

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO GUILHERME DOS SANTOS RIBEIRO

**PROJETO DE DISPOSITIVO SEMIAUTOMÁTICO PARA
POLIMENTO DE INSERTOS EM POLITRIZ METALOGRÁFICA**

SÃO CARLOS
2026

JOÃO GUILHERME DOS SANTOS RIBEIRO

**PROJETO DE DISPOSITIVO SEMIAUTOMÁTICO PARA
POLIMENTO DE INSERTOS EM POLITRIZ METALOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec -
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel
em Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura

SÃO CARLOS
2026

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, meus pais, Débora e João, por toda força, incentivo e confiança concedidas ao longo desta caminhada, permitindo que eu superasse os desafios encontrados durante a graduação.

À toda minha família, manifesto minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pela compreensão nos momentos de ausência, pelo incentivo constante e por acreditarem em meu potencial em todas as etapas desta trajetória.

Ao meu orientador, Dr.-Ing. Carlos Ventura, agradeço pela confiança, disponibilidade, paciência e orientações, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação, que foram essenciais para minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas e amigos, meu agradecimento pelo companheirismo, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio durante toda a jornada universitária, tornando esse período mais leve e enriquecedor.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta conquista e contribuíram para a conclusão desta etapa da minha vida.

O adversário é um parceiro necessário ao progresso
Jigoro Kano

RESUMO

RIBEIRO, João Guilherme dos Santos. PROJETO DE DISPOSITIVO SEMIAUTOMÁTICO PARA POLIMENTO DE INSERTOS EM POLITRIZ METALOGRÁFICA. 2026. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2026.

O avanço tecnológico dos processos de usinagem e as crescentes exigências por precisão dimensional demandam ferramentas de corte de alto desempenho e maior vida útil. Entretanto, uma ferramenta sem o preparo correto reduz a eficiência do processo, elevando o consumo energético e os custos de produção. O preparo individual de um inserto pode ser realizado de forma manual com uso de politriz metalográfica. Contudo, o procedimento manual apresenta limitações, como baixa repetibilidade e forte dependência da experiência do operador para o controle de variáveis como pressão, velocidade e tempo de contato, gerando inconsistências geométricas que aceleram o desgaste da ferramenta. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto conceitual de um dispositivo semiautomático para o polimento de insertos de corte em politriz metalográfica, visando preencher essa lacuna tecnológica. A metodologia compreendeu o estudo de processos abrasivos, fabricação e materiais das ferramentas de corte, seguida pelo estabelecimento das condições de projeto baseadas no modelo de politriz ALP-2 (Alcrisa). O dimensionamento do dispositivo parte de um sistema baseado em um mecanismo similar a um movimento biela-manivela com corredeira. Utiliza um motor elétrico de 25 W com redutor e inversor de frequência, permitindo o controle da velocidade de translação do inserto durante o polimento. Um conjunto de pressão montado com parafuso e mola para aplicar força normal ao inserto (pressão de projeto entre 10 e 20 N/cm²). A estrutura foi projetada em alumínio para garantir resistência à corrosão e com boa resistência mecânica. Os resultados do projeto demonstram a viabilidade de um sistema simples capaz de padronizar o processo de polimento em politriz metalográfica e controlar parâmetros como força normal e velocidade de translação, promovendo maior repetibilidade na operação em comparação a operação manual. Como o foco deu-se no desenvolvimento conceitual, recomendam-se a prototipagem e a validação experimental do dispositivo em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Usinagem. Insertos de corte. Polimento semiautomático. Projeto mecânico.

ABSTRACT

RIBEIRO, João Guilherme dos Santos. Design of a semi-automatic insert polishing device for metallographic polishing machine. 2026. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2026.

The technological advancement of machining processes and the increasing demand for dimensional accuracy require high-performance cutting tools with extended service life. However, cutting tools that are not properly prepared reduce process efficiency, leading to increased energy consumption and higher production costs. Individual insert preparation can be performed manually using a metallographic polishing machine. Nevertheless, the manual procedure presents inherent limitations, including low repeatability and a strong dependence on the operator's experience to control variables such as contact pressure, polishing speed, and contact time, resulting in geometric inconsistencies that accelerate tool wear. This study presents the conceptual design of a semi-automatic device for polishing cutting inserts using a metallographic polishing machine, aiming to address this technological gap. The adopted methodology comprised a review of abrasive finishing processes, cutting tool manufacturing methods, and tool materials, followed by the establishment of design requirements based on the ALP-2 metallographic polishing machine (Alcrisa). The proposed device is based on a mechanism analogous to a slider-crank system. It is driven by a 25 W electric motor equipped with a gear reducer and a variable frequency drive (VFD), enabling precise control of the insert translational speed during polishing. The normal force is applied through a spring-loaded assembly consisting of a screw and compression spring, designed to provide a contact pressure ranging from 10 to 20 N/cm². The supporting structure was designed in aluminum to ensure adequate mechanical strength and corrosion resistance. The design results demonstrate the feasibility of a simple system capable of standardizing the polishing process on a metallographic polishing machine while controlling key process parameters, such as normal force and translational speed, thereby providing greater operational repeatability than manual polishing. As this study is limited to the conceptual design stage, prototype fabrication and experimental validation of the proposed device are recommended for future work.

Keywords: Machining. Cutting inserts. Semi-automatic polishing. Mechanical design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimento dos grãos na lapidação	15
Figura 2 – Tipos de lapidação	15
Figura 3 – Princípio de Polimento	16
Figura 4 – Zonas de Deformação no Polimento	17
Figura 5 – Tamanho do grão x Rugosidade total	17
Figura 6 – Resistência à quebra x Resistência a deformação térmica	21
Figura 7 – Fabricação de insertos	22
Figura 8 – Microestrutura do metal duro	22
Figura 9 – Composição esquemática do metal duro	23
Figura 10 – Classificação de Ferramentas Cerâmicas	23
Figura 11 – Elementos de acabamento superficial	25
Figura 12 – Insertos antes e depois de polimento	25
Figura 13 – Politriz Ecomet 30	27
Figura 14 – Exemplo de <i>retrofit</i> em politriz metalográfica	27
Figura 15 – Projeto Conceitual do Dispositivo de Polimento	28
Figura 16 – Formato e tipos de insertos	29
Figura 17 – Modelo comercial de inserto	29
Figura 18 – Influência do movimento de translação	31
Figura 19 – Movimento biela-manivela com corredeira	31
Figura 20 – Influência da pressão de lapidação na remoção de material	32
Figura 21 – Esquema de barras do dispositivo	33
Figura 22 – Demonstrativo	34
Figura 23 – Curva do movimento de translação	35
Figura 24 – Curvas de Velocidade e aceleração do movimento	35
Figura 25 – Curvas de Velocidade e aceleração do movimento	36
Figura 26 – Esquemático dos esforços no eixo	36
Figura 27 – Diagrama de corpo livre	37
Figura 28 – Modelo de mola selecionado	40
Figura 29 – Guia deslizante Kalatec KRH15VL	41
Figura 30 – Torque requerido no motor em função do ângulo do braço motor	42
Figura 31 – Reduções disponíveis para motor monofásico 25 W	43
Figura 32 – Moto Redutor 25 W	43
Figura 33 – Vibra Stop Micro I	43
Figura 34 – Vista explodida do dispositivo	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Abrasivos de polimento por tipo de material	18
Quadro 2 – Parâmetros de polimento	18
Quadro 3 – Materiais ferramenta de corte	20
Quadro 4 – Métodos de afiação de insertos	24
Quadro 5 – Estruturas de alumínio	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas do inserto	30
---	----

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	12
1.1 Contextualização	12
1.2 Motivação	13
1.3 Objetivos	13
2 – REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Processos Abrasivos	14
2.1.1 Lapidagem	14
2.1.2 Polimento	16
2.2 Insertos	19
2.2.1 Insertos de Metal Duro	21
2.2.2 Insertos Cerâmicos	22
2.2.3 Métodos de preparação de arestas	23
2.2.4 Polimento e aumento da vida útil	24
2.2.5 Melhor adesão ao revestimento	26
3 – PROPOSTA DE PROJETO	27
3.1 Projeto Conceitual	27
3.2 Procedimento	28
3.2.1 Velocidade da Politriz	29
3.2.2 Dimensões do inserto	29
3.2.3 Movimento de polimento	30
3.3 Memorial de Cálculo	32
3.3.1 Forças de polimento	32
3.3.2 Movimento do inserto	33
3.3.3 Eixo suporte	36
3.3.4 Estrutura	39
3.4 Escolha dos Elementos Padrão	39
3.4.1 Mola	39
3.4.2 Porca e parafuso	40
3.4.3 Guia deslizante	40
3.4.4 Motor	41
3.4.5 Vibra-stop	43
3.5 Elementos de Fabricação	44
3.6 Vista Explodida	44

4 – CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47
 Apêndices	 49
APÊNDICE A – Cálculos e gráficos em MATLAB	50
APÊNDICE B – Desenhos de fabricação	54
APÊNDICE C – Vista Explodida	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O avanço dos processos de usinagem e o aumento das exigências relacionadas à precisão dimensional e à integridade superficial das peças manufaturadas demandam maior controle das condições operacionais e do desempenho das ferramentas de corte. Processos amplamente empregados na indústria, como torneamento e fresamento, utilizam insertos intercambiáveis submetidos a elevadas solicitações mecânicas e térmicas, de modo que a condição destas ferramentas exercem influência direta sobre a qualidade da superfície usinada, os esforços de corte e a estabilidade do processo.

Insertos fabricados em metal duro e materiais cerâmicos apresentam elevada dureza, resistência ao desgaste e estabilidade térmica, sendo amplamente empregados em operações de usinagem desde o início do século XX, em resposta à crescente demanda industrial por ferramentas capazes de operar em maiores velocidades de corte e sob condições severas de solicitação mecânica e térmica. Nesse contexto, destacam-se os avanços obtidos com os carbonetos sinterizados à base de carboneto de tungstênio e ligantes metálicos, produzidos por técnicas de metalurgia do pó, os quais promoveram significativa evolução nos processos de usinagem, como torneamento, fresamento e furação. Posteriormente, materiais cerâmicos à base de óxido de alumínio passaram a ser empregados em aplicações específicas de alta velocidade de corte, devido à elevada dureza a quente e resistência ao desgaste abrasivo. (Ferroresi, 1969)

O desgaste progressivo dessas ferramentas constitui um dos principais fatores associados à redução da eficiência do processo de usinagem, ocasionando aumento do atrito, elevação do consumo energético, piora do acabamento superficial e incremento dos custos de produção. Em pequenas empresas, laboratórios e ambientes acadêmicos, operações de polimento e/ou preparação de arestas de insertos ainda é frequentemente realizado de forma manual.

Entretanto, procedimentos manuais apresentam limitações relacionadas à baixa repetibilidade e à dificuldade de controle dos parâmetros de processo, como pressão de contato, velocidade relativa e tempo de polimento. Além disso, a qualidade final do acabamento superficial torna-se fortemente dependente da experiência do operador, resultando em variações geométricas e superficiais entre insertos submetidos ao mesmo procedimento. Essas inconsistências comprometem o desempenho da ferramenta durante a usinagem, favorecendo o aumento dos esforços de corte, a intensificação dos mecanismos de desgaste e a redução da vida útil do inserto.

Nesse contexto, observa-se uma lacuna tecnológica relacionada ao desenvolvimento de sistemas de polimento semiautomáticos aplicados à insertos em politrizes metalográficas,

capazes de promover controle operacional e padronização do acabamento superficial. A automação parcial desse processo apresenta potencial para aumentar a repetibilidade das operações de polimento, reduzir erros operacionais e garantir maior estabilidade dos parâmetros envolvidos.

1.2 Motivação

O projeto de um dispositivo semiautomático visa o controle preciso do polimento, sendo uma alternativa promissora capaz de refinar as faces e arestas de corte, reduzir os esforços de usinagem e minimizar o atrito durante o processo. O estudo apresentado em Gao et al. (2024), propõe um método de polimento para insertos, como consequência, é visto aumento na vida útil dos insertos, podendo ser até 1,75 vezes mais duráveis em comparação aos insertos não polidos. O polimento controlado dos insertos surge, assim, como uma alternativa eficiente para aumentar a durabilidade das ferramentas e manter a qualidade superficial das peças usinadas.

A automação do processo surge como uma alternativa ao processo manual, que é comumente utilizado em politriz metalográfica, permitindo maior repetibilidade e controle de parâmetros como velocidade, pressão e tempo de contato. Além disso, garante produtividade e segurança, e reduz tempo de operação, alinhado com demandas atuais da indústria.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um dispositivo semiautomático destinado ao polimento de insertos de corte, com diferentes geometrias e materiais, utilizando politriz metalográfica. O dispositivo proposto deverá possibilitar o controle dos principais parâmetros operacionais do processo, tais como força normal aplicada durante o polimento, pressão de contato e velocidade do movimento de translação, visando garantir maior repetibilidade e estabilidade operacional.

Inicialmente, serão apresentados os fundamentos teóricos dos processos de polimento e lapidação, bem como os métodos de fabricação de insertos e os materiais empregados em ferramentas de corte. A partir da análise dos parâmetros envolvidos no processo de polimento, serão estabelecidas as condições de projeto do dispositivo, incluindo a definição dos materiais, especificações operacionais e critérios de dimensionamento. Posteriormente, serão realizados os cálculos de projeto, a seleção de componentes comerciais e o desenvolvimento dos elementos mecânicos necessários à fabricação do equipamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processos Abrasivos

Processos abrasivos são comuns quando se precisa de uma boa qualidade superficial dos materiais em comparação a processos de usinagem convencionais (tornear, fresar, furar, etc.), podendo utilizar métodos com abrasivos ligados ou soltos, a depender da geometria, material, quantidade de material a ser removido e acabamento superficial desejado.

Visando melhorar a qualidade superficial e acabamento das arestas de corte, após a afiação de insertos de metal duro ou ligas cerâmicas, pode-se utilizar os processos de lapidação ou polimento, visto que estes são, por definição, praticamente o mesmo processo.

A lapidação é um processo que tem predominantemente a área limitada, com arestas de corte geometricamente indefinidas. É um processo de produção e acabamento, definido pelo desbaste com grãos soltos distribuídos em um fluido ou pasta de lapidação, que são guiados por uma ferramenta, apresentando trajetórias de corte idealmente não direcionadas dos grãos individuais (Klocke, 2009).

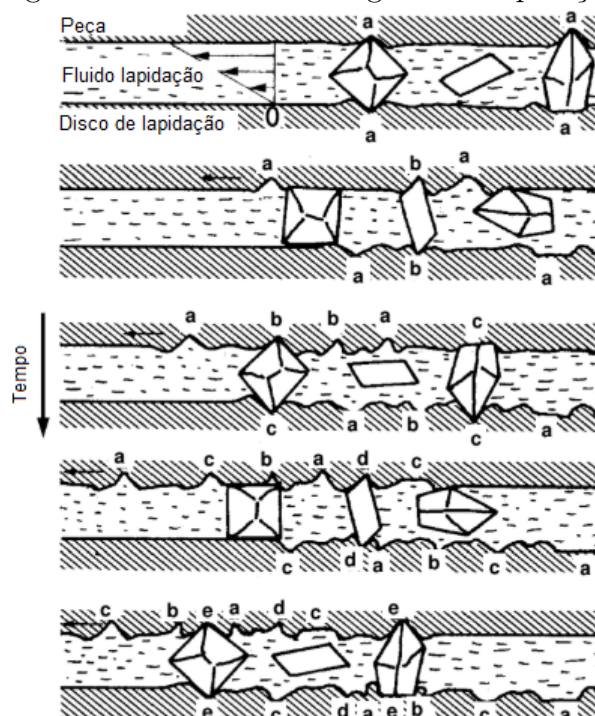
O método de usinagem de ultraprecisão por lapidação é seguido, de acordo com a qualidade superficial desejada, pelo processo de polimento. No polimento, os componentes são pré-lapidados para obter elevada remoção de material, mantendo a qualidade superficial e tolerância dimensional. O polimento é então feito para criar a mais alta qualidade superficial, que inclui acabamento espelhado (Klocke, 2009).

2.1.1 Lapidação

Entre as principais características do processo, a lapidação pode dar forma à peça obtendo dimensões desejadas e deve diminuir a rugosidade de um nível alto para um nível menos elevado. Essas características de uma lapidação só se mostram possíveis por conta da utilização de grãos de tamanhos maiores do que são apresentados em um polimento. A superfície que é lapidada mostra uma característica fosca que acaba não refletindo os raios de luz que incidem. No geral, o processo de lapidação antecede ao polimento, então, quanto menor a rugosidade que é alcançada na lapidação, menos tempo será necessário para o polimento (Otoboni, 2013).

Na lapidação, a superfície de trabalho é friccionada contra a superfície da peça a ser processada. A usinagem é realizada por meio da inserção de uma pasta de lapidação no espaço entre o disco de usinagem (ferramenta) e a peça de trabalho. No processo, grãos soltos (arestas de corte) são adicionados de forma contínua ou intermitente. A Figura 1 mostra o processo de usinagem por lapidação (Klocke, 2009).

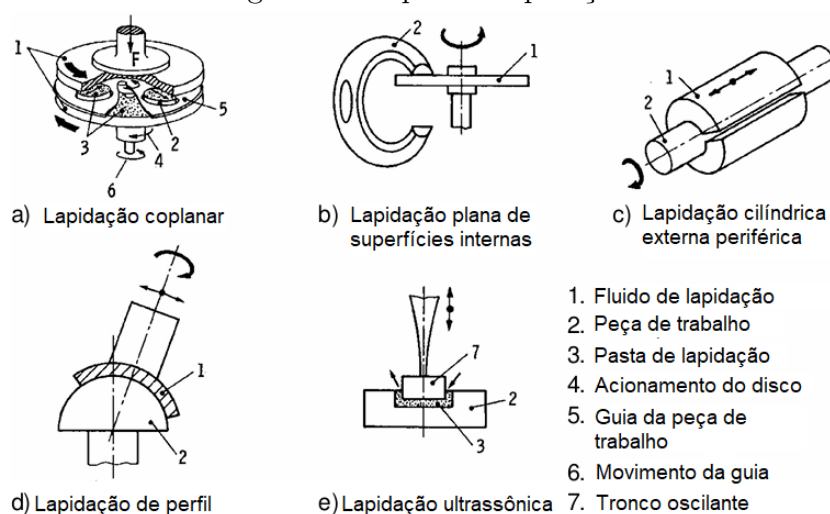
Figura 1 – Movimento dos grãos na lapidação



Fonte: Klocke (2009)

É possível subdividir os métodos de lapidação de acordo com a superfície ativa da ferramenta de lapidação. A Figura 2 apresenta alguns métodos de lapidação como: Sobreposição coplanar; Lapidação plana de superfícies internas, Lapidação cilíndrica externa periférica; Lapidação de perfis e Lapidação ultrassônica.

Figura 2 – Tipos de lapidação



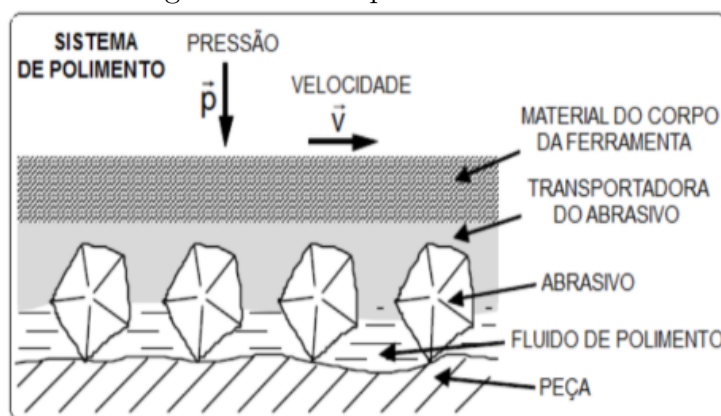
Fonte: Klocke (2009)

2.1.2 Polimento

Uma superfície polida é caracterizada pela ausência de cavidades e projeções com dimensões superiores ao comprimento de onda da luz refletida. Diferente da lapidação, o processo de polimento não deve oferecer alterações no formato e na dimensão de uma peça, e nem retirar elevadas quantidades de material (Otoboni, 2013).

Para realização de polimento utilizando politriz, a montagem dos equipamentos dependem do tipo de politriz ou técnica escolhida, podendo a peça ficar sob ou sobre o disco de polimento. A peça com suporte deve ficar abaixo de um eixo inferior da politriz, onde fará movimento circular, já o disco de polimento realizará movimentos de translação e rotação. No geral, um abrasivo suspenso em líquido (podendo ser água destilada ou deionizada) é aplicado de forma constante entre as superfícies, nesse momento, a pressão do movimento de polimento fará com que os abrasivos retirem essas porções de materiais dessa superfície, fazendo dessa forma a usinagem da peça (Otoboni, 2013). Na Figura 3 é apresentado um esquemático dos componentes presentes no processo de polimento.

Figura 3 – Princípio de Polimento

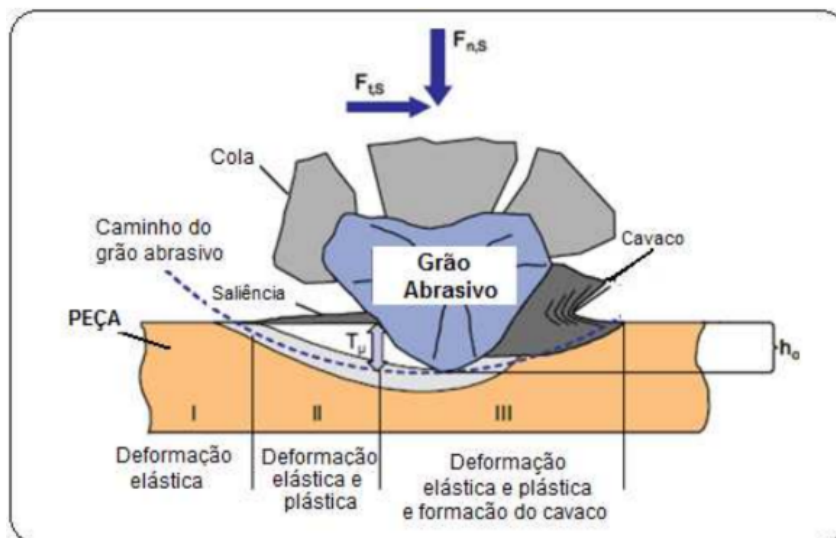


Fonte: Adaptado de Klocke (2009)

No polimento, as partículas abrasivas finas não podem deixar microfraturas na superfície. O processo de usinagem é realizado por meio de deformação elástica e plástica, conforme apresentado na Figura 4, para produção de um espelho liso na superfície de trabalho (Neto, 2012).

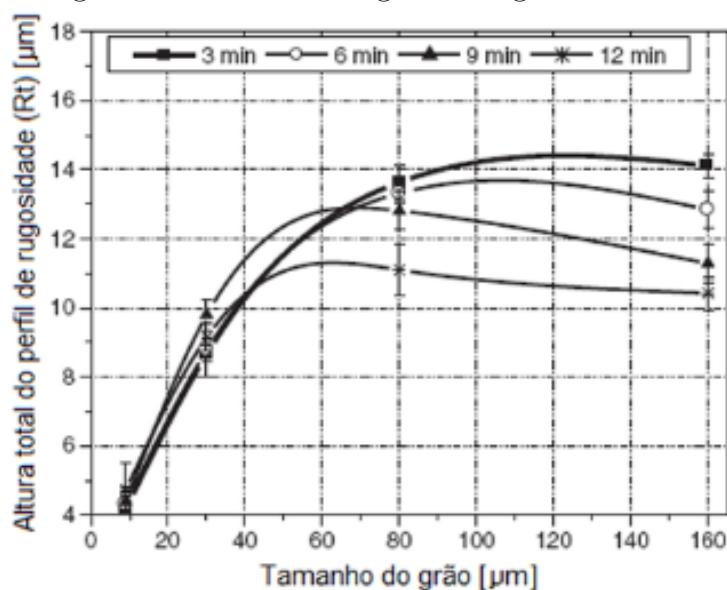
Em um processo de polimento, o acabamento então será proporcional ao tamanho do grão que será utilizado. Na Figura 5, é apresentada a correlação entre o tamanho de um grão e a rugosidade total (R_t) obtida. Para fins de análise, é notável que com o aumento do tempo de polimento, se tem uma pequena queda de rugosidade, isso pode acontecer por conta da diminuição do tamanho médio dos grãos, por conta de quebras do grão durante o processo (Otoboni, 2013).

Figura 4 – Zonas de Deformação no Polimento



Fonte: Adaptado de Klocke (2009)

Figura 5 – Tamanho do grão x Rugosidade total



Fonte: Belkhir D. Bouzid (2011)

No polimento, assim como na lapidação, a superfície da peça a ser processada e a superfície da ferramenta deslizam uma sobre a outra e uma pasta abrasiva, composta por um abrasivo e um fluido, geralmente à base de água, é inserida entre elas. Diferente da lapidação, as partículas abrasivas muito menores são geralmente usadas no polimento, o que limita o efeito abrasivo. Por essa razão, as interações físicas e químicas que ocorrem entre os componentes ativos no polimento adquirem uma importância crescente (Klocke, 2009). No Quadro 1 são apresentados alguns abrasivos utilizados no polimento de metais duros.

Os fluidos de polimento devem cumprir o suporte à possíveis reações químicas,

Quadro 1 – Abrasivos de polimento por tipo de material

Materiais metálicos	Argila (g- e a- Al_2O_3) Magnésio (MgO) Óxido de cromo (Cr_2O_3) Diamante (C) Dióxido de silício coloidal (SiO_2)
Materiais duros e quebradiços	Diamante (C) Dióxido de silício coloidal (SiO_2)
Vidro	Óxido ferroso (y- e g- Fe_2O_3) Dióxido de cério (CeO_2) Óxido de tório (ThO_2 – radioativo)

Fonte: Klocke (2009)

regulação de calor e distribuição e transporte de abrasivos usando os aditivos que são apropriados à água que podem se tornar mais ácido ($\text{pH} < 7$) ou mais básico ($\text{pH} > 7$) (Klocke, 2009).

De acordo com a hipótese de Preston, a pressão e a velocidade relativa são as variáveis que mais influenciam o processo de polimento. Muitos processos de polimento se comportam de acordo com essa hipótese em certas faixas de parâmetros, ou seja, dado um aumento na pressão e na velocidade relativa, a taxa de remoção aumenta correspondentemente (Klocke, 2009). No Quadro 2 são apresentadas as variáveis que influenciam no processo de polimento.

Quadro 2 – Parâmetros de polimento

Parâmetros do processo	Peça de trabalho	Pasta de polimento	Máquina
- Pressão - Distribuição da pressão - Velocidade relativa - Oscilação	- Estrutura - Propriedades químicas e físicas - Raio, diâmetro	- Concentração - Temperatura - Propriedades químicas - Viscosidade	- Tipo de máquina - Princípio cinemático - Rigidez
Grãos de polimento	Fluido de polimento	Perturbações	Ferramenta
- Propriedades físicas e químicas - Tamanho do grão - Forma do grão	- Material - Forma - Flexibilidade - Espessura	- Vibrações - Inomogeneidades - Influências ambientais	- Forma - Dimensões - Rigidez

Fonte: Adaptado de Klocke (2009)

2.2 Insertos

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. Partindo-se do princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para a confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem (Machado et al., 2009).

Para seleção de um material adequado para ferramenta de corte a ser empregada no processo de usinagem é fundamental identificar e analisar as principais características dos fatores que influenciam o processo. Nos aspectos mais relevantes a serem considerados estão as propriedades do material a ser utilizado como sua dureza, o tipo de cavaco gerado e o tipo de processo de usinagem adotado. Além disso, devem ser avaliadas as condições da própria ferramenta de corte, incluindo sua geometria, dimensões e o custo do material utilizado na fabricação dos insertos (Sabino, 2020).

Segundo Albano (2014) a seleção de uma material da ferramenta, se pondera em diversos fatores: Materiais utilizados, processo de usinagem, forma e dimensões da ferramenta e condições (parâmetros) de usinagem. Qualquer material de ferramentas de corte deve apresentar as seguintes características:

Uma boa dureza e quente: Em processos de usinagem a região de interface cavaco-ferramenta pode ultrapassar 1000°C, a ferramenta deve alcançar essa temperatura com uma dureza que suporte as tensões de corte.

Alta resistência ao desgaste: Na usinagem as ferramentas se desgastam pela abrasão, quanto melhor for a resistência a abrasão maior será a vida da ferramenta.

Alta tenacidade: Quanto maior a tenacidade do material maior será a sua resistência aos choques mecânicos inerentes ao processo de usinagem.

Estabilidade química: Em alguns casos o material da ferramenta tem afinidade química com o material a ser usinado, e isso provoca o desgaste por difusão, com ferramentas estáveis quimicamente este desgaste é minimizado.

O ideal é analisar que nenhuma ferramenta possui todas propriedades, de modo que será necessário escolher a opção mais adequada (Halcsik; Formigoni, 2020). O Quadro 3 apresenta materiais comumente utilizados como ferramentas de usinagem.

Nas operações de usinagem, acabam gerando muito calor e carga térmica na ferramenta. As temperaturas de corte, podem variar, na Figura 6 é mostrada uma relação entre a resistência à deformação térmica provenientes do processo de usinagem e a resistência à quebra, que também é incentivada pelos parâmetros de entrada do processo.

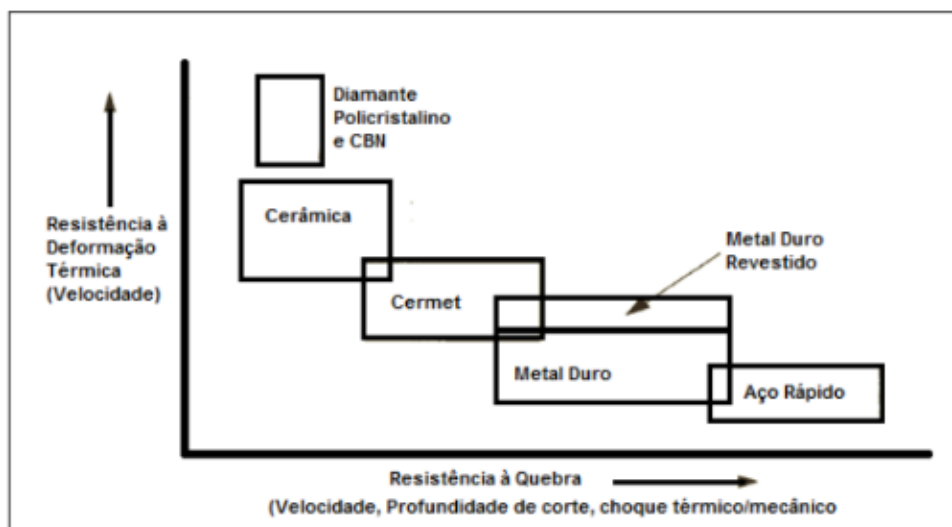
Em razão do escopo deste trabalho, os insertos de metal duro e cerâmicos serão apresentados de forma mais detalhada.

Quadro 3 – Materiais ferramenta de corte

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	APLICAÇÕES	DESENVOLVIMENTOS
AÇOS-CARBONO	- Principais materiais empregados no final do século XVIII e início do século XIX. - Geralmente tratados termicamente em água. -Perdem dureza quando aquecidos a temperaturas na faixa do revestimento.	-Custo relativamente baixo. -Principal tratamento empregado constitui de têmpera e revenido.	-Aplicados a ferramentas para usinagem a baixas velocidades de corte. -Aplicados a ferramentas de conformação.	-Formação de camadas de Ti e Ni no substrato de aço carbono para aumentar a micro dureza superficial.
AÇOS RÁPIDOS	-Foram desenvolvidos na virada do século XIX. -Composto por uma liga com os seguintes elementos: C, W, Cr, Mo, V. -São divididos em dois grandes grupos, aços ao tungstênio representado pela letra “T”, e aços ao molibdênio representado pela letra “M”	-Material tenaz de elevada resistência ao desgaste. -As velocidades de corte podem atingir 35 m/min. -Os elementos de liga podem ser modificados de acordo com a aplicação.	-Aplicados em brocas, fresas inteiriças e ferramentas de barra para aplicações de torneamento.	-Adição de TiC, CaF e MnS em aço rápido sinterizado, para a diminuição do atrito a altas velocidades e temperaturas..
METAIS DUROS E CERMETS	-Entrou no mercado a partir da década de 1970. -Contém uma fase cerâmica e uma fase metálica. -São constituídos por partículas duras ligadas por um aglomerante.	-Alta dureza a elevadas temperaturas. -Grande estabilidade química com pouca tendência a difusão.	-Aplicadas principalmente em acabamento dos aços. -Aplicados em usinagens de altas velocidades de corte .	-Adição de nano partículas de TiN a Cermets a base de TiC.
CERÂMICAS	-Utilizado como materiais de ferramentas desde a década de 1950. -A baixa condutividade e baixa tenacidade dificultam suas aplicações. -Podem ser produzidas a base de alumina, a base de silício ou mistas que são chamadas de Sialons.	-Alta dureza a quente. - Excelente estabilidade química. -Alta resistência ao desgaste.	-Aplicadas na usinagem do ferro fundido. -Aplicadas também na usinagem de aços endurecidos.	-Reforços de Sic em formas de whiskers, em cerâmicas a base de alumina, com o objetivo de diminuir os mecanismos de falha.
MATERIAIS ULTRADUROS	-Apresentam durezas acima de 3000 HV. -Fazem parte desse grupo os diamantes naturais, os diamantes sintéticos e os nitretos cúbicos de boro. -São muito frágeis, e quebram sobre impacto. -Apresentam alto custo de produção.	-Atingem acabamentos superficiais da ordem de Ra= 25 nm. -Processo competitivo na fabricação em série.	-Indicados para super acabamentos. -Indicado para ligas de aços, ligas de níquel e ferro fundido.	-Aplicação de ferramentas de nitreto cúbico de boro, revestidas, no torneamento de ligas de alta dureza.

Fonte: Albano (2014)

Figura 6 – Resistência à quebra x Resistência a deformação térmica



Fonte: Krebs (2019)

2.2.1 Insertos de Metal Duro

Quando se fala em metais duros, eles são os materiais mais utilizados em ferramentas de corte por conta das suas características. Resistência mecânica, resistência a desgaste e tenacidade estão dentre as principais características dos metais duros (Rezende, 2020).

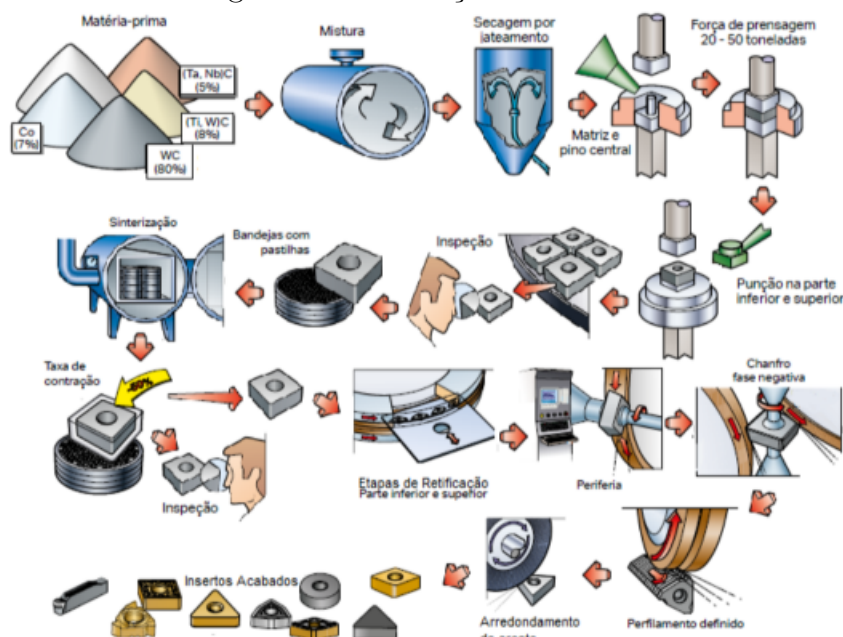
Insertos de metal duro são obtidos pelo processo de metalurgia em pó. Para a fabricação, é obtido a partir de pós metálicos de Tungstênio, que misturado a carbono puro, se obtém carboneto de tungstênio. A partir deste processo deve-se obter carbonetos contendo de 6,10% a 6,15% de carbono, nos quais de 0,05% a 0,10% devem estar na forma livre. Após esse processo é adicionado cobalto, que em seguida são sinterizados (Sabino, 2020). Na Figura 7 é apresentado um esquemático do processo de fabricação de insertos por metalurgia do pó.

Os metais duros com carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co) mostram na sua composição de 4% a 30% do peso em cobalto, e destes, na usinagem é comumente utilizado metais duros com cobalto na faixa de 4% a 12%. Apresenta também, uma variação média de tamanho de grão do carboneto entre 0,5 e 10 μm . Estes são fatores essenciais para uma ferramenta de corte conforme seu desempenho (Sabino, 2020). Na Figura 8 é apresentado um exemplo de microestrutura de metal duro com distribuição uniforme dos carbonetos em uma matriz de cobalto.

Na Figura 9 é apresentado um diagrama esquemático da composição do metal duro:

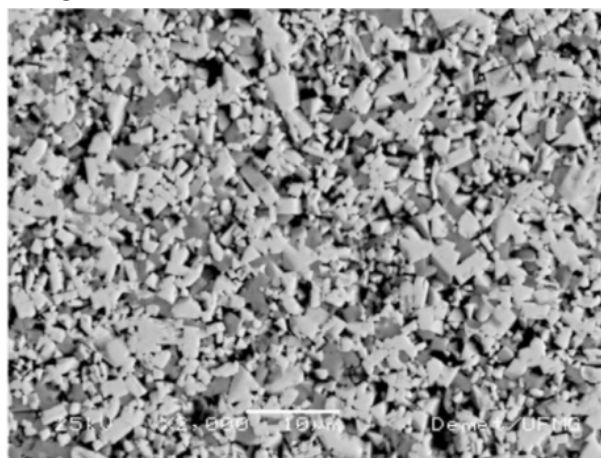
No geral, as ferramentas de metal duro progrediram com sucesso em usinagem de ferro fundido e em materiais não ferrosos, com resultados insatisfatórios na operação de aço. A causa dessa falha é o alto atrito. Com o desenvolvimento dessa classe de material

Figura 7 – Fabricação de insertos



Fonte: Halcsik e Formigoni (2020)

Figura 8 – Microestrutura do metal duro



Fonte: Albano (2014)

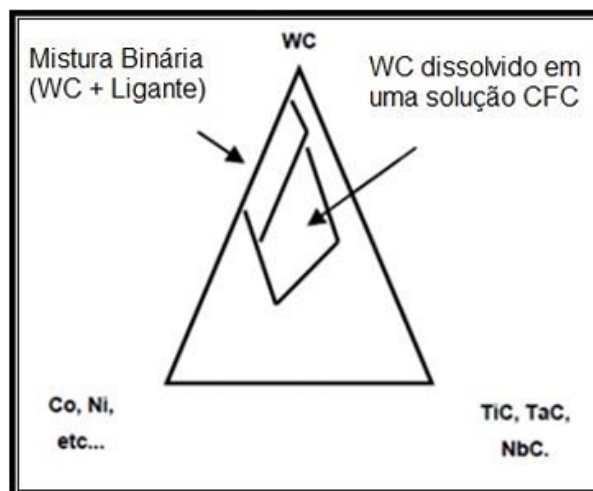
verificou-se que a resistência ao desgaste do metal duro é aumentada com a adição de carbonetos de titânio e tântalo na composição original (Machado et al., 2009).

2.2.2 Insertos Cerâmicos

Para as ferramentas cerâmicas, o emprego principal é em aplicações onde pode ser possível colocar elevada velocidade de corte, operações de acabamento de usinagem em aços endurecidos, peças de ferro fundido e usinagem de ligas de níquel.

Embora a elevada dureza confira a esses insertos suas vantagens competitivas e características únicas de corte, a fragilidade inerente também representa as principais causas

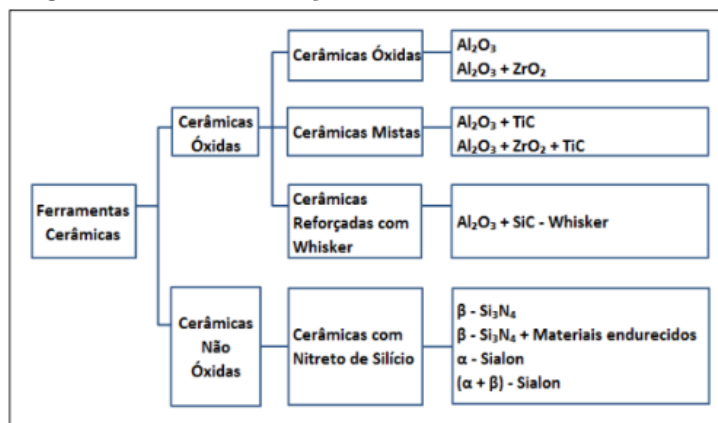
Figura 9 – Composição esquemática do metal duro



Fonte: Souza (2016)

de suas limitações mecânicas. A figura 10 apresenta uma classificação das ferramentas cerâmicas por material.

Figura 10 – Classificação de Ferramentas Cerâmicas



Fonte: Krebs (2019)

Diferente das ferramentas de metais duros, a elevada dureza das ferramentas cerâmicas as tornam suscetíveis ao choque mecânico durante a usinagem, sua elevada temperatura de fusão e a falta de uma fase aglutinante secundária, permite que não haja amolecimento em elevadas velocidades, apresentem maiores estabilidades químicas e resistência à oxidação (Krebs, 2019).

2.2.3 Métodos de preparação de arestas

A afiação de um inserto tem como finalidade realizar a preparação de um fio de corte, definindo a geometria da aresta. Como já apresentado anteriormente, insertos sofrem desgaste por abrasão, deformação plástica entre outros. A afiação auxilia melhorando a

estabilidade do processo, favorecendo tanto o desempenho técnico quanto os aspectos econômicos e sustentáveis. No Quadro 4 são apresentados alguns métodos de afiação de insertos.

Quadro 4 – Métodos de afiação de insertos

<i>Método</i>	<i>Descrição Resumida</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Fonte</i>
Retificação (Grinding)	Processo abrasivo de remoção de material em maior escala, usando rebolo de diamante ou CBN para formar geometria macro do inserto.	Metal duro, cerâmica, PCD (com cautela).	Meetyou Carbide
Edge Honing (Arredondamento)	Arredondamento controlado da aresta (10–50 μm) via escovas diamantadas ou abrasivos. Feito para fortalecer a ferramenta	Aumentar robustez da aresta e vida útil.	Vapormatt
Laser Honing	laser de pulsos ultracurtos remove material da aresta de forma extremamente controlada.	PCD, PCBN, cerâmicos.	Cutting Tool Engineering
Polimento	Mídias abrasivas + movimentos circulares para deixar a aresta lisa.	Metal duro, cerâmicos.	Belair Finishing

2.2.4 Polimento e aumento da vida útil

O polimento de insertos de corte, sendo eles de cerâmica ou metal duro, poderia elevar a vida útil da ferramenta, por várias razões, relacionadas à redução de atrito e controle de desgaste. Ao reduzir a rugosidade das faces e suavizar a aresta de corte, o polimento contribuiria para a diminuição do atrito entre inserto e peça, reduzindo o desgaste por abrasão.

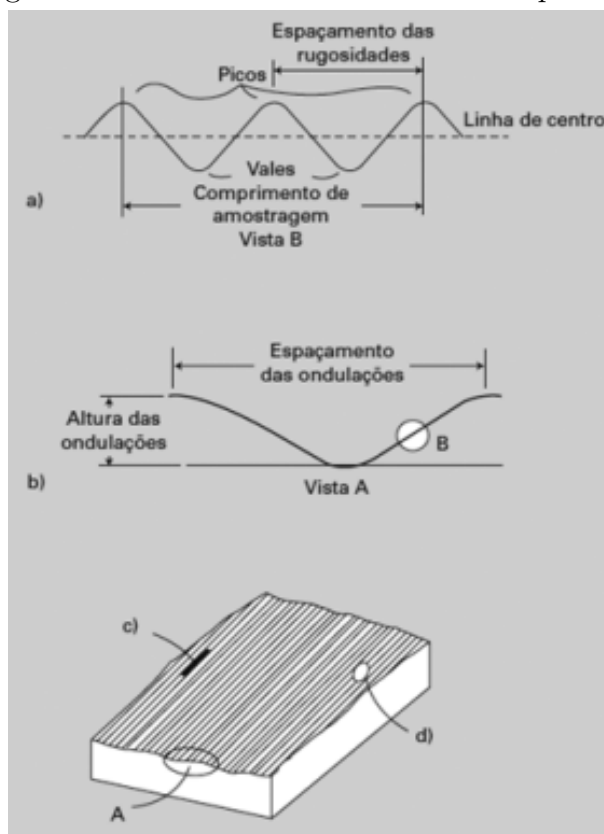
O polimento evita a ocorrência de microfraturas e promove uma superfície espeelhada, que favorece tanto a durabilidade da ferramenta quanto a qualidade superficial da peça usinada (Neto, 2012).

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.). Na figura 11 é apresentada uma visão de como funciona a rugosidade (Machado et al., 2009).

De acordo com Gao et al. (2024), a obtenção de uma rugosidade média nanométrica ($R_a \approx 2,5\text{nm}$) nas faces do inserto via polimento reflete no aumento da vida útil da ferramenta. Justificada pela redução do atrito na interface de corte proporcionada pela superfície lisa, o que desacelera a progressão do desgaste de flanco e previne o colapso prematuro da aresta. A Figura 12 fotografia do estudo, antes do polimento (a) e depois do polimento (b).

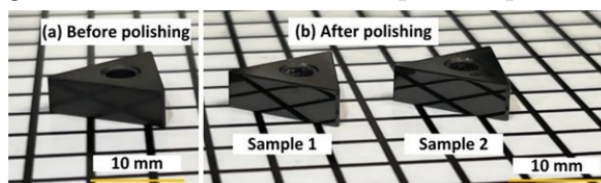
A região da aresta, praticamente não se alterou, ou seja, a forma geométrica original foi bastante preservada. Além disso, os insertos polidos mostraram vida útil até $1,75\times$ maior do que insertos não polidos. Portanto, já existem evidências de que um polimento bem feito pode melhorar a vida útil de uma ferramenta e reduzir desgaste.

Figura 11 – Elementos de acabamento superficial



Fonte: Machado et al. (2009)

Figura 12 – Insertos antes e depois de polimento



Fonte: Gao et al. (2024)

A prática de polimento e preparação de aresta em ferramentas de corte é amplamente utilizada na indústria, e é oferecida por diversas empresas especializadas. Essa prática é realizada no geral em ferramentas de alta precisão pensando no aumento da vida útil e melhora no desempenho de corte.

Empresas especializadas, como a Vapormatt, oferecem processos de preparação de aresta e polimento específicos para ferramentas de metal duro, de forma semelhante, a Bel Air Finishing e a Mutschler Edge Technologies disponibiliza serviços de polimento e preparação de aresta, onde as arestas afiadas resistem a lascas, permitem uma usinagem mais suave e aumentam a durabilidade da ferramenta. A presença desses serviços no mercado demonstra que o polimento da aresta é reconhecido industrialmente como um método eficaz para melhorar o desempenho e a durabilidade de insertos de metal duro.

2.2.5 Melhor adesão ao revestimento

Nos processos de usinagem as ferramentas são submetidas a condições severas como altas temperaturas, atrito, elevadas tensões localizadas entre outras, essas condições propiciam a ação dos mecanismos de desgaste. Para retardar esse desgaste a aplicação de revestimentos tem provado ser um meio eficaz. Os revestimentos oferecem uma melhor resistência ao desgaste da ferramenta ocasionando assim uma redução dos custos do processo (Albano, 2014).

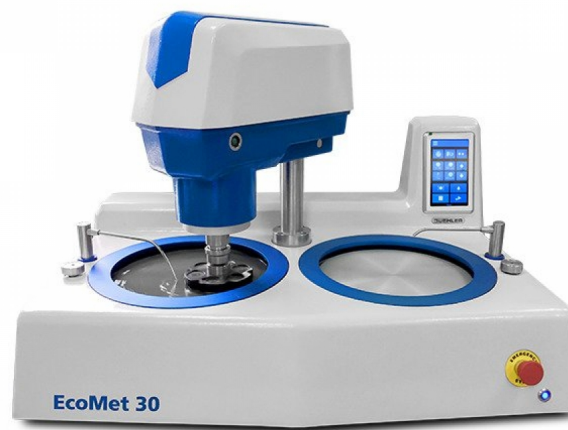
Uma superfície que se apresenta mais regular, que tem sua rugosidade reduzida por um polimento, melhora a interface do substrato ao revestimento, que diminuiria falhas de adesão que aumentam a duração de um filme depositado, Assim a junção de polimento, revestimento e afiação de insertos, seria uma boa solução que maximizaria a performance de inserto para usinagem mais severas (Albano, 2014) (Souza, 2016).

3 PROPOSTA DE PROJETO

3.1 Projeto Conceitual

O projeto do dispositivo parte de modelos de politriz metalográficas automáticas comerciais, voltados à preparação de amostras de materiais para ensaios de laboratório. O modelo apresentado na Figura 13 mostra um modelo sofisticado de politriz semiautomática, que alia um movimento rotativo a uma pressão na amostra a ser polida.

Figura 13 – Politriz Ecomet 30



Fonte: Instrumental Brasil

Gusmão et al. (2023) apresentam um *retrofit* (modernização de um equipamento através da incorporação de novas tecnologias) de uma politriz metalográfica, com o objetivo de automatizar um processo manual. Assim como a politriz automática industrial, a politriz modernizada é voltada para o polimento de amostras de laboratório.

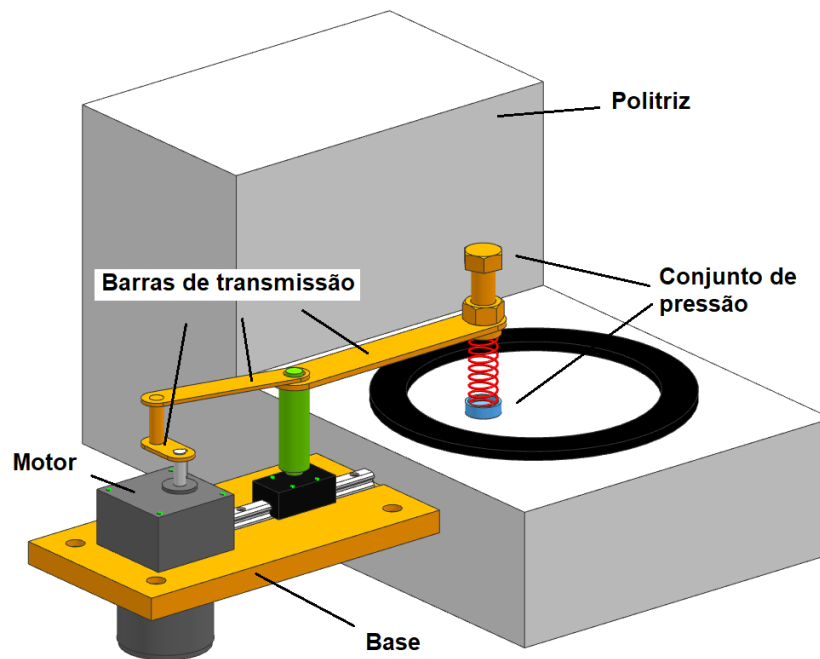
Figura 14 – Exemplo de *retrofit* em politriz metalográfica



Fonte: Gusmão et al. (2023)

O dispositivo segue o mesmo padrão de design, como um braço, com base externa ao dispositivo e posicionando a peça a ser polida entre o centro e a periferia do prato da politriz. Na Figura 15 é apresentado o projeto conceitual do dispositivo, com os principais elementos de construção, escala e posicionamento aproximados em relação a politriz. A partir deste desenho inicial, foram definidas as condições de contorno e valores iniciais para os cálculos subsequentes.

Figura 15 – Projeto Conceitual do Dispositivo de Polimento



Fonte: Autoria própria

3.2 Procedimento

Para o desenvolvimento do dispositivo semiautomático de polimento, foi realizado um levantamento bibliográfico, apresentando técnicas de polimento empregadas na indústria, princípios da metalografia e parâmetros utilizados em politrizes. Nessa etapa é necessário compreender os mecanismos envolvidos no processo de remoção de material, além de identificar práticas comumente utilizadas no polimento metalográfico, manual ou automatizado.

Nesse contexto, são definidos, a seguir, a velocidade de rotação da politriz, as dimensões do inserto e o tipo de movimento de polimento adotado, os quais servem de base para o dimensionamento dos componentes e para o atendimento aos requisitos de desempenho do conjunto.

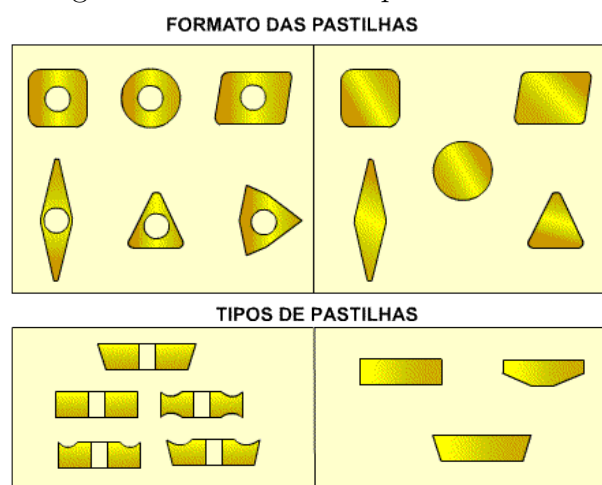
3.2.1 Velocidade da Politriz

A velocidade de trabalho do modelo de politriz escolhido, ALP-2 da Alcrisa, é de 300 ou 600 RPM. (Alcrisa, 2024) A escolha desse equipamento também se justifica pela sua ampla utilização em laboratórios de preparação metalográfica, oferecendo um padrão de velocidade.

3.2.2 Dimensões do inserto

Os insertos são elementos que possuem diferentes formatos, tamanhos, tolerâncias e geometrias, cada um adequado a um tipo de material, operação e condição de corte. São ferramentas utilizadas em diferentes processos de usinagem, principalmente em operações como torneamento, fresamento e furação.

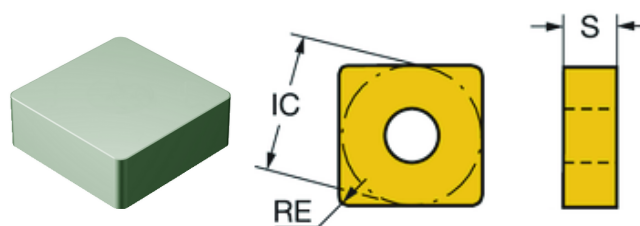
Figura 16 – Formato e tipos de insertos



Fonte: CIMM

Para o andamento do projeto, será escolhido um inserto com geometria simplificada, quadrado e com ângulos de folga e saída iguais a 0° (zero graus). A Figura 17 apresenta o modelo comercial de um inserto com a geometria escolhida, com suas dimensões apresentadas na Tabela 1.

Figura 17 – Modelo comercial de inserto



Fonte: Sandvik Coromant

Tabela 1 – Medidas do inserto

IC	12,7 mm
S	4,7625 mm
RE	0,7938 mm

Fonte: Sandvik Coromant

Para este projeto, também seria possível considerar outras dimensões de insertos, avaliando variações de formato, tamanho e geometria conforme a necessidade. Para o processo de polimento, a escolha não tem grande impacto, sendo necessário apenas a troca do porta-pastilha que será apresentado posteriormente.

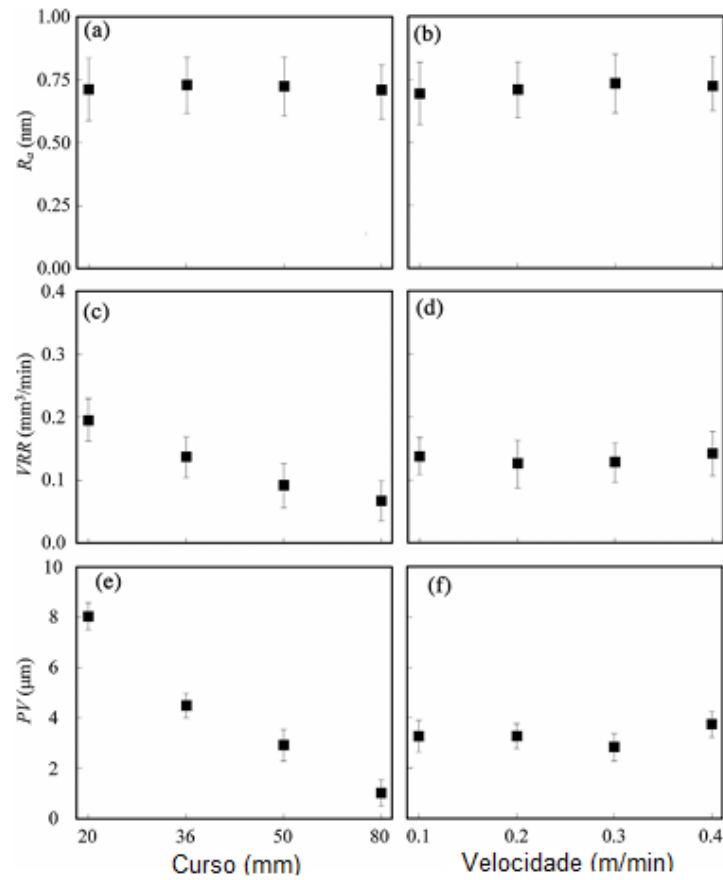
3.2.3 Movimento de polimento

O movimento relativo entre a peça e o disco de polimento ou lapidação não é um consenso entre as literaturas e manuais encontrados, visto que a disposição aleatória dos grãos em processos abrasivos não permite uma análise mais precisa. Em sua maioria, os parâmetros do polimento metalográfico são definidos pela experiência do operador.

Alguns manuais, como SumMet (2018), descrevem boas práticas, comumente utilizadas no polimento metalográfico manual, sendo a amostra segura com uma ou ambas as mãos, dependendo da preferência do operador, e girada em uma direção contrária à rotação da roda de polimento. Além disso, a amostra é continuamente movida para frente e para trás entre o centro e a borda da roda, garantindo assim a distribuição uniforme do abrasivo e o desgaste uniforme do pano de polimento. (Alguns utilizam uma pequena rotação do pulso ao mover a amostra do centro para a borda de um dos lados da roda.) Após cada etapa, a amostra é girada de 45 a 90° para que a abrasão não seja unidirecional.

Pelo experimento realizado por Wang, Yin e Huang (2015) vê-se que a adição de um movimento de translação no processo de polimento não melhora a qualidade superficial da peça em relação a rugosidade, porém, nota-se grande melhora na planicidade (PV) e redução no volume de remoção de material (VRR), apresentados na Figura 18. Também nota-se que a velocidade deste movimento de translação não mostra grande influência em nenhum dos parâmetros.

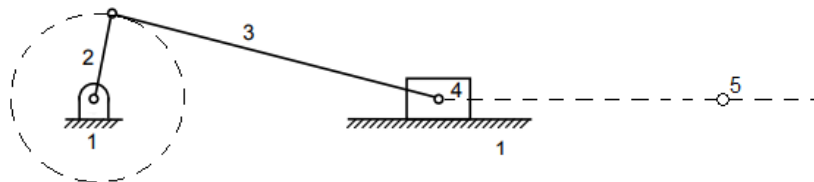
Figura 18 – Influência do movimento de translação



Fonte: Wang, Yin e Huang (2015)

O modelo de politriz conta com raio do disco de 100 mm, considerando as medidas do inserto e demais peças auxiliares, o movimento de translação definido para este projeto é de 60 mm, considerando o movimento no centro do inserto. A Figura 19 a seguir mostra como o movimento de translação se comporta como um mecanismo biela-manivela com corredeira, onde o movimento de rotação inicial será realizado por um motor.

Figura 19 – Movimento biela-manivela com corredeira



Fonte: Adaptado de Flores e Claro (2007)

3.3 Memorial de Cálculo

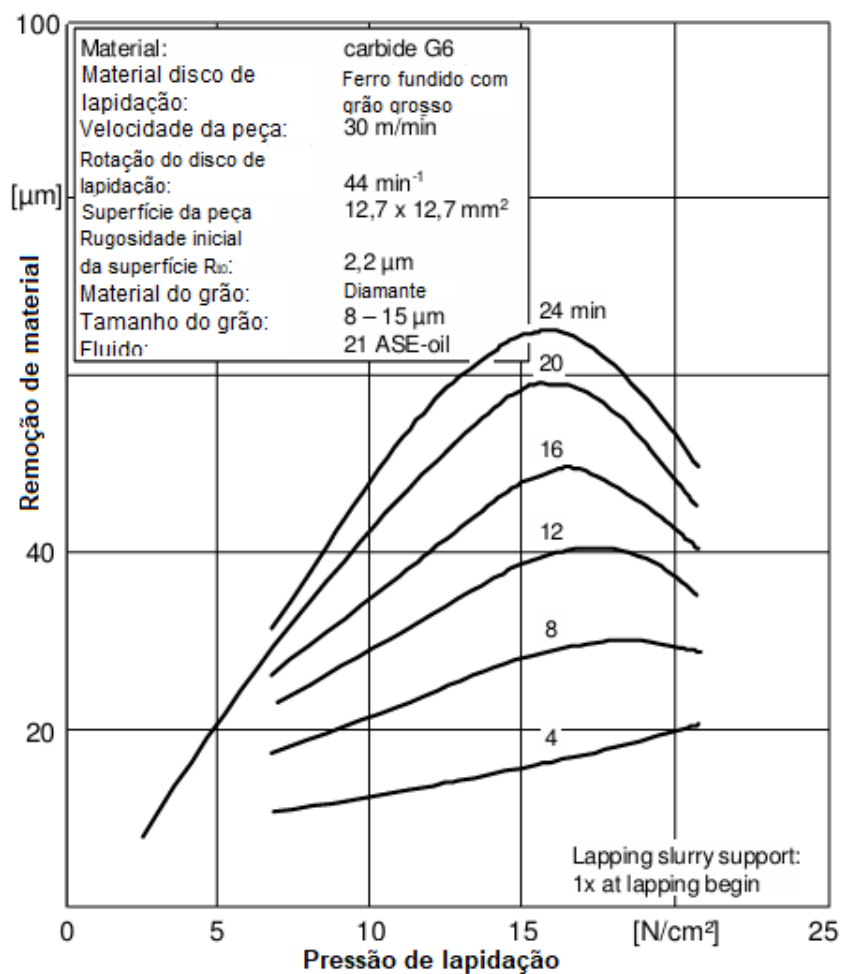
3.3.1 Forças de polimento

Para polimentos manuais, utilizando politriz metalográfica, a pressão aplicada durante o polimento é um parâmetro crítico e deve ser ajustada conforme a experiência e o comportamento do material. O ideal é utilizar uma pressão manual firme sobre a amostra (Summet, 2018).

A aplicação da força depende de diversos fatores, como o tipo de material a ser polido, o tamanho e a composição das partículas abrasivas, além da quantidade de material que se deseja remover. Como referência, Klocke (2009) apresenta pressões de lapidação entre 10 e 20 N/cm² para remoção em metal duro *carbide G6* utilizando grãos de diamante, apresentados na Figura 20.

Para o dispositivo, busca-se a abrangência no processamento dos insertos, podendo realizar grande remoção de material ou polimento fino, que necessitaria de forças de polimento menores.

Figura 20 – Influência da pressão de lapidação na remoção de material



Fonte: Klocke (2009)

Considerando uma pressão máxima aplicada sobre o inserto de 20 N/cm^2 e o modelo de inserto escolhido conta com área de face de $12,7 \times 12,7 \text{ mm}$, a força necessária será de $32,258 \text{ N}$.

$$F_N = P \cdot A \quad (1)$$

$$F_N = 20 \cdot (1,27 \cdot 1,27) \quad (2)$$

$$F_N = 32,258 \text{ N} \quad (3)$$

Enquanto a força normal (F_N) é perpendicular ao disco da politriz, a força tangencial (F_T) é paralela ao vetor da velocidade linear do disco no contato com a peça. A força tangencial é o resultado do produto da força normal com o coeficiente de atrito.

O experimento de Cozza et al. (2010) define valores para o coeficiente de atrito entre sistemas revestidos de nitreto de titânio (TiN) e carbetto de titânio (TiC) submetidos a desgaste com micro-abrasivo, provenientes de pasta abrasiva com 25% de carbetto de silício (SiC) com partículas de tamanho médio de $5 \mu\text{m}$ (micrometro). A dureza dos revestimentos e variação na força normal aplicada não apresentaram grande influência no coeficiente de atrito, com valores médios entre 0,6 e 0,74.

Considerando que o material dos inserts apresenta características mecânicas comuns com os materiais do experimento citado, será considerado um valor médio de 0,7 para o coeficiente de atrito, resultando em uma força tangencial igual a $22,58 \text{ N}$.

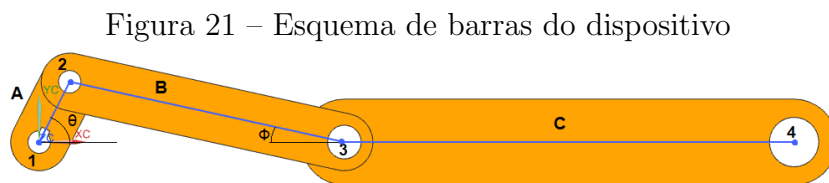
$$F_T = F_N \cdot \mu \quad (4)$$

$$F_T = 32,258 \cdot 0,7 \quad (5)$$

$$F_T = 22,58 \text{ N} \quad (6)$$

3.3.2 Movimento do inserto

Dado o movimento de translação do inserto mencionado anteriormente, para relacionar a posição do inserto ao movimento angular inicial é necessário definir o comprimento das barras e relacionar o ângulo formado entre elas e o eixo de coordenadas horizontal, demonstrado na Figura 21.



Fonte: Autoria própria

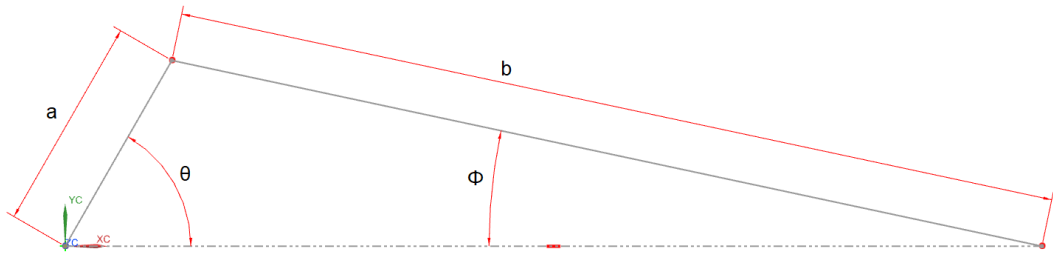
Inicialmente, tem-se a seguinte expressão para posição x_4 , onde a , b e c são, respectivamente, os comprimentos das barras A, B e C e, θ e ϕ as respectivas posições angulares em relação ao eixo horizontal x .

$$x_4 = c + a \cdot \cos\theta + b \cdot \cos\phi \quad (7)$$

Cada barra tem sua dimensão escolhida de forma a cumprir sua função. A primeira barra (A), ligada ao motor, tem dimensão definida pelo movimento de translação do inserto, sendo este de 60 mm. Portanto, a barra motora deve ter 30 mm entre os centros. A segunda barra (B) e terceira barra (C) têm suas dimensões definidas pelos outros elementos estruturais do dispositivo, como a guia deslizante, motor elétrico, base e a própria politriz, desta forma, suas medidas são de 125 mm e 200 mm entre os centros, respectivamente.

Visando relacionar a posição do inserto apenas ao ângulo θ do movimento motor, aplica-se a lei dos senos ao triângulo formado pelas duas primeiras barras, A e B, e os ângulos opostos, demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Demonstrativo



Fonte: Autoria própria

$$\frac{a}{\sin\phi} = \frac{b}{\sin\theta} \quad (8)$$

Resolvendo a equação para função de $\sin(\phi)$ e a adequando a equação fundamental da trigonometria.

$$\cos\phi = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}\sin^2\theta} \quad (9)$$

Substituindo na equação 7 do movimento, temos.

$$x_4 = c + a \cdot \cos\theta + b \cdot \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}\sin^2\theta} \quad (10)$$

Substituindo os valores das barras pelas medidas já mencionadas, temos a seguinte equação para o movimento do inserto.

$$x_4 = 200 + 30 \cdot \cos\theta + 125 \cdot \sqrt{1 - \frac{30^2}{125^2} \sin^2\theta} \quad (11)$$

O gráfico abaixo foi gerado utilizando MATLAB e mostra que o movimento de translação respeita o limite de 60 mm estabelecido anteriormente, variando entre 295 mm e 355 mm em relação ao eixo do motor.

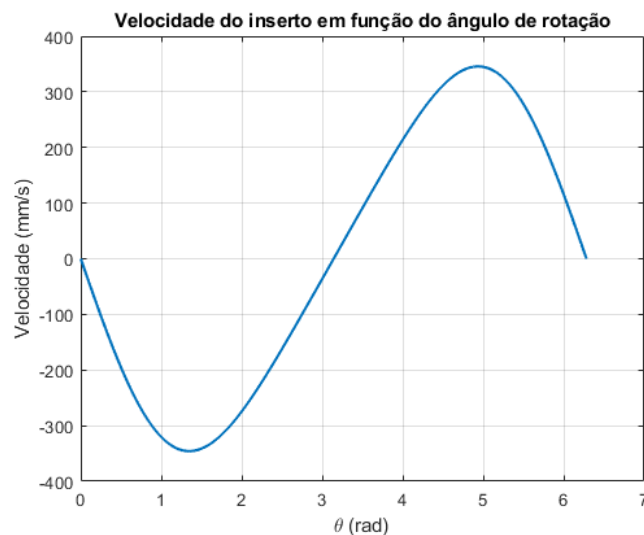
Figura 23 – Curva do movimento de translação



Autoria própria

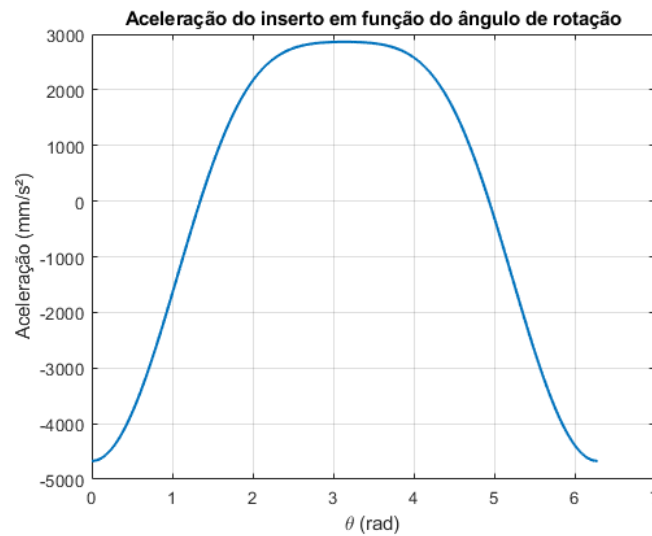
Para melhor compreensão dos esforços relacionados ao movimento de translação do insertos, as Figuras 24 e 25 apresentam os gráficos referentes a velocidade e aceleração do inserto.

Figura 24 – Curvas de Velocidade e aceleração do movimento



Autoria própria

Figura 25 – Curvas de Velocidade e aceleração do movimento



Autoria própria

3.3.3 Eixo suporte

Para a estrutura do dispositivo, será utilizado um eixo central, responsável pelo suporte das barras de movimentação. O eixo tem montagem paralela a força normal de polimento e espaçamento horizontal dado pela barra de translação, medindo 200 mm. A altura do eixo é igual a 75 mm, delimitada pela altura de outros componentes, como a politriz metalográfica e a mola de compressão. A figura 26 representa o eixo e as forças de polimento envolvidas, transferidas pela mola de compressão a barra de translação.

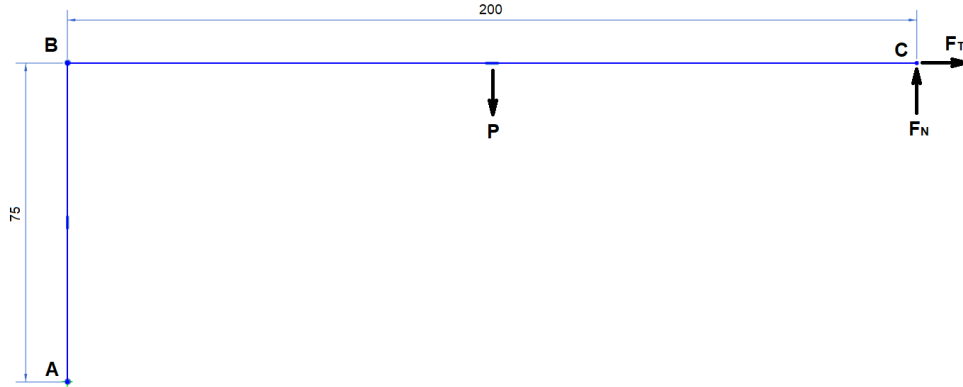
Figura 26 – Esquemático dos esforços no eixo



Autoria própria

Em seguida, para o dimensionamento do diâmetro deste eixo, realiza-se a análise estrutural, com análise do diagrama de corpo livre e equilíbrio das forças e momentos, conforme a Figura 27.

Figura 27 – Diagrama de corpo livre



Autoria própria

$$\sum F_x = F_T - R_{Ax} = 0 \quad (12)$$

$$\sum F_y = F_N - R_{Ay} - P = 0 \quad (13)$$

$$\sum F_z = 0 \quad (14)$$

$$\sum M_a = \vec{M}_A - \vec{r}_{AC} \times \vec{F} - \vec{r}_{AP} \times \vec{P} = 0 \quad (15)$$

Resultando:

$$R_{Ax} = F_T \quad (16)$$

$$R_{Ay} = F_N - P \quad (17)$$

$$\vec{M}_A = \vec{r}_{AC} \times \vec{F} + \vec{r}_{AP} \times \vec{P} \quad (18)$$

O vetor de força P representa o peso próprio do braço do dispositivo, com massa aproximadamente 116,7 g, o vetor P resulta em 1,14 N.

As forças de polimento/lapidação apresentadas anteriormente serão revistas para o seguimento deste projeto, visto que a mola selecionada para realizar a força normal (apresentada posteriormente) permite a aplicação de força total de 80 N. Deste modo, os valores corrigidos para o cálculo do momento em A serão de 80 N para F'_N e 56 N para F'_T .

$$\vec{M}_A = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ AC_x & AC_y & AC_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ AP_x & AP_y & AP_z \\ 0 & -P & 0 \end{vmatrix} \quad (19)$$

$$\vec{M}_A = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 200 & l & 0 \\ F'_T & F'_N & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 100 & l & 0 \\ 0 & -P & 0 \end{vmatrix} \quad (20)$$

$$\vec{M}_A = (0)\hat{i} + (0)\hat{j} + (200 \cdot F_N - l \cdot F_T - 100 \cdot P)\hat{k} \quad (21)$$

Com comprimento $l = 75$ mm, $P = 1,14$ N, $F_N = 80$ N e $F_T = 56$ N tem-se:

$$M_A = \sqrt{(200 \cdot F_N - l \cdot F_T - 100 \cdot P)^2} \quad (22)$$

$$M_A = 11686 \text{ Nmm} \quad (23)$$

Para determinar o diâmetro mínimo do eixo, Juvinall e Marshek (2012) propõe que eixos circulares e carregamento de flexão respeitem a seguinte equação para tensão máxima admissível.

$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (24)$$

O carregamento do eixo é alternado, variando o sentido do vetor de força tangencial de polimento de acordo com o movimento do inserto. Deste modo, Norton (2013) pode-se aplicar o critério de Goodman, utilizado em projetos com tensões uniaxiais repetidas.

$$\sigma_a = S_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right) \quad (25)$$

Adicionando fator de segurança e considerando carregamento totalmente alternado, temos:

$$\frac{\sigma_a}{S_f} = \frac{1}{n} \quad (26)$$

O material utilizado para fabricação do eixo será o alumínio, devido a sua alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica. O fornecedor Shockmetals traz informações sobre ligas de alumínio e seus principais usos, para estruturas e equipamentos, uma liga recomendada é a 6261 com limite de resistência à tração (S_u) igual a 260 MPa.

A aplicação do critério de Goodman implica na utilização do limite de resistência a fadiga (S_f), valor não fornecido para o material escolhido. Segundo Norton (2013), para alumínio, este valor pode ser aproximado de 40% do valor do limite de resistência à tração.

Para determinar o valor do fator de segurança, Juvinall e Marshek (2012) sugere valores recomendados. Para mecanismos com carga repetida, são recomendados valores entre 1 e 6, e considerando equipamentos dos quais as propriedades e esforços são conhecidos de forma média, operados em ambientes comuns, são recomendados valores entre 2 e 2,5. Como este dispositivo visa ser abrangente quanto aos materiais utilizados e, consequentemente, os esforços envolvidos, o valor do fator de segurança adotado será de 2,5. Deste modo, o diâmetro mínimo recomendado para o eixo é:

$$\frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_f}{n} \quad (27)$$

$$d^3 = \frac{32Mn}{\pi S_f} \quad (28)$$

$$d^3 = \frac{32 \cdot 11686 \cdot 2,5}{\pi \cdot 0,4 \cdot 260} \quad (29)$$

$$d = 14,20 \text{ mm} \quad (30)$$

3.3.4 Estrutura

Para construção do dispositivo serão necessários elementos fabricados, como a base, eixo de sustentação e os braços que realizam o movimento. O material escolhido para compor estes elementos é o alumínio, principalmente pela sua alta resistência à corrosão, além de outros aspectos como baixa densidade e alta resistência mecânica. O quadro 5 apresenta perfis comerciais para a construção das estruturas em alumínio com o peso estimado das mesmas.

Quadro 5 – Estruturas de alumínio

	Braço motor	Braço rotação	Braço translação	Base	Eixo
Perfil (pol)	1"x 1/8"	1"x 1/8"	1 1/2" x 3/16"	8"x 1"	1"
kg/m	0,217	0,217	0,490	13,935	1,368
Comprimento (mm)	55,4	150,4	238,1	305	90
Massa (g)	12,02	32,64	116,67	4250	123,12

Fonte: Autoria própria, adaptado de Shockmetais

3.4 Escolha dos Elementos Padrão

3.4.1 Mola

A força normal de polimento será exercida por compressão de uma mola, que para uma maior precisão na força que deve ser aplicada, deve ter um coeficiente de mola com um valor baixo. A mola selecionada apresenta é a 12477CS fabricada pela Century Spring, com coeficiente de mola igual a 1,66 N/mm e permite uma força total aplicada de 80 N e compressão máxima de 48 mm.

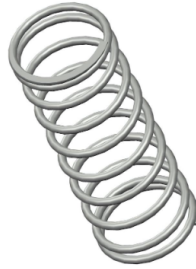
Para a força normal necessária, calculada anteriormente, a compressão necessária da mola é de 19,43 mm, como demonstrado abaixo.

$$F_N = k \cdot x \quad (31)$$

$$x = \frac{F_N}{k} = \frac{32,258}{1,66} \quad (32)$$

$$x = 19,43 \text{ mm} \quad (33)$$

Figura 28 – Modelo de mola selecionado



Fonte: Volition

3.4.2 Porca e parafuso

A mola responsável pela aplicação da força normal é montada entre dois discos, um porta-pastilha, responsável pelo posicionamento do inserto e um disco utilizado para comprimir a mola. Para realizar o deslocamento deste primeiro disco e, conseqüentemente, a compressão da mola será realizada por um conjunto porca e parafuso, onde o passo do conjunto definirá a razão da força por comprimento.

O parafuso escolhido é um M20 x 50, o que garante uma boa área de contato com o disco de compressão e comprimento suficiente para atender o deslocamento necessário na mola. Juntamente com uma porca M20, o passo de rosca igual a 2,5 mm resulta numa razão de 4,15 N/volta e 7,77 voltas necessárias para aplicar a força normal calculada de 32,258 N anteriormente.

3.4.3 Guia deslizante

Como dito anteriormente, o movimento do inserto é comparável a um sistema biela-manivela com corredeira, neste projeto, o movimento da corredeira será realizado montando o eixo suporte em uma guia deslizante, que permite o movimento de translação na direção horizontal.

O modelo selecionado foi o Kalatec KRH15VL, com uma estrutura enxuta e de fácil montagem com parafusos allen M4. A guia suporta um momento de 12 kg·m, suficiente para a montagem do eixo suporte.

Figura 29 – Guia deslizante Kalatec KRH15VL



Fonte: Kalatec

3.4.4 Motor

Para realizar o movimento de translação do inserto vê-se necessário uma fonte para o movimento de rotação inicial. Visando uma fácil construção, baixo custo e controle de velocidade e torque, a opção escolhida é um moto redutor AC monofásico, com ligação em rede residencial.

Para o dimensionamento do moto redutor necessário, deve-se calcular o torque requerido. A força tangencial de polimento do inserto atua de forma a gerar resistência para o movimento de translação e todo o conjunto do dispositivo.

Para encontrar o torque do moto redutor, será necessário utilizar alguns princípios de dinâmica, trabalho e energia, por Flores e Claro (2007) temos que a potência P gerada por um motor é definida pela quantidade de trabalho dU realizado por unidade de tempo dt .

$$P = \frac{dU}{dt} \quad (34)$$

O trabalho pode ser expresso como produto de força e velocidade de movimento, pode-se então, gerar uma igualdade entre a potência de entrada, do motor, e de saída, do movimento de translação do inserto. A potência do motor é descrita pelo produto do torque T e velocidade de rotação ω , já no movimento de translação, a potência é dada pela força tangencial de polimento e a velocidade linear do inserto.

$$P_{entrada} = P_{sada} \quad (35)$$

$$T \cdot \omega = F_T \cdot v \quad (36)$$

Ambas as velocidades podem ser obtidas derivando a posição em função do tempo. Logo, é possível gerar uma equação para o torque do motor igual ao produto de F_T e velocidade do inserto, obtida derivando a equação do deslocamento do inserto em função do ângulo da barra motora, apresentada previamente.

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} = F_T \cdot \frac{dx}{dt} \quad (37)$$

$$T = F_T \cdot \frac{dx}{d\theta} \quad (38)$$

Com o auxílio do MATLAB é possível gerar o gráfico do torque requerido do moto redutor em função do ângulo da barra motora. Abaixo segue o gráfico, que também mostra o torque máximo requerido de 0,697 Nm, ocorrendo quando a barra motora encontra-se perpendicular a barra de translação.

Figura 30 – Torque requerido no motor em função do ângulo do braço motor



Autoria própria

O valor encontrado para o torque requerido do moto redutor considerou apenas o a força tangencial de polimento. Para a escolha final do moto redutor, será adotado um fator de segurança, visando compensar as perdas do sistema, como o atrito nas articulações, inércia dos componentes e variação na própria força de polimento.

Assim como no dimensionamento do eixo, será adicionado um fator de segurança ao torque requerido no motor. Do mesmo modo, o fator de segurança adotado será de 2,5.

$$T_f = T_{nom} \cdot FS \quad (39)$$

$$T_f = 0,697 \cdot 2,5 = 1,742 \text{ Nm} \quad (40)$$

O torque final obtido é de 1,742 Nm será utilizado para a escolha do moto redutor. A figura 31 mostra as opções de redutores disponíveis para o micro motor AC 25 W.

Figura 31 – Reduções disponíveis para motor monofásico 25 W

	Relação de Redução para Motor 25W									
Redutor 80GKxxH	3	5	7.5*	10	15*	20	30*	50*	100	200
Velocidade (RPM)	533	320	213	160	107	80	53	32	16	8
Torque (Nm)	0.41	0.69	1.03	1.38	1.95	2.60	3.90	5.74	8	8

Fonte: Kalatec

Dentre as opções disponíveis, o micro motor 25 W com redução de 15 vezes, código 80GK15H, atende a demanda de torque necessária para realizar a movimentação do dispositivo.

Figura 32 – Moto Redutor 25 W



Fonte: Kalatec

3.4.5 Vibra-stop

Para suporte da base do dispositivo, que será nivelada a base da politriz metalográfica, serão adicionados amortecedores de vibração. O modelo selecionado é o Vibra Stop Micro I, com capacidade de 20 kgf cada, sendo suficiente para o peso estimado do dispositivo, que é de aproximadamente 7,2 kg. Na montagem são dispostos 4 amortecedores, que além da absorção de possíveis vibrações do sistema, possibilita o ajuste da altura do dispositivo.

Figura 33 – Vibra Stop Micro I



Fonte: Vibra Stop

3.5 Elementos de Fabricação

Realizados os cálculos necessários e a seleção de elementos comerciais, restam os componentes mecânicos que devem ser fabricados. Essenciais para a montagem e operação do sistema, os desenhos técnicos detalhados constam nos apêndices deste trabalho. A seguir, descrevem-se as funções dos elementos fabricados:

Apoio do eixo: elemento intermediário entre o eixo e guia deslizante.

Base: suporte geral do dispositivo, elementos como motor, eixo e guia deslizante tem suas posições delimitadas neste elemento.

Braço motor: ligada ao eixo motor, realiza o movimento inicial e delimita o movimento final do inserto.

Braço intermediário: transfere o movimento do braço motor ao eixo.

Braço translação: realiza o movimento linear entre o eixo e o inserto.

Bucha de bronze: utilizada para evitar o desgaste do eixo por atrito.

Disco de pressão: transfere o movimento proveniente do parafuso de ajuste para o conjunto elástico do sistema, promovendo a aplicação controlada da força normal sobre o inserto durante o polimento.

Eixo: ligado ao conjunto de braços e a guia deslizante, atua como ponto guiado do movimento.

Pino guia: evita a rotação da barra de translação.

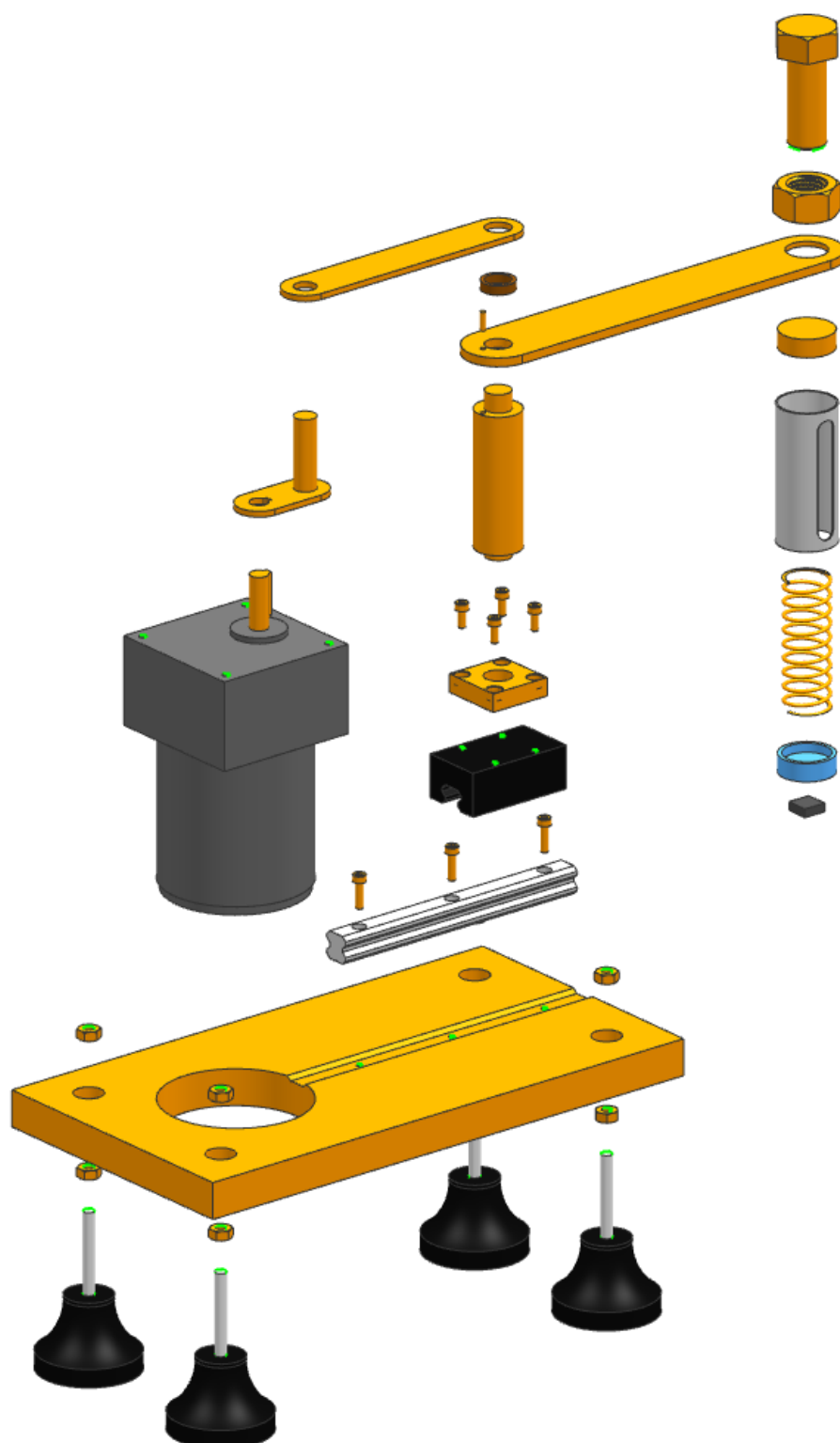
Porta-pastilha: elemento intercambiável, de acordo com o modelo do inserto e face de polimento.

Tubo guia: possui a função de confinamento e alinhamento dos componentes internos do conjunto de pressão, incluindo a mola, o disco de pressão e o porta-pastilha.

3.6 Vista Explodida

A Figura 34 exibe a vista explodida do conjunto, evidenciando a integração dos componentes mecânicos e a sequência lógica para montagem e manutenção do dispositivo de polimento.

Figura 34 – Vista explodida do dispositivo



Fonte:Elaborado pelo autor

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento do projeto conceitual de um dispositivo para polimento de forma semiautomática de insertos utilizando politriz metalográfica, aumentando o controle dos parâmetros do processo e melhorando a repetibilidade do acabamento superficial obtido em relação a um processo manual.

Para concepção do projeto, inicialmente foi realizado um estudo dos processos de polimento e lapidação ligados a politriz metalográfica, mecanismos de desgaste da ferramenta e métodos de afiação de insertos. Em seguida, foram definidas as condições iniciais de projeto, partindo do modelo de politriz ALP-2, da Alcrisa, o mecanismo para realizar a movimentação do inserto sobre o disco e alguns parâmetro de polimento médios, como pressão de 20 N/cm². Posteriormente, desenvolveu-se o conceito do dispositivo, com movimentação realizada por um micro motor elétrico de 25 W, com redutor e inversor de frequência para controle de velocidade, barras de alumínio, para evitar corrosão ao serem expostas a líquidos, que realizam a movimentação do inserto, seguindo o conceitos de um mecanismo com movimento biela-manivela com corredeira. Esta corredeira é resultado de um eixo principal apoiado sobre uma guia deslizante, responsáveis pelo movimento de translação do inserto sobre o disco de polimento.

O dispositivo proposto possibilita o controle dos principais parâmetros envolvidos no polimento, como força normal aplicada e velocidade de translação, reduzindo a influência da operação manual e contribuindo para maior padronização do processo.

Como limitação, destaca-se que o trabalho concentrou-se no desenvolvimento conceitual do dispositivo, não contemplando a construção de protótipo físico nem a validação experimental do desempenho do sistema.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a construção do protótipo do dispositivo e a realização de ensaios experimentais para avaliação da rugosidade superficial obtida, bem como a otimização dos parâmetros operacionais do processo.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, W. **Comparação de técnicas de modificação superficial e suas influências na adesão do revestimento em ferramentas de metal duro**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2014.
- ALCRISA. **Politriz Lixadeira Metalográfica - ALP/2**. [S.l.], 2024. Catálogo do equipamento, disponível em <www.alcrisa.com.br>.
- BELAIRFINISHING. **Tool Honing Polishing solutions: Process Overview**. Disponível em: <<https://belairfinishing.com/tool-honing/process-overview/>>. Acesso em: 03/03/2026.
- BELKHIR D. BOUZID, F. L. T. A. E. R. N. Characterization of glass surface damaged by alumina abrasive grains. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 2011.
- COZZA, R. C. et al. Análise comportamental dos coeficientes de atrito e desgaste de sistemas revestidos submetidos a desgaste micro-abrasivo. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 6, n. 4, p. 237–244, 2010.
- CUTTINGTOOLENGINEERING. **Laser Line Ultra**. 2020. Disponível em: <<https://ctemag.com/products/top-speed-ring-reamer/>>. Acesso em: 03/03/2026.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher Ltda, 1969.
- FLORES, P.; CLARO, J. C. P. **Cinemática dos Mecanismos**. [S.l.]: Guimarães, 2007.
- GAO, R. et al. Novel batch polishing method of ceramic cutting inserts for reducing tool wear. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2024.
- GUSMÃO, G. G. et al. Retrofit de dispositivo semiautomático para polimento metalográfico. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa-PR, v. 10, n. 1, p. 17–31, 2023.
- HALCSIK, V. M. C.; FORMIGONI, A. Análise comparativa de insertos de metal duro e cermet no torneamento do aço 1045 a seco. **XV SIMPÓSIO DOS PROGRAMAS DE MESTRADO PROFISSIONAL UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA**, 2020.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 5. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc, 2012.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Process 2**. [S.l.]: Springer, 2009.
- KREBS, G. **Utilização de insertos de cerâmica no torneamento de desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- MACHADO Álisson R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editor Blucher, 2009.

MEETYOUNCARBIDE. **An Useful introduction about Grinding Carbide Insert.** 2021. Disponível em: <<https://www.meetyoucarbide.com/pt/a-n-useful-introduction-about-grinding-carbide-insert/>>. Acesso em: 02/03/2026.

NETO, L. V. **ANÁLISE DO EFEITO DA METODOLOGIA DE INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA DE USINAGEM NA ETAPA DE POLIMENTO DE MOLDES E MATRIZES.** Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2012.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

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

REZENDE, B. A. **MODELAGEM ANALÍTICA DA TEMPERATURA DE CORTE NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR UTILIZANDO INSERTOS DE METAL DURO REVESTIDOS EXPERIMENTALMENTE PELO PROCESSO SOL-GEL.** Tese (Tese de doutorado) — Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2020.

SABINO, E. B. **Correlação entre as características de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 e sua vida útil.** Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa-PR, 2020.

SOUZA, J. S. de. Trabalho de conclusão de curso, **CARACTERIZAÇÃO TERMO-ÓPTICA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO VIA TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS.** Ponta Grossa-PR: [s.n.], 2016.

SUMMET, B. A guide to materials preparation & analysis, **The sum of our experience.** 2018.

VAPORMATT. **Edge honing (Edge radiusing) for cutting tools: consistent edge geometry, every cycle.** Disponível em: <<https://www.vapormatt.com/applications/edge-honing>>. Acesso em: 02/03/2026.

WANG, Y.; YIN, S.; HUANG, H. Polishing characteristics and mechanism in magnetorheological planarization using a permanent magnetic yoke with translational movement. **Elsevier**, 2015.

Apêndices

APÊNDICE A – Cálculos e gráficos em MATLAB

```

1 %% Dimensoes dos bracos
2 A = 30;          % braco motor [mm]
3 B = 125;         % breco intermediario [mm]
4 C = 200;         % braco de translacao [mm]
5
6 %% Velocidade do motor
7 rpm = 107;       % velocidade do motor [rpm]
8 omega = rpm*2*pi/60; % velocidade angular [rad/s]
9
10 %% MALHA DE ANGULO
11 theta = linspace(0, 2*pi, 1000).'; % uma volta completa
12
13 aux = 1 - (A^2/B^2).*sin(theta).^2;
14
15 %% POSICAO x(theta)
16 x = C + A*cos(theta) + B*sqrt(1 - (aux));
17
18 %% VELOCIDADE
19
20 dx_dtheta = -A*sin(theta) ...
21             - (A^2/B)*(sin(theta).*cos(theta))./sqrt(aux);
22
23 v = dx_dtheta*omega; % Velocidade [mm/s]
24
25 %% ACELERAÇÃO
26
27 d2x_dtheta2 = ...
28             -A*cos(theta) ...
29             -(A^2/B)*(cos(2*theta)./sqrt(aux)) ...
30             -(A^4/B^3)*((sin(theta).*cos(theta)).^2)./(aux.^(3/2));
31
32 a = d2x_dtheta2*omega^2; % Aceleração [mm/s^2]
33
34 %% Grafico do movimento
35 figure;
36 plot(theta, x, 'LineWidth', 1.5)
37 xlabel('\theta (rad)'); ylabel('x'); title('Posição (mm)');
38 title('Posicao do inserto em funcao ao angulo de rotacao');

```

```
39 grid on;
40
41 %% Gráfico da velocidade
42 figure;
43 plot(theta,v,'LineWidth',1.5)
44 grid on
45 xlabel('\theta (rad)')
46 ylabel('Velocidade (mm/s)')
47 title('Velocidade do inserto em função do ângulo de rotação')
48
49 %% Gráfico da aceleração
50 figure;
51 plot(theta,a,'LineWidth',1.5)
52 grid on
53 xlabel('\theta (rad)')
54 ylabel('Aceleração (mm/s²)')
55 title('Aceleração do inserto em função do ângulo de rotação')
56
57 %% Deslocamento max e min
58 Dmax = max(x);
59 Dmin = min(x);
60 fprintf('Deslocamento maximo = %.2f mm\n', Dmax);
61 fprintf('Deslocamento minimo = %.2f mm\n', Dmin);
```

Listing A.1 – Rotina MATLAB para cálculo do movimento do inserto

```

1 %% Dados
2
3 l = 75;           % Comprimento do eixo [mm]
4 Fn = 80;          % Força normal [N]
5 Ft = 56;          % Força tangencial [N]
6 Su = 260;         % Limite de resistencia a tracão [MPa]
7 FS = 2.5;         % Coeficiente de segurança [-]
8 Se = 0.4*Su;      % Limite de resistencia a fadiga [MPa]
9 P = 1.14;         % Peso proprio [N]
10
11 %% Vetores
12 A = [0 0 0];
13 B = [0 1 0];
14 C = [200 1 0];
15 D = [100 1 0];
16 F = [Ft Fn 0];
17 P = [0 -P 0];
18 rac = C - A;
19 rap = D - A;
20
21 %% Equacao do momento
22
23 MC = cross(rac,F);
24 MP = cross(rap,P);
25
26 Ma = norm(MC)/1000 - norm(MP)/1000;
27
28 fprintf('Momento na base = %.3f Nm\n', Ma);
29
30 %% Calculo do diametro
31
32 M = 1000*Ma;
33 d = [(32*M*FS)/(pi*Se)].^(1/3);
34
35 fprintf('Diametro = %.2f mm\n', d);

```

Listing A.2 – Rotina MATLAB para cálculo do momento

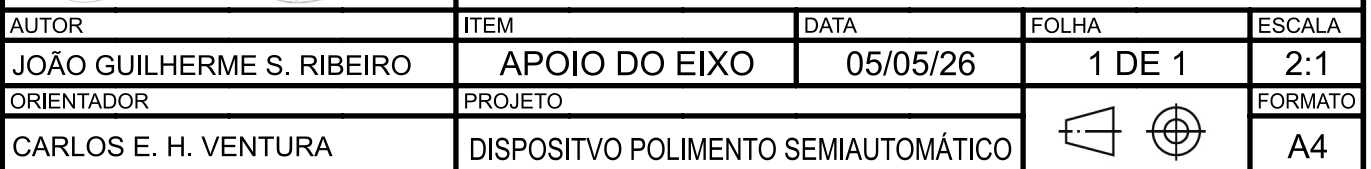
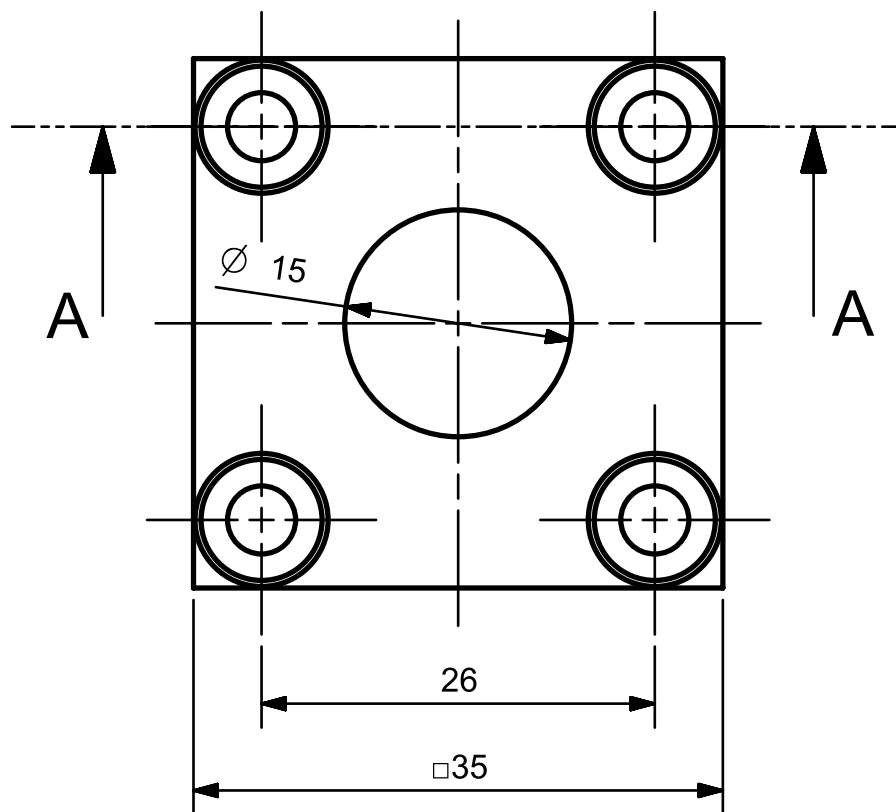
```

1 %% Dados do mecanismo
2 A = 30;          % braco motor [mm]
3 B = 125;         % breco intermediario [mm]
4 C = 200;         % braco de translacao [mm]
5 Fx = 22.58;      % forca de polimento [N]
6
7 k = (A^2)/(B^2);
8
9 %% Vetor de angulo
10 theta = linspace(0, 2*pi, 1000); % rad
11
12 %% Equacao da posicao x4(theta) [mm]
13 x4 = C ...
14     + A*cos(theta) ...
15     + B*sqrt(1 - k*(sin(theta)).^2);
16
17 %% Derivada dx4/dtheta (mm/rad)
18 dx4_dtheta = ...
19     - A*sin(theta) ...
20     - (B*k*sin(theta).*cos(theta)) ./ sqrt(1 - k*(sin(theta)).^2);
21
22 %% Torque no eixo do motor [N m]
23 T = Fx .* abs(dx4_dtheta) * 1e-3; % convers o mm -> m
24
25 %% Grafico de torque
26 figure;
27 plot(theta, T, 'LineWidth', 2);
28 grid on;
29 xlabel('\theta [rad]');
30 ylabel('Torque no motor [N m]');
31 title('Torque requerido no motor em funcao do angulo do bra o
      motor');
32
33 %% Torque maximo
34 Tmax = max(T);
35 fprintf('Torque maximo = %.3f N.m\n', Tmax);
36
37 %% Fator de seguranca
38 FS = 2.5;
39 Tfin = Tmax * FS;
40 fprintf('Torque final = %.3f N.m\n', Tfin);

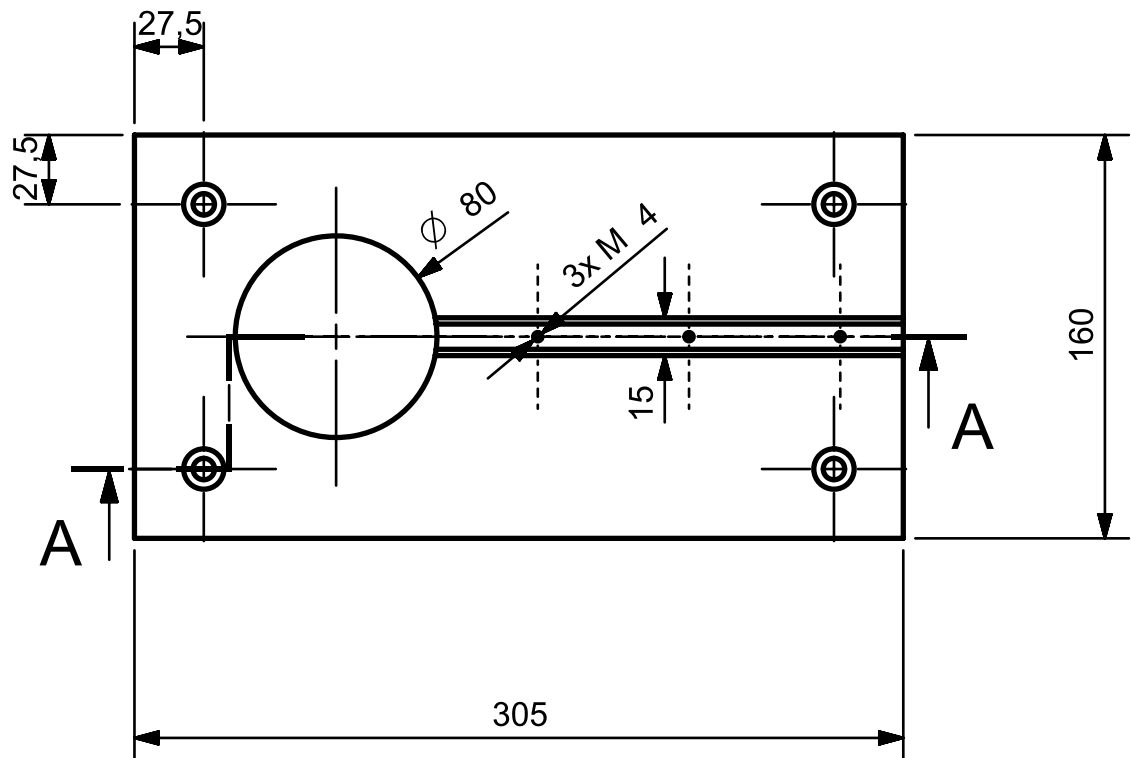
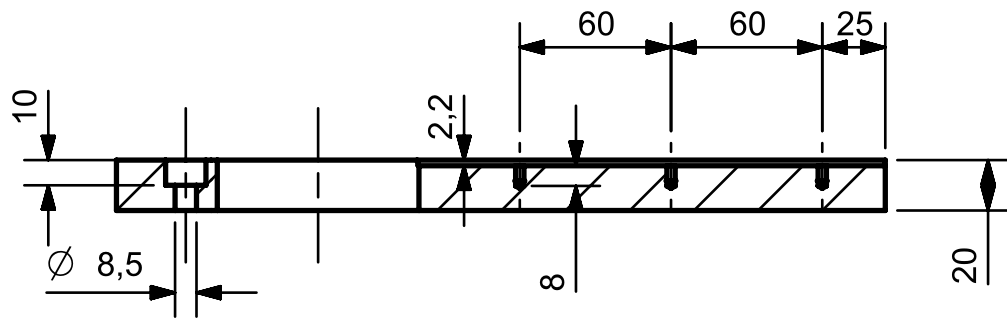
```

Listing A.3 – Rotina MATLAB utilizada para cálculo do torque

APÊNDICE B – Desenhos de fabricação



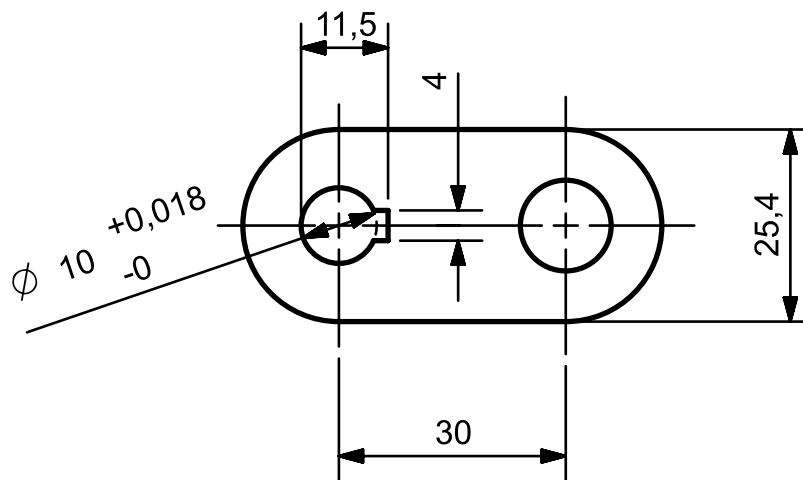
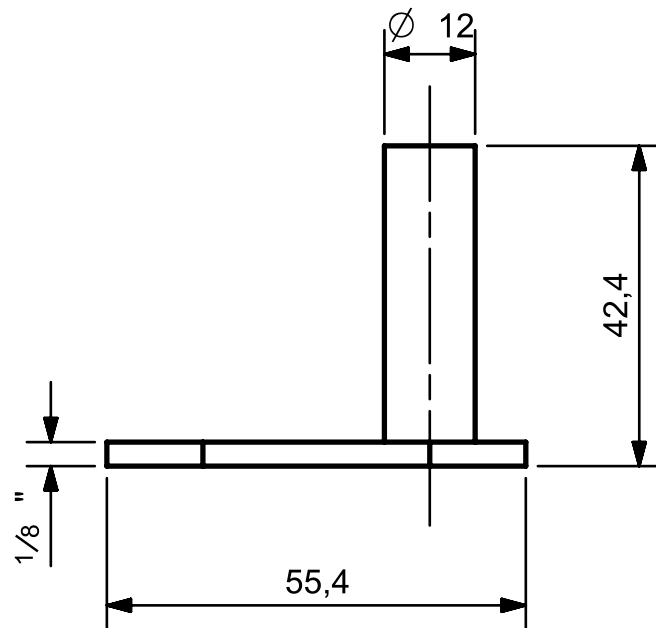
SECTION A-A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

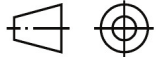
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

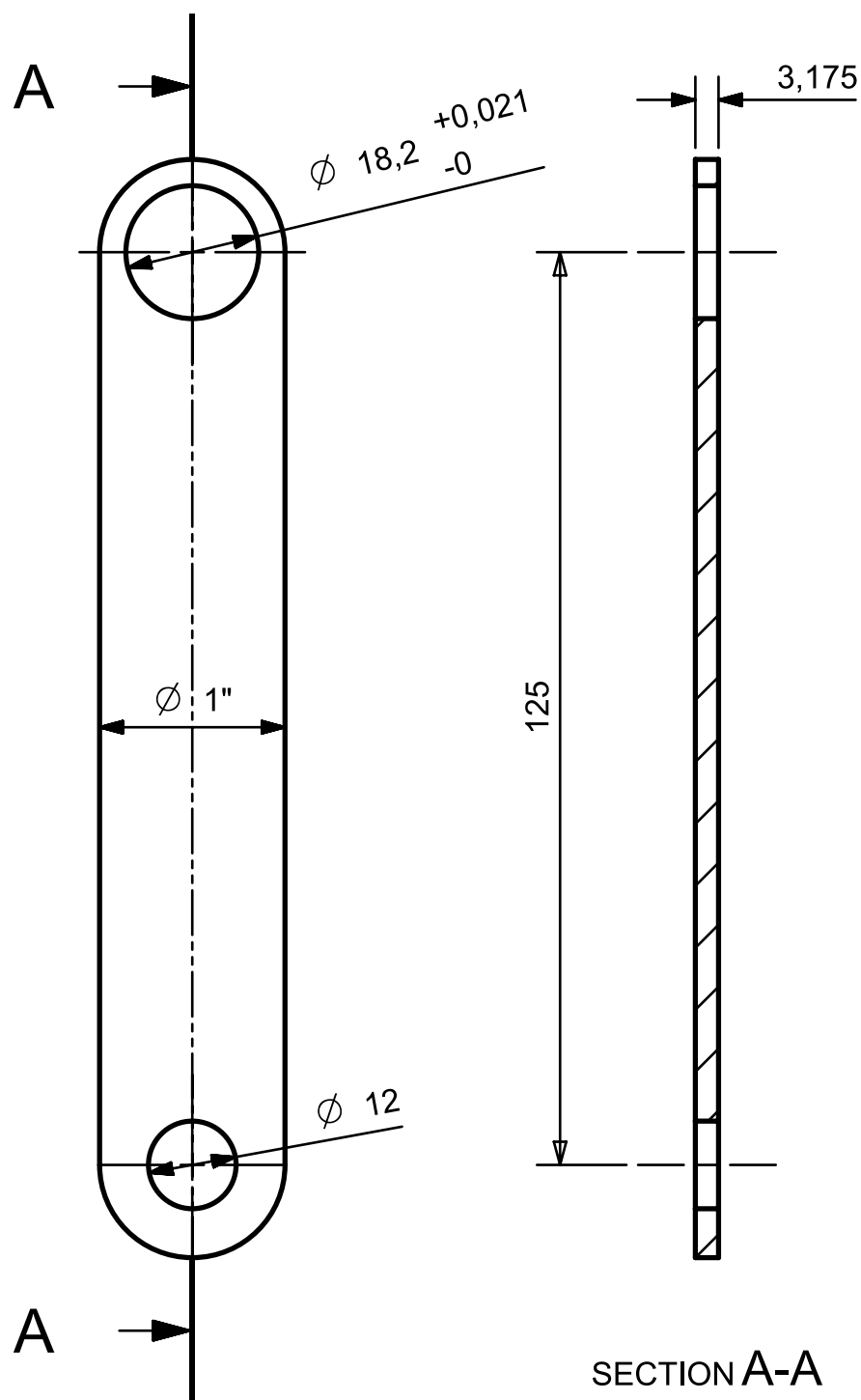
AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	BASE	05/05/26	1 DE 1	1:3
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

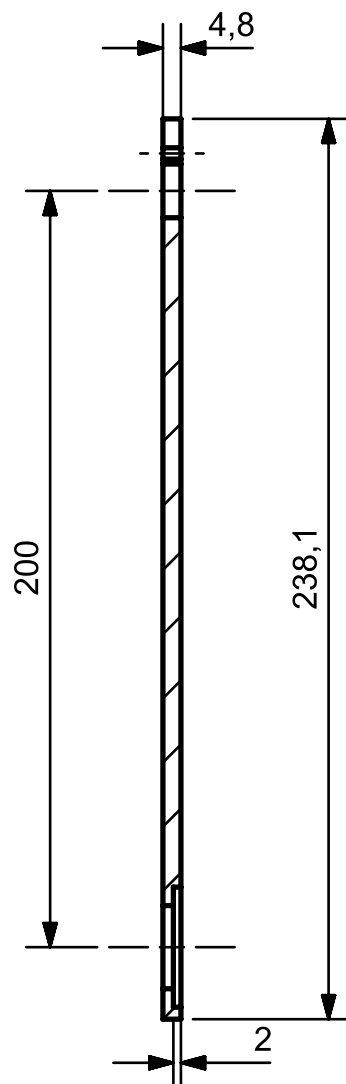
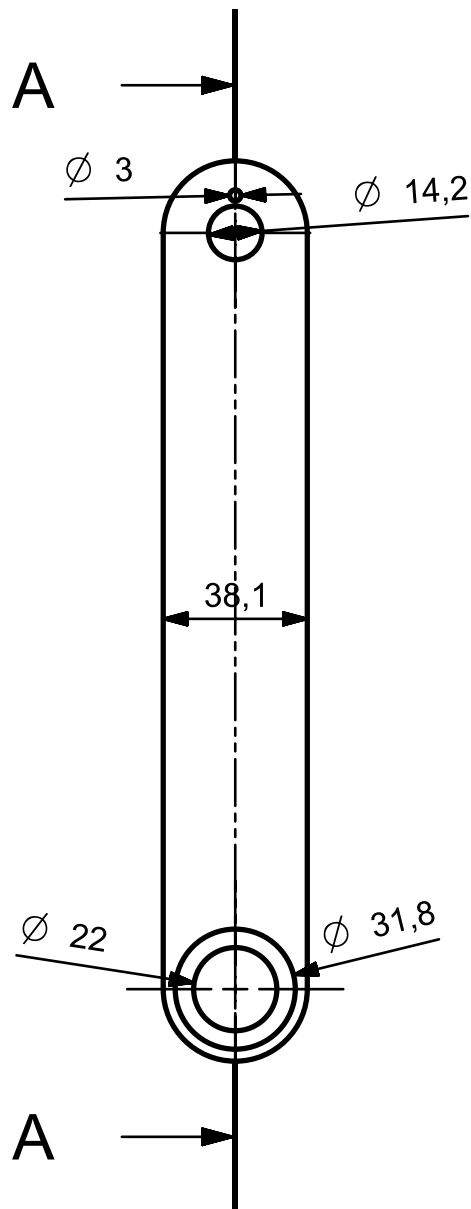
AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	BRAÇO MOTOR	04/05/26	1 DE 1	1:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	BRAÇO INTERMEDIÁRIO	05/05/26	1 DE 1	1:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4



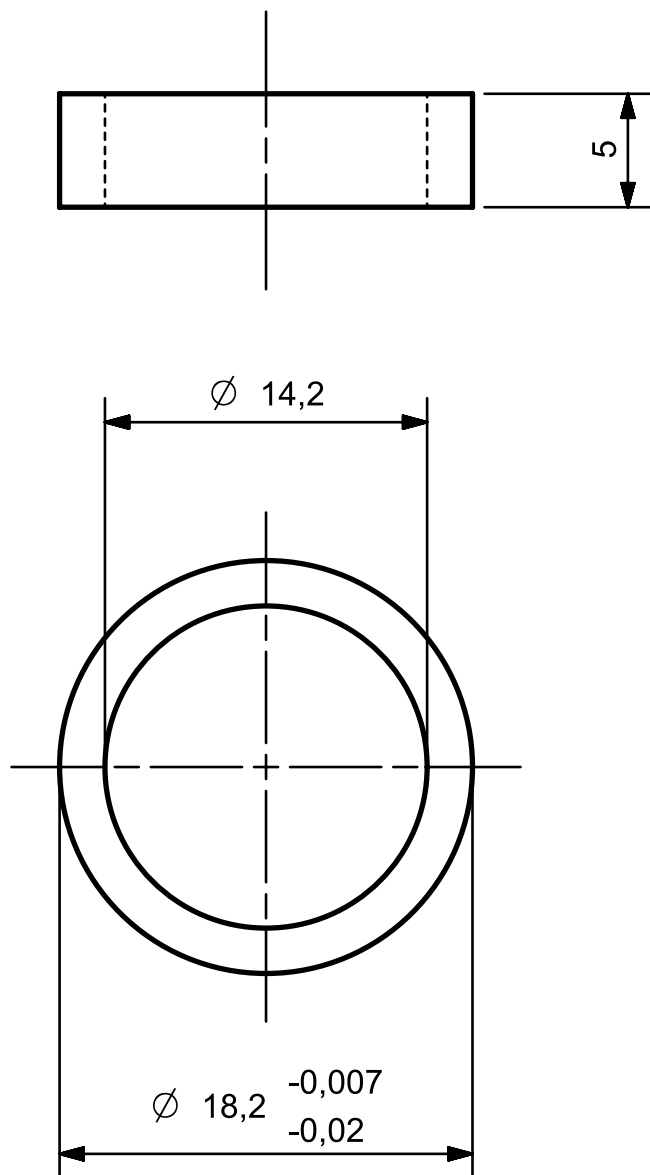
SECTION A-A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	BRAÇO TRANSLAÇÃO	05/05/26	1 DE 1	1:2
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4

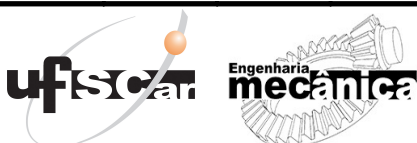
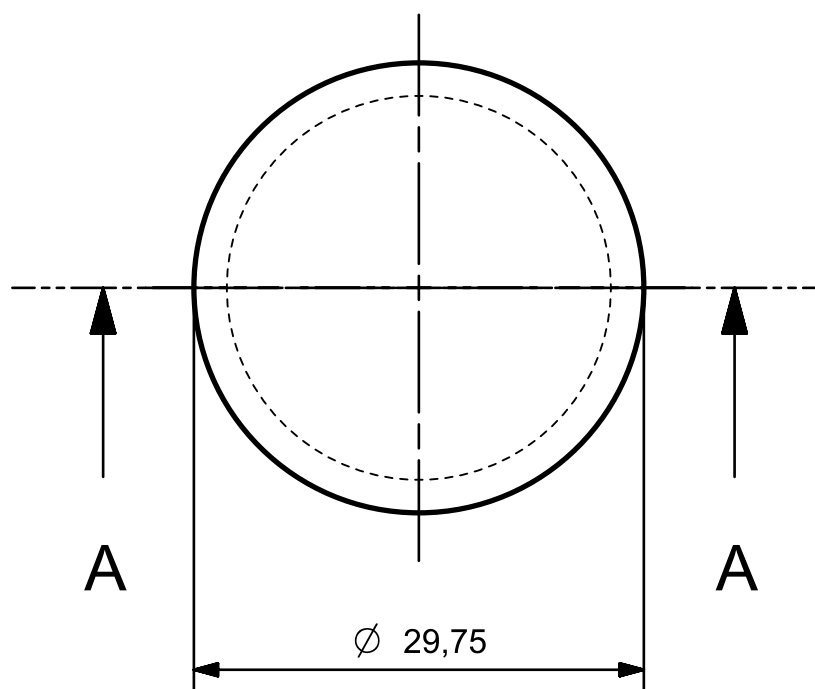
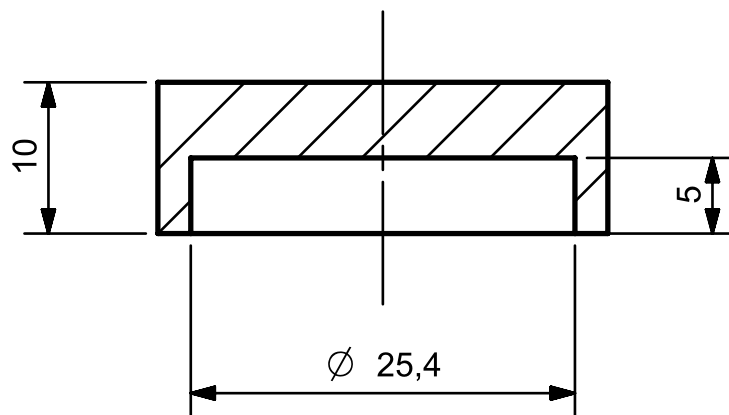


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	BUCHA DE BRONZE	01/07/2026	1 DE 1	3:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4

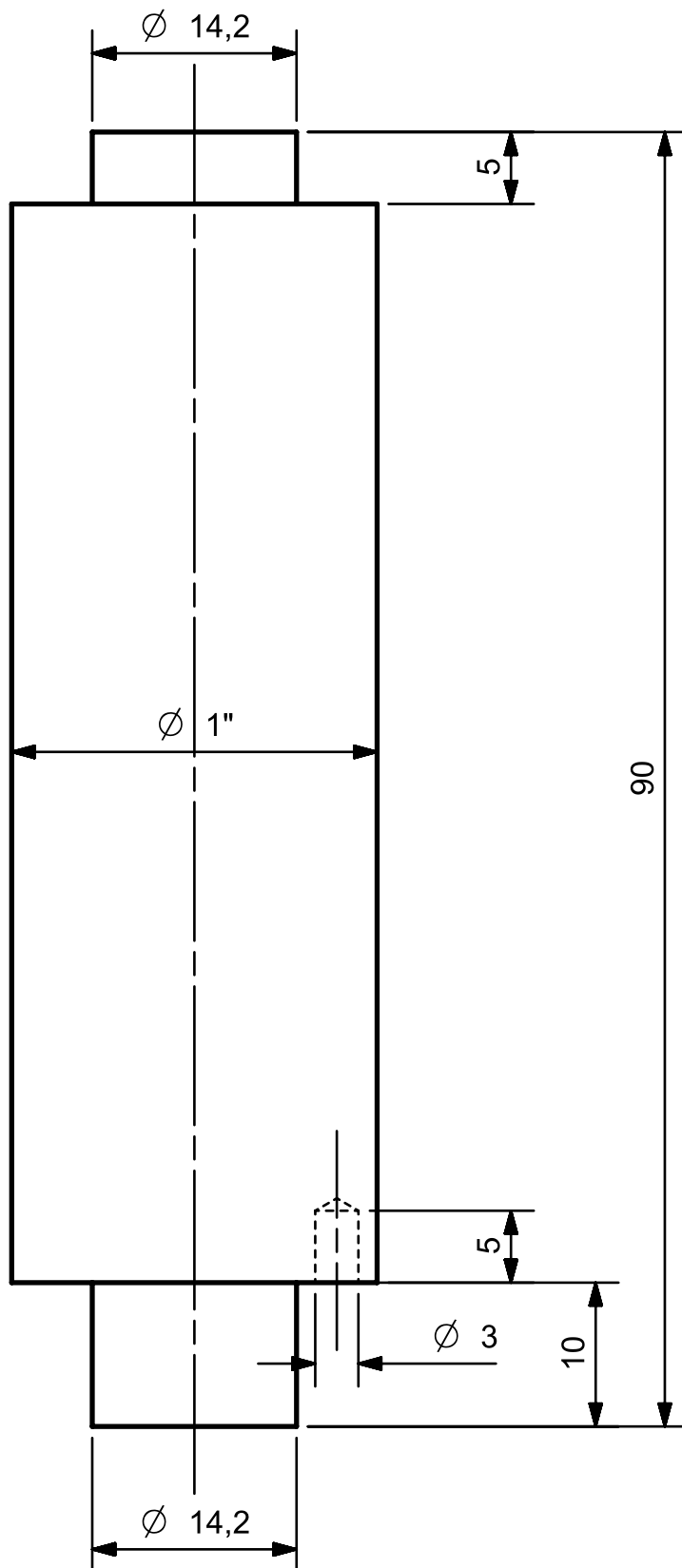
SECTION A-A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

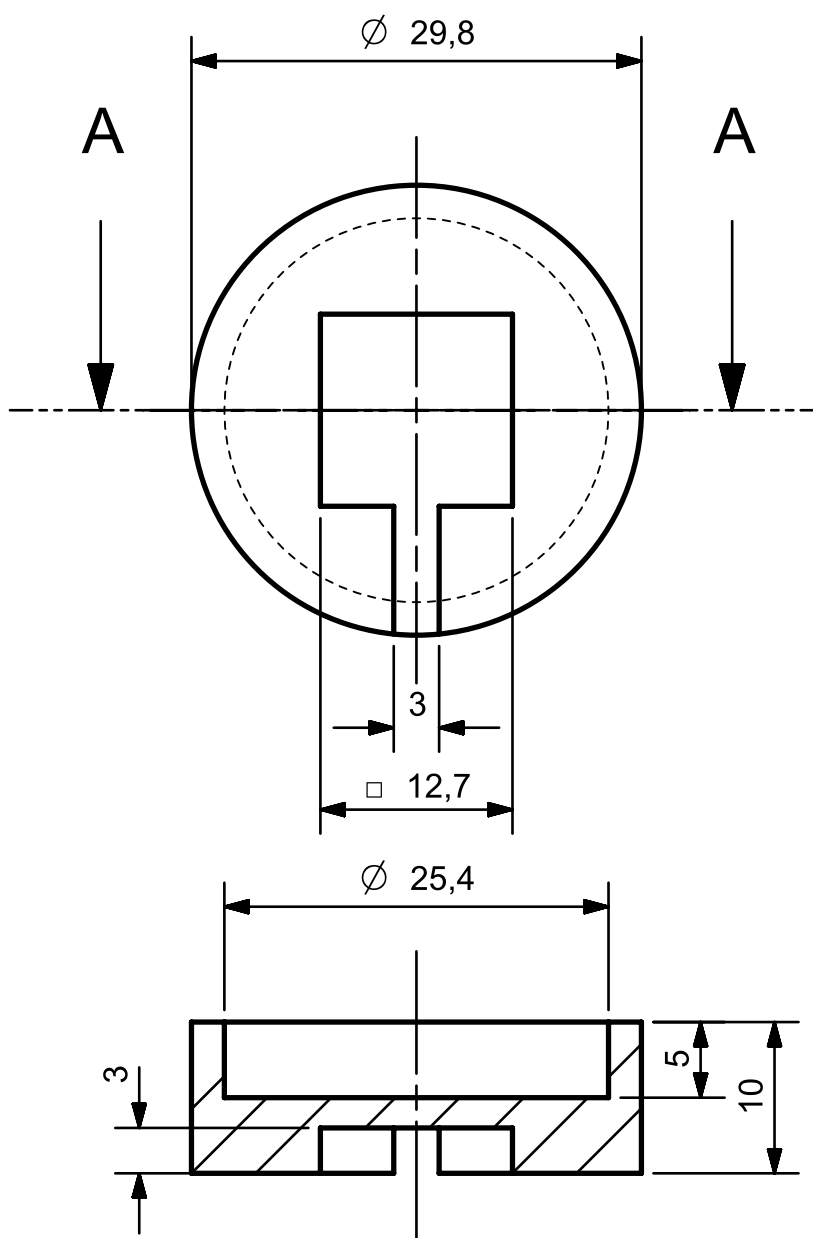
AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	DISCO DE PRESSÃO	02/05/26	1 DE 1	2:1
ORIENTADOR	PROJETO	 		FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	EIXO	04/05/26	1 DE 1	2:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4

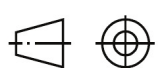


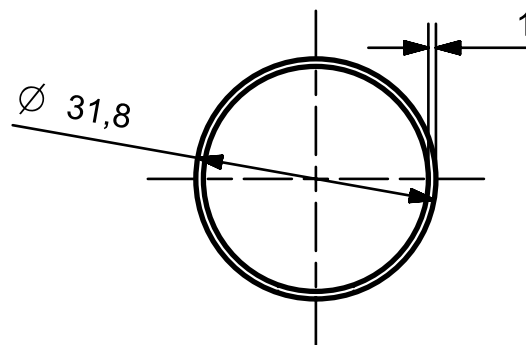
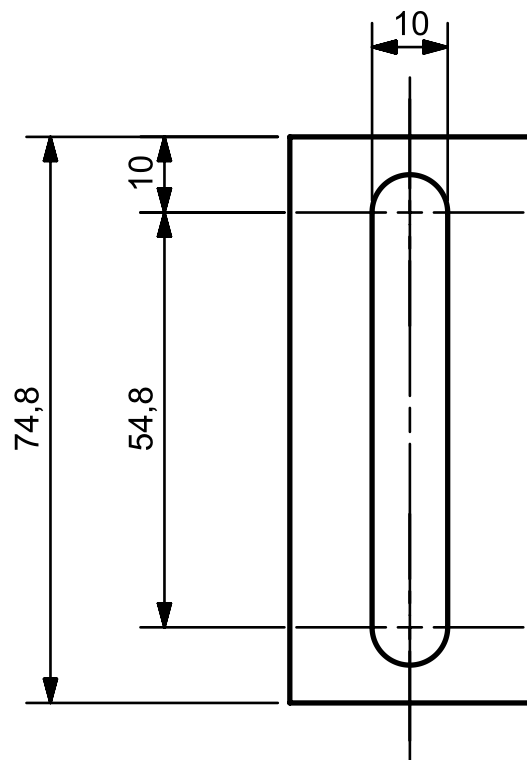
SECTION A-A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	PORTA PASTILHA	02/05/26	1 DE 1	1:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	TUBO GUIA	05/05/26	1 DE 1	1:1
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A4

APÊNDICE C – Vista Explodida



	UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS			
	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA			
AUTOR	ITEM	DATA	FOLHA	ESCALA
JOÃO GUILHERME S. RIBEIRO	MONTAGEM	20/05/26	1 DE 1	1:3
ORIENTADOR	PROJETO			FORMATO
CARLOS E. H. VENTURA	DISPOSITIVO POLIMENTO SEMIAUTOMÁTICO			A3