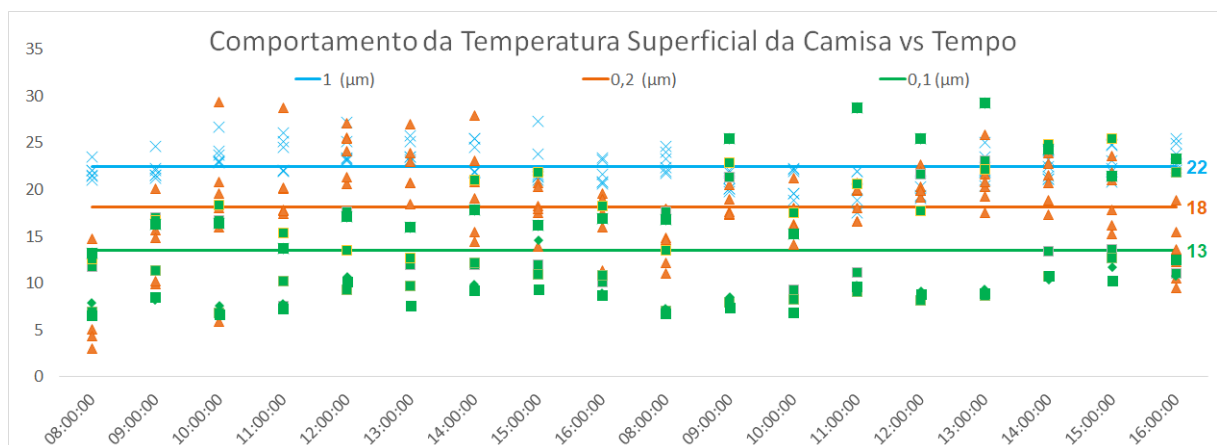
A análise numérica das médias obtidas em cada etapa do ensaio estabeleceu uma correlação direta e significativa entre a rugosidade superficial da camisa e a temperatura operacional da bomba. Isso significa que o acabamento superficial da camisa tem um impacto mensurável na quantidade de calor gerado durante o funcionamento da bomba.

A análise térmica dos componentes revelou uma correlação direta entre a rugosidade da superfície e o aumento da temperatura de operação, que serve como um indicador indireto da força de atrito.

A camisa com rugosidade de 1 μm demonstrou um aumento de temperatura de aproximadamente 24% em relação à camisa com rugosidade de 0,2 μm . Esse acréscimo de temperatura é uma evidência de maior atrito na interface de contato, o que resulta em maior dissipação de energia na forma de calor.

Em contraste, a camisa com rugosidade de 0,1 μm apresentou um desempenho notavelmente superior. Nos testes, foi observada uma redução expressiva de cerca de 34% na temperatura de trabalho da bomba em comparação com a camisa de 0,2 μm . Esse resultado sugere que uma superfície mais lisa (com menor rugosidade) minimiza o atrito, e por sua vez, a geração de calor, o que otimiza a eficiência térmica do sistema e pode prolongar a vida útil dos componentes devido ao menor estresse térmico. Essa correlação entre rugosidade e temperatura, agindo como um indicador indireto para o atrito, é visualizada na Figura 45.

Figura 45 - Comportamento da temperatura pelo tempo (Rugosidade)



Fonte: Próprio Autor

Para analisar o impacto da rugosidade no aquecimento das camisas, partimos da temperatura média de operação e realizamos uma avaliação estatística. Com o objetivo de minimizar o atrito e consequentemente a geração de calor nas camisas, durante o funcionamento das bombas, analisou-se o efeito da rugosidade superficial na temperatura de operação. Para isso, aplicamos o teste ANOVA.

Formalmente, as seguintes hipóteses foram estabelecidas para esta comparação específica:

- Hipótese Nula (H_0): Não há diferença estatisticamente significativa entre a média da temperatura para as camisas com diferentes rugosidades
 - Matematicamente: $\mu_1(1,0\mu\text{m}) = \mu_2(0,2\mu\text{m}) = \mu_3(0,1\mu\text{m})$ (Com um nível de significância $\alpha=0,05$, espera-se um valor de $p>0,05$ para suportar esta hipótese).
- Hipótese Alternativa (H_a): pelo menos uma μ (média) é diferente das demais, (espera-se um valor de $p<0,05$ para suportar esta hipótese).

Para a análise estatística, empregou-se o software Minitab®. O teste de análise de variância (ANOVA) foi aplicado e os resultados (Figura 46) indicaram um valor de p menor que o nível de significância de 0,05 ($p<0,05$). Isso significa que há evidências estatísticas suficientes para afirmar que a rugosidade das camisas impacta o aquecimento. Consequentemente, rejeitamos a hipótese nula (H_0), e aceitamos a hipótese alternativa, permitindo-nos concluir, com 95% de confiança, que a rugosidades das camisas (Figura 46), exerce influência sobre a temperatura de operação medida durante os ensaios de bancada.

Figura 46 – ANOVA – Análise de Variância (Rugosidade)

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	2	4335	2167,63	105,23	0,000
Erro	321	6612	20,60		
Total	323	10947			

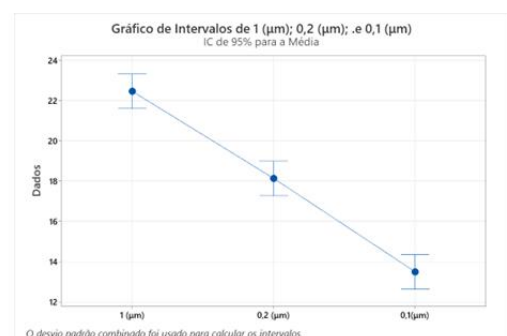
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,53852	39,60%	39,22%	38,47%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
1 (μm)	108	22,444	1,874	(21,585; 23,304)
0,2 (μm)	108	18,118	5,018	(17,258; 18,977)
0,1 (μm)	108	13,486	5,753	(12,627; 14,345)

DesvPad Combinado = 4,53852



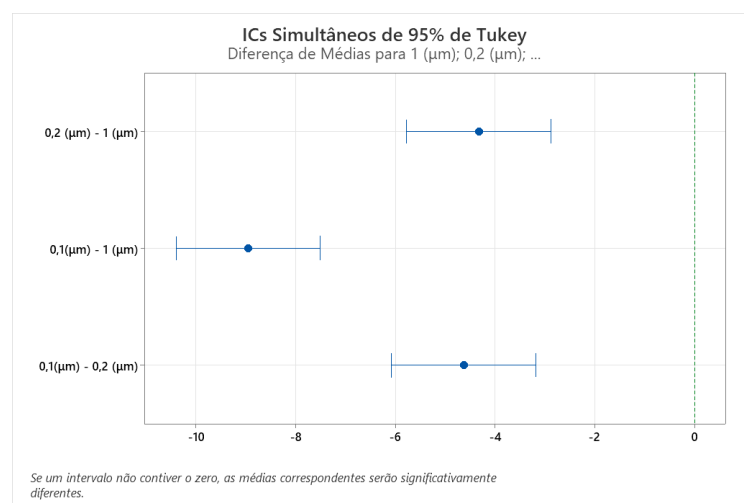
Fonte: Próprio Autor

Após conduzir a Análise de Variância (ANOVA) e, subsequentemente, o teste de comparações múltiplas de Tukey (Figura 47), foi possível determinar a natureza das diferenças entre as médias dos grupos. A ANOVA confirmou a existência de uma diferença estatisticamente significativa entre, pelo menos, uma das médias. Para identificar quais pares de médias eram de fato distintos, recorreu-se ao método de Tukey, que é ideal para este tipo de análise por controlar o risco de cometer um erro estatístico (erro Tipo I) ao realizar múltiplas comparações. A análise dos intervalos de confiança simultâneos de Tukey revelou um resultado consistente e inequívoco: todos os intervalos de confiança para a diferença entre os pares de médias não contiveram o zero.

De acordo com a metodologia de Tukey, a ausência do valor zero no intervalo de confiança é a prova de que a diferença entre as médias comparadas é estatisticamente significativa. Isso foi observado em todas as três comparações realizadas. A análise visual do gráfico e os valores numéricos por trás do teste de Tukey permitem concluir uma ordem clara e significativa. A média do grupo 1 μm é a mais alta, sendo estatisticamente maior que a média do grupo 0,2 μm . Da mesma forma, a média de 0,2 μm é estatisticamente maior que a média de 0,1 μm .

Portanto, a conclusão é que existe uma hierarquia nas médias, onde a média de 1 μm > a média de 0,2 μm > a média de 0,1 μm . Isso demonstra uma relação clara e significativa entre os grupos, indicando que o efeito da rugosidade impacta a temperatura.

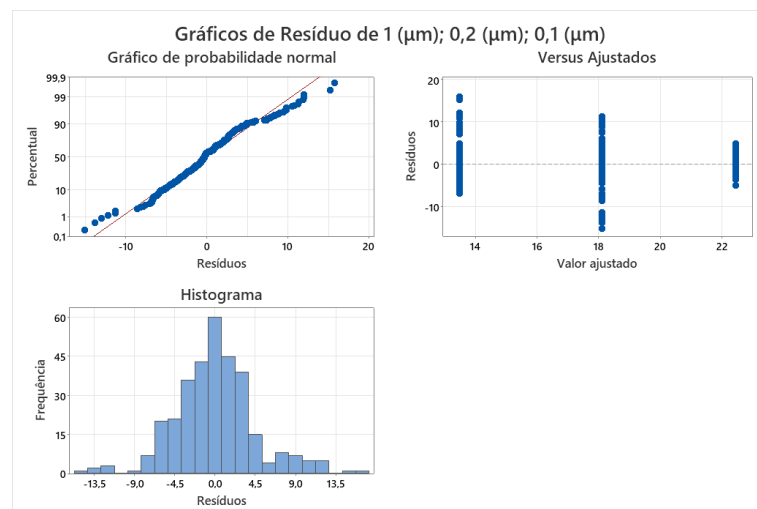
Figura 47 - Comparações Múltiplas de Médias (Teste de Tukey)



Fonte: Autor

A análise dos resíduos, demonstrando na figura 48, mostra que os principais pressupostos da ANOVA foram atendidos, o que significa que os resultados da análise são confiáveis. O gráfico "Versus Ajustados" não mostra padrões, indicando que a variância é homogênea (dispersão igual entre os grupos). Os gráficos de probabilidade normal e o histograma mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal, sem grandes desvios.

Figura 48 - Análise de Resíduos ANOVA (Rugosidade)

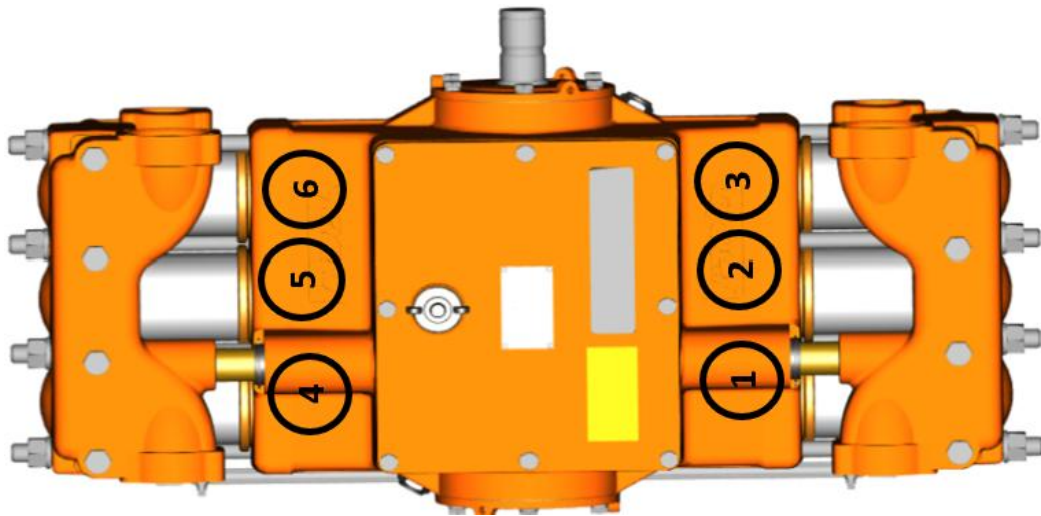


Fonte: Autor

5.4. Influência da Posição de Montagem

Com o objetivo de verificar a influência da posição de cada camisa na temperatura de trabalho, foi realizada uma análise comparativa dos resultados de dois testes. Um total de 432 amostras foi utilizado para esta avaliação, que empregou o teste estatístico ANOVA. A configuração e a posição das camisas foram mantidas de forma uniforme em todos os testes, seguindo o padrão detalhado na Figura 49.

Figura 49 - Posição de montagem das camisas



Fonte: Autor

Os dados utilizados nesta análise são os mesmos apresentados nas Tabelas 14 e 15

Formalmente, as seguintes hipóteses foram estabelecidas para esta comparação específica:

- Hipótese Nula (H_0): Não há diferença estatisticamente significativa entre a média da temperatura da posição de montagem das camisas
 - Matematicamente: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$ (Com um nível de significância $\alpha=0,05$, espera-se um valor de $p>0,05$ para suportar esta hipótese).
- Hipótese Alternativa (H_a): pelo menos uma μ (média) é diferente das demais, (espera-se um valor de $p<0,05$ para suportar esta hipótese).

Para a análise estatística, empregou-se o software Minitab®. O teste de análise de variância (ANOVA) foi aplicado e os resultados (Figura 50) indicaram um valor de p maior que o nível de significância de 0,05 ($p>0,05$). Isso significa que não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que a posição de montagem das camisas impacta o aquecimento. Consequentemente, aceitamos a hipótese nula (H_0), permitindo-nos concluir, com 95% de confiança, que a posição das camisas montadas na bomba (Figura 49), não exerce influência sobre a temperatura de operação medida durante os ensaios de bancada.

Figura 50- Análise de Variância ANOVA – (Posição de Montagem)**Análise de Variância**

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	5	670,8	134,16	2,21	0,053
Erro	426	25887,4	60,77		
Total	431	26558,2			

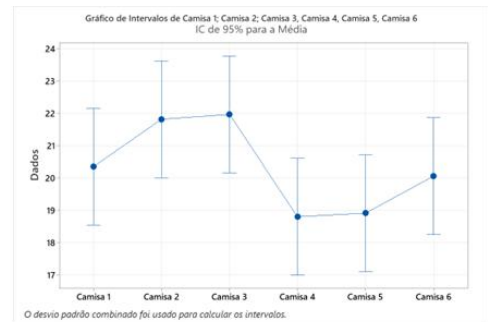
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
7,79541	2,53%	1,38%	0,00%

Médias

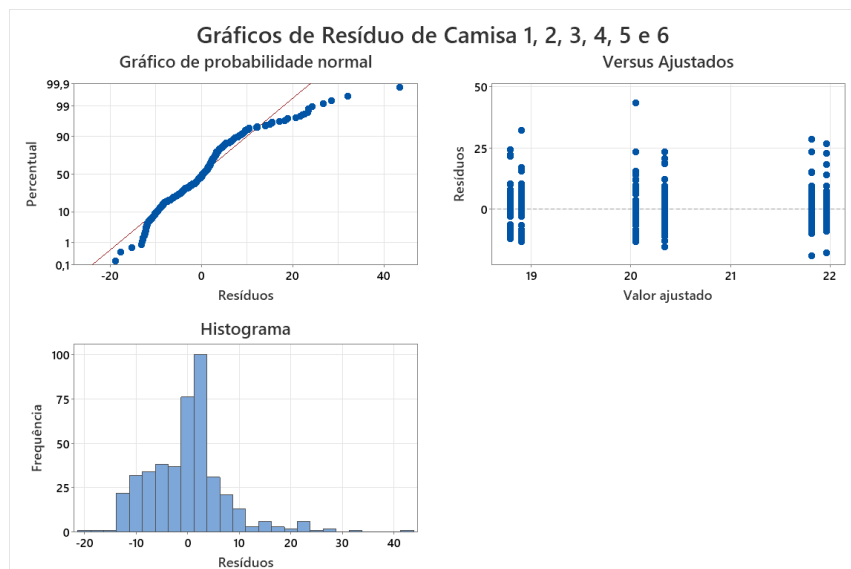
Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Camisa 1 72	20,342	7,430	(18,536; 22,147)	
Camisa 2 72	21,810	7,150	(20,004; 23,615)	
Camisa 3 72	21,961	6,668	(20,155; 23,767)	
Camisa 4 72	18,794	7,692	(16,989; 20,600)	
Camisa 5 72	18,904	8,277	(17,098; 20,710)	
Camisa 6 72	20,05	9,28	(18,25; 21,86)	

DesvPad Combinado = 7,79541



Fonte: Autor.

A análise dos resíduos, demonstrando na figura 51, mostra que os principais pressupostos da ANOVA foram atendidos, o que significa que os resultados da análise são confiáveis. O gráfico "Versus Ajustados" não mostra padrões, indicando que a variância é homogênea (dispersão igual entre os grupos). Os gráficos de probabilidade normal e o histograma mostram que os resíduos seguem uma distribuição normal, sem grandes desvios.

Figura 51 - Análise de Resíduos ANOVA (Posição de Montagem)

6. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios demonstram que o processo de fabricação dos êmbolos, tanto do tipo copo (EC) quanto do tipo plano (EP), exibe uma variação dimensional significativa. Essa variação é evidenciada pela baixa capacidade do processo (C_{pk}), apesar da distribuição normal observada para o diâmetro externo e a espessura de contato. A variabilidade dimensional observada requer a medição individual de cada amostra, a fim de obter uma determinação precisa da área de contato média.

A comparação entre os êmbolos revela uma diferença notável em suas áreas de contato, com o tipo plano (EP) apresentando uma área aproximadamente 30% maior que a do tipo copo (EC). Essa disparidade influencia diretamente a temperatura de operação, elevando-a em cerca de 52% no êmbolo plano, um efeito atribuído à maior geração e retenção de calor. A elevação da temperatura superficial da camisa em contato com o êmbolo plano é estatisticamente significativa.

A análise experimental e estatística das camisas com diferentes rugosidades revelou uma forte correlação entre o acabamento superficial e a temperatura de operação da bomba. Nossos testes demonstraram que a rugosidade de 1 μm resultou em um aumento de aproximadamente 24% na temperatura em comparação com a referência de 0,2 μm , evidenciando o efeito de um maior atrito. Por outro lado, a redução da rugosidade para 0,1 μm foi significativamente benéfica, proporcionando uma diminuição de cerca de 34% na temperatura.

Essas observações foram validadas estatisticamente pela Análise de Variância (ANOVA) e, em seguida, pelo teste post-hoc de Tukey. A ANOVA confirmou a existência de uma diferença significativa entre as médias de temperatura dos grupos. O teste de Tukey, por sua vez, demonstrou que a média de 1 μm é estatisticamente maior que a de 0,2 μm , que é significativamente maior que a de 0,1 μm , reforçando a conclusão de que a redução da rugosidade otimiza o desempenho térmico da bomba.

Esses resultados, fornecem uma base robusta para as conclusões. Em suma, a redução da rugosidade da camisa mostra-se um fator importante para otimizar o desempenho térmico das bombas. A menor temperatura de operação, indica uma diminuição do atrito e, conseqüentemente, uma menor geração de calor. Isso não só melhora a eficiência do sistema, mas também tem o potencial de prolongar

substancialmente a vida útil dos componentes, mitigando o desgaste induzido por altas temperaturas e consolidando a importância do controle rigoroso da rugosidade no processo de fabricação.

Por outro lado, a posição de montagem não demonstrou impacto significativo no aquecimento. Essa conclusão foi validada por meio de um teste ANOVA, que indicou que as médias de aquecimento para todas as camisas não apresentaram diferenças estatisticamente significativa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a influência da inclusão de lubrificantes à base de grafite no processo, visando aprofundar o entendimento e a otimização do comportamento térmico.
- Desenvolver e avaliar métodos para reduzir o tempo de fabricação de peças com rugosidade de $0,1\text{ }\mu\text{m}$, com o objetivo de aumentar a produtividade das peças.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBARO, A. J. L. A operação de prensagem: Considerações técnicas e sua aplicação industrial. **Cerâmica industrial**, v. 5, p. 14–20, 2001.

ASHBY, M. F.; CEBON, D. Materials selection in mechanical design. **MRS Bulletin**, v. 30, n. 12, p. 994–997, 2004.

ASSIS, P. J.; SOUSA, P. R.; LINHARES, P. C. F. **Testes de hipóteses estatísticas**. 1. ed. Mossoró, v. 1, 2020.

BLAEDEL, K. L.; TAYLOR, J. S.; EVANS, C. J. Ductile-regime grinding of brittle materials. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of ceramics and composites**. New York: Marcel Dekker, 1999. Cap. 5.

BUKVIC, G.; SANCHEZ, L. E. A.; FORTULAN, C. A.; FIOCCHI, A. A. Usinagem a verde aplicada na melhoria do acabamento superficial de cerâmicas sinterizadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 56., 2012, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABCM, 2012. p. 2552.

CAGLAYAN, H.; ŞÖHRET, Y.; CALISKAN, H. Thermo-ecologic evaluation of a spray dryer for ceramic industry. **Energy Procedia**, [S.l.]: Elsevier Ltd, 2018.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

CHEN, F. et al. Mechanical properties of hybrid multilayer graphene/whisker-reinforced ceramic composites: simulation and experimental investigation. **Ceramics International**, v. 48, p. 25673–25680, 2022.

FAGLIONI, F. D. et al. Effects of structural strain and phase transformations on the mechanical properties of alumina-zirconia-graphene composites. **Materialia**, v. 33, p. 102032, 2024.

FAGLIONI, F. D. et al. Volumetric zirconia stabilization using carbon nanotubes. **Ceramics International**, v. 51, p. 13692–13695, 2025.

FUJITA, H. **Retificação da alumina com rebolo diamantado usando diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2007.

GOPAL, A. V.; RAO, P. V. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 1327–1336, 2003.

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

HUANG, H. Machining characteristics and surface integrity of yttria stabilized tetragonal in high speed deep grinding. **Materials Science & Engineering A**, v. 345, p. 155–163, 2003.

JAHANMIR, S. et al. **Ceramic machining: assessment of current practice and research needs in the United States**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1992.

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

KAJORNCHAIYAKUL, J. **Abrasive machining of ceramics: assesment of near-surface characteristics in high speed grinding**. 2000. 208 f. Tese (Doutorado) - University of Connecticut, Estados Unidos, 2000.

KONG, S. C.; TSO, P. C. F.; ZHOU, Z. H. A study on the creep-feed grinding of ceramics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 31, n. 4, p. 543-556, 1991.

LEE, B. et al. Simultaneous strengthening and toughening of reduced graphene oxide/alumina composites fabricated by molecular-level mixing process. **Carbon**, v. 78, p. 212–219, 2014.

MARINESCU, I. D.; TONSHOFF, K. H.; INASAKI, I. **Handbook of ceramic grinding and polishing**. New York: William Andrew, 2000.

MARINESCU, I.; PRUTEANU, M. Deformation and fracture of ceramics materials. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H. K.; INASAKI, I. **Handbook of ceramic grinding and polishing**. New Jersey: Noyes Publications, 1998. Cap. 2.

MELO, C. C. et al. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 8, p. 2928–2936, 1 jul. 2018.

MEYER, H. R.; KLOCKE, F. Grinding tools. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H. K.; INASAKI, I. **Handbook of ceramic grinding and polishing**. New Jersey: Noyes Publications, 1998. p. 205–236.

PORWAL, H. et al. Graphene reinforced alumina nano-composites. **Carbon**, v. 64, p. 359–369, 2013. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.07.086.

RAMESH, K. et al. Experimental evaluation of super highspeed grinding of advanced ceramics. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 17, p. 87–92, 2001.

RATNER, B. D. The nature of matter and materials. In: RATNER, B. D. et al. **Biomaterials science: an introduction to materials in medicine**. 4. ed. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 37–40.

RICHERSON, D.; LEE, W. **Modern ceramic engineering properties, processing, and use in design**. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2018.

ROCHA, Henrique Martins. Controle Estatístico de Qualidade. Volume único. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2019. 406 p.

SANTOS, L. A. L.; SOUSA, V. C. **Introdução aos materiais cerâmicos: estrutura e processamento**. São Paulo: Pimenta Cultural, v. 2, 2024.

SEDLACEK, M.; PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. **Wear**, n. 266, p. 482-487, 2009.

SHAH, W. A. et al. Mechanical and thermal properties of spark plasma sintered Al₂O₃-graphene-SiC hybrid composites. **Ceramics International**, v. 49, p. 7987–7995, 2023. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.10.312.

SHIBATA, J. The conditioning of grinding wheel e Wear mechanisms. In: MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H. K.; INASAKI, I. **Handbook of ceramic grinding and polishing**. New Jersey: Noyes Publications, 1998. p. 237–257.

SOUZA, T. S. G. **Efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio**. 2016. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2016.

SUBHASH, G.; LOUKUS, J. E.; PANDIT, S. M. Application of data dependent systems approach for evaluation of fracture modes during a single-grit scratching. **Mechanics of Materials**, n. 34, p. 25–42, 2002.

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

ZANETTA, D. M. T. **Métodos estatísticos: coleta, tratamento e análise de dados; aplicação nas pesquisas de saúde pública, controle de doenças e epidemias**. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP); Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP), [s.d.].

ZHANG, B. et al. Grinding induced damage in ceramics. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 132, p. 353–364, 2003.