

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MATEUS KRÜGER

**PROJETO E CONTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO MQL PARA UTILIZAÇÃO NO
PROCESSO DE USINAGEM**

JARAGUÁ DO SUL

2019

MATEUS KRÜGER

**PROJETO E CONTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO MQL PARA UTILIZAÇÃO NO
PROCESSO DE USINAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de tecnologia em fabricação mecânica do instituto federal de Santa Catarina como requisito a obtenção do título de tecnólogo em fabricação mecânica.

Orientador: Prof. Gil Chagas, Dr.

JARAGUÁ DO SUL

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

KRÜGER, MATEUS

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO MQL PARA UTILIZAÇÃO
NO PROCESSO DE USINAGEM / MATEUS KRÜGER ; orientação
de GIL CHAGAS. Jaraguá do Sul, SC, 2019.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

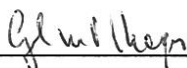
1. MQL. 2. QUANTIDADE MINIMA DE LUBRIFICAÇÃO. 3.
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO. I. CHAGAS, GIL. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. . III. Título.

MATEUS KRUGER

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO MQL PARA UTILIZAÇÃO NO
PROCESSO DE USINAGEM

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 03 de dezembro de 2019



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

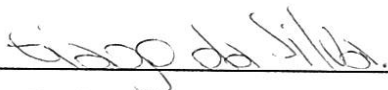
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Cassiano Rodrigues Moura

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Tiago da Silva

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa pela compreensão do tempo necessário para realização deste trabalho. Ao meu orientador pelo apoio e ideias na realização do trabalho. Agradeço a WEG por disponibilizar a utilização da impressora 3D para fabricação de componentes.

RESUMO

Com a grande preocupação pelos impactos que são gerados ao meio ambiente, surge também uma grande necessidade de equipamentos que minimizam seus efeitos. Os equipamentos de usinagem acabam utilizando de técnicas de refrigeração e lubrificação convencionais que agridem o meio ambiente, principalmente pelo alto consumo de fluidos refrigerantes. Tais métodos que acabam sendo utilizadas devido ao seu custo baixo e praticidade na utilização. Uma alternativa é investir em um equipamento de mínima quantidade de lubrificação (MQL) que tem como conceito a utilização de uma pequena quantidade de fluido misturado ao ar comprimido. Este presente trabalho é uma proposta de solução de um equipamento de MQL eficiente para o uso no processo de usinagem que seja de fácil fabricação e aplicação e que atenda as necessidades de um equipamento de lubrificação e refrigeração. Para atingir o objetivo foi projetado, fabricado e testado um equipamento MQL. Os resultados do teste de molhabilidade indicam que o dispositivo é capaz de gerar aerossol e transferir o fluido para a região alvo. Os testes de avaliação da variabilidade da vazão ao longo do tempo mostraram que o dispositivo MQL desenvolvido manteve a vazão de 70 ml/h constante durante seu funcionamento.

Palavras chaves: MQL. Quantidade mínima de lubrificação. Sistema de refrigeração.

ABSTRACT

With great concern for the impacts that are generated on the environment, there is also a great need for equipment that minimizes these effects. The machining equipment ends up using refrigeration and lubrication techniques that pollute the environment, due to the high consumption of the substances used. These methods are being used due to their low cost and practicality. An alternative is to invest in minimum quantity lubrication (MQL) equipment that is conceptualized to use a small amount of liquid mixed with compressed air. This paper proposes a solution for efficient MQL equipment for use in machining processes that are easy to operate and that meet the requirements of lubrication and cooling equipment. To achieve the goal an MQL equipment was designed, manufactured and tested. Moisture test results determined that the device is capable of generate aerosol and transfer fluid to a target region. Tests of flow variation over time show that the MQL device developed is capable to maintain the flow rate the 70 ml/h constant during operation and can be used in machining.

Keywords: MQL. Minimum quantity lubrication. Coolant system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Grupos e subgrupos de sistemas MQL.....	18
Figura 2 - Sistema de pulverização de baixa pressão	20
Figura 3 - Bomba dosadora.....	21
Figura 4 - Tanque de alta pressão.....	22
Figura 5 - Sistema de bombardeamento.....	23
Figura 6 - Sistema de dois canais.....	24
Figura 7 - Bico pulverizador testado por Dias.....	25
Figura 8 – Teste de molhabilidade de Dias.....	25
Figura 9 - Quantidade de lubrificante (g) transferido para a superfície aderente, em função da vazão, da distância e do tipo de bocal.....	26
Figura 10 - Esquema funcionamento do sistema MQL projetado.....	27
Figura 11 - Projeto completo dos componentes montados.....	28
Figura 12 - Solução para fixação do sistema MQL na máquina.....	29
Figura 13 - Esquema de funcionamento do reservatório.....	30
Figura 14 - Bico misturador.....	31
Figura 15 - Mistura do ar comprimido e óleo.....	32
Figura 16 - Trajetória do fluxo de ar e óleo no bico	33
Figura 17 - Passo a passo do fluxo de ar e óleo.....	34
Figura 18 - Balança de precisão utilizada no ensaio de molhabilidade.....	36
Figura 19 - Marcas do teste de molhabilidade.....	37
Figura 20 - Fotografia do teste de variabilidade da vazão.....	38

Figura 21 - Fotografia do teste variabilidade da vazão.....	39
Figura 22 - Teste variabilidade em 50 mm.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

MQL – Mínima quantidade de lubrificante

mm – milímetro

ml/h – Mililitros por hora

g – Grama

s – Segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
	1.1 Objetivos.....	14
	1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	15
	2.1 Mínima quantidade de lubrificação MQL.....	15
	2.2 Fluido de corte.....	16
	2.2.1 Óleo de girassol	18
	2.2.2 Óleo de canola.....	18
	2.3 Tipos de sistemas MQL.....	19
	2.3.1 Sistema de pulverização de baixa pressão.....	20
	2.3.2 Dispositivos com bombas dosadoras.....	21
	2.3.3 Tanque de alta pressão.....	22
	2.3.4 Bombardeio direcionado com gotas de óleo.....	23
	2.4 Tipos de bicos pulverizadores.....	25
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MQL.....	28
	3.1 Projeto Reservatório.....	30
	3.2 Válvulas utilizadas.....	31
	3.3 Projeto bico pulverizador.....	32
	3.3.1 Simulação do bico com SolidWorks Flow simulation.....	33
4	RESULTADOS.....	36

4.1	Verificação da capacidade de aderência (molhabilidade).....	36
4.2	Verificação da variabilidade da vazão do sistema.....	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
6	CONCLUSÃO.....	43
7	REFERÊNCIAS.....	44
	Apêndice.....	45
	Apêndice A - Desenho técnico do bico misturador.....	45
	Apêndice B - Desenho técnico do Tubo do reservatório.....	47
	Apêndice C - Desenho técnico das tampas do reservatório.....	47

1 INTRODUÇÃO

O meio ambiente tem se tornado um assunto cada vez mais presente no meio industrial, sejam por questões legais com novas normas e leis, que acabam enrijecendo a legislação, ou por pressões da sociedade e exigência dos consumidores. A partir deste cenário diversas indústrias buscam por alternativas mais sustentáveis para o processo de fabricação de seus produtos.

Muitos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos em relação à necessidade de restringir, na medida do possível, o uso dos fluidos refrigerantes/lubrificantes em razão do alto custo operacional (uso, manutenção e armazenamento), problemas ambientais, danos à saúde humana e exigências legais (HEISEL *et al.*, 1998; KLOCKE *et al.*, 1997).

Com passar dos anos se vê um grande avanço na utilização de novas tecnologias para diminuição dos impactos na utilização do fluido ao processo de usinagem. Como alternativa, existe a técnica conhecida como Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que utiliza da combinação do ar comprimido com o óleo em pequenas quantidades (KLOCKE *et al.*, 2000).

Segundo Heisel *et al.* (1998), a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) é considerada uma alternativa interessante, sendo um elo de ligação entre a usinagem a seco e os métodos de lubri-refrigeração convencionais.

A aplicação de fluido de corte pelo método da atomização (névoa ou mínima quantidade de lubrificante - MQL) consiste no princípio de 10 ml/h a 200 ml/h de vazão aplicado a elevadas pressões. A mistura de ar comprimido e de gotículas de óleo é aplicada na interface cavaco-ferramenta. A função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido (NOVASKI, DÖRR, 1999).

Existem diferentes dispositivos MQL disponíveis no mercado. Entretanto estes equipamentos são geralmente importados e tem um custo relativamente elevado. Por este motivo, e por desconhecer os ganhos gerados pelo MQL, diversas empresas optam por não utilizar o sistema.

Dentro deste contexto esse trabalho visa projetar e desenvolver um protótipo de equipamento MQL de simples fabricação e que atenda as necessidades do

processo de lubrificação e refrigeração na usinagem, permitindo controle de variáveis como fluxo do óleo, ar e pressão de trabalho.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um equipamento de simples fabricação e utilização. Que seja capaz de controlar a vazão do óleo e manter constante de acordo com a necessidade de cada processo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Projetar um equipamento MQL
- Fabricar um protótipo de equipamento MQL;
- Realizar testes de molhabilidade e de variabilidade no fluxo do jato MQL.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mínima quantidade de lubrificação – MQL

De acordo com Klocke *et al.* (2000), a técnica de Quantidade Mínima de Lubrificação (MQL) pode ser entendida como uma pequena quantidade de óleo lubrificante misturado ao fluxo de ar comprimido, onde o óleo tem a função de lubrificar e o ar tem a função de refrigerar.

Sua principal função é reduzir ao máximo a utilização da lubrificação sem que altere a qualidade da peça final e garantindo a vida útil da ferramenta. Além disso, com o uso incorreto do fluido de corte e métodos errados na sua disposição podem resultar em problemas para a saúde humana e meio ambiente (SHARMA *et al.*, 2016).

Segundo Heisel *et al.* (1998) e Klocke *et al.* (2000), dentre as principais vantagens da técnica de MQL, quando comparada com a utilização do fluido de corte convencional, pode-se citar:

- Dispensa a instalação de um sistema de circulação devido à baixa quantidade de fluido de corte utilizada;
- Eliminação da aplicação de biocidas e fungicidas, uma vez que a quantidade de óleo presente no reservatório é renovada constantemente, o que impede que aja tempo para a ação de microrganismos;
- Reduz o volume de lubrificante impregnado com os cavacos;
- Evitar sistemas de filtragem e reciclagem do fluido;
- Os fluidos de corte convencionais aumentam a necessidade de manutenção e causam grandes problemas e custos relacionados ao despejo e descarte;
- As peças, ao final do processo, encontram-se praticamente secas, o que dispensa o processo de lavagem subsequente.

No entanto, comparado com a técnica convencional, o MQL envolve custos adicionais para pressurizar o ar e os apoios tecnológicos necessários no processo, a fim de superar as restrições tecnológicas da técnica MQL. Por exemplo, técnicas especiais para o transporte de cavacos podem ser necessárias e a produtividade pode diminuir devido ao impacto térmico nos componentes usinados.

O vapor de óleo, a névoa e a fumaça gerada durante o uso do MQL na usinagem pode ser considerada subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes no ar. Isso se tornou um fator de preocupação,

exigindo um sistema de exaustão adequado na máquina-ferramenta. Outra desvantagem é o nível de ruído gerado durante seu funcionamento, que podem exceder os limites estabelecidos legalmente (MACHADO & DINIZ, 2000).

Conforme Weinert (*et. al.*, 2004), o segredo do sucesso para uma usinagem com MQL está no entendimento da sistemática que envolve esses processos, englobando fatores como componentes individuais, tecnologias de alimentação, parâmetros de corte, ferramentas e máquinas ferramentas. Ou seja, não existe um padrão para como se utilizar o MQL, mas sim cada processo, operação, material torna uma variável diferente que deve ser levado em conta.

2.2 Fluidos de corte

A operação de corte na usinagem gera atrito entre ferramenta e peça, causando elevação na temperatura em ambas. Quando a temperatura não é controlada corretamente podem ocorrer diversos danos ao processo como a redução significativa da vida útil da ferramenta e alteração nas propriedades da peça. (MACHADO *et al.* 2011)

Diante deste e outros problemas do processo surge também a necessidade da utilização dos fluidos de corte no processo de usinagem. De acordo com Diniz *et al.* (2000) as principais funções dos fluidos são;

- Remover o calor gerado durante a operação de corte, prolongando a vida útil da ferramenta e garantindo a precisão dimensional da peça;
- Retirar cavaco da região de corte;
- Proteger contra corrosão tanto a ferramenta como a peça;
- Lubrificar a região de contato entre peça e ferramenta, reduzindo o atrito, minimizando a erosão e o desgaste da ferramenta, aumentando sua vida útil.

E para atender a essas exigências e realizar suas funções corretamente, os fluidos de corte devem possuir características específicas como Diniz *et al.* (2000):

- Alta capacidade de absorção de calor (isto depende da viscosidade, calor específico, condutividade térmica e, em certo grau, do calor latente de vaporização).

- Capacidade de molhar eficientemente o metal, de modo que o resfriamento possa ser eficaz.

- Boas propriedades anti-fricção.

- Boas propriedades anti-soldante.

- Estabilidade durante seu uso e também no armazenamento.

- Ausência de odores desagradáveis.

- Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde.

- Isenção da tendência de manchar ou corroer a peça trabalhada e a máquina-ferramenta.

- Capacidade de proteger a peça e a máquina dos defeitos da corrosão pela umidade atmosférica, ou por outras causas possíveis.

- Isenção da tendência a originar precipitados sólidos que possam depositar substâncias semelhantes a gomas nas guias, ou obstruir os tubos de circulação do fluido de corte.

- Viscosidade adequada: a viscosidade deve ser suficientemente baixa de modo a permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta para permitir a aderência do fluido de corte às superfícies da ferramenta.

- Não devem apresentar tendência à formação de fumaça.

- Transparência de modo que a peça possa ser observada claramente durante as operações de usinagem.

Por outro lado, a utilização desses fluidos em grandes quantidades acaba gerando grandes danos a saúde do operador e ao meio ambiente. A causa maior desses problemas é a composição química dos fluidos de corte. Dessa forma, alguns componentes de sua composição são anticorrosivos, antiespumantes e biocidas. Os biocidas são uns dos aditivos mais perigosos aos operadores das máquinas (HONG & BROOMER, 2000).

O contato pela pele pode ocasionar alergias e dermatites dependendo do tipo de pele da pessoa e o tempo de exposição a tal fluido. Já os danos respiratórios e digestivos ocorrem, respectivamente, pela inspiração da névoa de fluido e por engolir pequenas partículas. Desta forma, segundo Howell *et al.* (2006), os trabalhadores

expostos ao fluido de corte têm um risco aumentado em desenvolver problemas dermatológicos e respiratórios ou até mesmo digestivos em alguns casos.

Além dos problemas ecológicos, existe a preocupação com o fator econômico, pois, conforme Byrne (1993), a utilização dos fluidos de corte representa uma porção significativa dos gastos no processo de manufatura de uma peça, ou seja, em torno de 15 - 17%.

Na última década, a indústria vem tentando formular lubrificantes biodegradáveis com características superiores aos usuais baseados em óleo mineral. Dessa forma, além da catálise natural, os óleos vegetais são promissores candidatos como fluido de base em lubrificantes a fim de atingir a sustentabilidade ambiental (ASADAUSKAS e EHRAN, 2000). Na sequência são apresentados alguns estudos com aplicação destes óleos.

2.2.1 Óleo de girassol

Dentro deste grupo de lubrificantes biodegradáveis pode se citar o óleo de girassol. De acordo com Araujo *et al.* (2013) sua utilização no processo de usinagem se mostrou eficiente em relação a fluidos já utilizados no processo de usinagem com lubrificação por meio de sistema MQL.

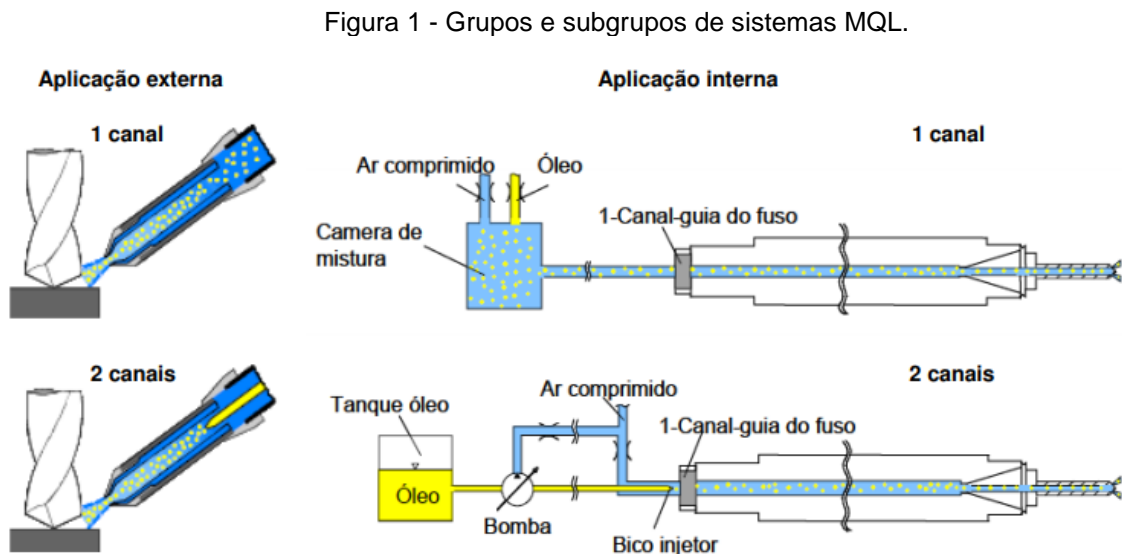
2.2.1 Óleo de canola

Outra alternativa de óleo biodegradável é a utilização do óleo de canola. Araújo Junior, Machado e Ribeiro (2015) apresentaram um estudo e aplicação de MQL com óleo de canola no fresamento de aço 1045, os resultados mostram que o óleo de canola pode vir a ser um substituto de grande potencial para os demais fluidos de usinagem. Sua utilização mostrou resultados parecidos ao fluido de corte comercial LB2000.

2.3 Tipos de sistemas MQL

Existem alguns tipos de sistemas de mínima quantidade de lubrificação que são comercializados, dos quais cada um possui sua vantagem e desvantagem. Segundo Novaski e Dörr (1999), os sistemas de MQL podem ser divididos em dois grupos principais: injeção do fluido internamente, através de orifícios na própria ferramenta, e externamente, onde o fluido é fornecido por jatos separadamente.

Segundo Weinert, *et. al*, (2004) esses grupos ainda são divididos em dois subgrupos: Aplicação com um canal, onde a mistura é feita fora do bico, que tem como função apenas direcionar a mistura. Nos sistemas de dois canais, o fornecimento do fluido e ar comprimido é separado, e o bico injetor tem a função de realizar a mistura. A Figura 1 mostra os grupos e subgrupos como mencionados anteriormente.



Fonte: Weinert, *et. al*,(2004).

Os sistemas externos apresentam como vantagem a aplicação em máquinas existentes, ou seja, podem ser adaptados facilmente, onde se tem um custo para implantar relativamente baixo. Este tipo de aplicação é geralmente utilizado em fresamento, torneamento e retífica. Como desvantagem deste sistema é caso seja necessário à utilização de diversos tipos de ferramentas também existe a necessidade de adaptação e reposicionamento do bico. Este problema é eliminado com o sistema de aplicação interna, pois toda ferramenta já está adequada para seu devido

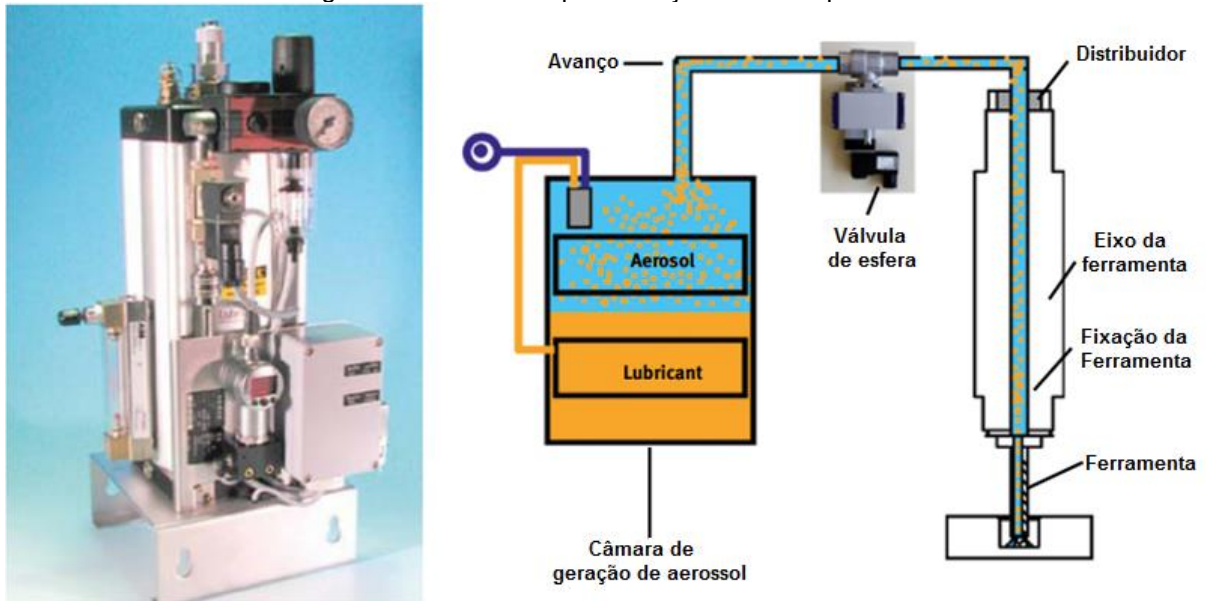
processo, se tornando muito mais ágil e prático. Por outro lado, têm como desvantagens o fato que somente é possível a utilização do sistema com ferramentas e máquinas específicas.

Segundo Heisel *et al.* (1998), existem principalmente três tipos diferentes de sistemas de mínimo volume de óleo. Mas com passar do tempo já se pode encontrar novos tipos e sistemas com a tecnologia. Na sequência são apresentados os principais tipos de sistemas MQL comercializados.

2.3.1 Sistema de pulverização de baixa pressão

No primeiro tipo está o sistema de pulverização de baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa como uma mistura, conhecido como efeito Venturi. Esses sistemas se distinguem por um fluxo volumétrico de refrigerante de aproximadamente 0,5 a 10 litros por hora. Eles são usados principalmente para a refrigeração com emulsões, produzem uma atomização notável e somente podem ser dosados grosseiramente, ou seja, sem nenhum controle de vazão (MASCHINENBAU *et al.*, 2010; MADHUKAR *et al.*, 2016). Na Figura 2 é possível observar uma foto do sistema e o seu esquema de funcionamento, em um sistema de injeção de fluido internamente na ferramenta. A mistura é realizada em uma câmara geradora de aerossol externa e a aplicação do fluido é somente por um canal.

Figura 2 - Sistema de pulverização de baixa pressão



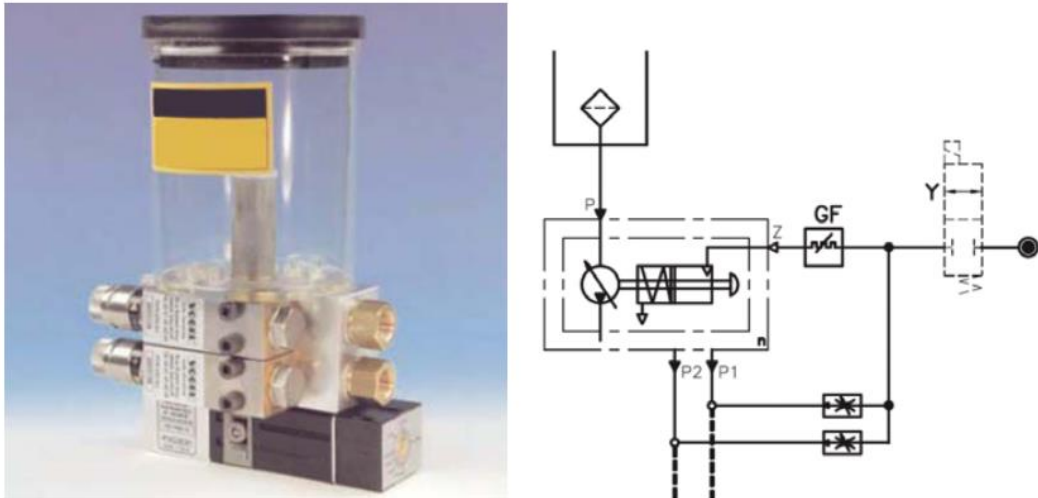
Fonte: Maschinenbau et al, (2010)

2.3.2 Dispositivos com bombas dosadoras

O segundo tipo de sistema usa bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade definida de lubrificante para a superfície ativa, sem ar. As taxas de fluxo são ajustáveis numa faixa entre 0,1 e 1 ml por ciclo, com até 260 ciclos por minuto. Estes sistemas são utilizados principalmente em processos intermitentes (MASCHINENBAU *et al*, 2010; MADHUKAR *et al*, 2016).

As principais vantagens do sistema de micro bomba são as configurações exatas do volume de dosagem e o desenho modular, que, além da montagem descentralizada dos elementos da bomba, possibilita a instalação de praticamente qualquer número de elementos da bomba possibilitando a utilização em vários pontos. As desvantagens são vazão de lubrificante pulsante e o desgaste das peças móveis tendo uma vida útil do equipamento menor em comparação aos outros sistemas. Na Figura 3 é possível observar uma foto do sistema e o seu esquema de funcionamento.

Figura 3 - Bomba dosadora



Fonte: Maschinenbau et al, (2010)

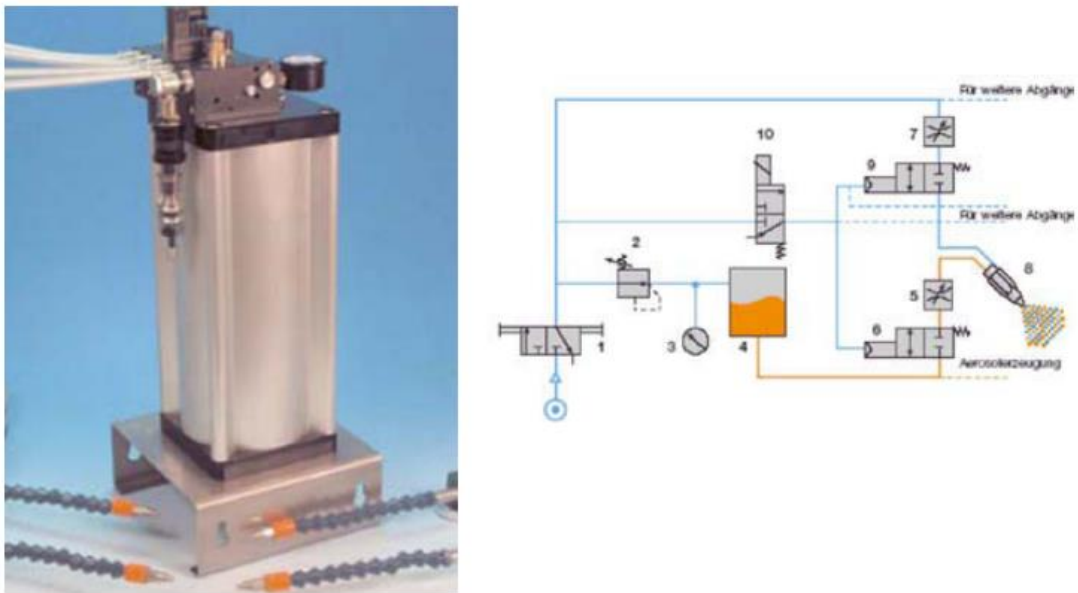
2.3.3 Tanque de alta pressão

O terceiro e mais usado tipo de sistema de mínima quantidade de refrigeração é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado para o bocal através de uma tubulação de suprimento em separado. Ali ele é misturado com o ar comprimido fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente.

Este tipo de sistema é uma alternativa particularmente interessante, porque combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo, na faixa de 10 a 100 ml/h. Ao mesmo tempo, a mistura coaxial de refrigerante e ar no bocal previne enormemente a nebulosidade (MASCHINENBAU *et al*, 2010; MADHUKAR *et al*, 2016).

Ao contrário dos sistemas de micro bomba, as vantagens mais importantes desses sistemas são o fluxo de lubrificação uniforme e a falta de peças móveis sujeitas a desgaste. Mas os sistemas com tanques de pressão também apresentam desvantagens. O ajuste preciso do volume de dosagem de óleo é possível apenas em um grau limitado e o número de saídas é limitado. Na Figura 4 é possível observar uma foto do sistema e o seu esquema de funcionamento. Nesse sistema a mistura ar e óleo é realizada dentro do bico em um sistema de dois canais.

Figura 4 - Tanque de alta pressão



Fonte: Maschinenbau et al, (2010)

2.3.4 Bombardeio direcionado com gotas de óleo

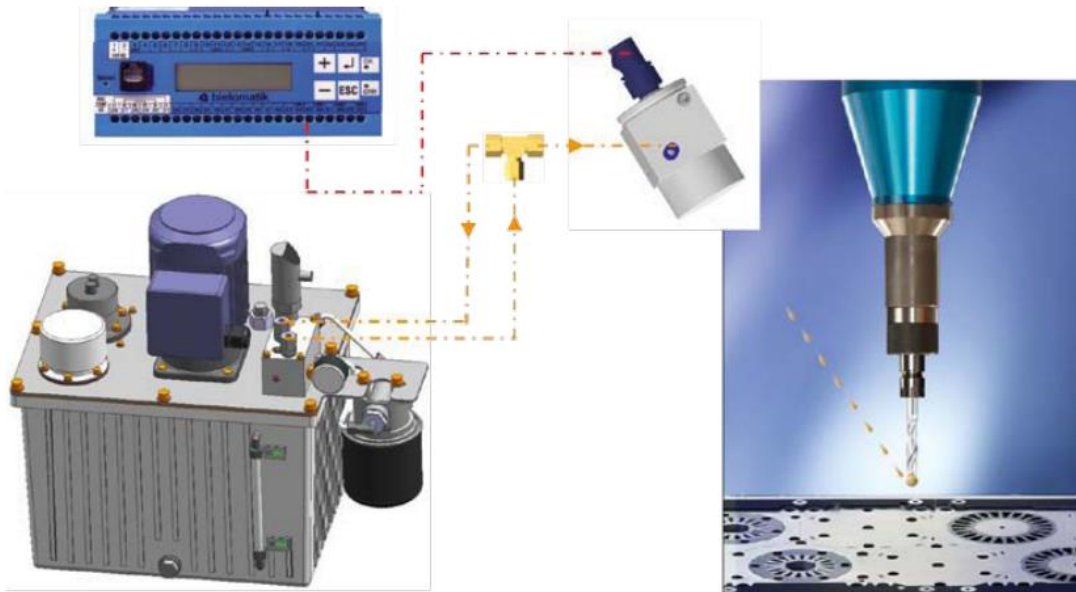
Esse sistema MQL externo dispara gotículas únicas de lubrificante no ponto de contato da usinagem por meio de uma válvula de alta velocidade. Pode haver uma distância de até 800 mm entre a válvula e a ferramenta sem a mistura de ar ou a atomização (MASCHINENBAU *et al*, 2010; MADHUKAR *et al*, 2016).

Esse princípio de medição permite (especialmente com ferramentas de rotação rápida ou peças de trabalho, por exemplo, tornos) romper o ar da camada limite que se acumula durante o movimento de rotação.

A gota de lubrificante atinge o ponto exato em que é necessária. Além das válvulas fixas de alta velocidade, as válvulas dinâmicas de alta velocidade se alinham automaticamente à peça de trabalho.

O sistema externo também pode ser combinado com um sistema de dois canais com alimentação interna de lubrificante e um dispositivo de controle. É usado principalmente nesta combinação para lubrificar ferramentas muito pequenas sem canais de refrigeração internos. Na Figura 5 é possível observar uma foto do sistema e o seu esquema de funcionamento.

Figura 5 - Sistema de bombardeamento



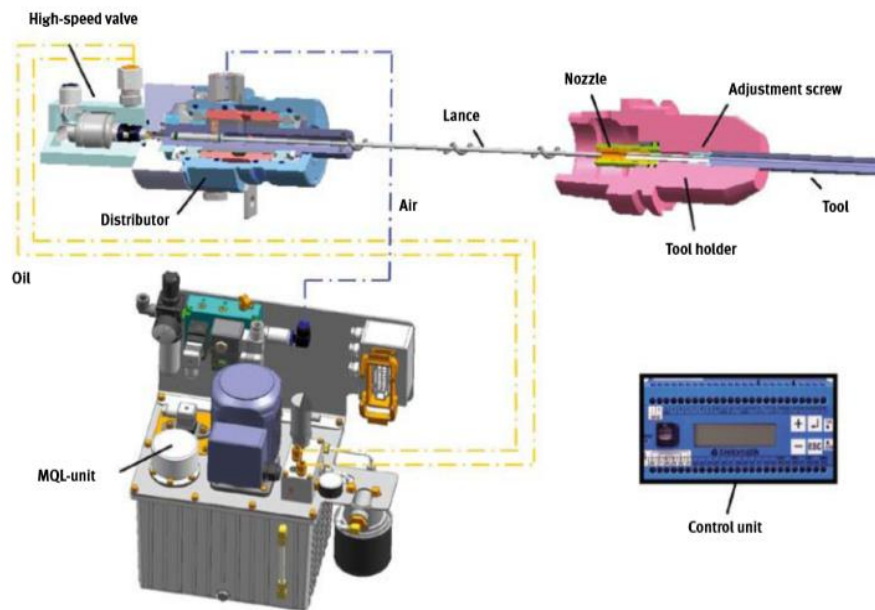
Fonte: Maschinenbau et al, (2010)

Na aplicação do sistema de bombardeio junto um sistema de dois canais, a unidade MQL deve transportar o lubrificante para a válvula de alta velocidade, que mede com precisão a quantidade ideal de lubrificante dependente do processo e a transporta para o mandril rotativo de 2 canais. O lubrificante é transportado através do canal interno da lança enquanto o ar é fornecido através do canal de anel externo entre a lança e o eixo (MASCHINENBAU *et al*, 2010; MADHUKAR *et al*, 2016).

A extremidade frontal da lança se projeta na câmara de mistura do bico de tubo, de onde a mistura óleo-ar assim criada é alimentada à ferramenta. O bico do tubo pressionado no tubo do agente de resfriamento padrão consiste em uma câmara de mistura e uma peça de tubo, que é cortada no comprimento para o projeto.

O dispositivo de controle é responsável por acionar e monitorar o sistema. A seleção dos vários parâmetros da ferramenta é feita através das funções M ou ProfiBus. Opcionalmente, uma válvula externa de alta velocidade pode ser conectada a este sistema. Na Figura 6 é possível observar uma foto do sistema e o seu esquema de funcionamento.

Figura 6 - Sistema de bombardeamento de dois canais



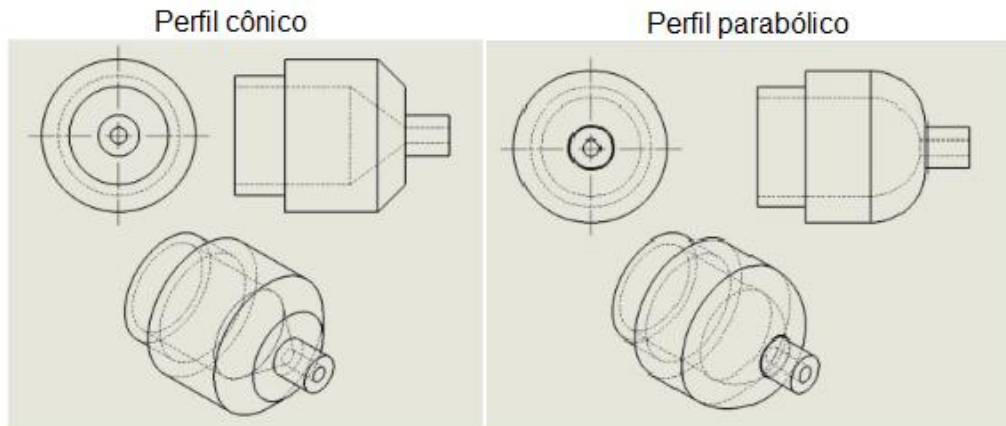
Fonte: Maschinenbau et al, (2010)

2.4 Tipos de perfil do bico pulverizador

Quando o sistema MQL utiliza dois canais é necessário que a mistura de fluido e ar, realizada dentro do bico pulverizador, seja realizada de forma adequada.

Dias (2011) utilizou modelo de sistema MQL de tanque de alta pressão e realizou testes de dois diferentes tipos de bicos pulverizadores, um com perfil interno parabólico e outro com o perfil cônico como pode ser observado na Figura 7.

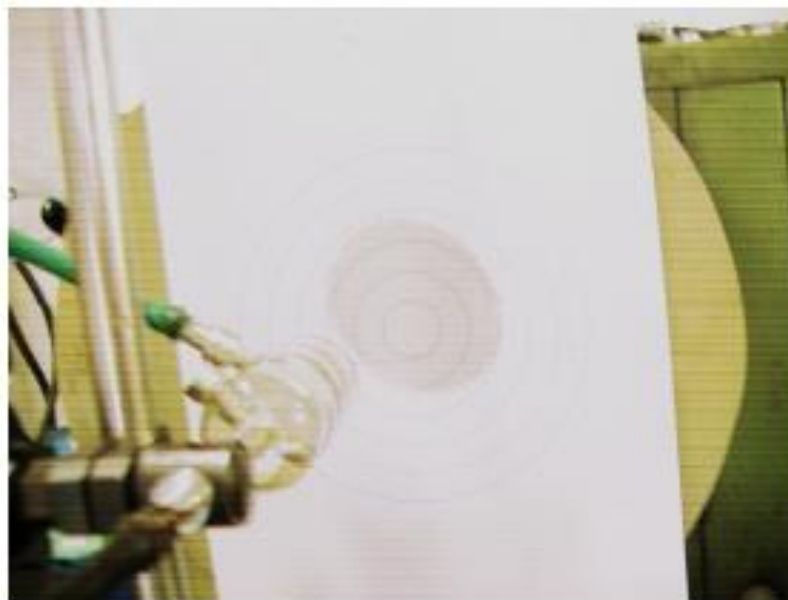
Figura 7 - Bico pulverizador testado por Dias.



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2011)

Para comparar a eficiência de cada perfil de bico citado anteriormente Dias (2011) realizou experimentos de molhabilidade de uma superfície absorvente. A Figura 8 mostra um resultado obtido do teste de molhabilidade realizado por Dias (2011).

Figura 8 - Teste de molhabilidade Dias.



Fonte: Dias et al. (2011)

Para efeito de comparação entre as diferentes condições, Dias (2011) mediu a massa de fluido consumida no tempo avaliada pelo volume e relação entre os pesos

do material absorvente antes e depois dos ensaios, onde foi medido por uma balança de precisão.

Para avaliar as diferenças dos sistemas foram avaliadas três vazões em três distâncias diferentes com a utilização de dois perfis de bocais diferentes e realizado as medições após 10 segundos do sistema ligado conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Quantidade de lubrificante (g) transferido para a superfície aderente, em função da vazão, da distância e do tipo de bocal.

Distância	Perfil do Bocal	Vazão								
		25ml/h			65ml/h			100ml/h		
100mm	Parabólico	0,0477	0,0497	0,0465	0,1595	0,1536	0,1515	0,2453	0,2331	0,2306
	Cônico	0,0582	0,0613	0,0585	0,1628	0,1564	0,1572	0,2136	0,2042	0,1912
200mm	Parabólico	0,0379	0,0343	0,0342	0,1628	0,1566	0,1617	0,2323	0,2318	0,2214
	Cônico	0,0502	0,0477	0,0534	0,1412	0,1493	0,1480	0,1376	0,1361	0,1475
300mm	Parabólico	0,0239	0,0275	0,0263	0,1397	0,1376	0,1325	0,2140	0,1995	0,1988
	Cônico	0,0384	0,0393	0,0445	0,1201	0,1065	0,1203	0,1177	0,1106	0,1091

Fonte: Dias et al. (2011)

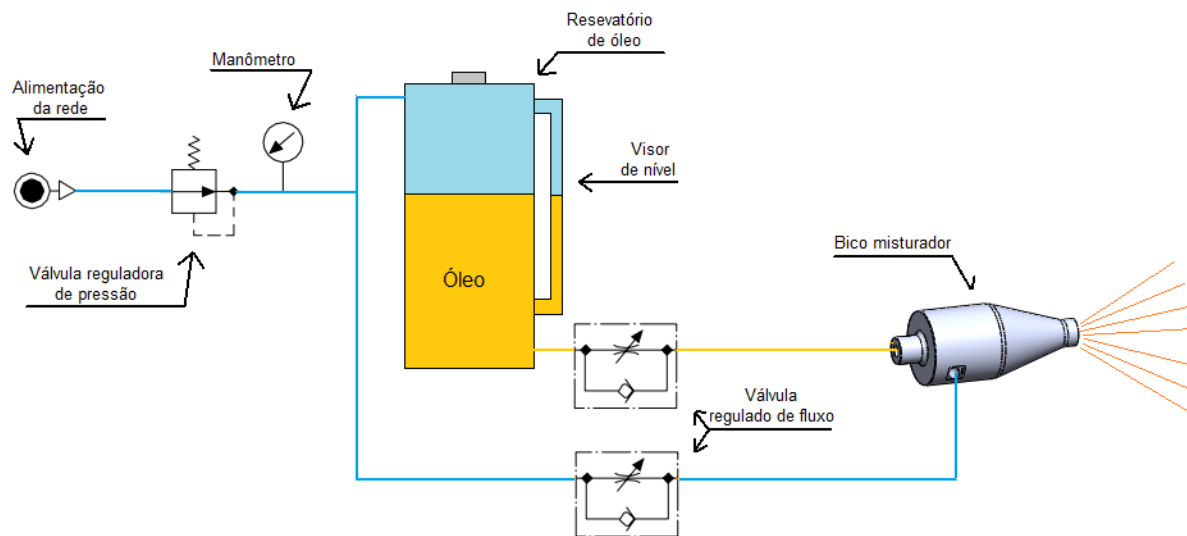
De acordo com Dias *et al.* (2011), e seus resultados apresentados, foi possível verificar que o perfil parabólico tem uma maior eficiência na transferência de massa para a região alvo em relação ao perfil cônico. Sendo assim, o autor concluiu que a melhor utilização ocorre neste tipo de bocal, com vazões maiores e distancias menores.

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MQL

Tendo em vista os métodos e modelos de equipamentos para MQL apresentados, o sistema escolhido como base para o projeto foi o sistema para aplicação externa de MQL com dois canais, para o fluxo de ar e óleo independentes, com bico misturador e reservatório do tipo tanque de alta pressão. O motivo da escolha deste sistema MQL foi pelo controle de variáveis como vazão do fluido, pressão e por ser um sistema de simples fabricação e aplicação.

Na Figura 10 é possível observar o esquema de funcionamento do sistema MQL desenvolvido e com todos seus componentes. O sistema de MQL (mínima quantidade de lubrificante) desenvolvido é composto por um bico misturador, um reservatório, reguladora de pressão e reguladoras de fluxo para o óleo e o ar comprimido.

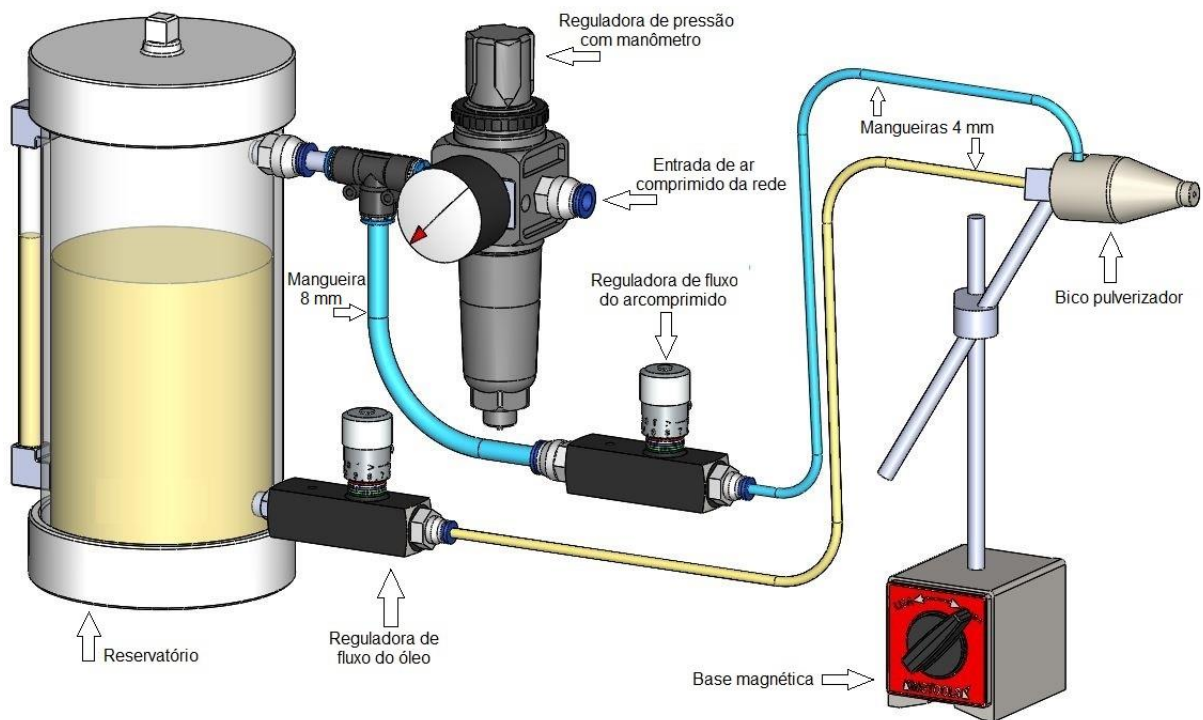
Figura 10 - Esquema de funcionamento do sistema MQL desenvolvido



Fonte: Autor

Na Figura 11 é possível observar o projeto completo com todos os componentes especificados. Foram utilizadas mangueiras pneumáticas de 4 e 8 mm para alimentação de ar e óleo ao bico pulverizador. A base magnética foi adicionada ao projeto como solução simples para fixar, posicionar e direcionar o bico pulverizador para região alvo.

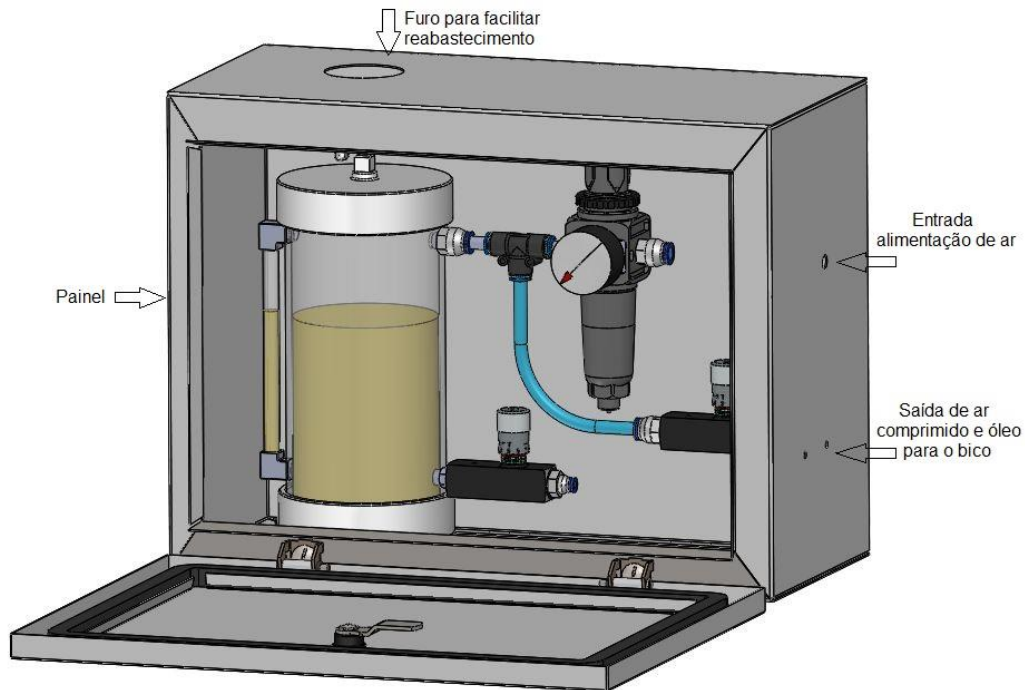
Figura 11 - Projeto completo dos componentes montados



Fonte autor

Na Figura 12 é possível observar uma solução para a fixação do sistema MQL em máquinas de usinagem. O equipamento fica protegido dentro de um painel onde apenas as mangueiras pneumáticas são direcionadas até a região onde está instalado o bico pulverizador com a base magnética. A instalação pode ser feita em qualquer local do equipamento podendo assim a utilização em diversos tipos de equipamentos.

Figura 12 - Solução para fixação do sistema MQL na máquina.



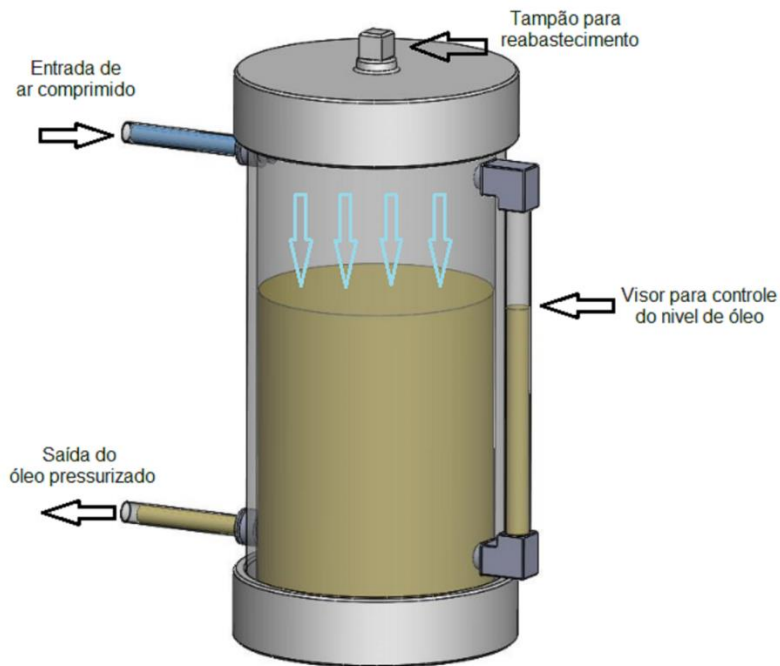
Fonte: autor

3.1 Projeto do reservatório

O reservatório tem como função armazenar o óleo e pressurizar o mesmo com ar comprimido a uma pressão estipulada para o sistema em 4 bar, que é controlada por uma reguladora de pressão na entrada do reservatório. Segundo Machado *et al.* (2010) a pressão ideal para utilização no MQL pode variar entre 1 e 5 bar. A pressão gerada no interior do reservatório faz com que o óleo saia pressurizado, podendo assim controlar com maior precisão sua vazão com uma reguladora de fluxo instalada na sua saída.

O controle do nível de óleo é realizado por um visor que foi colocado junto ao corpo do reservatório. Já o reabastecimento de óleo pode ser realizado pela tampa superior onde foi usinado um furo roscado com bujão para facilitar o reabastecimento. Na Figura 13 é possível observar todos componentes do reservatório de óleo, entrada de ar comprimido para pressurização do sistema e a saída do óleo pressurizado.

Figura 13 - Esquema de funcionamento do reservatório.



Fonte: Autor

Para a fabricação do reservatório foram utilizados materiais chapas e tubos de aço baixo carbono do tipo ABNT1020.

3.2 Válvulas utilizadas

Para garantir o perfeito funcionamento do dispositivo foi necessário utilizar diferentes tipos de válvulas para diferentes funções.

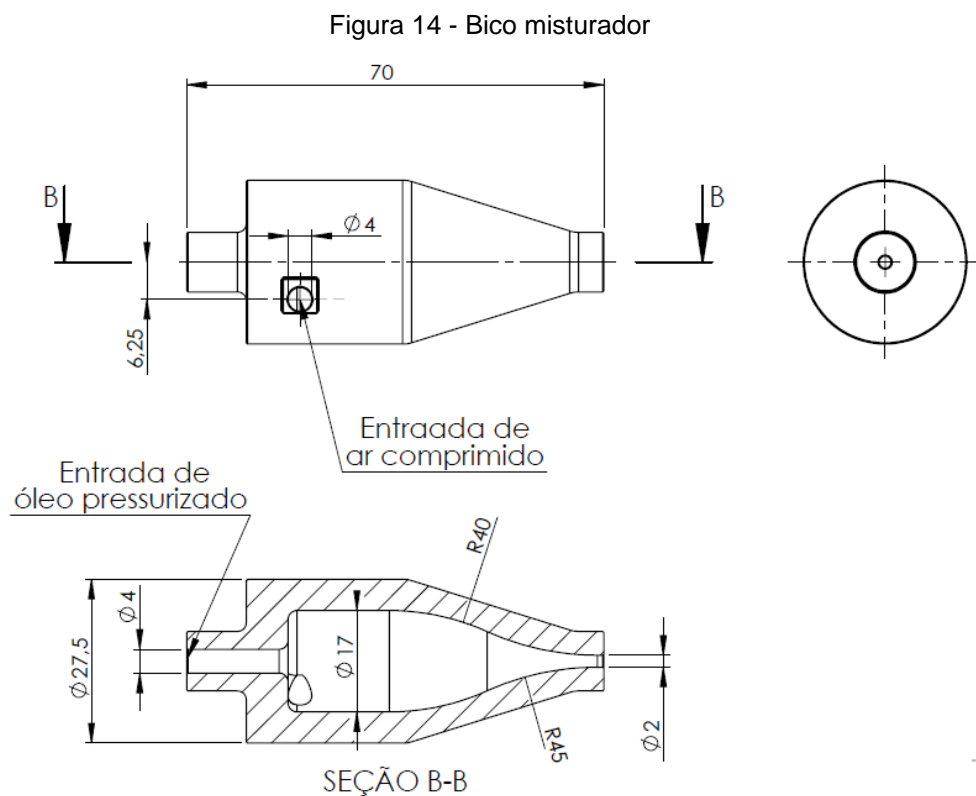
A válvula reguladora de pressão tem como objetivo evitar a flutuação da pressão no sistema, devendo garantir que a pressão regulada para o sistema se mantenha constante. Esta válvula foi utilizada no sistema desenvolvido para garantir a pressão constante do sistema em 4 Bar.

A válvula reguladora de fluxo tem como função reduzir seção de passagem para modificar a vazão do ar comprimido ou óleo e assim controlar a vazão, onde o ajuste é feito por meio de um parafuso. Esta válvula no sistema desenvolvido foi utilizada para realizar o controle do fluxo do fluido e do ar comprimido com maior precisão.

3.3 Projeto e construção do bico misturador

O bico misturador tem como função realizar a mistura entre ar e o óleo, gerando um aerossol e assim direcionar até a superfície desejada. A escolha do perfil interno do bico misturador foi feito através de estudos já realizados por Dias (2011), onde o autor afirma que o bico com perfil parabólico tem um melhor aproveitamento e melhor direcionamento do aerossol.

Na Figura 14 pode se observar construção geométrica e o perfil interno do bico misturador. É possível observar o local de entrada do óleo pressurizado e o local da entrada de ar comprimido, bem como as principais dimensões do bico.

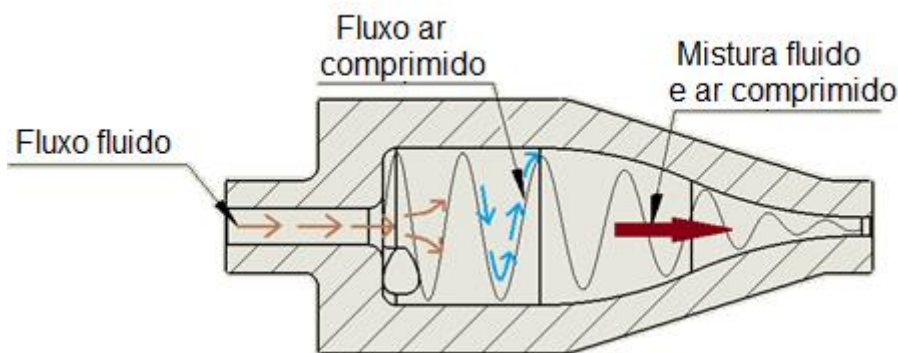


Fonte: Autor

O bico projetado foi produzido em material termoplástico ABS (Acrlonitrila butadieno estireno) onde foi produzido em uma impressora 3D marca *Dimension* modelo *Uprint*, cedida pela empresa WEG no departamento de desenvolvimento de componentes localizado em Jaraguá do sul.

O princípio de funcionamento do bico está representado na Figura 15. A mistura ocorre com a entrada do ar descentralizado da entrada do óleo, gerando assim um fluxo rotativo que transforma esta mistura em aerossol, direcionando assim até a saída do bico.

Figura 15 - Mistura do ar comprimido e óleo.



Fonte: Autor

Como vantagem já citada do sistema está a não necessidade de bombas para pressurizar o sistema, controle com uma vazão constante do óleo, baixo consumo de óleo, onde utilizada a mistura entre ar e óleo, e baixo custo e de simples fabricação de seus componentes.

Visando diminuir ainda mais os impactos ambientais gerados pela utilização de fluidos a base de minerais, se optou por avaliar a utilização do óleo de canola consumível como fluido refrigerante e lubrificante.

Após a escolha do perfil do bico e seu modelo pronto, se optou pela utilização do SolidWorks Flow Simulation para melhor entender como é gerado o aerossol no bico misturador, bem como para verificar a eficiência da mistura.

3.3.1. Simulação do bico misturador por software SOLIDWORKS Flow Simulation

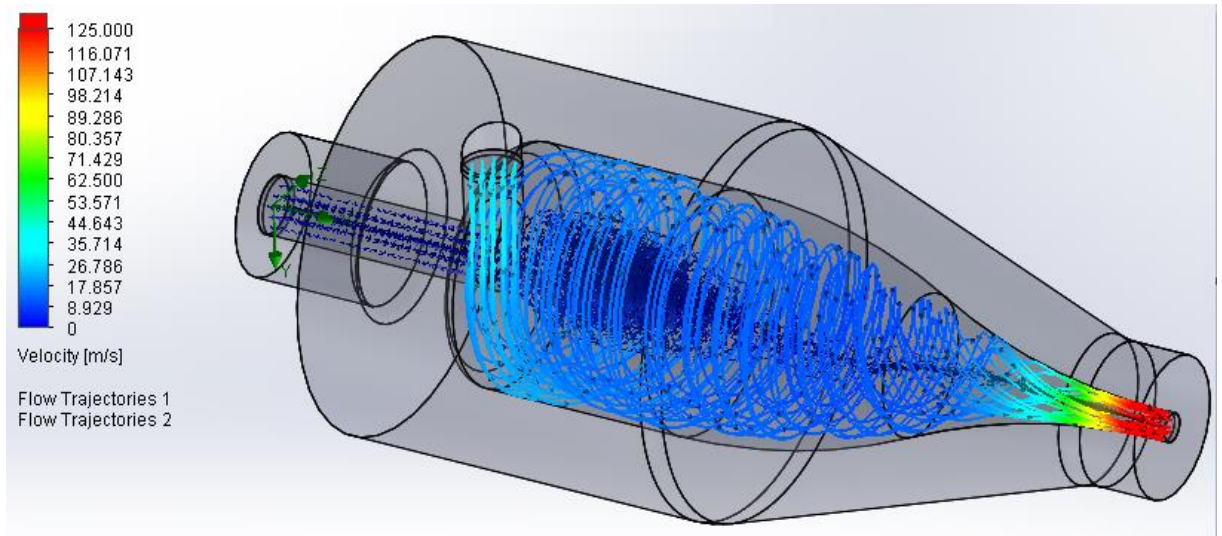
O SolidWorks Flow Simulation é uma ferramenta potente que simplifica a dinâmica de fluidos computacional (CFD) para projetistas e engenheiros. Capaz de

simular com rapidez e facilidade o fluxo e as forças de fluidos e a transferência de calor, análises fundamentais para o sucesso do projeto.

Com o conhecimento dos parâmetros de alimentação do bico como fluxo de fluido e pressão do sistema foi utilizado desta ferramenta para entender o funcionamento do bico misturador proposto.

Na simulação foi considerada uma pressão na entrada de ar de 4 bar. O óleo foi considerado um fluxo de massa de $1,8 \times 10^{-5}$ kg/s e a densidade do óleo de canola de $0,92$ g/cm³. Com a entrada dos dados foi possível avaliar a mistura, e forma dinâmica das linhas do fluxo do fluido após sua mistura. Na Figura 16 é possível observar os resultados da simulação com as trajetórias de ar e de óleo dentro do bico misturador.

Figura 16 - Trajetória do fluxo de ar e óleo no bico.



Fonte: Autor

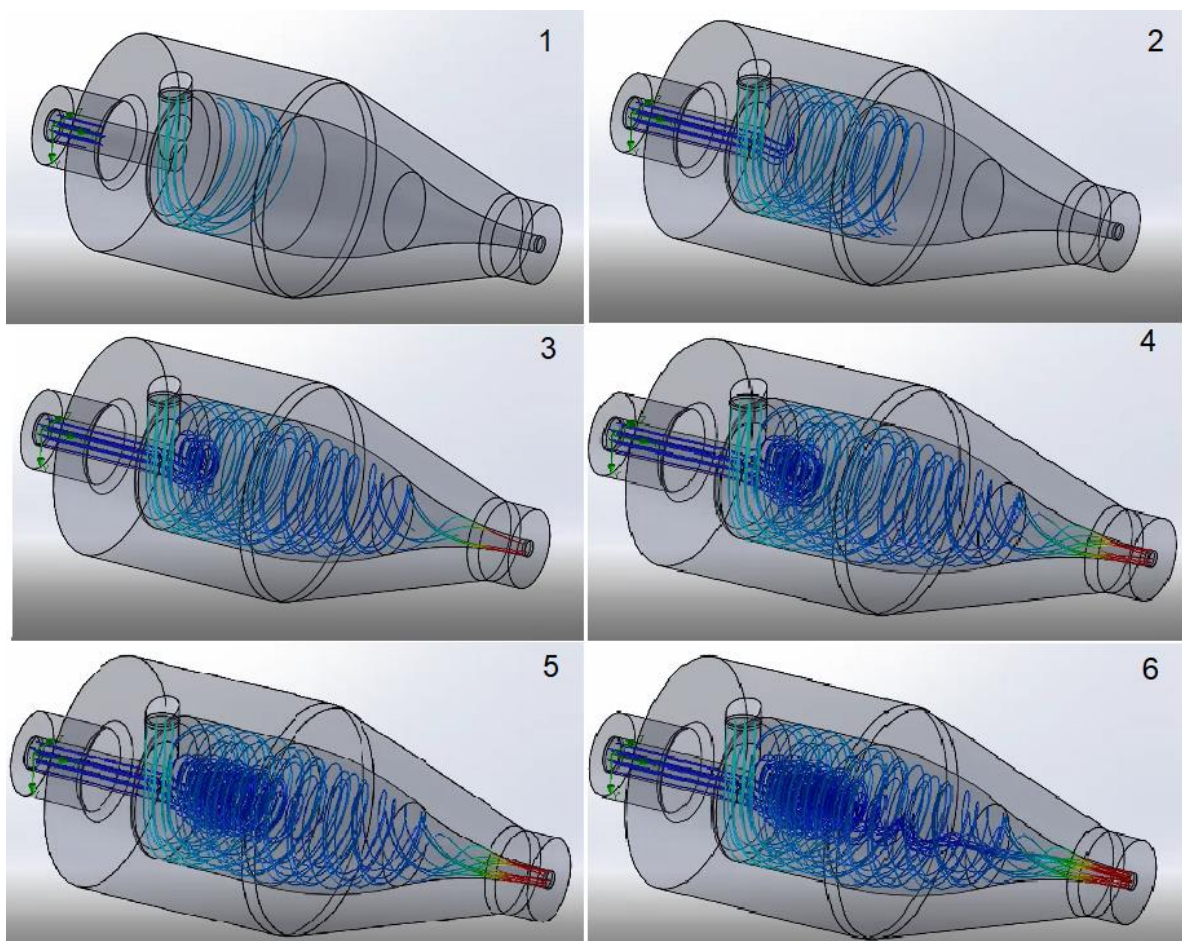
A entrada de ar comprimido descentralizada da entrada do óleo, faz com que se gere um vórtice que é um escoamento giratório onde as linhas apresentam um padrão espiral ao entorno do óleo deslocando a mistura com maior velocidade para a saída do bico.

Na Figura 17 é possível observar melhor como ocorre em cada etapa da mistura. Na primeira etapa pode se observar o fluxo de entrada do óleo e ar, na segunda etapa o ar gera linhas de fluxo em vórtice, na terceira o óleo acaba seguindo

o fluxo do ar e se misturando no vórtice, na quarta e quinta etapa o ar ganha velocidade conforme vai chegando a sua saída por fim o clico completo.

A simulação comprovou o bom funcionamento do bico misturador onde é possível se observar as linhas do fluxo em forma de espiral ao entorno do fluxo de fluido, mostrando a eficiência do modelo proposto em fazer a mistura entre fluido e ar comprimido. É possível observar também o grande aumento da velocidade do aerossol na saída do bico.

Figura 17 - Passo a passo do fluxo de ar e óleo.



Fonte: Autor

Como resultado da simulação o bico projetado se mostra eficaz para ser utilizado neste sistema usando as variáveis propostas. Fazendo uma boa mistura, e gerando um aerossol. Também é possível observar um aumento considerável na velocidade no qual o fluxo saí do bico misturador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência são apresentados os resultados dos testes realizados para verificar o funcionamento correto do dispositivo e validar o projeto e desenvolvimento. O objetivo dos testes é verificar o funcionamento do sistema proposto conforme variáveis e problemas já conhecidas por diversos estudos sobre o sistema de MQL, permitindo sua aplicação em operações de usinagem.

4.1 Verificação da capacidade de aderência (molhabilidade)

O teste para verificar a capacidade de aderência (molhabilidade) consiste em aplicar o fluido (óleo) em uma superfície absorvente e assim obter um comparativo entre os resultados. Este teste é realizado para medir a capacidade do equipamento em transferir o óleo até a região desejada, bem como para a dispersão do fluido impresso na superfície.

Foram realizados os testes a distâncias de 50,100,150 mm entre o bico e a superfície (Folha sulfite A4) em um tempo estipulado em 10 segundos. Todas as folhas foram pesadas antes da realização do ensaio numeradas e logo após a realização dos testes pesadas novamente tendo um teste comparativo. Para a pesagem das folhas foi utilizado uma balança de precisão conforme Figura 18, da marca Shimadzu do IFSC – Campus GW no laboratório de ensaios.

Figura 18 - Balança de precisão utilizada no ensaio de molhabilidade



Fonte: Autor

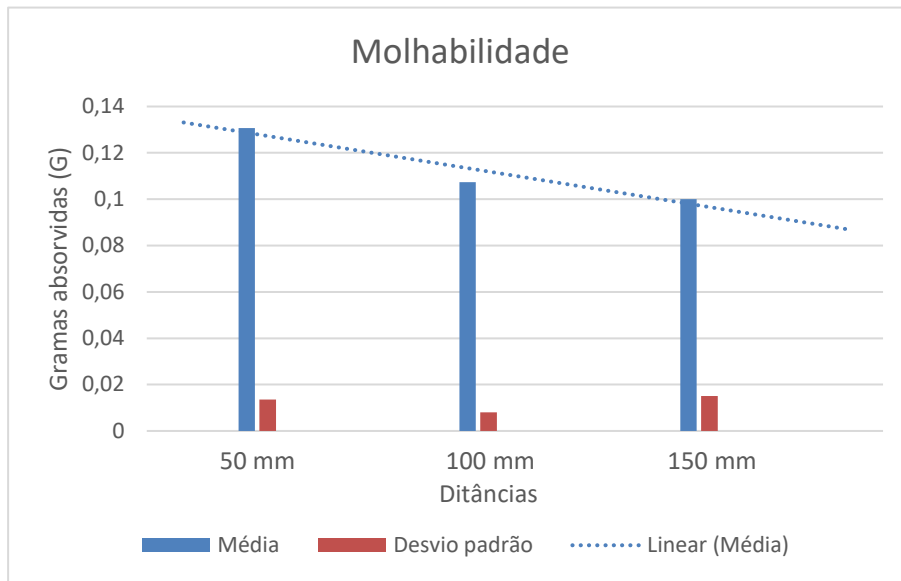
A vazão no qual este teste foi realizado foi de 17 ml/h. A Tabela 1 mostra os resultados do teste de molhabilidade em três diferentes distâncias de posicionamento do bico. Foram realizados três ensaios para cada distância de posicionamento do bico.

Tabela 1 - Peso absorvido pela folha A4 no teste de molhabilidade

Distâncias (mm)	Peso inicial (g)	Peso após ensaio (g)	Diâmetro marca (mm)	Peso absorvido (g)	Média peso absorvido (g)	Desvio padrão
50	4,872	5,001	43	0,129	0,131	0,014
	4,742	4,860	41	0,118		
	4,783	4,928	48	0,145		
100	4,851	4,967	41	0,116	0,107	0,008
	4,831	4,931	36	0,100		
	4,821	4,927	37	0,106		
150	4,726	4,824	41	0,098	0,100	0,015
	4,749	4,865	42	0,116		
	4,840	4,926	39,5	0,086		

Fonte: autor

Gráfico 1 - Teste de molhabilidade

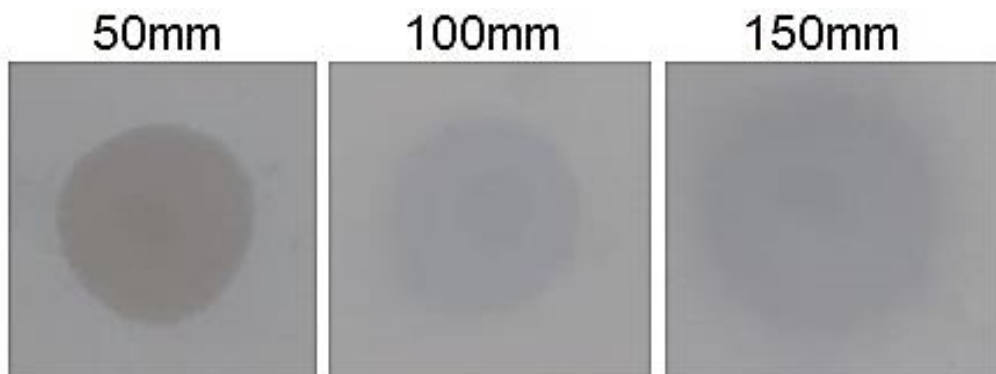


Fonte: autor

Como resultado, pode se observar que a distância de 50 mm tem uma maior taxa de transferência de lubrificante para a superfície absorvente.

A Figura 19 mostra as marcas do óleo absorvido na superfície do papel. É possível observar a forma padrão circular e homogênea, para o fluido aplicado em distâncias de 50, 100, 150mm o que mostra o correto funcionamento do sistema. É possível observar também a diferença de absorção das três diferentes distâncias tendo uma maior absorção na de 50 mm onde a marca fica mais nítida.

Figura 19 - Marcas do teste de molhabilidade



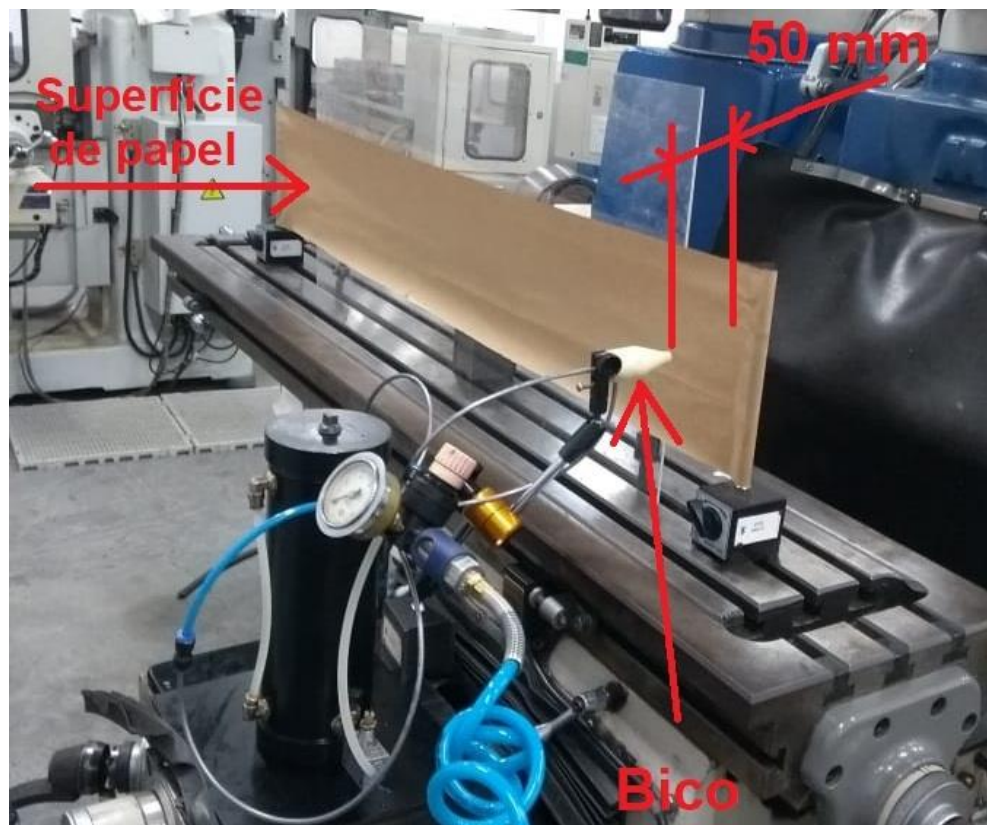
Fonte: autor.

4.2 Verificação da variabilidade da vazão do sistema

Para verificar a confiabilidade do sistema em garantir uma vazão constante durante processo de usinagem, para permitir a utilização no processo de fresamento e torneamento, foi realizado um teste para verificar a variabilidade da vazão do sistema em um intervalo maior de tempo. O equipamento utilizado para auxiliar neste teste foi uma fresadora Diplomat 3001 modelo FVF3000 do IFSC Campus GW do laboratório de usinagem.

Para realizar o teste foi fixada na mesa da fresadora uma superfície de papel absorvente como comprimento de 950 mm. A Figura 20 mostra o papel fixo por meio de duas bases magnéticas e o dispositivo MQL pronto para o teste.

Figura 20 - Fotografia do teste de variabilidade da vazão



Fonte: Autor

Para realizar o teste foi utilizado uma pressão do sistema de 4 bar com o bico pulverizador posicionado a uma distância de 50 mm com uma velocidade constante de avanço de 0,6 m/min e uma vazão média 70 ml/h. O fluido é pulverizado até a

superfície absorvente por todo seu comprimento em um tempo de 95 segundos onde gerou uma marca visual, após isto foi dado um intervalo de 5 minutos com o dispositivo ligado, após este tempo foi realizado o segundo teste com os mesmos intervalos de tempo, realizando assim da mesma forma os 4 testes.

Este teste foi realizado com intuito de verificar o comportamento do sistema MQL durante o funcionamento na usinagem, podendo assim comparar a vazão em determinados pontos da superfície e observar sua variabilidade durante todo o comprimento da superfície em um tempo total de funcionamento de 25 minutos e 20 segundos. A Figura 21 mostra como foi realizado o teste de variabilidade da vazão durante o seu funcionamento. É possível verificar a marca linear do fluido pulverizado na superfície de papel durante o avanço da mesa.

Figura 21 - Fotografia do teste variabilidade da vazão



Fonte: Autor

Na Tabela 2 é possível observar um resumo das variáveis utilizadas para o teste de variabilidade da vazão.

Tabela 2 - Tabela das variáveis utilizadas

Distância (mm)	Vazao ml/h	Pressão (bar)	Avanço da mesa m/min	Tempo do avanço (s)	Tempo intervalo equipamento ligado (s)	Comprimento superfície (mm)	Número de testes
50	70	4	0,6	95	300	950	4

Os resultados obtidos no teste de variabilidade nos quatro intervalos de tempos avaliados são mostrados na Figura 22.

Figura 22 - Teste variabilidade em 50 mm



Fonte: Autor

A avaliação do resultado foi visual e comparativa, onde foi possível verificar que o equipamento garantiu a lubrificação homogênea durante todo seu processo sem apresentar nenhuma falha conforme apresentado na figura 20. Em um intervalo de 25 min de funcionamento o equipamento teve uma baixa variação da vazão durante seu funcionamento. Essa característica do equipamento é de grande importância para o processo pois garante durante o processo de usinagem a peça e ferramenta de corte se mantenham lubrificadas e refrigeradas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dispositivo MQL desenvolvido e testado atingiu o objetivo de disponibilizar um equipamento MQL de fabricação simples, para aplicação na usinagem, com baixo custo, simples utilização e que mantenha os requisitos de manter uma vazão constante, com formação de um aerossol adequado e com boa molhabilidade.

A utilização do princípio de funcionamento do tipo tanque de alta pressão, com dois canais para aplicação externa se mostrou eficaz. Conforme relatado por Machinebau *et al* (2010). O sistema de bico misturador parabólico utilizado também se mostrou eficaz, comprovando os relatos de Dias (2011).

6 CONCLUSÃO

Para o desenvolvimento do sistema MQL foram realizados estudos sobre os tipos de sistemas MQL comercializados tal como suas vantagens e desvantagens. A escolha pelo sistema tanque de alta pressão se deu pelos motivos da simples utilização, fácil fabricação e a precisão no controle da vazão mantendo a mesma constante durante o funcionamento.

A escolha do perfil do bico misturador teve como base os estudos realizados por Dias (2011) onde mostrou a maior eficiência na transferência de massa do bico de perfil parabólico. O bico do sistema desenvolvido atendeu as funções e necessidades do sistema em realizar a mistura entre ar e óleo gerando o aerossol, conforme simulação *Flow Simulation* e o teste de molhabilidade.

O projeto e a construção do protótipo do sistema de MQL foram realizados com sucesso, permitindo controle de parâmetros importantes como a regulagem da vazão do fluido e a vazão do ar. O equipamento apresentou um bom controle na variabilidade da vazão durante seu funcionamento conforme os testes realizados, esta característica se mostra de grande importância para usinagem, pois garante que todo o processo tenha o mesmo padrão de lubrificação.

Como ponto negativo do sistema proposto os resultados do teste de molhabilidade mostram que em distâncias superiores a 100 mm o sistema perde eficiência na transferência de massa para a região alvo, devido à grande perda do aerossol que acaba se transformando em névoa perdendo pressão e se misturando ao ambiente. Portanto se sugere para o sistema desenvolvido a utilização de distâncias inferiores a 50 mm entre o bico misturador e a região de corte para garantir maior eficiência e melhor aproveitamento do fluido de corte.

Outra desvantagem do sistema desenvolvido é a necessidade da utilização de um exaustor devido a grande formação de névoa no ambiente.

Com o desenvolvimento do sistema criou-se diversas possibilidades de trabalhos relacionados a técnica MQL. Fica como sugestão para trabalhos futuros, a utilização do equipamento MQL desenvolvido nos diversos processos de usinagem comparando a eficiência do mesmo com os sistemas de refrigeração por emulsão e usinagem a seco.

7 REFERÊNCIAS

ARAUJO JUNIOR, Antonio Santos. Desempenho de óleos vegetais consumíveis aplicados por MQF no fresamento frontal do aço ABNT 1045. Uberlândia, MG: Tese (Pós-graduação) – Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia mecânica. 2013.

ARAUJO JUNIOR, A. S.; MACHADO, A. R.; RIBEIRO, J. R.S. “Análise dos esforços de usinagem e acabamento superficial no fresamento frontal do aço ABNT 1045 com aplicação MQF de óleo refinado vegetal a base de canola”. 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DEFABRICAÇÃO, São Luis, 2015.

ASADAUSKAS, S.; ERHAN, S. Z. Lubricant base stocks from vegetable oil. *Industrial crops and products*. v. 11, n. 2-3, p. 277-282, 2000.

BYRNE, G., SCHOLTA, E. Environmentally clean machining processes—a strategic approach. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 42, p. 471–474, 1993.

DIAS, G. T. “Projeto e construção de um equipamento de atomização de fluido lubrificante em ar comprimido”. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DEFABRICAÇÃO, Caxias do Sul, 2011.

HEISEL, U.; LUTZ, M. Pesquisa de fluidos de refrigeração e de lubrificação. *Revista Máquinas e Metais*, p. 40-49, maio, 1998.

HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. “A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.” *Revista Máquinas e Metais*, Ano XXXIV, nº 385, pp. 22-38, 1998.

HONG, S.Y.; BROOMER, M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Products Process*, 2, p. 157–166, 2000.

HOWELL, J.K.; LUCKE, W.E.; WHITE, E.M. *Health and Safety Aspects in the Use of Metalworking Fluids*, by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; LUNG, D. “Minimal quantity lubrication (MQL) – motivation, fundamentals”. In: 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 14p, 2000.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. Presented at the Opening Session Dry Cutting *CIRP. Annals*, v. 46 (2), p. 519-526, 1997.

MASCHINENBAU, FERTIGUNGSSYSTEME, STAHLBAU. (Mechanical engineering, production systems, steel construction) of the Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) - [http:// publikationen.dguv.de/ dguv/pdf/10002/i-718e.pdf](http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-718e.pdf). 2010.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R. T.; SILVA, M.B. *Teoria da usinagem dos materiais*. 2ª ed, ed Blucker. 2010.

MACHADO, AR, DINIZ, AE, "Vantagens e desvantagens do uso dos fluidos de corte", Machining Congress 2000, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

MADHUKAR, S.; SHRAVAN, A.; VIDYANAND, P.; REDDY, G.S. "A Critical review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) Coolant System for Machining Operations". International Journal of Current Engineering and Technology, India, 2016.

NOVASKI, O., DÖRR, J., "Usinagem sem refrigeração", Máquinas e Metais, No.399, p.18-27, 1999.

RUZZI, Rodrigo de Souza. Aplicação de fluido de corte pela técnica MQL com limpeza do rebolo de alumina na retificação do aço ABNT 4340. Bauru, SP: 93 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, 2017.

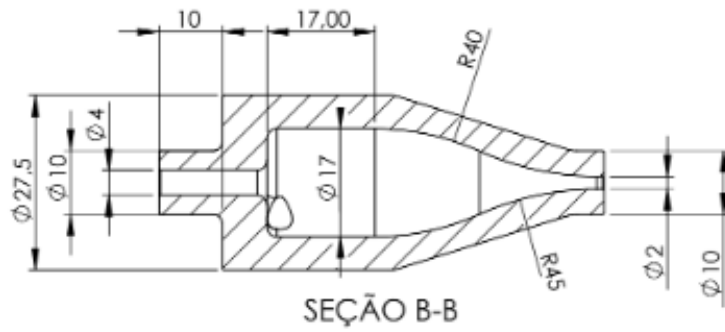
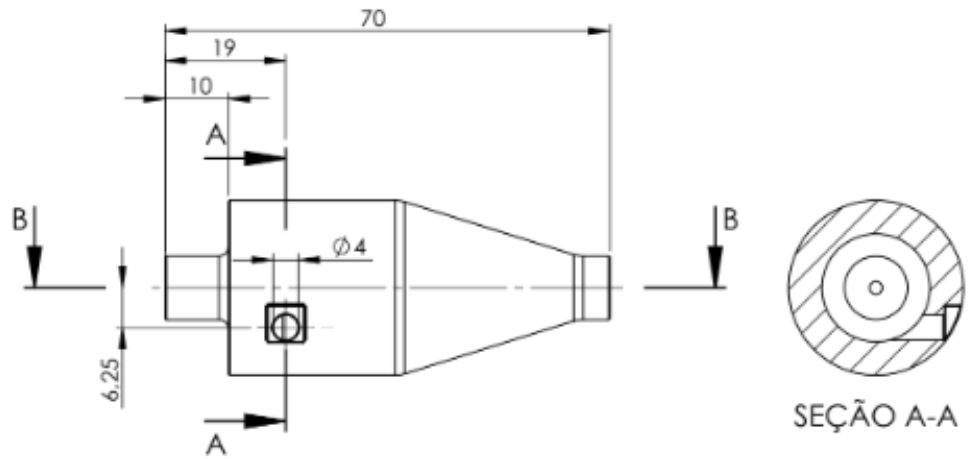
SHARMA, A. M. et al. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, v. 127, p. 1-18, 2016.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WAKABAYASHI, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Vol 53, Issue 2. Pages 511-537, 2004.

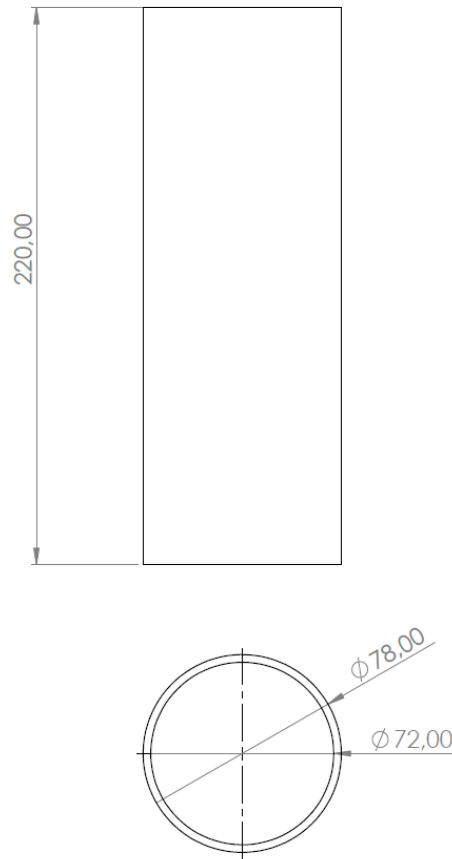
WALKER, T. The mql handbook – a guide to machining with minimum quantity lubrication. [s.l.] Unist Inc, 2013.

APÊNDICE

Apêndice A - Desenho técnico do bico misturador



Apêndice B - Desenho técnico do Tubo reservatório.



Apêndice C - Desenho técnico das tampas do reservatório.

