

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA.
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS
PRODUTIVOS

VITOR MARCELO COSTA HALCSIK

**PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE
USINAGEM POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM
FOCO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.**

São Paulo

2022

VITOR MARCELO COSTA HALCSIK

**PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE
USINAGEM POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM
FOCO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.**

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Formigoni.

São Paulo

2022

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CPS CRB8-8390

H157p Halcsik, Vitor Marcelo Costa
Projeto de dispositivo de refrigeração para processo de usinagem por torneamento para micros e pequenas empresas com foco em desenvolvimento sustentável / Vitor Marcelo Costa Halcsik. – São Paulo: CPS, 2022.
72 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Formigoni
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2022.


1. Aço ABNT 1045. 2. Refrigeração MQCL. 3. Rugosidade. 4. DOE. 5. Projeto de produto. I. Formigoni, Alexandre. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

VITOR MARCELO COSTA HALCSIK

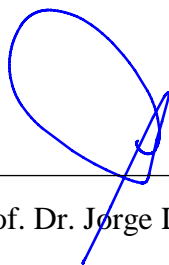
**PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE USINAGEM
POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM FOCO EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.**



Prof. Dr. Alexandre Formigoni



Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi



Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa

São Paulo, 27 de junho de 2022

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve ao meu lado apoiando com seu carinho e compreensão e aos amigos e colegas da FATEC São Paulo pelo incentivo e colaboração sem o qual essa pesquisa não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ter passado por esse período de pandemia com saúde.

A minha mãe onde quer que esteja, sinto que ainda me guarda e me apoia.

Ao meu pai pelas ausências em momentos difíceis.

A minha esposa Andréa por todo cuidado, dedicação e compreensão.

Ao meu filho Andrey por me cobrir nos momentos de ausência.

A minha irmã Roseli pelo incentivo para esta jornada.

Ao amigo e cunhado Marcio Aparecido Candido pela doação do tubo de vórtice, parte fundamental deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Formigoni por todos os seus esforços, paciência e confiança na orientação deste trabalho.

Ao Centro Paula Souza pela oportunidade que me proporcionou no meu aprimoramento profissional.

À Profa. Msc. Silvia Regina Lucas chefe do Departamento de Mecânica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, pela disposição em ajudar com a cessão dos laboratórios e oficinas.

À empresa Iscar pela disponibilização das ferramentas.

A todos os colegas e companheiros do curso de mestrado da Unidade de pós-graduação, extensão e pesquisa do Centro Paula Souza, em especial a Mayara Pohlmann e ao Ronald Freitas de Oliveira pelo companheirismo e apoio nas horas mais difíceis.

E a todos os colegas e companheiros dos laboratórios do Departamento de Mecânica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP, em especial ao amigo Antônio Adílson da Silva com o qual, sem o apoio este trabalho não seria realizado.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!

“Talvez não tenha conseguido fazer o
melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus,
não sou o que era antes”.

Martin Luther King

RESUMO

HALCSIK, V. M. C. PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM FOCO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.

72 f. Dissertação de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2022.

O torneamento é uma operação de usinagem convencional fundamentada na retirada de parte do material na forma de cavaco, por meio do cisalhamento provocado pela aresta de corte de uma ferramenta mais dura que o material da peça.

Durante este processo ocorre deformação plástica do material para a formação do cavaco e grande parte da energia mecânica fornecida pela máquina (mais de 90%) transforma-se em calor. Esta elevação do calor produz uma concentração de energia térmica em uma pequena região no contato cavaco-ferramenta que no caso do aço ABNT 1045, utilizado nos corpos de prova, pode chegar acima dos 1000°C, dependendo dos parâmetros de usinagem.

O calor gerado facilita a remoção do cavaco permitindo menor esforço no cisalhamento do material, porém a alta temperatura sobre a ferramenta de corte atua como um catalisador dos mecanismos de desgaste, diminuindo assim sua vida útil, podendo inclusive alterar as características macro e micro dimensionais de uma peça. Por isso, torna-se necessário o controle da temperatura, na forma da aplicação de fluido de corte (FC) ou fluidos refrigerantes (FR) na região da zona de corte (ZC).

Sabe-se que a utilização incorreta dos FC ou FR podem gerar impactos ambientais e a saúde do operador, para evitar isso, técnicas como a usinagem a seco, refrigeração pela técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) e sistemas de refrigeração criogênica vem sendo testados com êxito. Porém algumas delas não são possíveis em função da criticidade da operação ou possuem alto custo de aquisição tornando-se inviáveis para micro e pequenas empresas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo para a refrigeração híbrida onde a técnica MQL se alia a aplicação de ar comprimido resfriado, chamada de *minimum quantity cooling lubrication* (MQCL) ou mínima quantidade de líquido refrigerado, e avaliar o efeito da sua utilização na rugosidade da peça e na vida útil da ferramenta.

O dispositivo projetado e fabricado alcançou durante a fase preliminar de testes temperaturas tão baixas quanto -5 °C. Para esta pesquisa foram realizados ensaios de usinagem em um corpo de prova de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1045 com 100 mm de

diâmetro, comparando a utilização do sistema MQCL com o sistema por inundação (aqui chamado de Jorro) utilizando insertos de metal duro. Para realização dos experimentos foi utilizado um planejamento experimental fatorial completo de 2^3 , baseado em *Design of Experiments* (DOE), com três fatores e dois níveis, para os fatores de vc (188 e 298 m/min), velocidade do avanço (0,125 e 0,251 mm/rev) e uso de refrigeração (Jorro e MQCL), totalizando 8 condições diferentes. As variáveis de saída foram a Rugosidade Ra, a morfologia do cavaco e o desgaste de flanco dos insertos. Os resultados dos experimentos mostram uma pequena variação entre as rugosidades encontradas para os dois sistemas de refrigeração quando se compara Jorro e MQCL, o uso das MQCL resultou em uma menor rugosidade, 4,7% até 8,8% para vc mais baixa, entretanto os resultados não se mantiveram no uso da velocidade mais alta, o que exigirá estudos posteriores.

Palavras-chave: aço ABNT 1045, refrigeração MQCL, rugosidade, DOE, Projeto de Produto.

ABSTRACT

HALCSIK, V. M. C. **REFRIGERATION DEVICE DESIGN FOR TURNING MACHINING PROCESS FOR MICROS AND SMALL BUSINESSES WITH A FOCUS ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT.** 72 p. Professional Master's Dissertation in Management and Technology in Production Systems. Paula Souza State Center for Technological Education, São Paulo, 2022.

Turning is a conventional machining operation based on the removal of part of the material in the form of a chip, through the shear caused by the cutting edge of a tool that is harder than the work piece material.

During this process, plastic deformation of the material occurs to form the chip and a large part of the mechanical energy supplied by the machine (more than 90%) is transformed into heat. This increase in heat produces a concentration of thermal energy in a small region in the chip-tool contact which, in the case of ABNT 1045 steel, used in the specimens, can reach above 1000°C, depending on the machining parameters.

The generated heat facilitates the chip removal, allowing less effort in shearing the material, but the elevated temperature on the cutting tool acts as a catalyst for wear mechanisms, thus reducing its useful life, and may even change the macro and micro dimensional characteristics of one piece. Therefore, it becomes necessary to control the temperature, in the form of the application of cutting fluid (FC) or refrigerant fluids (FR) in the region of the cutting zone (ZC).

It is known that the incorrect use of FC or FR can generate environmental impacts and the health of the operator, to avoid this, techniques such as dry machining, cooling by the technique of minimum quantity of lubricant (MQL) and cryogenic cooling systems have been used successfully tested. However, some of them are not possible due to the criticality of the operation or have a high acquisition cost, making them unfeasible for micro and small companies. This work aims to develop a low-cost device for hybrid refrigeration where the MQL technique is combined with the application of cooled compressed air, called minimum quantity cooling lubrication (MQCL) or minimum quantity of refrigerated liquid, and to evaluate the effect of its use in the roughness of the part and in the useful life of the tool.

The designed and manufactured device reached temperatures as low as -5°C during the preliminary testing phase. Machining tests were carried out on a specimen of a cylindrical bar of steel ABNT 1045 with 100 mm in diameter, comparing the use of the MQCL system with

the flood system (here called jet) using carbide inserts. To carry out the experiments, a complete factorial experimental design of 23 was used, based on Design of Experiments (DOE), with three factors and two levels, for the factors of v_c (188 and 298 m/min), speed of advance (0.125 and 0.251 mm/rev) and use of cooling (Journal and MQCL), totaling 8 different conditions. The output variables were Roughness R_a , chip morphology and insert flank wear. The results of the experiments show a small variation between the roughness found for the two refrigeration systems when comparing Jet and MQCL, the use of MQCL resulted in a lower roughness, 4.7% to 8.8% for v_c lower, however the results did not hold for the use of the highest speed, which will require further studies.

Keywords: ABNT 1045 steel, MQCL coolant, roughness, DOE, Product Design.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critério de classificação das empresas.	42
Quadro 2 - Diretrizes de pesquisa em DSR.	47
Quadro 3 - Forma e cor do cavaco nos diferentes ensaios.....	61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	30
Equação 2.....	30
Equação 3.....	30
Equação 4.....	41
Equação 5.....	41
Equação 6.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do material do corpo de prova	53
Tabela 2 - Parâmetros de corte teóricos.....	53
Tabela 3 - Parâmetros recalculados	54
Tabela 4 - Matriz experimental.....	55
Tabela 5 - Medições da rugosidade Ra.....	59
Tabela 6 - Análise da variância preliminar da rugosidade Ra.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação.....	21
Figura 2 - Classificação da Usinagem.	22
Figura 3 - Classificação dos processos de usinagem convencional.....	23
Figura 4 - representação dos movimentos no torneamento.	24
Figura 5 - Operações mais comuns de torneamento.	25
Figura 6 - Diagrama de forças no corte ortogonal.	25
Figura 7 - Forma dos cavacos.	27
Figura 8 - Componentes da força de usinagem no torneamento.....	29
Figura 9 - Variação da resistência dos <i>strain gauge</i> em função de sua extensão.	31
Figura 10 - Distribuição da temperatura na ponta da ferramenta de MD.	32
Figura 11 - Representação esquemática dos métodos de aplicação.....	36
Figura 12 - Separação do fluxo de ar comprimido em fluxo quente e frio.....	38
Figura 13 - Representação do parâmetro de rugosidade R_a	41
Figura 14 - Distribuição das indústrias metalúrgicas paulistas.....	43
Figura 15 - Artigos publicados durante o recorte temporal	46
Figura 16 - Esquema de montagem do sistema MQCL.....	49
Figura 17 - Tubo de vórtice comercial de baixo custo	50
Figura 18 - Subsistema MQCL.....	50
Figura 19 - Projeto em CAD do bloco misturador da névoa	51
Figura 20 - Ajuste da vazão do MQL	51
Figura 21 - Projeto do Bloco de Suporte	52
Figura 22 - Sistema MQCL montado no Torno.....	52
Figura 23 - Dimensões do copo de prova	53
Figura 24 - Torno mecânico universal.....	56
Figura 25 - Inserto QNMG 120408 - TF	56
Figura 26 - Suporte PQLNR 2020K - 12	57
Figura 27 - Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-301.....	57
Figura 28 - Microscópio ótico digital.	58
Figura 29 - Resultados da medição da rugosidade R_a	59
Figura 30 - Gráfico para interações da Rugosidade R_a	60
Figura 31 - Micrografias do flanco do Inserto no torneamento com Jorro.....	62
Figura 32 - Micrografias do flanco do Inserto no torneamento com MQCL.	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI American Iron and Steel Institute
Al Alumínio
ANOVA Análise de variância
ap Profundidade de usinagem [mm]
BAR Unidade de pressão
CAD *Computer Aided Design*
CAGR *Compound Annual Growth Rate*
CVD *Chemical Vapor Deposition*
Cu Cobre
Co Cobalto
CO₂ Dióxido de carbono
DOE *Design of Experiments*
DSR *Design Science Research*
Fap Força de apoio [N]
FC Fluido de Corte
Fc Força de corte [N]
Fe Ferro
Ff Força de avanço [N]
FR Fluido refrigerante
Fp Força de profundidade [N]
Ft Força de usinagem [N]
Fu Força de usinagem [N]
ISO *International Organization for Standardization*
KT Desgaste de Entalhe
MD Metal Duro
MEV Microscopia Eletrônica de Varredura
ml/h Mililitros por hora
MQL *Minimum Quantity Lubrication*
MQCL *Minimum Quantity Cooling Lubrication*
NbC Carboneto de Nióbio
Ni Níquel
Pc Potência efetiva de corte [kW]

re Raio de ponta [mm]

RHVT *Ranque-Hilsch Vortex Tube*

RPM Rotações por minuto

TaC Carboneto de Tântalo

Ti Titânio

TiC Carboneto de Titânio

TiN Nitreto de Titânio

V Vanádio

VB desgaste de flanco [mm]

vc Velocidade de corte [mm/min]

vf Velocidade de avanço [mm/rev]

WC Carboneto de Tungstênio

ZC Zona de Corte

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	18
1 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
1.1 Processos de Fabricação	21
1.1.1 Usinagem.....	21
1.1.2 Torneamento	24
1.1.2.1 Formação do Cavaco.....	25
1.1.2.2 Forças e Potência no Torneamento	28
1.1.3 Temperatura de Corte.....	31
1.1.4 Ferramentas de Corte	32
1.1.5 Lubrificação	34
1.1.6 Métodos de Aplicação da Lubrificação	36
1.1.7 Parâmetros de Rugosidade Superficial.....	40
1.2 Micro e Pequenas Empresas	42
2 METODOLOGIA.....	45
2.1 Bibliometria sobre MQCL no torneamento	45
2.2 A metodologia <i>Design Science Research</i> (DSR).....	46
2.3 D.O.E – <i>Design of Experiments</i>	47
2.4 Projeto do Sistema MQCL.....	49
2.5 O Material do Corpo de Prova	52
2.6 Elaboração dos Ensaios de Usinagem.....	53
2.7 Máquinas e equipamentos.....	55
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.1 Análise da Rugosidade da Superfície Usinada Ra.....	59
3.2 Análise da morfologia do cavaco.....	61
3.3 Análise do desgaste de flanco (VB).....	62
4 CONCLUSÃO.....	64
4.1 Rugosidade Média da Superfície Usinada	64

4.2	Formação do cavaco dos ensaios	64
4.3	Desgaste de flanco do Inserto (VB)	64
4.4	O sistema MQCL	65
5	CONTINUIDADE DO TRABALHO	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE	71

INTRODUÇÃO

O processo de torneamento ainda é um dos mais importantes da usinagem, sendo um dos mais utilizados no ramo metal mecânico na produção de peças para as mais diversas aplicações. Nos processos de usinagem convencional o movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça provoca um aumento de tensão que excede o limite de cisalhamento do material, proporcionando assim a formação do cavaco e consequente retirada de material da peça. (MACHADO *et al.*, 2015)

Durante esse processo, toda energia mecânica fornecida pela máquina é usada para a deformação plástica sendo quase toda transformada em energia térmica, gerando aumento de temperatura na ZC. A maior parte dessa energia térmica gerada é dissipada para o cavaco, uma pequena parte fica no material da peça e ambiente, e o restante, por volta de 20%, é dissipado na ferramenta.

O principal parâmetro de usinagem que influência no aumento da temperatura no conjunto material-ferramenta é a vc . (TRENT; WRIGHT, 2000)

Considerando-se que o custo de um processo de usinagem é baseado na taxa de remoção do material (material removido/tempo), sempre se busca o aumento da vc , de modo a tornar os processos mais produtivos. Porém, existem limites para o aumento da vc , em função das temperaturas mais elevadas geradas por este aumento. O calor auxilia no processo de deformação plástica facilitando o cisalhamento do cavaco, porém, as altas temperaturas na ZC aceleram os mecanismos de desgaste da ferramenta, o que resulta em vida útil mais curta e consequentemente maior custo operacional.

Desta forma o controle da temperatura é parte essencial do processo. Entre as formas de controle está a aplicação de técnicas de lubrificação da ZC: aplicação em jorro ou a alta pressão de FC e o uso da mínima quantidade de lubrificante (MQL). (MACHADO *et al.*, 2015)

Além do controle da temperatura a lubrificação possui outras funções como: prevenir a formação de aresta postiça, facilitar a retirada do cavaco da ZC, proteger a superfície usinada contra a corrosão, reduzir a dilatação térmica da peça, prevenir avaria e a ocorrência de tensões residuais na estrutura superficial da peça usinada. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)

Apesar dos benefícios da aplicação de FC ou FR a indústria metal mecânica passa por grande pressão, para que se reduza o seu uso; um dos fatores é o custo que representa de 15%

a 20% do custo total de produção e outro se refere aos resíduos gerados por esses processos e os riscos à saúde dos trabalhadores. A redução de tais fatores requer monitoramento, análise, e compreensão para desenvolvimento de uma tecnologia de usinagem ambientalmente limpa como a mínima quantidade de lubrificação (MQL), a usinagem criogênica e usinagem a seco. (EL-HOFY, 2013)

De modo a estudar a aplicação de método alternativo, este trabalho propõe construir um novo dispositivo com técnicas de refrigeração de baixo impacto ao meio ambiente e que seja acessível às micro e pequenas empresas, tendo desempenho semelhante aos meios já adotados sem causar perda na qualidade dos produtos.

A técnica do *Design Science Research* (DSR) foi a metodologia adotada para este trabalho pela necessidade de produzir um artefato viável, desenvolvendo soluções baseadas em tecnologia para resolução problemas relevantes as organizações, onde sua eficácia precisa ser rigorosamente demonstrada por meio de métodos de avaliação bem executados. (HEVNER *et al.*, 2004)

De tal modo, determinou-se como objetivo geral: desenvolver e validar um dispositivo de baixo custo e ambientalmente amigável na aplicação da refrigeração do processo de usinagem no torneamento, visando à utilização por empresas de micro e pequeno porte do ramo da metalmecânica.

Como objetivos específicos são:

- a) Verificar e avaliar estatisticamente a forma com que os parâmetros de v_c e v_f e método de refrigeração influenciam na variável rugosidade R_a .
- b) Verificar a morfologia do cavaco produzido pelos diferentes ensaios.
- c) Realizar uma análise superfície de folga após a usinagem, comparando os métodos de refrigeração dos ensaios.

Para verificar e avaliar estatisticamente o dispositivo foi utilizado o Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* - DOE), que é uma metodologia estatística utilizada como um método de resolução de problemas e melhoria da qualidade e desempenho de um processo. A principal característica do DOE está na identificação de variáveis que influenciam as características da qualidade em um processo, baseado na alteração das suas variáveis de entrada e verificando os possíveis efeitos na variável de saída. (FIRKA, 2011)

Os protocolos de experimentos e análises estatísticas foram feitos com o auxílio do Minitab®. Um *software* de computador para aplicações em estatística, muito utilizado por universidades e empresas.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

A constante necessidade de aumento de produtividade, modelo de produção mais sustentável, exige igual empenho na melhoria dos materiais, processos de fabricação, ferramentas, equipamentos e demais aspectos envolvidos. Tornando obrigatório o estudo dos elementos que compõem o processo de fabricação. Este levantamento e análise da base teórica são importantes para a compreensão dos resultados e fenômenos provenientes do trabalho realizado.

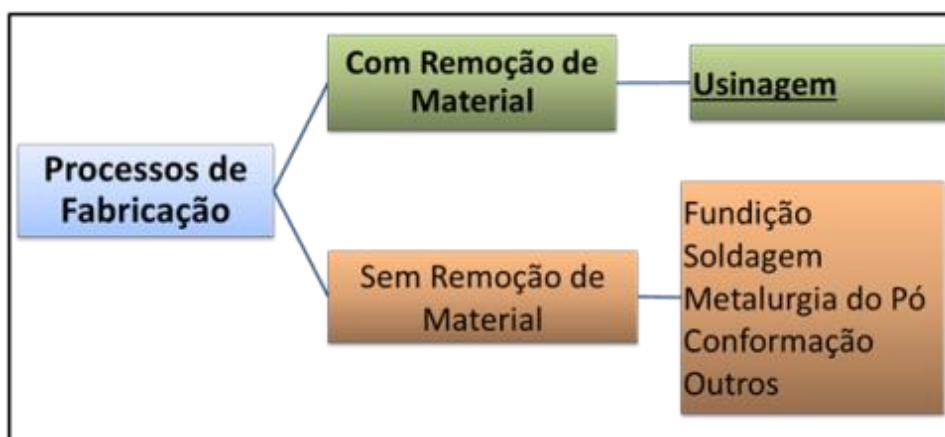
1.1 Processos de Fabricação

Um Processo de Fabricação é a atividade que transforma as matérias-primas em produtos acabados de maneira planejada e organizada, particularmente associado ao conceito de manufatura, ou seja, feito à mão. Entretanto após a primeira Revolução Industrial (século XVIII) a ideia de manufatura tem um novo sentido, associado a fabricação industrial, devido a grande utilização de máquinas e equipamentos na execução das atividades produtivas (LIANG; SHIH, 2016).

Na área de fabricação mecânica existem diversos processos de manufatura, que são classificados quanto à remoção de material ou não (Figura 1).

Dentre os diferentes processos o mais empregado e objeto deste estudo é a usinagem.

Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação



Fonte: autor adaptado de YOUSSEF e EL-HOFY (2008).

1.1.1 Usinagem

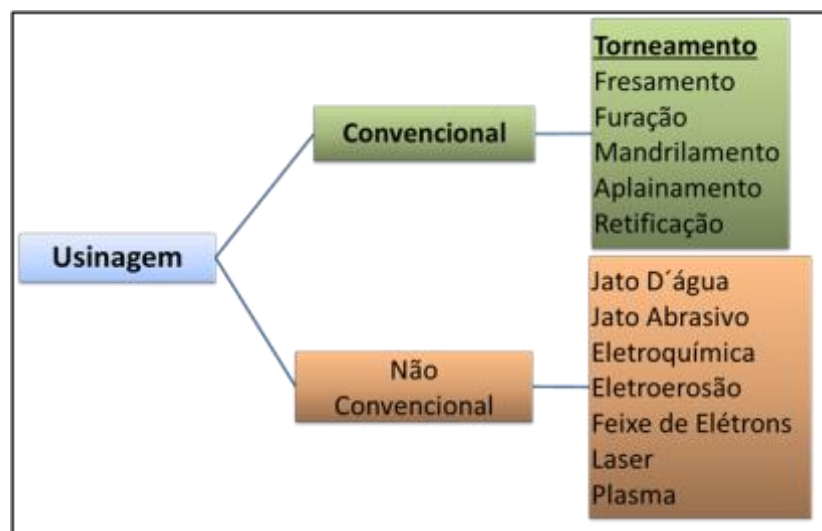
A usinagem é um processo de fabricação que se caracteriza, por conferir a um determinado material, forma, dimensões e acabamento desejados ou a combinação destes por meio da remoção de parte do material na forma de aparas ou cavacos, combinando a ação de máquinas e ferramentas.

Entre os anos 5000 e 4000 a.C. os processos de fabricação por meio da remoção de material já eram empregados em materiais como madeira, ossos e pedra, evoluindo ao longo dos séculos para metais como cobre, estanho, latão, bronze e por fim o ferro. Com a Revolução Industrial, a utilização de água e vapor como fonte energética, novos e mais resistentes materiais apareceram, estimulando o desenvolvimento de materiais de ferramentas de corte, máquinas-ferramentas e instrumentos (MACHADO *et al.*, 2015; KALPAKJIAN; SCHMID, 2019).

Na segunda Revolução Industrial ocorreu uma evolução ainda maior onde produtos fabricados com materiais ainda mais duráveis, logo, mais difíceis de serem usinados, bem como a necessidade de produção em larga escala, exigiram o desenvolvimento de materiais de ferramentas e máquinas mais avançadas, culminando nas ferramentas de aço rápido, e depois de carboneto de tungstênio, assim como o desenvolvimento de máquinas automáticas, chegando as máquinas CNC, comandadas numericamente via computadores dos dias atuais (MACHADO *et al.*, 2015; KALPAKJIAN; SCHMID, 2019).

A usinagem pode ser classificada basicamente em convencional e não convencional (Figura 2).

Figura 2 - Classificação da Usinagem.



Fonte: autor adaptado YOUSSEF e EL-HOFY (2008).

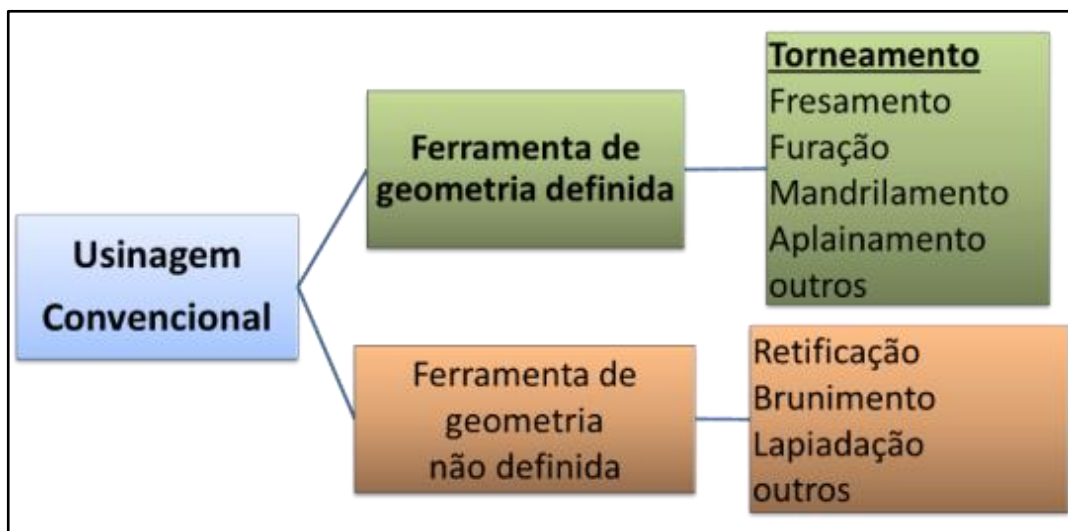
Enquanto a usinagem convencional utiliza-se essencialmente de energia mecânica para a remoção de material a não convencional pode utilizar-se de energia térmica, química,

eletroquímica ou mecânica pela ação abrasiva de um elemento (jato d'água) contra o material, ou até mesmo uma associação delas (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

A usinagem não convencional surgiu na década de 1940, esses processos removem o material não pela produção de cavacos, mas por meios como dissolução química, corrosão, fusão, evaporação e ação hidrodinâmica (jato d'água) as vezes com o auxílio de finas partículas abrasivas. Os processos não convencionais ganharam importância por serem capazes de produzir peças com elevada qualidade de acabamento, tolerâncias apertadas, e de geometria complexa em materiais de difícil usinagem (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008; MACHADO *et al.*, 2015; KALPAKJIAN; SCHMID, 2019).

A usinagem convencional é classificada pelo método de remoção de material, corte com ferramenta de geometria definida e abrasão com ferramenta de geometria não definida (Figura 3) (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008; GROOVER, 2013).

Figura 3 - Classificação dos processos de usinagem convencional.



Fonte: autor adaptado de YOUSSEF e EL-HOFY (2008).

A usinagem convencional executa a remoção do material por meio da ação de penetração de uma ferramenta mais dura do que o material da peça, em um movimento relativo entre peça e ferramenta. As principais operações de usinagem convencional são agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada para a sua execução (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

A usinagem por meio de corte do material pode ser realizada em duas etapas: desbaste e acabamento. O desbaste tem como principal função remover a maior quantidade de material, no menor tempo, garantindo material suficiente (sobremetal) para o acabamento, respeitando

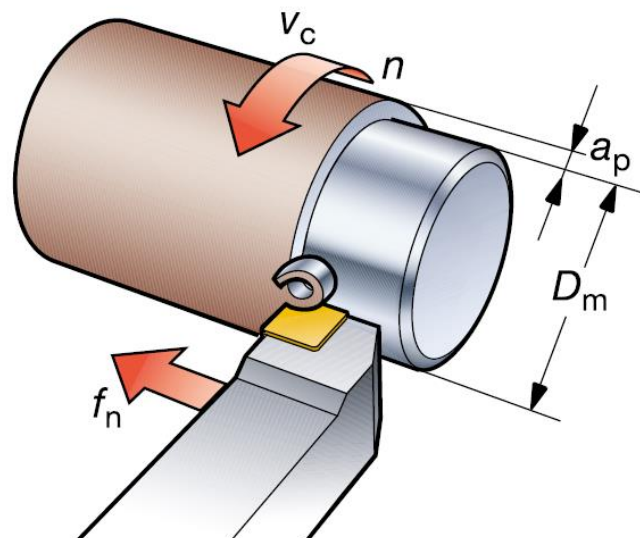
os limites do equipamento e da ferramenta. Já o acabamento é a remoção do sobremetal deixado pela operação de desbaste, onde a qualidade final (dimensão, tolerância e acabamento de superfície) da peça é essencial (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008; GROOVER, 2013).

Apesar de ser o processo fabricação mais utilizado, a usinagem possui desvantagens, como o impacto sobre o meio ambiente e riscos ao trabalhador, provenientes de ruído, calor e resíduos. Deste modo, precauções de segurança devem ser tomadas de maneira a eliminar ou ao menos reduzir os efeitos negativos dos processos de usinagem (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

1.1.2 Torneamento

O torneamento caracteriza-se pela combinação de dois movimentos relativos: rotação da peça (material) e o movimento de avanço de uma ferramenta monocortante ao longo da peça (Figura 4), provocando a remoção externa ou interna de material, utilizado principalmente para a obtenção de peças cilíndricas ou que possuam um perfil de revolução sobre o próprio eixo. .

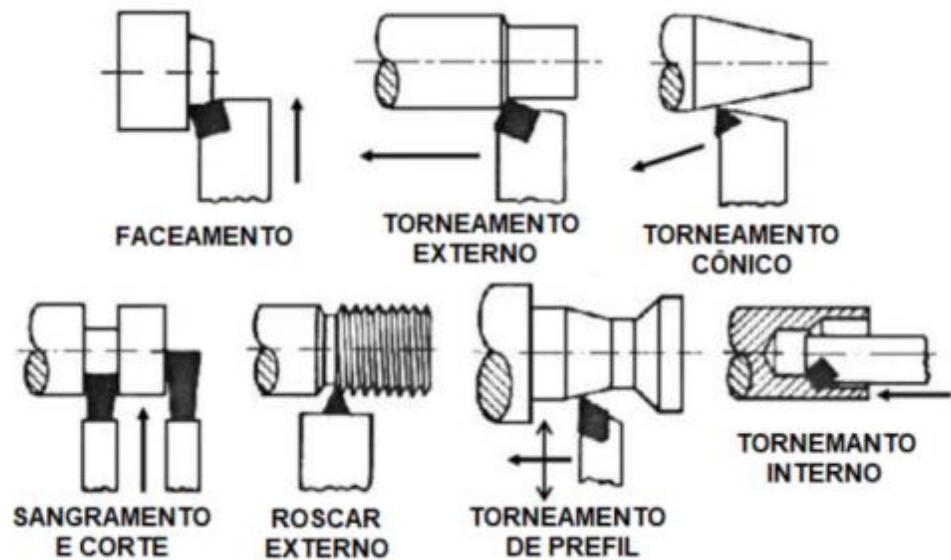
Figura 4 - representação dos movimentos no torneamento.



Fonte: adaptado de SANDVIK COROMANT ACADEMY (2011)

O torneamento permite a realização de diferentes operações de acordo com as características das peças, ferramentas e máquinas (Figura 5).

Figura 5 - Operações mais comuns de torneamento.



Fonte: Adaptado de YOUSSEF e EL-HOFY (2008).

Dentre todas as operações de torneamento a mais utilizada é o torneamento externo objeto de estudo desta pesquisa.

1.1.2.1 Formação do Cavaco

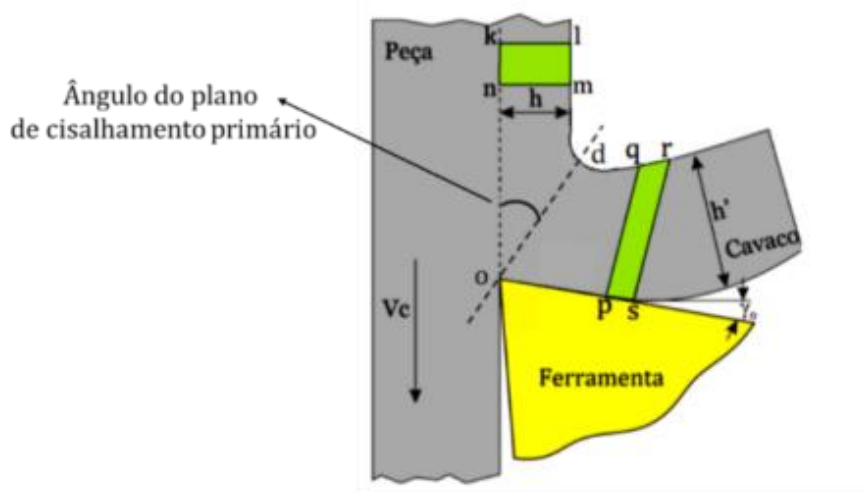
O cavaco é o principal subproduto presente nos processos de usinagem entre eles o torneamento. Em cada operação de usinagem ou mesmo em uma única operação, o cavaco pode variar na sua forma, tipo, extensão *etc.* (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do FC, entre outros. Estão também envolvidos com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador e a utilização adequada da máquina-ferramenta.

Mecanismo de formação do cavaco

A formação do cavaco em condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro ou aço rápido é um fenômeno periódico (ocorre ciclicamente) mesmo quando da formação do cavaco contínuo (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015). O processo de formação do cavaco se divide em quatro partes Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de forças no corte ortogonal.



Fonte: adaptado de MACHADO *et al.* (2015)

1ª etapa: A ação da ferramenta recalca o volume “klmn” e o metal começa a sofrer deformações elásticas (recalque).

2ª etapa: Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura.

3ª etapa: A ruptura se inicia com a trinca no ponto “O” podendo prosseguir até o ponto “D”. A região destes campos de tensões e deformações plásticas, chamada de zona de cisalhamento primária, é de forma simplificada representada na Figura por um plano definido pela linha “OD”. A extensão da trinca iniciada no ponto “O” é que vai determinar a classe do cavaco.




















4ª etapa: Após o volume “klmn” passar pela zona de cisalhamento primário, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato “pqrs”, e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se a região da zona de cisalhamento secundária.

Tipos de cavaco

O cavaco assume várias formas e tamanhos nas operações de usinagem. Em função das velocidades de corte, dos materiais e das ferramentas utilizadas. Uma grande deformação ocorre na região de corte em um pequeno intervalo de tempo, e alguns dos materiais e ligas não podem suportar esta tensão sem fratura. No entanto, sob a maioria das condições de corte, metais dúcteis e ligas não fraturam no plano de cisalhamento, e um cavaco

contínuo é produzido. Cavacos contínuos podem adotar muitas formas, como fita, helicoidal, espiral *etc.* Figura 7 (TRENT; WRIGHT, 2000).

Figura 7 - Forma dos cavacos.

1	2	3	4	5	6	7	8
Cavaco em fita	Cavaco tubular	Cavaco helicoidal tipo arruela	Cavaco helicoidal	Cavaco espiral	Cavaco em arco	Cavaco fragmentado	Cavaco tipo agulha
							
Curto	Curto	Curto	Curto	Plano	Solto		
							
Longo	Longo	Longo	Longo	Cônico	Conectado		
							
Emaranhado	Emaranhado	Emaranhado	Emaranhado	Curto			

Fonte: adaptado de Trent e Wright (2000).

Birmingham *et al.* (2012) usaram a forma do cavaco e a vida útil da ferramenta como parâmetro para analisar a influência de diferentes meios de refrigeração no torneamento de Ti-6Al-4V, variando o método de refrigeração, parâmetros de corte e posição do bico de refrigeração, constataram que aplicação de emulsão à base de água em alta pressão melhora a vida útil, no entanto, o parâmetro mais influente foi a posição do bocal de refrigeração.

Maruda *et al.* (2016) analisaram a influência do desgaste da ferramenta de corte na forma do cavaco e nos índices da zona de formação do cavaco: o coeficiente de espessamento do cavaco e o coeficiente de atrito na face de saída sob diferentes métodos de resfriamento no torneamento do aço AISI 1045 com ferramenta de MD. Os testes foram realizados com diferentes velocidades de corte e variantes de resfriamento: usinagem a seco, método MQCL

e MQCL com aditivos. Verificou-se que durante o resfriamento MQCL com aditivos, houve redução desgaste da ferramenta em 20% para vc mais baixa e 51% para vc mais altas em comparação com a usinagem a seco. A aplicação do aditivo resultou na redução do coeficiente de atrito na face de saída proveniente da formação de uma fina camada lubrificante sobre a cunha cortante.

1.1.2.2 Forças e Potência no Torneamento

O conhecimento das forças de corte e da potência envolvida nas operações de usinagem é importante, pois possibilitam projetos de máquinas-ferramentas mais adequadas, com componentes mais rígidos que satisfaçam a precisão dimensional e permitam a escolha de dispositivos de fixação, porta-ferramentas e ferramentas mais apropriados a cada processo. (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016; KALPAKJIAN; SCHMID, 2019).

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) descrevem os principais fatores que afetam, em maior ou menor grau, as forças de usinagem:

- a) Material da peça: a composição química altera a dureza do material que influencia na energia necessária para a deformação plástica durante a formação do cavaco, então, quanto mais duro for o material maior será a grandeza das forças de usinagem, com algumas exceções nos materiais com elementos de liga.
- b) Material e geometria da ferramenta: o material da ferramenta pode interagir com o material da peça alterando o coeficiente de atrito e variando assim as forças de corte, quanto à geometria quão maior o ângulo de saída menor será o ângulo da cunha diminuindo as forças de usinagem devido à menor deformação plástica durante a formação do cavaco.
- c) Velocidade de corte: influencia no fluxo de formação do cavaco e nos efeitos térmicos gerados, o aumento da velocidade ocasiona uma diminuição do limite de escoamento do material além da diminuição da espessura do cavaco, dessa forma reduzindo os esforços de corte e consequentemente os esforços sobre a ferramenta.
- d) Condições de lubrificação e refrigeração: quanto mais eficiente for a penetração do fluido na ZC, maior será seu efeito lubrificante e maior será a influência na redução das forças de usinagem.
- e) Desgaste da ferramenta: são caracterizados por alterações na geometria e composição do material da ferramenta, que alteram nos efeitos térmicos e de atrito.

A força de usinagem é tratada como uma ação da peça sobre a ferramenta (Figura 8), e pode ser decomposta segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), como:

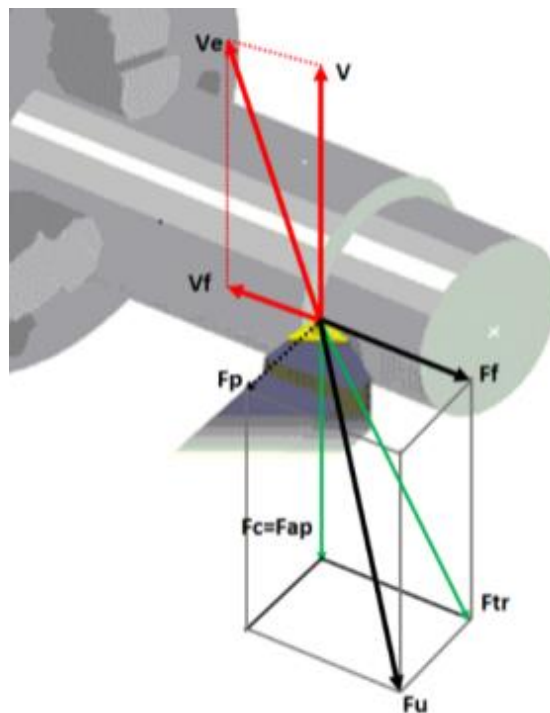
As três componentes básicas da força de usinagem são:

- a) F_c = força de corte, ou força principal de corte, é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela v_c .
- b) F_f = força de avanço, é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela v_f .
- c) F_p = força passiva, ou força de profundidade, é projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Além dessas componentes básicas pode-se também identificar outras três componentes importantes:

- a) F_{TR} = força ativa, é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho;
- b) F_n = força de compressão, é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.
- c) F_{ap} = força de apoio, é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

Figura 8 - Componentes da força de usinagem no torneamento.



Fonte: Autor adaptado de Diniz Marcondes e Coppini (2013).

Como a força de usinagem é normalmente decomposta nas suas três principais componentes, vale sempre a relação (Equação 1):

$$Fu^2 = Fc^2 + Fp^2 + Ff^2 \quad \text{Equação 1}$$

A potência de usinagem resulta da soma das potências necessárias para cada componente da força de usinagem. Como a potência resulta do produto da velocidade pela força e pelo cosseno do ângulo entre ambas, somente as componentes de corte e de avanço contribuem para a potência de usinagem. A potência de corte (P_c) é dada por (Equação 2):

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60000} [\text{kW}] \quad \text{Equação 2}$$

As unidades da Equação 2 são as que normalmente se empregam em usinagem, ou seja, força de corte em [N] e v_c em [m/min]. Desta forma usa-se a constante 60.000 para que a unidade final seja em [kW]. Da mesma forma, a potência de avanço é dada por (Equação 3):

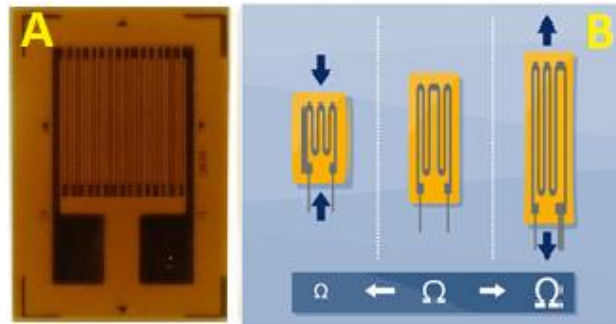
$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60000} [\text{kW}] \quad \text{Equação 3}$$

Igualmente a unidade usual em usinagem para a v_f é [mm/min] e a constante 60×10^6 é usada para obter-se a potência em [kW].

Para a medição experimental das componentes das forças de usinagem, existem basicamente dois métodos principais: com transdutores resistivos conhecidos por *strain gauge* ou com transdutores piezoelétricos. Os transdutores são dispositivos utilizados para a conversão de energia de uma natureza para outra (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

Os transdutores resistivos são formados por condutores elétricos firmemente presos em um filme polimérico, formando uma grade Figura 9a. Quando se contraem tem sua resistência reduzida e aumentada quando são estendidos, como mostrado na Figura 9b. São geralmente montados em um circuito com quatro *strain gauge* conhecido como ponte de *Wheatstone* podendo ser aplicados própria ferramenta. A força medida é proporcional à tensão mecânica sobre a ferramenta, e esta, por sua vez, é proporcional à sua deformação. O sinal de saída da ponte de *Wheatstone* é linearmente proporcional à mudança relativa na resistência dos *strain gauges*. (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008)

Figura 9 - Variação da resistência dos *strain gauge* em função de sua extensão.



Fonte: adaptado de a) Ferreira (2021) b) Kleckers (2020).

No caso dos transdutores piezoelétrico, o princípio é simples, esse tipo de material (cristal de quartzo) quando submetido a estresse mecânico produz uma carga elétrica, que é proporcional ao estresse mecânico aplicado. Para que seja possível a medição um amplificador de carga converte essa carga em um sinal de 0 a 10 V, onde a tensão de saída é proporcional à tensão mecânica (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016).

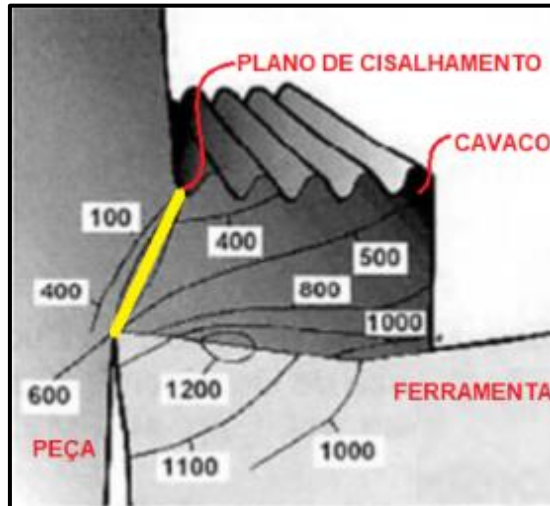
Freitas *et al.* (2017) investigaram a influência dos sistemas de refrigeração e dos parâmetros de corte sobre as respostas, rugosidade e forças de usinagem no torneamento do aço inox 304L com ferramentas de MD revestidas e os parâmetros definidos conforme o fabricante. Utilizando os sistemas de refrigeração por Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) e ar gelado, sendo comparados com a usinagem a seco. Os resultados mostraram os esforços de corte não foram influenciados pelos sistemas de resfriamento. Sendo o raio de ponta da ferramenta o fator de maior impacto, produzindo superfícies com rugosidade mais baixas quanto maiores raios de ponta. Observaram também que a refrigeração com o sistema de ar gelado foi mais eficiente na melhoria do acabamento superficial que o sistema de MQL.

1.1.3 Temperatura de Corte

Durante o corte do metal, para deformar uma porção de material e superar o atrito entre a ferramenta e a peça, a energia utilizada é praticamente toda convertida em calor, gerando altas temperaturas na região da interface de corte (Figura 10). A elevação da temperatura na zona primária e secundária facilita a usinagem, diminuindo a resistência mecânica do material favorecendo a deformação plástica. Porém essas temperaturas afetam o desempenho da usinagem, influenciando nas propriedades mecânicas do material usinado e na vida útil da ferramenta, afetando o custo e impactando economicamente a operação. (DINIZ;

MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO *et al.*, 2015; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Figura 10 - Distribuição da temperatura na ponta da ferramenta de MD.



Fonte: adaptado de Diniz; Marcondes e Coppini (2013).

A temperatura aumenta conforme aumenta a taxa da remoção de material, seja pelo aumento da v_c ou pelo aumento da profundidade de corte (a_p) ou do aumento do avanço (v_f). Sendo a Velocidade de corte a mais influente, com o aumento desta, a força de corte diminui e a taxa da qual a energia se dissipa aumenta (MACHADO *et al.*, 2015).

Reis *et al.* (2016) investigaram os fenômenos intrínsecos que as variações dos parâmetros de corte (v_f 0,15 e 0,30 mm/ver e a_p 0,5, 1,0, 1,5 mm) e método de lubrificação (Seco, Jorro, MQL), causam sobre a rugosidade superficial e a temperatura de corte no torneamento do aço ABNT 4340. Foram realizados 36 ensaios, onde os resultados mostraram que a rugosidade (R_q) é mais influenciada pelo avanço sendo o uso de FC pouco efetivo na redução da rugosidade. Em relação a temperatura, verificaram que as variáveis de entrada (avanço, profundidade de usinagem e ambiente) e a interação entre profundidade de usinagem e meio lubrificante e a interação entre avanço e meio lubrificante são significativas sobre a variável resposta.

1.1.4 Ferramentas de Corte

Machado *et al.* (2015) afirmam que as ferramentas de corte podem ser fabricadas em diversos materiais para a usinagem em geral e definiram que entre as principais propriedades que as ferramentas de corte devem possuir são:

- a) Elevada dureza;
- b) Tenacidade para suportar impactos e não falhar por fratura;
- c) Resistência ao desgaste abrasivo;
- d) Alta resistência mecânica para suportar os esforços de usinagem;
- e) Capacidade de ser inerte quimicamente;

Porém nenhuma delas possui todas as propriedades que são desejáveis para usar determinado material, sendo preciso escolher a melhor opção para cada aplicação.

O desenvolvimento de novos materiais para ferramentas se acelera no início e do século XX com a prensagem e sinterização da mistura de pó de carboneto de tungstênio (WC) com pó de metais ligantes geralmente cobalto (Co), níquel (Ni) ou ferro (Fe), tal material ficaria conhecido como metal duro (MD).

O processo se inicia com a seleção dos materiais a serem misturados. Posteriormente a prensagem, processo no qual a mistura dos pós é compactada em moldes (formas das ferramentas) em tamanho maior que o produto. Posteriormente, passam pelo processo de sinterização onde as ferramentas são aquecidas a temperaturas entre 1300 °C e 1500 °C, fundindo o metal ligante, preenchendo então os vazios entre os grãos dos carbonetos, reduzindo seu volume e resultando em uma ferramenta de elevada dureza (SANDVIK COROMANT ACADEMY, 2011).

O MD foi considerado uma grande descoberta, visto que ela trazia uma excelente união das propriedades de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. Pesquisas posteriores permitiram a adição de novos materiais como Carboneto de titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC), de modo a reduzir a craterização na ZC. Com o avanço da tecnologia pós-metade do século XX foi possível revestir estas ferramentas com TiC, óxido de alumínio (Al₂O₃) e de nitreto de titânio (TiN) com uma excelente adesão ao metal da ferramenta. Isso possibilitou uma grande melhoria no desempenho com maiores taxas de remoção e melhores condições de corte (maiores *vc*, *vf* e *ap*) proporcionado pelos ganhos em resistência ao desgaste, tornando o MD o material mais indicado para utilização na usinagem da maioria dos materiais conhecidos (MACHADO *et al.*, 2015).

O mercado de ferramentas de metal duro foi avaliado em US\$ 10,6 bilhões em 2020 e deve chegar a US\$ 15,3 bilhões até 2028; apesar da pandemia do COVID-19 ter abalado

vários setores como: manufatura, automotiva, semicondutores e eletrônicos, petróleo e gás, mineração, aviação e outras especialmente as pequenas e médias empresas. No entanto, com a crescente necessidade de produtos de saúde, a demanda por ferramentas de metal duro aumentou nas indústrias médicas, e com a retomada da produção a perspectiva de que cresça a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,8% de 2021 a 2028. (REPORTLINKER, 2021)

Viana, Lima e Resende (2021) investigaram o acabamento superficial e a vida útil de ferramentas de MD da classe ISO P, texturizadas a laser e por jateamento, sem revestimento e com revestimento TiAlN, no torneamento do aço SAE 4340, sob as condições de corte a seco e com aplicação de FC por jorro e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante). Os resultados mostraram um melhor desempenho nos ensaios de vida dos insertos texturizados por jateamento, e um melhor acabamento da peça torneada com a utilização do revestimento, em relação a ferramenta sem revestimento. A aplicação de FC por MQL mostrou se eficiente nos ensaios de vida, aumentando a vida das ferramentas, excepcionalmente, na ferramenta TiAlN-jateada. Entretanto a aplicação de MQL não se mostrou eficiente nos ensaios de acabamento superficial (rugosidade média aritmética, Ra).

1.1.5 Lubrirrefrigeração

Durante o corte devido aos esforços de usinagem são geradas grandes quantidades de calor, de modo a reduzir a formação do calor são utilizados fluidos refrigerantes com diferentes composições e propriedades. A escolha e aplicação correta do FC trazem benefícios. Ele deve ser aplicado de maneira que permita sua chegada o mais próximo possível da ZC dentro da interface ferramenta/cavaco, a fim de assegurar que suas funções sejam desempenhadas apropriadamente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO *et al.*, 2015; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Porém, são vários os problemas causados pela má utilização e descarte inadequado que vão dos efeitos nocivos ao trabalhador até a agressão do meio ambiente tornando a indústria metal mecânica um possível agressor do meio ambiente. (ALVES; OLIVEIRA, 2007)

Função e funcionamento da lubrirrefrigeração

As principais funções da lubrirrefrigeração segundo Diniz; Marcondes e Coppini (2013) são:

- a) Prevenir a ocorrência de aresta postiça lubrificando a aresta de corte;
- b) Promover a retirada do cavaco da região de corte por meio do fluxo contínuo de fluido refrigerante em alta pressão;
- c) Proteger a superfície usinada contra a corrosão;
- d) Reduzir a dilatação (distorção) térmica da peça, com o fim de facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas;
- e) Evitar danos à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície do peço usinada (no caso de processos de retificação).

De modo a cumprir estas funções com maior eficiência, o FC deve possuir algumas características como:

- a) Viscosidade ideal para fluir e aderir à superfície da ferramenta
- b) Alta condutividade térmica e alto calor específico (resistência a evaporação em altas temperaturas e pressões);
- c) Capacidade de se espalhar bem no material para estabelecer um bom contato térmico.
- d) Boas propriedades antissoldantes e antifricção;

Tipos de fluidos de corte

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), os fluidos de corte são comumente classificados como:

- a) Óleos puros ou de corte são óleos minerais, animais, vegetais ou sintéticos usados sem diluição com água.
- b) Fluidos à base de água são emulsões diluídas ou soluções de óleos em água, que proporcionam menos lubrificação, mas melhor capacidade de resfriamento e limpeza de cavacos do que óleos puros. Existem três tipos básicos: óleos solúveis, semissintéticos e sintéticos.
- c) Fluidos gasosos são usados como fluidos de corte, em aplicações em que resíduos de fluido não são tolerados (aplicações médicas e aeroespaciais), os mais usados são ar, hélio, CO₂, argônio e nitrogênio sendo o ar o mais comum devido ao seu baixo custo.
- d) Óleos névoas consistem em pequenas gotas de óleo à base de água misturadas com ar, são aplicados em dois métodos: aspiração e métodos de pressão direta são mais

adequados para aplicações nas quais a refrigeração por jorro é impraticável, suas principais desvantagens são a tendência de entupimento dos bicos e a exposição do operador à inalação de névoa, que tem consequências adversas para a saúde.

- e) Fluidos criogênicos (com pontos de ebulição abaixo de -150°C) são usados para usinar e retificar materiais endurecidos, sendo o nitrogênio líquido (LN2) o refrigerante criogênico mais comum, embora argônio líquido e CO2 líquido também sejam usados.

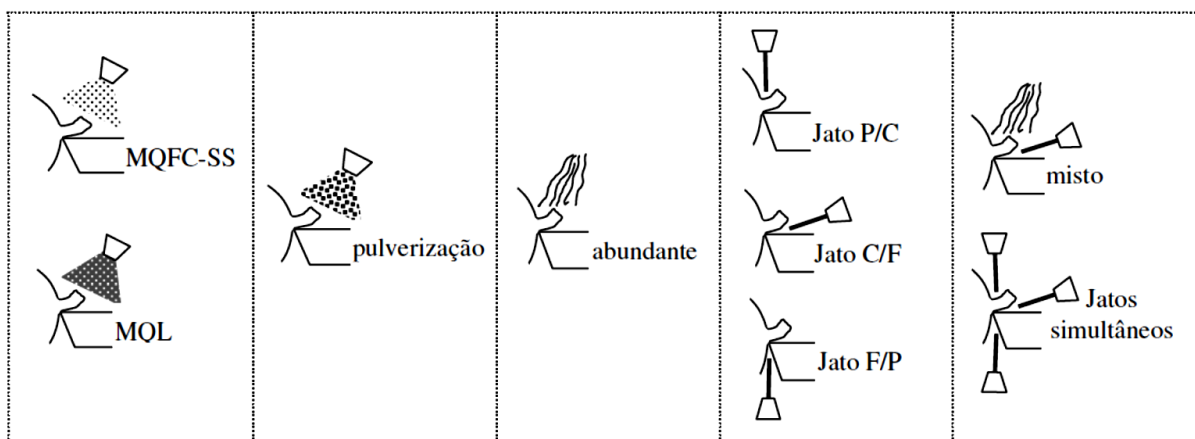
1.1.6 Métodos de Aplicação da Lubrirrefrigeração

A eficácia dos fluidos de corte depende em grande parte do método de sua entrada na ZC. Existem quatro métodos básicos de aplicação de refrigerante:

- Abundante: Com menor pressão e maior área de contato;
- Jato: Possuindo uma maior pressão e menor área de contato;
- MQL (mínima quantidade de FC): Névoa formada pela mistura de FC e ar comprimida, também chamada de usinagem quase seca.
- Pulverização: Múltiplas gotas aplicadas sob pressão.

As direções mais comuns de aplicação do FC são na interface C/F (cavaco-ferramenta), nas costas do cavaco entre P/C (peça e cavaco), e no contato entre F/P (ferramenta e peça) no flanco da ferramenta. Ainda é possível fazer aplicações simultâneas. Estas formas de aplicações, assim como os tipos de jorros podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 - Representação esquemática dos métodos de aplicação.



Fonte: Adaptado de Sanchez, Nalon e Palma (2011)

Sanchez, Nalon e Palma (2011) concluem em seu trabalho que o desempenho do torneamento pode ser substancialmente modificado pelo método de aplicação do FC. As

maiores vidas e as menores rugosidades foram obtidas para as aplicações com jato de fluido sob alta pressão. Os métodos de jato de alta pressão mistos e combinados alcançaram as maiores vidas de ferramenta, porém com o dobro e o triplo da vazão empregada nos jatos individuais. O jato C/F apresentou bons resultados, aliado à sua vazão de fluido similar a empregada no método convencional. O jato F/P, se mostrou mais eficiente do que o jato P/C, que teve o pior desempenho entre os jatos aplicados individualmente. O método abundante produziu os melhores resultados dentre as aplicações sob baixa pressão. O método MQL se distinguiu dentre os de vazão reduzida pelos baixos níveis de rugosidade ao longo da maior parte da vida da ferramenta. No que se refere as forças de corte, temperatura da ferramenta e rugosidade os resultados retrataram, em grande parte, o comportamento da vida da ferramenta obtida pelos diferentes métodos de aplicação de fluido.

Machado *et al.* (2009) afirma que não há uma melhor direção de aplicação geral, porém recomenda o uso conforme suas diferenças. A direção P/C é inadequada quando o processo produz cavacos emaranhados que dificultariam a penetração do fluido até a ZC. A direção C/F é recomendada quando puder ser aplicado sob pressão, e em F/P quando se deseja reduzir ainda mais o desgaste da ferramenta e melhorar o acabamento superficial.

Problemas Causados à Saúde e ao Meio Ambiente

Apesar das diversas vantagens proporcionadas pela lubrificação, o seu uso apresenta algumas desvantagens relacionadas a questão da sustentabilidade seja social, ambiental ou econômica. Os fluidos de corte nas suas diversas variações possuem em sua composição inúmeros elementos químicos nocivos à saúde e ao meio ambiente. O descarte dos fluidos é uma atividade onerosa, pois necessita de reciclagem exigida pelas rigorosas regulamentações ambientais que controlam esta e outras atividades. A exposição aos fluidos de corte em forma líquida ou em névoa podem trazer diversos efeitos adversos à saúde. Os meios mais comuns de exposição são pelo contato dérmico (pele) e a inalação. Também pode acontecer de forma menos comum, através de um corte aberto ou pela ingestão oral. (ALVES; OLIVEIRA, 2007; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Refrigeração por tubo de vórtice

Como grande parte dos fluidos pode acabar sendo prejudiciais ao meio ambiente e a saúde do operador quando utilizado de forma inadequada. A usinagem a seco torna-se uma

opção vantajosa e uma das muitas técnicas de usinagem a seco é o uso de ar comprimido resfriado.

O ar comprimido frio, como FC, possui as características de dissipar o calor na área da interface ferramenta/peça/cavacos, resfriar a ferramenta e a peça, assim com expulsar o cavaco solto da ZC. O processo de resfriamento com o uso de ar comprimido frio é realizado por um tubo vórtice, também conhecido como tubo vórtice Ranque-Hilsch (RHVT). Os tubos de vórtice são equipamentos mecânicos sem partes móveis, de design simples, em pequenos tamanhos e pouco peso, que basicamente possuem a função de produzir um resfriamento, separando o fluxo de ar em quente e frio (Figura 12). Utiliza pressões relativamente baixas, tipicamente entre 6 e 9 BAR. Eles trabalham gerando um vórtice externo e um vórtice interno, onde o externo irá remover o calor transmitido pelo interno, deste modo, em uma extremidade irá sair o ar quente e na outra extremidade irá sair o ar frio. (PATWARI *et al.*, 2015; DRAGIČEVIĆ, 2018)

Figura 12 - Separação do fluxo de ar comprimido em fluxo quente e frio.



Fonte: autor adaptado de Patwari *et al.* (2015)

Ekinović *et al.* (2014a, 2014b) investigaram a temperatura, a forma do cavaco e a força de corte no torneamento de diferentes materiais (aço ligado C5432, bronze alumínio Cu85.5Al10Fe2.5Mn2 e alumínio puro) com a variação dos dados de corte e sob a influência da usinagem a seco e com refrigeração por ar comprimido resfriado, por meio do tubo de vórtice. Com base na análise dos cavacos produzidos concluiu-se que a usinagem a seco apresenta ligeira vantagem, principalmente no processo de segmentação de cavacos, mesmo em casos de usinagem de material muito dúctil, que a usinagem a seco altera a forma do cavaco, que o ar comprimido resfriado produz cavacos com trincas do lado externo em ambos os casos seja qual for o material.

Refrigeração MQCL

O conceito de manufatura sustentável surgiu na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) em 1992 e representa um dos principais componentes do desenvolvimento sustentável. A fabricação verde é a base da estratégia de desenvolvimento sustentável na indústria de usinagem e alcançar o desenvolvimento sustentável exige mudanças nos processos de usinagem, na relação dos tipos e quantidades de recursos utilizados, no tratamento de resíduos, no controle das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e nos produtos produzidos. (DRAGIČEVIĆ, 2018)

A usinagem a seco é classificada como a técnica ecologicamente mais correta aplicada com sucesso em muitos dos processos de usinagem. As vantagens da usinagem a seco incluem ausência de poluição ambiental, redução dos custos de descarte e limpeza, sem perigo para a saúde dos trabalhadores. Entretanto a eliminação dos fluidos de corte acarreta a perda de seus benefícios, como resfriamento, lubrificação e lavagem de cavacos. A usinagem a seco exige materiais avançados para ferramentas de corte e revestimentos de ferramentas, mas são muito caros e aumentam os custos totais de usinagem. Como uma solução alternativa em termos de manufatura sustentável e melhoria da qualidade dos produtos acabados pode-se utilizar a técnica MQL. (DRAGIČEVIĆ, 2018)

De acordo com Klocke (2011), Stephenson e Agapiou (2016), o MQL é um método de usinagem quase seco no qual a refrigeração é fornecida na forma de uma névoa fina de aerossol à base de água. Na MQL, o óleo é consumido no processo, em vez de coletado, filtrado e reutilizado.

Uma evolução da tecnologia MQL é a técnica MQCL (*Minimum Quantity Cooling Lubrication*) mínima quantidade de líquido resfriado onde com emulsões, água (com aditivos), ar frio ou gases fluidos. Nesta tecnologia o FC ou o ar são resfriados potencializando a capacidade de resfriamento do FC, isto é conseguido com ou sem um ar comprimido.

No caso de sistemas *airless*, a ferramenta é abastecida por meio de uma bomba que produz de gotículas individuais, rápidas e sucessivas, finamente dosadas, geralmente de óleo. No segundo caso, o meio é atomizado em gotas ultrafinas com a ajuda de ar comprimido resfriado e fornecido como aerossol ao local de usinagem. Apesar de relativamente pouco usado e, portanto, pouco conhecido pelos usuários, pode, no entanto, contribuir para a solução

de problemas térmicos na ferramenta ou componente em operações de usinagem a seco. (KLOCKE, 2011)

Maruda *et al.* (2015) estudou influência das condições de formação de emulsão e névoa de óleo na forma do cavaco e rugosidade superficial do aço inoxidável X10CrNi18-8 durante o torneamento. Comparando a usinagem a seco, com resfriamento pelo método MQCL (*Minimal Quantity Cooling Lubrication*) e com resfriamento pelo método MQL (*Minimum Quantity Lubrication*). Verificou-se que, nas condições MQCL e MQL, a formação de cavacos com formato de espirais curtas é maior em relação ao torneamento a seco. Com o aumento do fluxo de emulsão e óleo, o cavaco emaranhado é formado. O resfriamento pelo método MQCL e MQL resultou na redução dos valores dos parâmetros de rugosidade selecionados em 2% a 42% em comparação com a usinagem a seco.

Feldshtein e Nieslony (2019) estudaram a influência do método de refrigeração sob à força de corte, frequência e amplitude de trepidação. Foram utilizadas diferentes condições de resfriamento do torneamento da liga de alumínio AlCu4MgSi: corte a seco, Jorro, MQL e MQCL. Foi determinado que as condições de refrigeração e lubrificação na ZC têm um efeito mínimo nas forças de usinagem para a faixa de parâmetros: v_c de 300 a 600 m/min, a_p de 1 a 2 mm, v_f de 0,1 a 0,5 mm/ rev. Concluíram que a usinagem a seco foi a melhor opção para redução de custos e que as mudanças de força de corte ao longo da usinagem, podem provocar a ocorrência de trepidação.

1.1.7 Parâmetros de Rugosidade Superficial

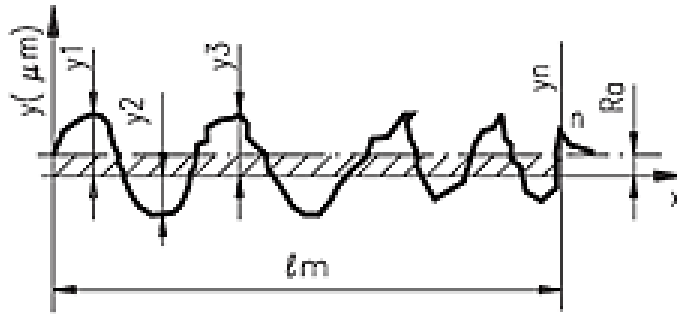
Qualquer superfície, por mais lisa que pareça, apresentará irregularidades superficiais ao ser observado em maior ampliação e esse é um fator importante na avaliação da qualidade de peças usinadas conhecido com rugosidade superficial.

Para Machado *et al.* (2015), a rugosidade ou textura de uma superfície é composta de erros micro geométricos (saliências e reentrâncias) presentes nas peças, que são resultantes dos processos de fabricação utilizados e dependem da interação entre o conjunto máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, da lubrificação e parâmetros de corte, dentre outros, sendo muito utilizada como parâmetro de saída para controle dos processos de usinagem.

A quantificação da rugosidade pode ser feita em diferentes parâmetros, sendo o mais comum à rugosidade média por meio dos parâmetros R_a , sendo a média aritmética dos valores

absolutos dos afastamentos (Y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação a linha média ao longo do comprimento medido (L_m) Figura 13. (SANTOS e SALES, 2007; MACHADO *et al.*, 2015)

Figura 13 - Representação do parâmetro de rugosidade R_a



Fonte: adaptado de Camargo (2002)

O parâmetro R_a , por exemplo, expressa a altura média aritmética do perfil, definida como a distância média absoluta da altura do perfil à sua linha média num determinado comprimento de avaliação. Seu cálculo é feito conforme as expressões na Equação 4. Devido a simplicidade de medição e análise, esse parâmetro tem sido o mais utilizado nas análises superficiais historicamente. (SANTOS e SALES, 2007)

$$Ra = \frac{|y1| + |y2| + \dots + |yn|}{n} \quad \text{Equação 4}$$

No processo de torneamento a remoção contínua do cavaco associada a rotação da peça gera um perfil periódico ondulado fazendo com que o espaçamento dos vales acompanhe a v_f e o perfil do raio de ponta da ferramenta. Neste caso, o valor teórico de R_a pode ser calculado conforme a Equação 5, onde f é a v_f e r_e é o raio de pontada ferramenta. (MACHADO *et al.*, 2015)

$$Ra = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_e} \quad \text{Equação 5}$$

A verificação da rugosidade segue procedimentos determinados pelas normas NBR ISO 4287 e NBR ISO 4288 que orientam a medição e cálculo dos parâmetros de rugosidade para perfis periódicos e não periódicos, também recomendam valores para o comprimento de apalpamento e comprimento de amostragem. (ABNT, 2002)

Gupta e Laubscher (2018) investigaram a rugosidade no torneamento de titânio Grau 4 com pastilhas de metal duro, sob influência da refrigeração MQL. Os parâmetros de vazão (50-70-90 ml/h); distância do bocal (20-30-40 mm) e pressão do ar (4-5-6 bar) foram variados. A velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram fixados em 125 m/min; 0,2 mm/rev e 1 mm respectivamente. Os dados indicaram ainda que os parâmetros ótimos eram uma taxa de fluxo de 70 ml/h, distância do bocal de 30 mm e pressão de ar de 6 bar. A distância do bocal foi reconhecida como o mais significativo parâmetro. Quando comparado ao corte seco e úmido condições MQL mostrou ter vantagens significativas.

1.2 Micro e Pequenas Empresas

As Pequenas e Microempresas podem ser definidas por dois critérios, faturamento ou número de funcionários Quadro 1. O critério faturamento está previsto na Lei Complementar nº 123/06 (BRASIL, 2006), que institui o estatuto nacional da microempresa e da empresa de pequeno porte, onde também são previstos quais os tipos societários que podem ser adotados e as atividades que são vedadas para MPEs (micro e pequenas empresas).

Quadro 1 - Critério de classificação das empresas.

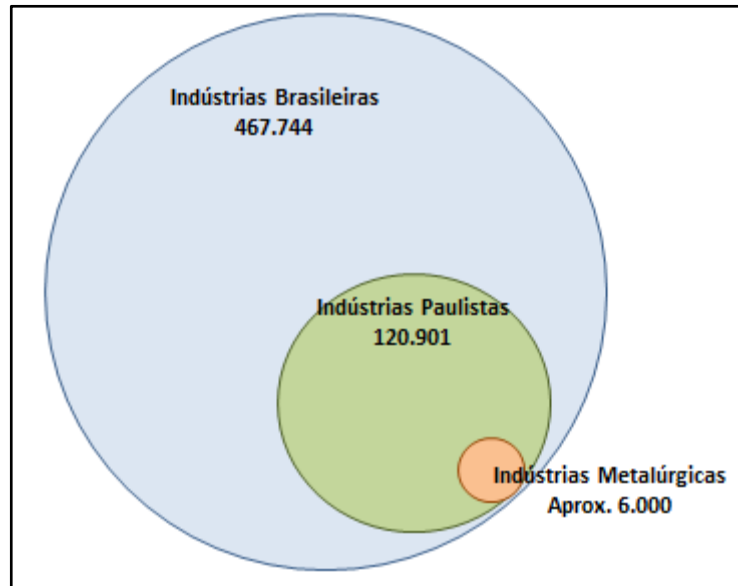
Porte	Indústria	Comércio e serviços	Renda anual (R\$)
Micro empresa	até 19 pessoas	até 9 pessoas	≤ 360 mil
Pequena empresa	de 20 a 99 pessoas	de 10 a 49 pessoas	> 360 mil e ≤ 4,8 milhões
Média empresa	de 100 a 499 pessoas	de 50 a 99 pessoas	> 4,8 milhões e ≤ 300 milhões
Grande empresa	500 pessoas ou mais	100 pessoas ou mais	> 300 milhões

Fonte: adaptado de DIEESE (2021) e BNDES (2022)

O setor industrial é responsável por 21,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, dos 467.744 estabelecimentos existentes, 93,8% deles são micros e pequenas empresas. Além disso, representam 32,9% dos empregos com registro em carteira do setor privado. A indústria paulista é responsável 42,2% da exportação nacional de produtos manufaturados. O estado de São Paulo é o estado com maior número de industriais no Brasil. São 120.901, que representam 25,8% da indústria nacional, destas 66,7% são microempresas e 25,5% são

pequenas. O setor de produtos de metais e metalurgia representam juntos 5% das indústrias paulistas Figura 14. (CNI, 2020)

Figura 14 - Distribuição das indústrias metalúrgicas paulistas.



Fonte: autor.

Gestão de resíduos nas MPEs

O governo federal por meio de diversas leis determina a Política de Gestão de Resíduos Sólidos e Efluentes, nos diferentes segmentos econômicos. Porém, como visto anteriormente, apenas no segmento industrial no estado de São Paulo mais de 92% das indústrias, são micro e pequenas empresas. Estas empresas recebem tratamento diferente quanto as médias e grandes empresas no que toca a Gestão de Resíduos. (BRASIL, 2010)

Buson (2017) em seu trabalho de comparação entre as MPEs do Brasil e da União Europeia, conclui que o Brasil tem avançado muito na questão ambiental, mas deveria estar bem melhor, se não fosse o protecionismo dado as MPEs, porém ressalta as limitações imposta a essas empresas no que tange a possibilidade de faturamento.

Picchiai e Senigalia (2019) em seu trabalho buscaram evidenciar o conhecimento e a percepção dos administradores das MPEs quanto à legislação sobre a gestão dos resíduos sólidos na Região do ABC Paulista, por meio de coleta documental, entrevistas in loco e questionário. Verificou-se que mais de 60% dos administradores de MPEs não possuem conhecimentos básicos sobre as leis e normas que regem a gestão dos resíduos sólidos e demais compromissos ambientais, como a obrigatoriedade de possuir licenciamento ambiental

quanto ao impacto local ou eventual obrigatoriedade de executar um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), extrapolando para os dados apresentados anteriormente.

Stumpf, Theis e Schreiber (2018) realizaram um estudo sobre conhecimento e aplicação da gestão de resíduos em quatro empresas da área metalmeccânica que possuíam certificação ambiental, localizadas na cidade de São Leopoldo, RS por meio de entrevista em profundidade, levantamento documental e observação não participante. Constataram que as empresas que possuem um sistema de gestão ambiental, apresentam resultados mais expressivos quanto a compreensão dos processos de gerenciamento de resíduos e da necessidade de ações de cunho ambiental junto aos colaboradores. Nas outras organizações estudadas, verificou-se dificuldade de entendimento quanto aos assuntos avaliados, por parte dos respondentes da pesquisa, principalmente no que se refere ao gerenciamento de resíduos.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas as metodologias usadas para a execução deste trabalho. As atividades foram divididas em cinco etapas, Bibliometria, Projeto e Montagem do Sistema MQCL, Elaboração dos ensaios, Tratamento e análise dos dados dos ensaios, e conclusão.

2.1 Bibliometria sobre MQCL no torneamento

De modo a verificar a relevância da pesquisa e formar uma base de informações foi realizado um estudo bibliométrico.

A bibliometria é pode ser definida como uma ferramenta estatística que por meio da análise quantitativa das publicações científicas, permite a geração de indicadores que possibilitam a avaliação do desempenho de temas, pesquisadores, instituições *etc.*

Para Araújo (2006) a análise de citações é a parte mais importante da bibliometria, permitindo a identificação e descrição de diferentes padrões na produção científica. Através delas é possível identificar: os autores mais citados, os mais produtivos, fator de impacto dos autores, grupos de pesquisa, as instituições e países de origem das publicações; tipo de documento mais utilizado, idade média e a obsolescência da literatura utilizada *etc.*

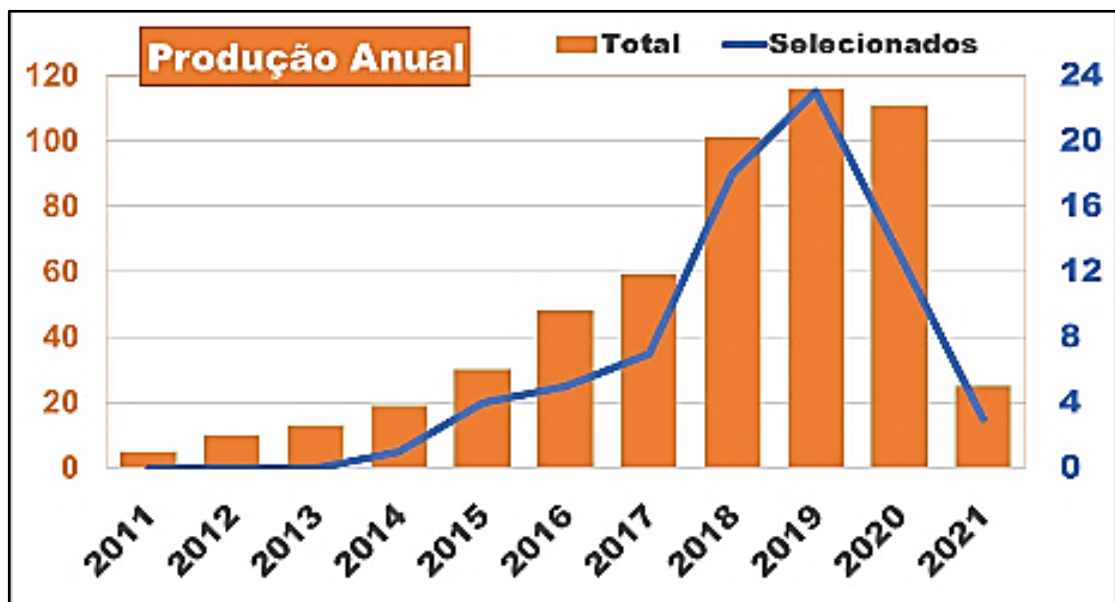
O fator de impacto é medido por diferentes índices, sendo um dos mais utilizado o *h-index*. Esse índice determina que um pesquisador tem índice “ $h=N$ ” se o seu número de publicações “ N ” receber um número “ N ” de citações cada uma, ou seja, um pesquisador com h_{10} tem ao menos 10 artigos com pelo menos 10 citações cada um. (HIRSCH, 2005)

A busca foi realizada através do software de recuperação e análise de citações acadêmicas, *Publisher o Perish* (Pop), nas bases de dados do *Google Scholar* e *Scopus*, excluindo citações e patentes, pela expressão “MQCL”, no período de 2011 a 2021.

Com o próprio Pop foram eliminados aqueles que não possam citações, sendo os resultados exportados para o *software* ENDNOTE, onde foi verificada a ocorrência de artigos duplicados e publicações em idioma que não fosse o Inglês, passando pela aplicação de filtros na análise do Abstract com as seguintes expressões AND “*turning*” e NOT “*grandinho*”, “*drilling*”, “*mailing*”, “*nano*”, dos resultados obtidos foram lidos os resumos para estabelecer a sua adesão ao tema. Para o tratamento bibliométrico foi feita uma padronização dos dados encontrados, de modo a eliminar incongruências, permitindo a criação de listas que exportadas para o Excel possibilitaram a representação gráfica dos resultados.

Através da busca com o PoP nas bases de dados, foram encontrados 909 trabalhos que com a eliminação dos não citados resultando em 600 estudos que exportados para o EndNote passaram por uma verificação onde foram eliminados os artigos duplicados e com idioma diferente do inglês, resultando em 537 artigos. Com a aplicação dos filtros, os resultados foram refinados para 74 artigos que após a verificação de disponibilidade seguida pela leitura dos resumos chegou-se à quantidade de 42 artigos que foram usados para a análise bibliométrica Figura 15.

Figura 15 - Artigos publicados durante o recorte temporal



Fonte: autor, dados coletados do Google Scholar (2021)

Esse estudo permitiu a verificação de possíveis redes de colaboração entre os autores e a relevância dos periódicos segundo classificação no Qualis-Periódicos da Plataforma Sucupira. De modo a incrementar a base de dados também foram realizadas buscas no portal de periódicos da Capes e em alguns dos repositórios das principais universidades brasileiras, além de buscas das referências bibliográficas dos artigos selecionados.

2.2 A metodologia *Design Science Research* (DSR)

A pesquisa é quantitativa de natureza aplicada com caráter exploratório e procedimentos experimentais. A metodologia adotada para este trabalho é a de *Design Science Research* (DSR). O método descreve uma sequência de passos a serem seguidos, contendo as seguintes diretrizes Quadro 2. (HEVNER *et al.*, 2004)

Quadro 2 - Diretrizes de pesquisa em DSR.

DIRETRIZES	DESCRIÇÃO
Diretriz 1: Design como um artefato	DSR deve produzir um artefato viável na forma de uma construção, um modelo, um método ou uma instanciação.
Diretriz 2: Relevância do Problema	O objetivo da DSR é desenvolver soluções baseadas em tecnologia para problemas importantes e relevantes para organizações e empresas.
Diretriz 3: Avaliação de Projeto	A utilidade, qualidade e eficácia de um artefato de design devem ser rigorosamente demonstradas por meio de métodos de avaliação bem executados.
Diretriz 4: Contribuições de pesquisa	Uma DSR eficaz deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas de artefato de design, fundamentos de design e / ou metodologias de design.
Diretriz 5: Rigor de Pesquisa	A DSR depende da aplicação de métodos rigorosos tanto na construção quanto na avaliação do artefato de design.
Diretriz 6: Design como um processo de pesquisa	A busca por um artefato eficaz requer a utilização dos meios disponíveis para alcançar os fins desejados e, ao mesmo tempo, satisfazer as leis do ambiente do problema.
Diretriz 7: Comunicação de Pesquisa	A DSR deve ser apresentada de forma eficaz tanto para pessoas orientadas a tecnologia quanto para a gestão

Fonte: adaptado de Hevner *et al.* (2004)

Para Lacerda *et al.* (2013) a DSR tem por responsabilidade idealizar e validar sistemas que ainda não existem, seja criando, recombinao ou alterando produtos, processos, *softwares* ou métodos de modo à aprimorar as condições existentes.

A DSR, por sua vez, permite ao pesquisador não apenas explorar, descrever ou explicar um determinado fenômeno, mas também projetar ou prescrever soluções para um determinado problema. A DSR é um método que associa intervenções ou sistemas aos resultados de modo a resolver problemas reais e não apenas teóricos, sendo dessa forma uma metodologia pragmática, que desenvolve conhecimento geral, válido para resolver problemas das demandas referentes à sua aplicação para o ambiente ao qual foi destinado. (LACERDA *et al.*, 2013; DRESCH *et al.*, 2015)

Desta forma entende-se o projeto MQCL como um artefato, para a solução de problemas referentes aos aspectos econômicos ambientais das micro e pequenas empresas da área de fabricação mecânica, possibilitando a elas acesso a tecnologias.

2.3 D.O.E – *Design of Experiments*

De modo a garantir o rigor científico da pesquisa elaborou-se um planejamento experimental, onde foi traçada a estratégia de experimentação com os parâmetros e os

métodos de refrigeração definidos, utilizou-se da metodologia do planejamento de experimentos, ou DOE—*Design of Experiments*, que proporciona uma abordagem direcionada e é capaz determinar a interação entre múltiplas variáveis de entrada quantitativas ou qualitativas e o resultado de saída também integrando métodos simples e poderosos de análises estatísticas que possibilitam conclusões sólidas (CAVAZZUTI, 2013).

PARK (2007) afirma que a metodologia DOE possibilita a alocação sistemática dos recursos e os resultados dos experimentos são analisados estatisticamente, permitindo que se obtenha o máximo de dados com uma quantidade mínima de experimentos.

A experimentação é parte fundamental desta pesquisa, assim como em diferentes problemas de engenharia, sendo geralmente usada para estudar o desempenho de sistemas e processos. Um processo como o torneamento, pode ser descrito como uma combinação de diferentes recursos como: máquinas, métodos, pessoas etc. e que transformam algumas variáveis de entrada em uma ou mais variáveis de saída (respostas observáveis). Algumas das variáveis do processo podem ser controladas, enquanto outras não podem (variáveis de ruído) como flutuações de temperatura ambiente, flutuações de umidade, variações de matéria-prima, etc. (CAVAZZUTI, 2013).

Os três princípios básicos para planejar experimentos (DOE) são: a replicação ou repetições dos experimentos, a randomização ou manutenção do acaso (aleatoriedade) de cada etapa, e a formação de blocos ou sistematização de conjuntos homogêneos para evitar erros devido à variabilidade dos elementos. A aplicação efetiva destes princípios visa minimizar os efeitos das variáveis ruído (ANTONY, 2003).

Dentre as diferentes estratégias existentes para o DOE será usada para este trabalho a do fatorial completo, a estratégia mais comum e intuitiva de planejamento experimental.

Na forma mais simples, o fatorial completo de dois níveis, existe k fatores e L = 2 níveis por fator. As amostras são dadas por todas as combinações possíveis dos valores dos fatores. Portanto, o tamanho da amostra é $n = 2^k$ (CAVAZZUTI, 2013).

$$L^k = n^o \text{ ensaios}$$

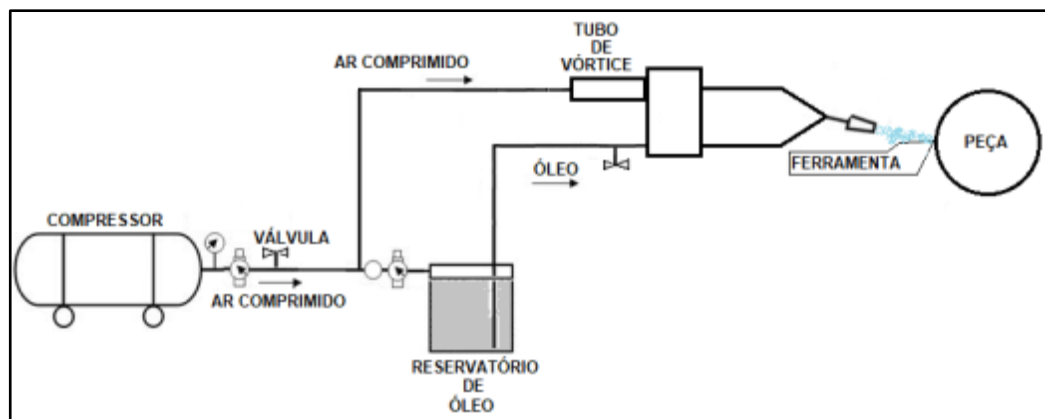
$$\text{Equação 6}$$

O mercado disponibiliza inúmeros *softwares* para identificação dos fatores significativos e análises estatísticas dos dados obtidos, foi escolhido o Minitab por ser uma ferramenta simples e poderosa para interpretação dos resultados (ANTONY, 2003).

2.4 Projeto do Sistema MQCL

O projeto do sistema de refrigeração MQCL abrange dois subsistemas: o subsistema de refrigeração do ar comprimido por meio de tubo de vórtice e o subsistema de pulverização, responsável por gerar a névoa do fluido lubrificadorrefrigerante. Os fluxos de ar comprimido resfriado e de névoa se misturam em um bico posicionado próximo a ZC na interface cavaco/ferramenta Figura 16.

Figura 16 - Esquema de montagem do sistema MQCL



Fonte: Autor

A alimentação de ar comprimido de todo o sistema é feito por um compressor de 20 pés, com capacidade de 200 Litros, pressão de 175 lbf/pol² e deslocamento teórico (vazão) de 576 l/min. A interação entre os dois subsistemas, fornece refrigeração na ZC a baixas temperaturas, entre 5°C e -5°C, variando em função da temperatura do ar comprimido fornecido pelo compressor.

Subsistema de resfriamento do ar comprimido

O subsistema de resfriamento do ar comprimido consiste de um tubo de vórtice adquirido para esta dissertação, fabricado em alumínio, com válvula de controle de fluxo em latão, silenciador em latão poroso e válvula geradora de vórtice em nylon, possui furos roscados para conexões (BSP 1/8") para entrada de ar comprimido e (BSP 3/8") para a saída do ar resfriado, pressão máxima de trabalho de 6,9 BAR Figura 17 - Tubo de vórtice comercial de baixo custo Figura 17.

Figura 17 - Tubo de vórtice comercial de baixo custo



Fonte: autor

O tubo de vórtice recebe ar comprimido por meio de um filtro secador acoplado ao subsistema de pulverização sem controle de fluxo, porém, com a pressão controlada em 6 BAR.

Subsistema de pulverização

O subsistema de pulverização consiste em um reservatório de fluido refrigerante pressurizado a 2 bar, conectado à um sistema MQL fabricado para esta dissertação, composto por um bloco em alumínio com galerias internas e furos roscados para conexões (BSP 1/8") para as entradas de ar, fluido pressurizado, e saída de névoa. As entradas possuem válvula de controle de fluxo simples para o ar comprimido e válvula de controle de fluxo com ajuste fino para o fluido refrigerante de modo a permitir um controle mais precisa da vazão do fluido refrigerante Figura 18.

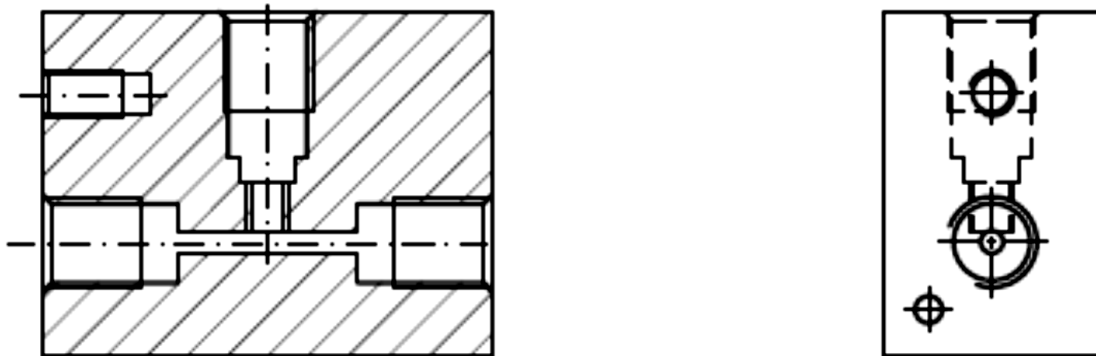
Figura 18 - Subsistema MQCL



Fonte: autor

O projeto do bloco do MQL foi feito em *software* CAD, onde foram especificadas as suas dimensões, os diâmetros das galerias internas, e as roscas das conexões Figura 19.

Figura 19 - Projeto em CAD do bloco misturador da névoa

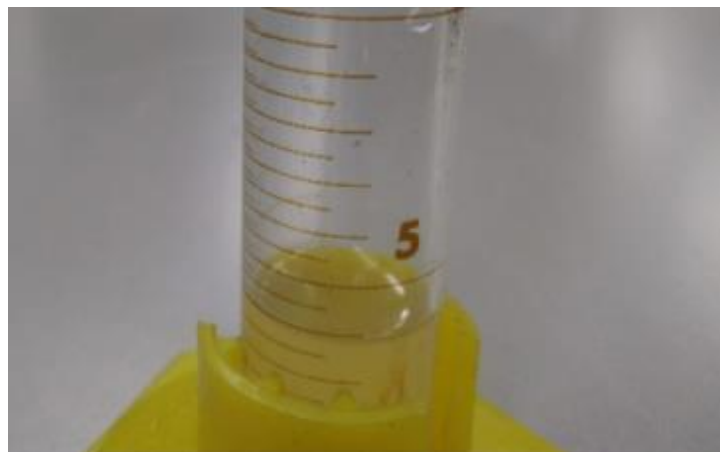


Fonte: autor

Seu funcionamento se dá pelo efeito Venturi onde o fluxo de ar percorre um tubo e ao encontrar um estreitamento em sua seção reduz sua pressão e aumenta sua velocidade causando sucção de outro fluido introduzido por um terceiro duto na zona de estreitamento. (GROOVER, 2013)

A vazão do MQL foi ajustada para uma vazão média de 60 ml/h, de modo a ajustar a vazão do aparelho, o fluxo foi coletado em uma proveta graduada por um período de 5min, processo repetido por cinco vezes de onde se tirou a média da vazão Figura 20.

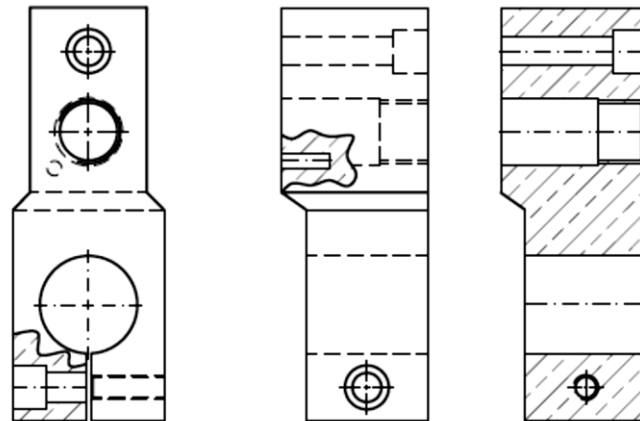
Figura 20 - Ajuste da vazão do MQL



Fonte: autor.

Para integrar os subsistemas, foi projetado um bloco que os acoplassem e servisse de suporte para o todo o conjunto, permitindo que proximidade suficiente para utilizarem um único bico de aplicação, que também facilita o manuseio e o correto posicionamento do bico junto a ZC Figura 21.

Figura 21 - Projeto do Bloco de Suporte



Fonte: autor.

O sistema montado foi fixado ao castelo de ferramentas do torno com dois ímãs de neodímio com capacidade de carga de 20 kg cada. O bico do sistema foi posicionado de modo a fornecer a refrigeração na ZC Figura 22.

Figura 22 - Sistema MQCL montado no Torno

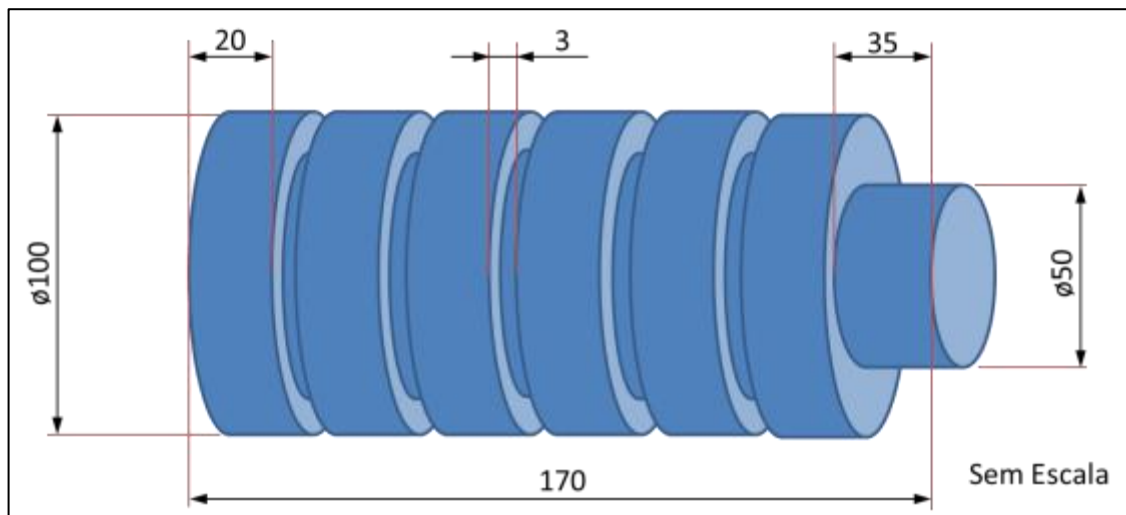


Fonte: Autor

2.5 O Material do Corpo de Prova

Para os ensaios utilizou-se como corpo de prova uma barra de seção cilíndrica do aço ABNT 1045, com canais que possibilitaram a utilização de até 6 amostras no mesmo corpo de prova, permitindo a variação dos parâmetros para cada um dos ensaios. O corpo de prova feito com $\varnothing 100$ mm x 170 mm, dividido em 6 partes de 20 mm separadas por canais de 3 mm de largura por 8 mm de profundidade, reservando 35 mm como área de pega com diâmetro de 50 mm para as castanhas do torno, formando assim um comprimento de usinagem de 120 mm Figura 23.

Figura 23 - Dimensões do copo de prova



Fonte: autor.

A composição química foi fornecida pelo fabricante conforme a Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do material do corpo de prova

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	N	Al	Fe
Teor %	0,46	0,61	0,25	0,013	0,032	0,14	0,054	0,028	Balanço

Fonte: fabricante GGD metals.

A escolha do material se deu em função de ser um material comum a maioria das micro e pequenas empresas da área metalmeccânica.

2.6 Elaboração dos Ensaio de Usinagem

Para o ensaio foram utilizados parâmetros, v_c e v_f , recomendados pelos fabricantes de ferramentas para o material utilizado, que foram variados para uma condição mais econômica com v_c e v_f menores sendo mantida profundidade de corte em 1 mm.

Tabela 2 - Parâmetros de corte teóricos.

Parâmetros	v_c (m/min)	v_f (mm/rev)	a_p (mm)	RPM
Recomendados	330	0,25	1	1051
Condição econômica	220	0,12	1	700

Fonte: autor

Devido as limitações do torno mecânico quanto a gama de rotações, as velocidades de corte e avanço foram recalculadas para avanços e rotações próximas as definidas pelos dados recomendados, conforme Equação 6.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 6}$$

As vcs recalculadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros recalculados

Parâmetros	vc (m/min)	vf (mm/rev)	ap (mm)	RPM
Recomendados	298	0,251	1	9500
Condição econômica	188	0,125	1	600

Fonte: autor

Para a fase de planejamento foi definido um protocolo de ensaios, onde foram definidas três variáveis de entrada (vc, vf, meio de refrigeração) cada uma com 2 níveis (vc 188 e 298 m/min, vf 0,12 e 0,25mm/ver, e o meio de refrigeração por Jorro e MQCL) sendo a variável de resposta (saída) a rugosidade Ra.

Com o auxílio do *software* Minitab[®], foi criado um planejamento para realização dos experimentos fatoriais baseados em DOE. Foi escolhido o método de fatoriais completos por permitir combinações entre fatores e níveis de fatores, proporcionando a estruturação das rodadas do experimento. Os resultados obtidos a cada combinação vão determinar efeitos de interações em variáveis respostas em diferentes níveis. O Minitab[®] possibilita a ordenação aleatória das diferentes combinações dos fatores e níveis que serão avaliados em relação à cada rodada de experimentos, possibilita também a replicação, ou seja, a repetição de cada um dos experimentos mantendo a aleatoriedade.

Sendo 3 os fatores (k) com 2 níveis (n), resultam em 8 ensaios. Somadas a mais 2 réplicas (repetição dos ensaios), resultando em 24 ensaios, Tabela 4. Os insertos foram substituídos após cada ensaio de maneira a evitar a possibilidade de que uma variável não controlável (ruído), como um possível desgaste ou avaria do inserto provoca-se alterações da rugosidade.

Tabela 4 - Matriz experimental.

Ordem	Nº do Ensaio	vc (m/min)	vf (mm/rev)	Refrigeração
1	15	-	+	+
2	4	+	+	-
3	11	-	+	-
4	13	-	-	+
5	8	+	+	+
6	5	-	-	+
7	9	-	-	-
8	18	+	-	-
9	1	-	-	-
10	21	-	-	+
11	12	+	+	-
12	23	-	+	+
13	22	+	-	+
14	17	-	-	-
15	24	+	+	+
16	14	+	-	+
17	3	-	+	-
18	20	+	+	-
19	10	+	-	-
20	16	+	+	+
21	19	-	+	-
22	6	+	-	+
23	2	+	-	-
24	7	-	+	+

Fonte: autor

Para verificar a influência do método de refrigeração no desgaste de flanco da ferramenta também foram realizados ensaios de vida da ferramenta nas condições recomendadas pelo fabricante com ap de 1 mm para cada método de refrigeração, conforme recomendações da NBR ISO 3685:2017, que descreve os procedimentos necessários para ensaios de torneamento com ferramentas de aresta única. (ABNT, 2017)

2.7 Máquinas e equipamentos

Torno mecânico

Os ensaios foram realizados no laboratório de usinagem da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, em ambiente com temperatura controlada em 21°C em um torno mecânico universal da marca Nardini modelo NODUS 220 GOLD, com 7,5 cavalos de potência com 18 rotações entre 30 e 2360 RPM, com 280 velocidades de avanço entre 0,04 e 10,09 mm/rev, com sistema de refrigeração da ferramenta, com vazão máxima de 8 l/min Figura 24.

Figura 24 - Torno mecânico universal

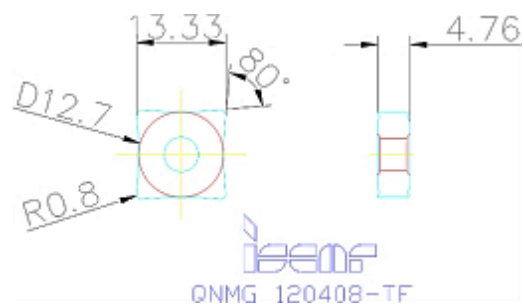


Fonte: autor.

Ferramenta

A ferramenta utilizada nos ensaios foi o inserto intercambiável QNMG 120408 – TF com cobertura CVD IC 9025 fornecidos pela Iscar (Figura 25).

Figura 25 - Inserto QNMG 120408 - TF



Fonte: autor (“Iscar - QNGM 120408-TF IC3028 - Other inserts - Tools United”, 2022)

O inserto possui 8 arestas de corte, com formato romboidal com ângulo de ponta de 80° e ângulo de folga de 0° , raio de ponta de 0,8mm. Indicado para aplicações de usinagem média com vc entre 150 e 300 m/min, vf de 0,12 a 0,35 mm/rev e ap entre 1,0 e 4,0 mm. O quebra cavaco do tipo TF possui comprimento de 1,8 mm e ângulo de saída de 13° .

O suporte de ferramenta utilizado foi o PQLNR 2020K-12, com ângulo de posição de 95°, ângulo de folga de -6° e ângulo de saída de -6°, Figura 26.

Figura 26 - Suporte PQLNR 2020K - 12



Fonte: autor.

Instrumentos de medição

Durante os ensaios de usinagem ocorreu a medição de rugosidade, que foi realizada com um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest SJ-301. Foram realizadas três medições para cada ensaio, o corpo de prova foi rotacionado em 120° entre cada medição. Segundo a orientação da norma ABNT NBR ISO 4288 adotou-se um cut-off (λ) de 2,5 mm. (ABNT, 2008)

Figura 27 - Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-301.



Fonte: autor

Para análise do desgaste das ferramentas e dos cavacos as micrografias foram feitas com um microscópio ótico digital resolução HD sob luz branca, conectado ao computador, assistido por *software* Cooling Tech com ampliações de 10x.

Figura 28 - Microscópio ótico digital.



Fonte: autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da utilização do sistema de refrigeração desenvolvido, os trabalhos foram divididos em duas etapas, sendo a primeira a execução de ensaios para a análise da rugosidade e da morfologia cavaco, definidos pelo plano de experimentos elaborado por meio do D.O.E., a segunda etapa foi verificar a influência do método de refrigeração no desgaste de flanco da ferramenta nas condições recomendadas pelo fabricante com ap de 1 mm para cada método de refrigeração, conforme recomendações da NBR ISO 3685:2017. (ABNT, 2017)

3.1 Análise da Rugosidade da Superfície Usinada Ra

As medições de rugosidade foram feitas após cada um dos ensaios, foram realizadas três medições para cada ensaio, com rotação do CP para as posições 0°, 120° e 240° os resultados individuais de cada ensaio são apresentados na Tabela 5.

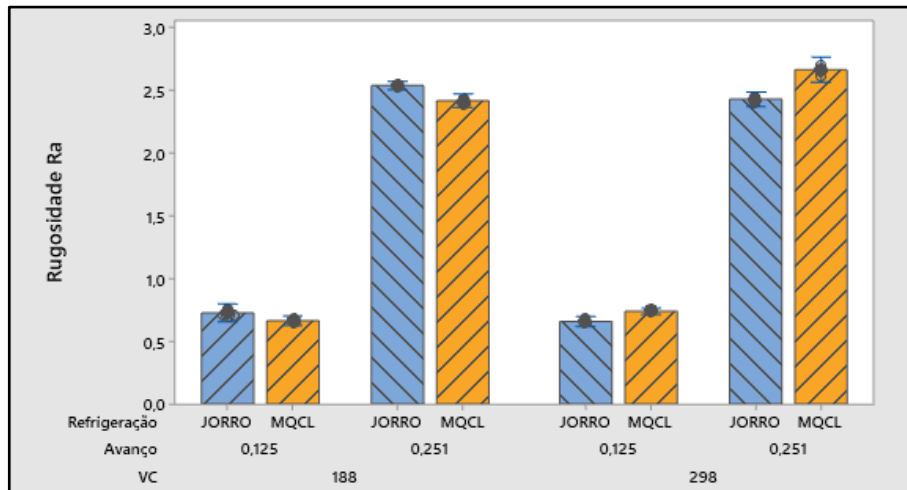
Tabela 5 - Medições da rugosidade Ra

Ordem de execução	Número do Ensaio	VC corrigida	Vf corrigido	Método de Refrigeração	Rugosidade			Média da Rugosidade Ra
					0°	120°	240°	
1	15	188	0,251	JORRO	2,59	2,55	2,49	2,54
2	4	298	0,251	MQL	2,71	2,67	2,63	2,67
3	11	188	0,251	MQL	2,49	2,43	2,4	2,44
4	13	188	0,125	JORRO	0,79	0,72	0,78	0,76
5	8	298	0,251	JORRO	2,46	2,49	2,4	2,45
6	5	188	0,125	JORRO	0,72	0,73	0,68	0,71
7	9	188	0,125	MQL	0,68	0,67	0,63	0,66
8	18	298	0,125	MQL	0,76	0,77	0,71	0,75
9	1	188	0,125	MQL	0,64	0,62	0,68	0,65
10	21	188	0,125	JORRO	0,72	0,75	0,67	0,71
11	12	298	0,251	MQL	2,67	2,58	2,62	2,62
12	23	188	0,251	JORRO	2,53	2,59	2,53	2,55
13	22	298	0,125	JORRO	0,67	0,63	0,68	0,66
14	17	188	0,125	MQL	0,65	0,71	0,67	0,68
15	24	298	0,251	JORRO	2,39	2,46	2,45	2,43
16	14	298	0,125	JORRO	0,63	0,62	0,68	0,64
17	3	188	0,251	MQL	2,37	2,45	2,39	2,40
18	20	298	0,251	MQL	2,73	2,68	2,69	2,70
19	10	298	0,125	MQL	0,73	0,75	0,72	0,73
20	16	298	0,251	JORRO	2,41	2,39	2,41	2,40
21	19	188	0,251	MQL	2,37	2,41	2,44	2,41
22	6	298	0,125	JORRO	0,67	0,65	0,7	0,67
23	2	298	0,125	MQL	0,74	0,77	0,7	0,74
24	7	188	0,251	JORRO	2,55	2,53	2,49	2,52

Fonte: autor.

De modo a verificar graficamente as médias das rugosidades Ra para cada interação de fatores, foi elaborado um gráfico por meio do Minitab® sendo apresentadas na Figura 29.

Figura 29 - Resultados da medição da rugosidade Ra

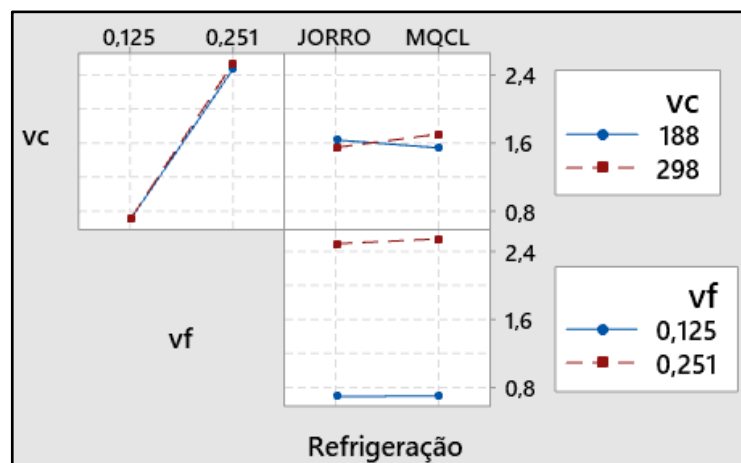


Fonte: autor

Observou-se que para a vc (188 m/min) mais baixa o sistema MQCL produz uma rugosidade 8,8% menor do que o Jorro para vf de 0,125 mm/rev e de 4,7% para a mesma vc com vf de 0,251 mm/rev. Já na vc (298 m/min) mais alta não ofereceu o mesmo desempenho, para a vf de 0,125 mm/rev a rugosidade foi 12,6% maior que a do jorro e para a vf de 0,251 mm/rev foi 9,7% maior.

As interações provenientes do planejamento de experimento, para a variável de saída rugosidade e os fatores de entrada: vc, vf, e método de refrigeração são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Gráfico para interações da Rugosidade Ra



Fonte: Autor.

De modo a estudar o efeito do sistema de refrigeração, elaborou-se, por meio do *software* Minitab®, uma análise de variância preliminar (ANOVA) da rugosidade considerando todas as variáveis de entrada: meio de refrigeração, vc e vf. Foi adotado um

nível de confiança de 95% e nível de significância de 5% (Valor-p < 0,05) Tabela 6, observou-se que as variáveis: vc e meio de refrigeração não foram significativas, a variação delas não produz variação da rugosidade. Observou-se que a variável vf provoca alterações significativas o que vai de encontro a literatura, também a correlação entre vc e meio de refrigeração apresentou relativa significância para os ensaios realizados. O coeficiente de correlação (R^2) foi de 99,87%, para o Ra indicando que os fatores utilizados para esta análise explicam o comportamento dessas rugosidades.

Tabela 6 - Análise da variância preliminar da rugosidade Ra.


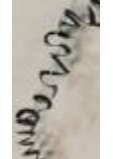






Variáveis	GL	SQ	Contribuição	QM	F	Valor-P
VC	1	0,0078	0,04%	0,0078	5,19	0,036
Avanço	1	19,7533	99,27%	19,7533	13109,81	0,000
Refrigeração	1	0,0064	0,03%	0,0064	4,28	0,054
VC*Avanço	1	0,0064	0,03%	0,0064	4,28	0,054
VC*Refrigeração	1	0,0946	0,48%	0,0946	62,77	0,000
Avanço*Refrigeração	1	0,0034	0,02%	0,0034	2,27	0,150
Erro	17	0,0256	0,13%	0,0015		
Falta de ajuste	1	0,0171	0,09%	0,0171	31,94	0,000
Erro puro	16	0,0085	0,04%	0,0005	*	*
Total	23	19,8976	100,00%			

Fonte: autor

3.2 Análise da morfologia do cavaco

Para a análise da forma do cavaco, estes foram coletados após cada ensaio, não foi verificada, alteração na forma do cavaco quando mantidos os parâmetros e meio de refrigeração, mesmo nas réplicas. Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Forma e cor do cavaco nos diferentes ensaios.

Perfil do Cavaco								
Método	Jorro				MQCL			
vc	188	188	298	298	188	188	298	298
vf	0,125	0,251	0,125	0,251	0,125	0,251	0,125	0,251
Foto								
Forma e cor	Arruela longo Azul	Arruela longo Azul	Helicoidal curta Azul	Helicoidal curta Azul	Arcos conect. Azul	Arcos conect. Azul	Arcos conect. Azul	Arcos Azul

Fonte: Autor

Para as condições de usinagem proposta para o aço ABNT 1045, os cavacos apresentaram uma coloração azul em todos os ensaios. Quanto à forma, os cavacos variaram do tipo arruela para arruela com algum emaranhamento para as condições de jorro na v_c de 188 m/min, ainda na condição de jorro, mas na v_c de 298 m/min os cavacos apresentaram forma Helicoidal curta evoluindo um pouco no comprimento. Na condição de refrigeração MQCL a forma do cavaco fora predominantemente de cavacos em Arcos Conectados, com algumas variações para arcos soltos.

Devido ao uso de uma ferramenta revestida, a influência do meio de refrigeração acaba sendo pouco percebida, pois, a forma do cavaco se relaciona com a interface cavaco ferramenta, região onde tanto o fluido quanto o revestimento atuam.

3.3 Análise do desgaste de flanco (VB)

Para a análise da superfície de folga ou flanco, seguiu-se a NBR ISO 3685 que define os procedimentos para ensaios de torneamento com ferramentas monocortantes, fixou-se os parâmetros na condição definida pelo fabricante: v_c de 300 m/min e v_f em 0,25 mm/rev, e a_p de 1 mm, os ensaios foram replicados para as duas condições de refrigeração: jorro e MQCL.

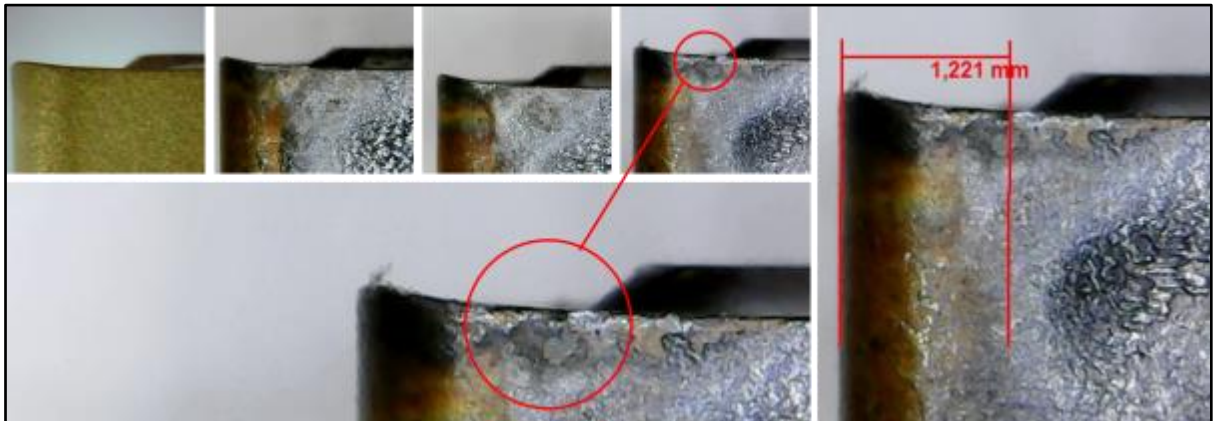
Como critério de vida o valor de desgaste foi fixado em $VB = 0,3$ mm, não sendo admitido desgaste de entalhe KT de modo a evitar o colapso do inserto.

Durante os ensaios não foram percebidas a ocorrência da formação de aresta postiça, percebe-se, porém, a alteração da coloração da cobertura do inserto proveniente do aumento da temperatura causado pelo atrito durante a usinagem, nota-se também adesão de material a superfície de folga do inserto, causada pelo choque do cavaco curvado antes de se quebrar.

Os ensaios foram interrompidos antes do atingimento do critério de VB, devido a ocorrência de desgaste de entalhe, tanto para a condição de jorro, quanto para a MQCL.

Nos ensaios com jorro foram executados 30 passes, totalizando 6 min ou 5100 mm usinados até a ocorrência de desgaste de entalhe, não foi verificado desgaste significativo visível com os meios disponíveis, nas micrografias produzidas com o microscópio ótico digital é possível verificar o início da formação do desgaste por entalhe motivo da interrupção dos ensaios Figura 31.

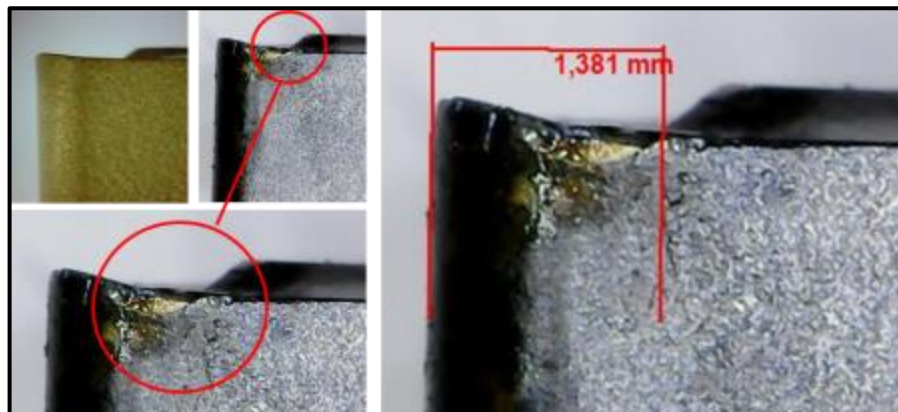
Figura 31 - Micrografias do flanco do Inserto no torneamento com Jorro.



Fonte: Autor.

Nos ensaios com MQCL foram executados: 11 passes em 2,1 min ou 1785 mm usinados até a ocorrência do desgaste de entalhe as micrografias da Figura 32 apresentam a formação do desgaste por entalhe na região do limite da profundidade de corte (acima do ap de 1 mm).

Figura 32 - Micrografias do flanco do Inserto no torneamento com MQCL.



Fonte: Autor.

Esse desgaste pode ser explicado pela formação de rebarba na superfície usinada provocando atrito contínuo em um mesmo ponto.

Segundo a literatura as principais causas podem ser: a composição do material, as condições de corte ou característica da ferramenta.

Por se tratar de material certificado, falhas no material podem ser desconsideradas, e as condições de corte foram adotadas segundo o fabricante, restando por fim as características da ferramenta, deve-se então considerar a adoção de insertos com formas diferentes de quebra cavaco, ausência ou tipos diferentes de revestimento, de modo a possibilitar uma análise mais clara.

4 CONCLUSÃO

Neste capítulo estão às considerações finais sobre os resultados obtidos e possibilidades de continuidade e melhoria no trabalho

4.1 Rugosidade Média da Superfície Usinada

Para velocidades de corte mais baixas o MQCL reduziu a rugosidade, sendo a causa provável, uma maior facilidade encontrada para a penetração do fluxo de ar até a ZC. Em velocidades mais altas a própria rotação impede a penetração, estudos referentes a mudança de posição do bico de refrigeração devem ser realizados de modo a verificar uma possível melhoria da rugosidade em vcs mais altas.

Não foi verificada uma influência significativa da vc na rugosidade, entretanto confirmando a literatura, a vf influencia de maneira direta na rugosidade, com o aumento da vf a rugosidade aumenta consideravelmente. Um aumento aproximado de 100% na vf representou aumento da rugosidade de mais 254% na refrigeração em jorro para vc de 188 m/min e de 269% para vc de 298 m/min, a tendência se mantém para qualquer associação, quando analisamos a influência da vf na rugosidade com a refrigeração MQCL, as diferenças se acentuam, 282% para vc de 188 m/min e 305% para vc de 298 m/min.

4.2 Formação do cavaco dos ensaios

Em função dos resultados experimentais obtidos, para investigar a formação dos cavacos do aço ABNT 1045 pode-se concluir que para a as mesmas condições de refrigeração de 1 foram frequentes os cavacos do tipo arruela e helicoidal curto variando conforme a vc aplicada. Para a condição de refrigeração MQCL os cavacos mantiveram a forma de Arcos conectados com algumas ocorrências de arcos soltos para a vc e vf mais altas. A diferença dos meios de aplicação do fluido de corte, não apresentaram uma relevância significativa possivelmente causada pelo revestimento do inserto. Sugerem-se experimentos que utilizem ferramentas sem revestimento de modo a avaliar com maior precisão a atuação da lubrificação.

4.3 Desgaste de flanco do Inserto (VB)

Devido a ocorrência de desgaste por entalhe a verificação do VB foi interrompida antes que se pudesse avaliar o desgaste de flanco, a formação deste tipo de desgaste pode levar ao colapso do inserto, podendo causar danos ao suporte do inserto, ao corpo de provas ou ao operador.

Assim como na análise de formação do cavaco, a análise de desgaste do flanco foi comprometida pelas características da ferramenta, a escolha de uma nova ferramenta com outra geometria e sem revestimento, possibilitara a coleta de novos dados, que permitirão uma análise mais ajustada, proporcionando uma avaliação mais aprofundada da interação dos métodos de refrigeração.

4.4 O sistema MQCL

Os resultados do sistema MQCL na comparação com a refrigeração em jorro apresentam um sistema promissor, ainda necessitando de ajustes.

Ainda que em alguns pontos fique abaixo do método de jorro, se sobressai em pontos como:

- a) a economia gerada, pela redução no uso de fluidos;
- b) a eliminação de custos com pós-tratamento de resíduos;
- c) a produção de cavacos limpos, isentos de fluidos.

Apesar de ter um custo mais alto (por volta de 30%) do que os fluidos refrigerantes usuais, ainda assim se justifica o uso de um fluido específico para MQCL, frente a grande redução na aplicação dele, acima de 95%. Como visto anteriormente o custo com o pós-tratamento dos efluentes pode representar até 20% do faturamento de uma empresa, o que para uma pequena ou microempresa, inviabiliza uma possibilidade de crescimento em função do comprometimento das receitas. Outra grande vantagem é a possibilidade da comercialização do principal subproduto da usinagem, “o cavaco”, por sair isento de resíduos e seco se torna mais atrativo para as siderúrgicas que trabalham com materiais reciclados.

5 CONTINUIDADE DO TRABALHO

Como continuidade deste trabalho devem ser executados novos ensaios com um inserto sem revestimento e com geometria diferente, para uma nova coleta de dados e verificação mais apurada da interação entre os diferentes parâmetros e rugosidade superficial, assim como a levantamento da vida útil a partir da análise do VB.

Deve-se verificar também a possibilidade da aplicação de fluídos mais sustentáveis como os do tipo orgânico a base de óleos vegetais com diferentes vazões a fim de se obter uma vazão ótima para esse tipo de fluido.

A utilização de um torno CNC ao invés do mecânico é uma mudança a ser considerada como facilitadora para a execução dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR ISO 4287:2002 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. , 2002.
- ABNT. NBR ISO 4288:2008 - Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. , 2008.
- ABNT. NBR ISO 3685:2017 - Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. , 2017.
- ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. DE. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Production*, v. 17, n. 1, p. 129–138, abr. 2007.
- ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 1. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2003.
- ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 10 dez. 2006.
- BERMINGHAM, M. J. et al. A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti–6Al–4V cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, n. 4, p. 752–765, 1 abr. 2012.
- BRASIL. LEI COMPLEMENTAR Nº 123, de 14 de Dezembro de 2006. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. 2006.
- BRASIL. 12.305. Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. 2010.
- BUSON, L. S. L. *Gestão de Resíduos Sólidos Industriais em Micro e Pequenas Empresas: Uma comparação entre países da União Europeia e Brasil*. Porto: Faculdade de Economia do Porto, 2017.
- CAVAZZUTI, M. *Optimization Methods: From Theory to Design*. Modena: Springer Berlin, Heidelberg, 2013.
- CNI. CNI - Perfil da Indústria nos Estados. Disponível em: <<http://perfil.portaldaindustria.com.br>>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- DE CAMARGO, R. *Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento*. Santa Bárbara d'Oeste: Centro SENAI - Fundação Romi Formação de Formadores, 2002.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- DRAGIČEVIĆ, M. The Application of Alternative Techniques for Cooling, Flushing and Lubrication to Improve Efficiency of Machining Processes. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, v. 25, n. 5, out. 2018.

DRESCH, A. et al. Uma análise distintiva entre o estudo de caso, a pesquisa-ação e a design science research. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, v. 17, n. 56, p. 1116–1133, 2015.

EKINOVIĆ, S. et al. Cold Air Dry Machining Part 1: Experimental Setup. *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, v. 18, n. 1, p. 4, 2014a.

EKINOVIĆ, S. et al. Cold air dry machining part 2: sem and metallographic analysis of the chip. *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, v. 18, n. 1, p. 5, 2014b.

EL-HOFY, H. A.-G. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2013.

FELDSHTEIN, E.; NIESLONY, P. Forces and Process Dynamics in Profiling of AlCu4MgSi Aluminium Alloy. *Advances in Manufacturing Engineering and Materials*, p. 398–406, 2019.

FERREIRA, A. Princípios básicos da extensometria – Parte 2. Disponível em: <<https://kotengenharia.com.br/principios-basicos-da-extensometria-parte-2/>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

FIRKA, D. Statistical, technical and sociological dimensions of design of experiments. *The TQM Journal*, v. 23, n. 4, p. 435–445, 14 jun. 2011.

FREITAS, S. et al. Análise da rugosidade e esforços no corte ortogonal do aço 304L com diferentes sistemas de lubrificação. *Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Anais... Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. ABCM, 2017. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COF2017/0994>>. Acesso em: 27 fev. 2022*

GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems*. 5^o ed. Hoboken: Wiley, 2013.

GUPTA, K.; LAUBSCHER, R. F. Minimum Quantity Lubrication (MQL) Assisted Machining of Grade-4 Titanium. *International Conference on Competitive Manufacturing. Anais... Em: COMA 16 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPETITIVE MANUFACTURING. Africa do Sul: 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283641639_Minimum_Quantity_Lubrication_MQL_Assisted_Machining_of_Grade-4_Titanium>. Acesso em: 25 fev. 2022*

HEVNER et al. Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75, 2004.

HIRSCH, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 15 nov. 2005.

Iscar - QNMG 120408-TF IC3028 - Other inserts - Tools United. Disponível em: <<https://www.toolsunited.com/App/EN/Article/ArticleDetailsPage/24696400131009200?SearchMode=toolsUnited&classificationType=GTC>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. Manufacturing Engineering and Technology. 8. ed. Londres: Pearson Education, 2019.

KLECKERS, T. Como um sensor de força realmente funciona? Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6697/artigo-como-um-sensor-de-forca-realmente-funciona/>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. Gestão & Produção, v. 20, n. 4, p. 741–761, 26 nov. 2013.

LIANG, S. Y.; SHIH, A. J. Analysis of Machining and Machine Tools. New York: Springer, 2016.

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. 3º ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MARUDA, R. W. et al. Influence of cooling conditions on the machining process under MQCL and MQL conditions. Tehnički vjesnik, 2015.

MARUDA, R. W. et al. The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism. Journal of Manufacturing Processes, v. 24, p. 107–115, 1 out. 2016.

PARK, G.-J. Analytic Methods for Design Practice. [s.l.] Springer London, 2007.

PATWARI, A. et al. Thermal Investigation of Vortex Generated Green Coolant on Surface Texture for Drilling Process. Procedia Engineering, v. 105, p. 808–813, 1 jan. 2015.

PICCHIAI, D.; SENIGALIA, F. Gestão de Resíduos Sólidos Integrada às Responsabilidades das Micro e Pequenas Empresas e do Poder Público Municipal. Desenvolvimento em Questão, v. 17, n. 49, p. 112–135, 17 out. 2019.

REIS, B. C. M. et al. Influência de parâmetros de corte sobre o torneamento do aço abnt 4340. . Em: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Fortaleza, Ceará, Brasil: 2016. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CON-2016-0314>>. Acesso em: 27 fev. 2022

REPORTLINKER. Carbide Tools Market Forecast to 2028 - COVID-19 Impact and Global Analysis By Tool Type, Configuration, and End-User. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2021/05/20/2233154/0/en/Carbide-Tools-Market-Forecast-to-2028-COVID-19-Impact-and-Global-Analysis-By-Tool-Type-Configuration-and-End-User.html>>. Acesso em: 23 fev. 2022.

SANCHEZ, L. E. DE A.; NALON, L. J.; PALMA, G. L. Avaliação do emprego de diferentes métodos de aplicação de fluido de corte no torneamento de um aço de difícil usinagem. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 15 abr. 2011.

SANDVIK COROMANT ACADEMY. Manual Técnico em Tecnologia de Usinagem. Sandviken: [s.n.].

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. ASPECTOS TRIBOLOGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS. São Paulo: ARTLIBER, 2007.

STEPHENSON, D.; AGAPIOU, J. Metal Cutting Theory and Practice by Stephenson and Agapiou. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

STUMPF, U. D.; THEIS, V.; SCHREIBER, D. Gestão de Resíduos Sólidos em Empresas Metalomecânicas de Pequeno Porte. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 7, n. 2, p. 230–247, 9 maio 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal cutting. 4. ed. Woburn: Butterworth–Heinemann, 2000.

VIANA, R.; LIMA, M. S. F. DE; RESENDE, P. V. DA S. Aplicação de MQL no torneamento do aço SAE 4340 com inserto de metal duro texturizado a laser e revestido de TiAlN. 2021.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. Machining technology: machine tools and operations. Boca Raton: CRC Press, 2008.

APÊNDICE

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA.
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS PRODUTIVOS

LINHA DE PESQUISA: GESTÃO DA PRODUÇÃO E OPERAÇÕES

PROJETO DE PESQUISA: INOVAÇÃO DE PROCESSOS E DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS

RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO

TÍTULO: PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE
USINAGEM POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM FOCO
EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

NOME DO ALUNO: VITOR MARCELO COSTA HALCSIK

NOME DO ORIENTADOR: ALEXANDRE FORMIGONI

São Paulo

Julho/2022

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CPS CRB8-8390

H157p Halcsik, Vitor Marcelo Costa
Projeto de dispositivo de refrigeração para processo de usinagem por torneamento para micros e pequenas empresas com foco em desenvolvimento sustentável / Vitor Marcelo Costa Halcsik. – São Paulo: CPS, 2022.
72 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Formigoni
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2022.

1. Aço ABNT 1045. 2. Refrigeração MQCL. 3. Rugosidade. 4. DOE. 5. Projeto de produto. I. Formigoni, Alexandre. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

RESUMO

HALCSIK, V. M. C. **PROJETO DE DISPOSITIVO DE REFRIGERAÇÃO PARA PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO PARA MICROS E PEQUENAS EMPRESAS COM FOCO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. 72 f. Dissertação de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2022.

O torneamento é uma operação de usinagem fundamentada na retirada de material na forma de cavaco, por cisalhamento causado pela aresta de uma ferramenta, provocando a deformação plástica do material para a formação do cavaco e grande parte da energia mecânica fornecida pela máquina (mais de 90%) transforma-se em calor. Este calor produz uma concentração de energia térmica em uma pequena região no contato cavaco-ferramenta que pode chegar acima dos 1000°C, dependendo dos parâmetros de usinagem.

O calor gerado permite menor esforço no cisalhamento do material, porém a alta temperatura atua como um catalisador dos mecanismos de desgaste da ferramenta, reduzindo sua vida útil, podendo inclusive alterar as características macro e micro dimensionais de uma peça. Por isso, torna-se necessário o controle da temperatura, na forma da aplicação de fluido de corte (FC) ou fluidos refrigerantes (FR) na região da zona de corte (ZC).

Sabe-se que a utilização incorreta destes fluidos podem gerar impactos ambientais e a saúde do operador, para evitar isso, técnicas como a usinagem a seco, refrigeração pela técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) e sistemas de refrigeração criogênica vem sendo testados com êxito. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo onde a técnica MQL se alia a aplicação de ar comprimido resfriado, chamada de *minimum quantity cooling lubrication* (MQCL), e avaliar o efeito da sua utilização na rugosidade da peça e na vida útil da ferramenta.

Para esta pesquisa foram realizados ensaios de usinagem em um corpo de prova de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1045 com 100 mm de diâmetro, comparando a utilização do sistema MQCL com o sistema por Jorro utilizando insertos de metal duro. Foi elaborado um planejamento experimental fatorial completo de 2^3 , baseado em *Design of Experiments* (DOE), com três fatores e dois níveis, para os fatores de vc, velocidade do avanço e uso de refrigeração (Jorro e MQCL), totalizando 8 condições diferentes. As variáveis de saída foram a Rugosidade Ra, a morfologia do cavaco e o desgaste de flanco dos insertos.

Palavras-chave: aço ABNT 1045, refrigeração MQCL, rugosidade, DOE, Projeto de Produto.

ABSTRACT

HALCSIK, V. M. C. REFRIGERATION DEVICE DESIGN FOR TURNING MACHINING PROCESS FOR MICROS AND SMALL BUSINESSES WITH A FOCUS ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 72 p. Professional Master's Dissertation in Management and Technology in Production Systems. Paula Souza State Center for Technological Education, São Paulo, 2022.

Turning is a machining operation based on the removal of material in the form of a chip, by shear caused by the edge of a tool, causing the plastic deformation of the material for the formation of the chip and a large part of the mechanical energy supplied by the machine (more than 90 %) turns into heat. This heat produces a concentration of thermal energy in a small region in the chip-tool contact that can reach above 1000°C, depending on the machining parameters.

The generated heat allows less effort in material shear, but the high temperature acts as a catalyst for the wear mechanisms of the tool, reducing its useful life, and may even change the macro and micro dimensional characteristics of a part. Therefore, it is necessary to control the temperature, in the form of the application of cutting fluid (FC) or refrigerant fluids (FR) in the region of the cutting zone (ZC). It is known that the incorrect use of these fluids can generate environmental impacts and the health of the operator, to avoid this, techniques such as dry machining, cooling by the technique of minimum quantity of lubricant (MQL) and cryogenic cooling systems have been tested with success. This work aims to develop a low-cost device where the MQL technique is combined with the application of cooled compressed air, called minimum quantity cooling lubrication (MQCL), and to evaluate the effect of its use on the roughness of the part and on the useful life of the part. tool.

For this research, machining tests were carried out on a specimen of a cylindrical ABNT 1045 steel bar with 100 mm in diameter, comparing the use of the MQCL system with the jet system using carbide inserts. A complete factorial experimental design of 23 was elaborated, based on Design of Experiments (DOE), with three factors and two levels, for the factors of v_c , feedrate and use of cooling (Gout and MQCL), totaling 8 different conditions. The output variables were Roughness R_a , chip morphology and insert flank wear.

Keywords: ABNT 1045 steel, MQCL coolant, roughness, DOE, Product Design.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critério de classificação das empresas.....	89
Quadro 2 - Diretrizes de pesquisa em DSR.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do material do corpo de prova	96
Tabela 2 - Parâmetros recalculados	96
Tabela 3 - Análise da variância preliminar da rugosidade Ra.	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de forças no corte ortogonal.....	81
Figura 2 - Forma dos cavacos.	82
Figura 3 - Distribuição da temperatura na ponta da ferramenta de MD.	83
Figura 4 - Representação esquemática dos métodos de aplicação.....	86
Figura 5 - Separação do fluxo de ar comprimido em fluxo quente e frio.	87
Figura 6 - Representação do parâmetro de rugosidade R_a	88
Figura 7 - Artigos publicados durante o recorte temporal.....	92
Figura 8 - Esquema de montagem do sistema MQCL	94
Figura 9 - Subsistema MQCL.....	95
Figura 10 - Sistema MQCL montado no Torno	95
Figura 11 - Resultados da medição da rugosidade Ra.....	98
Figura 12 - Gráfico para interações da Rugosidade Ra	98

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI American Iron and Steel Institute
Al Alumínio
ANOVA Análise de variância
 a_p Profundidade de usinagem [mm]
BAR Unidade de pressão
CAD *Computer Aided Design*
CAGR *Compound Annual Growth Rate*
CVD *Chemical Vapor Deposition*
Cu Cobre
Co Cobalto
CO₂ Dióxido de carbono
DOE *Design of Experiments*
DSR *Design Science Research*
FC Fluido de Corte
Fe Ferro
FR Fluido refrigerante
ISO *International Organization for Standardization*
KT Desgaste de Entalhe
MD Metal Duro
ml/h Mililitros por hora
MQL *Minimum Quantity Lubrication*
MQCL *Minimum Quantity Cooling Lubrication*
Ni Níquel
re Raio de ponta [mm]
RHVT *Ranque-Hilsch Vortex Tube*
RPM Rotações por minuto
V Vanádio
VB desgaste de flanco [mm]
vc Velocidade de corte [mm/min]
vf Velocidade de avanço [mm/rev]
WC Carboneto de Tungstênio
ZC Zona de Corte

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	78
1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	80
1.1 Processos de Fabricação	80
1.1.1 Usinagem.....	80
1.1.2 Ferramentas de Corte	83
1.1.3 Lubrificação.....	84
1.1.4 Parâmetros de Rugosidade Superficial	88
1.2 Micro e Pequenas Empresas	89
2 CAMINHO METODOLÓGICO	91
2.1 Bibliometria sobre MQCL no torneamento	91
2.2 A metodologia <i>Design Science Research</i> (DSR).....	92
2.3 D.O.E – Design of Experiments	93
2.4 Projeto do Sistema MQCL	94
2.5 O Material do Corpo de Prova	95
2.6 Elaboração dos Ensaios de Usinagem	96
2.7 Máquinas e equipamentos	97
3 RESULTADOS (INOVAÇÃO/ INTERVENÇÃO/ RECOMENDAÇÕES)	98
4 CONTRIBUIÇÕES PARA A ORGANIZAÇÃO E/OU SOCIEDADE.....	100
REFERÊNCIAS.....	101
ANEXO 1.....	103

INTRODUÇÃO

O processo de torneamento ainda é um dos mais importantes da usinagem, sendo um dos mais utilizados no ramo metal mecânico na produção de peças para as mais diversas aplicações. Nos processos de usinagem convencional o movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça provoca um aumento de tensão que excede o limite de cisalhamento do material, proporcionando assim a formação do cavaco e consequente retirada de material da peça. (MACHADO *et al.*, 2015)

Durante esse processo, toda energia mecânica fornecida pela máquina é usada para a deformação plástica sendo quase toda transformada em energia térmica, gerando aumento de temperatura na ZC. A maior parte dessa energia térmica gerada é dissipada para o cavaco, uma pequena parte fica no material da peça e ambiente, e o restante, por volta de 20%, é dissipado na ferramenta.

O principal parâmetro de usinagem que influencia no aumento da temperatura no conjunto material-ferramenta é a *vc*. (TRENT; WRIGHT, 2000)

Considerando-se que o custo de um processo de usinagem é baseado na taxa de remoção do material (material removido/tempo), sempre se busca o aumento da *vc*, de modo a tornar os processos mais produtivos. Porém, existem limites para o aumento da *vc*, em função das temperaturas mais elevadas geradas por este aumento. O calor auxilia no processo de deformação plástica facilitando o cisalhamento do cavaco, porém, as altas temperaturas na ZC aceleram os mecanismos de desgaste da ferramenta, o que resulta em vida útil mais curta e consequentemente maior custo operacional.

Desta forma o controle da temperatura é parte essencial do processo. Entre as formas de controle está a aplicação de técnicas de lubrificação da ZC: aplicação em jorro ou a alta pressão de FC e o uso da mínima quantidade de lubrificante (MQL). (MACHADO *et al.*, 2015)

Além do controle da temperatura a lubrificação possui outras funções como: prevenir a formação de aresta postiça, facilitar a retirada do cavaco da ZC, proteger a superfície usinada contra a corrosão, reduzir a dilatação térmica da peça, prevenir avaria e a ocorrência de tensões residuais na estrutura superficial da peça usinada. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)

Apesar dos benefícios da aplicação de FC ou FR a indústria metal mecânica passa por grande pressão, para que se reduza o seu uso; um dos fatores é o custo que representa de 15% a 20% do custo total de produção e outro se refere aos resíduos gerados por esses processos e os riscos à saúde dos trabalhadores. A redução de tais fatores requer monitoramento, análise, e compreensão para desenvolvimento de uma tecnologia de usinagem ambientalmente limpa como a mínima quantidade de lubrificação (MQL), a usinagem criogênica e usinagem a seco. (EL-HOFY, 2013)

Este trabalho propõe construir um novo dispositivo com técnicas de refrigeração de baixo impacto ao meio ambiente e que seja acessível às micro e pequenas empresas, tendo desempenho semelhante aos meios já adotados sem causar perda na qualidade dos produtos.

A técnica do *Design Science Research* (DSR) foi a metodologia adotada para este trabalho pela necessidade de produzir um artefato viável, desenvolvendo soluções baseadas em tecnologia para resolução problemas relevantes as organizações, onde sua eficácia precisa ser rigorosamente demonstrada por meio de métodos de avaliação bem executados. (HEVNER *et al.*, 2004)

De tal modo, determinou-se como objetivo geral: desenvolver e validar um dispositivo de baixo custo e ambientalmente amigável na aplicação da refrigeração do processo de usinagem no torneamento, visando à utilização por empresas de micro e pequeno porte do ramo da metalmecânica.

Como objetivos específicos são:

- d) Verificar e avaliar estatisticamente a forma com que os parâmetros de v_c e v_f e método de refrigeração influenciam na variável rugosidade R_a .

Verificar a morfologia do cavaco produzido pelos diferentes ensaios.

Realizar uma análise superfície de folga após a usinagem, comparando os métodos de refrigeração dos ensaios.

Para verificar e avaliar estatisticamente o dispositivo foi utilizado o Planejamento de Experimentos (*Design of Experiment* - DOE), que é uma metodologia estatística utilizada como um método de resolução de problemas e melhoria da qualidade e desempenho de um processo. A principal característica do DOE está na identificação de variáveis que influenciam as características da qualidade em um processo, baseado na alteração das suas variáveis de entrada e verificando os possíveis efeitos na variável de saída. (FIRKA, 2011)

Os protocolos de experimentos e análises estatísticas foram feitos com o auxílio do Minitab®. Um *software* de computador para aplicações em estatística, muito utilizado por universidades e empresas.

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS UTILIZADOS NA PESQUISA

A constante necessidade de aumento de produtividade, modelo de produção mais sustentável, exige igual empenho na melhoria dos materiais, processos de fabricação, ferramentas, equipamentos e demais aspectos envolvidos. Tornando obrigatório o estudo dos elementos que compõem o processo de fabricação. Este levantamento e análise da base teórica são importantes para a compreensão dos resultados e fenômenos provenientes do trabalho realizado.

1.1 Processos de Fabricação

Um Processo de Fabricação é a atividade que transforma as matérias-primas em produtos acabados de maneira planejada e organizada, particularmente associado ao conceito de manufatura, ou seja, feito à mão. Entretanto após a primeira Revolução Industrial (século XVIII) a ideia de manufatura tem um novo sentido, associado a fabricação industrial, devido a grande utilização de máquinas e equipamentos na execução das atividades produtivas (LIANG; SHIH, 2016).

Na área de fabricação mecânica existem diversos processos de manufatura, que são classificados quanto à remoção de material ou não. Dentre os diferentes processos o mais empregado e objeto deste estudo é a usinagem.

1.1.1 Usinagem

A usinagem é um processo de fabricação que se caracteriza, por conferir a um determinado material, forma, dimensões e acabamento desejados ou a combinação destes por meio da remoção de parte do material na forma de aparas ou cavacos, combinando a ação de máquinas e ferramentas.

A usinagem pode ser classificada basicamente em convencional e não convencional. Enquanto a usinagem convencional utiliza-se essencialmente de energia mecânica para a remoção de material a não convencional pode utilizar-se de energia térmica, química, eletroquímica ou mecânica pela ação abrasiva de um elemento (jato d'água) contra o material, ou até mesmo uma associação delas (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

A usinagem convencional é classificada pelo método de remoção de material, corte com ferramenta de geometria definida e abrasão com ferramenta de geometria não definida (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008; GROOVER, 2013).

A usinagem convencional executa a remoção do material por meio da ação de penetração de uma ferramenta mais dura do que o material da peça, em um movimento relativo entre peça e ferramenta. As principais operações de usinagem convencional são agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada para a sua execução (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

A usinagem por meio de corte do material pode ser realizada em duas etapas: desbaste e acabamento. O desbaste tem como principal função remover a maior quantidade de material, no menor tempo, garantindo material suficiente (sobremetal) para o acabamento, respeitando os limites do equipamento e da ferramenta. Já o acabamento é a remoção do sobremetal deixado pela operação de

desbaste, onde a qualidade final (dimensão, tolerância e acabamento de superfície) da peça é essencial (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008; GROOVER, 2013).

Apesar de ser o processo fabricação mais utilizado, a usinagem possui desvantagens, como o impacto sobre o meio ambiente e riscos ao trabalhador, provenientes de ruído, calor e resíduos. Deste modo, precauções de segurança devem ser tomadas de maneira a eliminar ou ao menos reduzir os efeitos negativos dos processos de usinagem (YOUSSEF; EL-HOFY, 2008).

Torneamento

O torneamento caracteriza-se pela combinação de dois movimentos relativos: rotação da peça (material) e o movimento de avanço de uma ferramenta monocortante ao longo da peça, provocando a remoção externa ou interna de material, utilizado principalmente para a obtenção de peças cilíndricas ou que possuam um perfil de revolução sobre o próprio eixo.

Formação do Cavaco

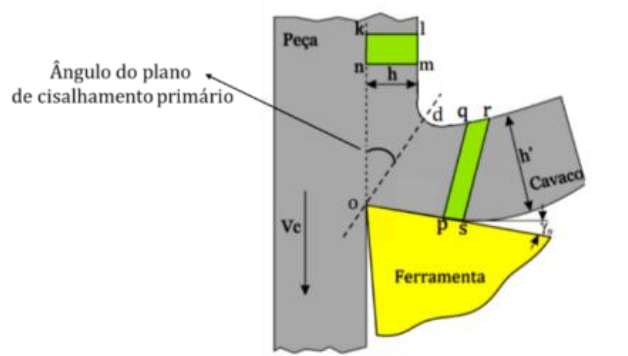
O cavaco é o principal subproduto presente nos processos de usinagem entre eles o torneamento. Em cada operação de usinagem ou mesmo em uma única operação, o cavaco pode variar na sua forma, tipo, extensão *etc.* (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do FC, entre outros. Estão também envolvidos com o processo de formação do cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador e a utilização adequada da máquina-ferramenta.

Mecanismo de formação do cavaco

A formação do cavaco em condições normais de trabalho com ferramentas de metal duro ou aço rápido é um fenômeno periódico (ocorre ciclicamente) mesmo quando da formação do cavaco contínuo (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2015). O processo de formação do cavaco se divide em quatro partes Figura 6.

Figura 33 - Diagrama de forças no corte ortogonal.



Fonte: adaptado de MACHADO *et al.* (2015)

1ª etapa: A ação da ferramenta recalca o volume “klmn” e o metal começa a sofrer deformações elásticas (recalque).

2ª etapa: Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura.




















3ª etapa: A ruptura se inicia com a trinca no ponto “O” podendo prosseguir até o ponto “D”. A região destes campos de tensões e deformações plásticas, chamada de zona de cisalhamento primária, é de forma simplificada representada na Figura por um plano definido pela linha “OD”. A extensão da trinca iniciada no ponto “O” é que vai determinar a classe do cavaco.

4ª etapa: Após o volume “klmn” passar pela zona de cisalhamento primário, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato “pqrs”, e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se a região da zona de cisalhamento secundária.

Tipos de cavaco

O cavaco assume várias formas e tamanhos nas operações de usinagem. Em função das velocidades de corte, dos materiais e das ferramentas utilizadas. Uma grande de deformação ocorre na região de corte em um pequeno intervalo de tempo, e alguns dos materiais e ligas não podem suportar esta tensão sem fratura. No entanto, sob a maioria das condições de corte, metais dúcteis e ligas não fraturam no plano de cisalhamento, e um cavaco contínuo é produzido. Cavacos contínuos podem adotar muitas formas, como fita, helicoidal, espiral *etc.* Figura 7 (TRENT; WRIGHT, 2000).

Figura 34 - Forma dos cavacos.

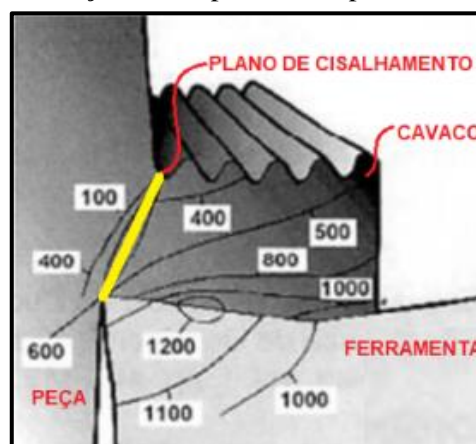
1	2	3	4	5	6	7	8
Cavaco em fita	Cavaco tubular	Cavaco helicoidal tipo arruela	Cavaco helicoidal	Cavaco espiral	Cavaco em arco	Cavaco fragmentado	Cavaco tipo agulha
							
Curto	Curto	Curto	Curto	Plano	Solto		
							
Longo	Longo	Longo	Longo	Cônico	Conectado		
							
Emaranhado	Emaranhado	Emaranhado	Emaranhado	Curto			

Fonte: adaptado de Trent e Wright (2000).

Temperatura de Corte

Durante o corte do metal, para deformar uma porção de material e superar o atrito entre a ferramenta e a peça, a energia utilizada é praticamente toda convertida em calor, gerando altas temperaturas na região da interface de corte (Figura 10). A elevação da temperatura na zona primária e secundária facilita a usinagem, diminuindo a resistência mecânica do material favorecendo a deformação plástica. Porém essas temperaturas afetam o desempenho da usinagem, influenciando nas propriedades mecânicas do material usinado e na vida útil da ferramenta, afetando o custo e impactando economicamente a operação. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO *et al.*, 2015; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Figura 35 - Distribuição da temperatura na ponta da ferramenta de MD.



Fonte: adaptado de Diniz; Marcondes e Coppini (2013).

A temperatura aumenta conforme aumenta a taxa da remoção de material, seja pelo aumento da v_c ou pelo aumento da profundidade de corte (ap) ou do aumento do avanço (vf). Sendo a Velocidade de corte a mais influente, com o aumento desta, a força de corte diminui e a taxa da qual a energia se dissipa aumenta (MACHADO *et al.*, 2015).

1.1.2 Ferramentas de Corte

Machado *et al.* (2015) afirmam que as ferramentas de corte podem ser fabricadas em diversos materiais para a usinagem em geral e definiram que entre as principais propriedades que as ferramentas de corte devem possuir são:

- e) Elevada dureza;
- f) Tenacidade para suportar impactos e não falhar por fratura;
- g) Resistência ao desgaste abrasivo;
- h) Alta resistência mecânica para suportar os esforços de usinagem;
- i) Capacidade de ser inerte quimicamente;

Porém nenhuma delas possui todas as propriedades que são desejáveis para usinar determinado material, sendo preciso escolher a melhor opção para cada aplicação.

O desenvolvimento de novos materiais para ferramentas se acelera no início e do século XX com a prensagem e sinterização da mistura de pó de carboneto de tungstênio (WC) com pó de metais ligantes geralmente cobalto (Co), níquel (Ni) ou ferro (Fe), tal material ficaria conhecido como metal duro (MD).

O processo se inicia com a seleção dos materiais a serem misturados. Posteriormente a prensagem, processo no qual a mistura dos pós é compactada em moldes (formas das ferramentas) em tamanho maior que o produto. Posteriormente, passam pelo processo de sinterização onde as ferramentas são aquecidas a temperaturas entre 1300 °C e 1500 °C, fundindo o metal ligante, preenchendo então os vazios entre os grãos dos carbonetos, reduzindo seu volume e resultando em uma ferramenta de elevada dureza (SANDVIK COROMANT ACADEMY, 2011).

O MD foi considerado uma grande descoberta, visto que ela trazia uma excelente união das propriedades de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. Pesquisas posteriores permitiram a adição de novos materiais o que possibilitou uma grande melhoria no desempenho com maiores taxas de remoção e melhores condições de corte (maiores v_c , v_f e a_p) proporcionado pelos ganhos em resistência ao desgaste, tornando o MD o material mais indicado para utilização na usinagem da maioria dos materiais conhecidos (MACHADO *et al.*, 2015).

O mercado de ferramentas de metal duro foi avaliado em US\$ 10,6 bilhões em 2020 e deve chegar a US\$ 15,3 bilhões até 2028; apesar da pandemia do COVID-19 ter abalado vários setores como: manufatura, automotiva, semicondutores e eletrônicos, petróleo e gás, mineração, aviação e outras especialmente as pequenas e médias empresas. No entanto, com a crescente necessidade de produtos de saúde, a demanda por ferramentas de metal duro aumentou nas indústrias médicas, e com a retomada da produção a perspectiva de que cresça a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,8% de 2021 a 2028. (REPORTLINKER, 2021)

1.1.3 Lubrificação

Durante o corte devido aos esforços de usinagem são geradas grandes quantidades de calor, de modo a reduzir a formação do calor são utilizados fluidos refrigerantes com diferentes composições e propriedades. A escolha e aplicação correta do FC trazem benefícios. Ele deve ser aplicado de maneira que permita sua chegada o mais próximo possível da ZC dentro da interface ferramenta/cavaco, a fim de assegurar que suas funções sejam desempenhadas apropriadamente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO *et al.*, 2015; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Porém, são vários os problemas causados pela má utilização e descarte inadequado que vão dos efeitos nocivos ao trabalhador até a agressão do meio ambiente tornando a indústria metal mecânica um possível agressor do meio ambiente. (ALVES; OLIVEIRA, 2007)

Função e funcionamento da lubrificação

As principais funções da lubrificação segundo Diniz; Marcondes e Coppini (2013) são:

- j) Prevenir a ocorrência de aresta postiça lubrificando a aresta de corte;
- k) Promover a retirada do cavaco da região de corte por meio do fluxo contínuo de fluido refrigerante em alta pressão;
- l) Proteger a superfície usinada contra a corrosão;
- m) Reduzir a dilatação (distorção) térmica da peça, com o fim de facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas;
- n) Evitar danos à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície do peço usinada (no caso de processos de retificação).

De modo a cumprir estas funções com maior eficiência, o FC deve possuir algumas características como:

- o) Viscosidade ideal para fluir e aderir à superfície da ferramenta
- p) Alta condutividade térmica e alto calor específico (resistência a evaporação em altas temperaturas e pressões);
- q) Capacidade de se espalhar bem no material para estabelecer um bom contato térmico.
- r) Boas propriedades antissoldantes e antifricção;

Tipos de fluidos de corte

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), os fluidos de corte são comumente classificados como:

- s) Óleos puros ou de corte são óleos minerais, animais, vegetais ou sintéticos usados sem diluição com água.
- t) Fluidos à base de água são emulsões diluídas em água, que proporcionam menos lubrificação, mas melhor capacidade de resfriamento e limpeza de cavacos do que óleos puros. Existem três tipos básicos: óleos solúveis, semissintéticos e sintéticos.
- u) Fluidos gasosos são usados como fluidos de corte, em aplicações em que resíduos de fluido não são tolerados (aplicações médicas e aeroespaciais), os mais usados são ar, hélio, CO₂, argônio e nitrogênio sendo o ar o mais comum devido ao seu baixo custo.
- v) Óleos névoas consistem em pequenas gotas de óleo à base de água misturadas com ar, são aplicados em dois métodos: aspiração e métodos de pressão direta são mais adequados para aplicações nas quais a refrigeração por jorro é impraticável, suas principais desvantagens são a tendência de entupimento dos bicos e a exposição do operador à inalação de névoa, que tem consequências adversas para a saúde.
- w) Fluidos criogênicos (com pontos de ebulição abaixo de -150°C) são usados para usinar e retificar materiais endurecidos, sendo o nitrogênio líquido (LN₂) o refrigerante criogênico mais comum, embora argônio líquido e CO₂ líquido também sejam usados.

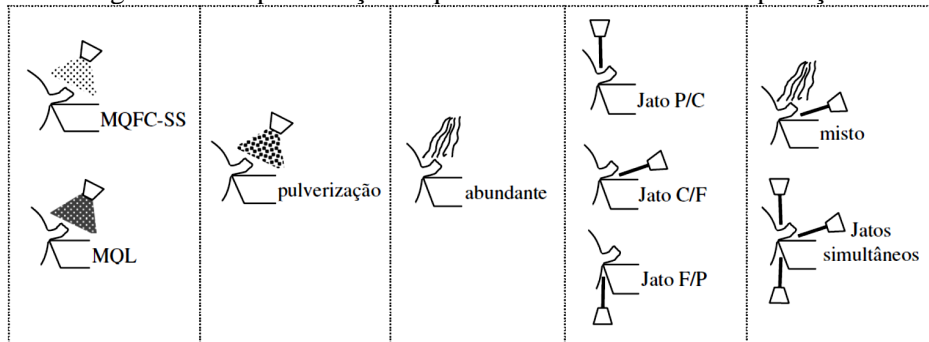
Métodos de Aplicação da Lubrificação

A eficácia dos fluidos de corte depende em grande parte do método de sua entrada na ZC. Existem quatro métodos básicos de aplicação de refrigerante:

- x) Abundante: Com menor pressão e maior área de contato;
- y) Jato: Possuindo uma maior pressão e menor área de contato;
- z) MQL (mínima quantidade de FC): Névoa formada pela mistura de FC e ar comprimida, também chamada de usinagem quase seca.
- aa) Pulverização: Múltiplas gotas aplicadas sob pressão.

As direções mais comuns de aplicação do FC são na interface C/F (cavaco-ferramenta), nas costas do cavaco entre P/C (peça e cavaco), e no contato entre F/P (ferramenta e peça) no flanco da ferramenta. Ainda é possível fazer aplicações simultâneas. Estas formas de aplicações, assim como os tipos de jorros podem ser observadas na Figura 11.

Figura 36 - Representação esquemática dos métodos de aplicação.



Fonte: Adaptado de Sanchez, Nalon e Palma (2011)

Problemas Causados à Saúde e ao Meio Ambiente

Apesar das diversas vantagens proporcionadas pela lubrificação, o seu uso apresenta algumas desvantagens relacionadas a questão da sustentabilidade seja social, ambiental ou econômica. Os fluidos de corte nas suas diversas variações possuem em sua composição inúmeros elementos químicos nocivos à saúde e ao meio ambiente. O descarte dos fluidos é uma atividade onerosa, pois necessita de reciclagem exigida pelas rigorosas regulamentações ambientais que controlam esta e outras atividades. A exposição aos fluidos de corte em forma líquida ou em névoa podem trazer diversos efeitos adversos à saúde. Os meios mais comuns de exposição são pelo contato dérmico (pele) e a inalação. Também pode acontecer de forma menos comum, através de um corte aberto ou pela ingestão oral. (ALVES; OLIVEIRA, 2007; STEPHENSON; AGAPIOU, 2016)

Refrigeração por tubo de vórtice

Grande parte dos fluidos pode acabar sendo prejudiciais ao meio ambiente e a saúde do operador quando utilizado de forma inadequada. A usinagem a seco torna-se uma opção vantajosa e uma das muitas técnicas de usinagem a seco é o uso de ar comprimido resfriado.

O ar comprimido frio possui as características de dissipar o calor na área da interface ferramenta/peça/cavacos, resfriar a ferramenta e a peça, assim com expulsar o cavaco solto da ZC. O

processo de resfriamento com o uso de ar comprimido frio é realizado por um tubo vórtice, conhecido como tubo vórtice Ranque-Hilsch (RHVT). São equipamentos mecânicos sem partes móveis, de design simples, em pequenos tamanhos e pouco peso, que basicamente possuem a função de produzir um resfriamento, separando o fluxo de ar em quente e frio (Figura 12). Utiliza pressões relativamente baixas, tipicamente entre 6 e 9 BAR. Eles trabalham gerando um vórtice externo e um vórtice interno, onde o externo irá remover o calor transmitido pelo interno, deste modo, em uma extremidade irá sair o ar quente e na outra extremidade irá sair o ar frio. (PATWARI *et al.*, 2015; DRAGIČEVIĆ, 2018)

Figura 37 - Separação do fluxo de ar comprimido em fluxo quente e frio.



Fonte: autor adaptado de Patwari *et al.* (2015)

Refrigeração MQCL

O conceito de manufatura sustentável surgiu na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) em 1992 e representa um dos principais componentes do desenvolvimento sustentável. A fabricação verde é a base da estratégia de desenvolvimento sustentável na indústria de usinagem e alcançar o desenvolvimento sustentável exige mudanças nos processos de usinagem, na relação dos tipos e quantidades de recursos utilizados, no tratamento de resíduos, no controle das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e nos produtos produzidos. (DRAGIČEVIĆ, 2018)

A usinagem a seco é classificada como a técnica ecologicamente mais correta aplicada com sucesso em muitos dos processos de usinagem. As vantagens da usinagem a seco incluem ausência de poluição ambiental, redução dos custos de descarte e limpeza, sem perigo para a saúde dos trabalhadores. Entretanto a eliminação dos fluidos de corte acarreta a perda de seus benefícios, como resfriamento, lubrificação e lavagem de cavacos. A usinagem a seco exige materiais avançados para ferramentas de corte e revestimentos de ferramentas, mas são muito caros e aumentam os custos totais de usinagem. Como uma solução alternativa em termos de manufatura sustentável e melhoria da qualidade dos produtos acabados pode-se utilizar a técnica MQL. (DRAGIČEVIĆ, 2018)

De acordo com Klocke (2011), Stephenson e Agapiou (2016), o MQL é um método de usinagem quase seco no qual a refrigeração é fornecida como uma névoa fina de aerossol à base de água. O óleo é consumido no processo, em vez de coletado, filtrado e reutilizado.

Uma evolução da tecnologia MQL é a técnica MQCL (*Minimum Quantity Cooling Lubrication*) mínima quantidade de líquido resfriado onde com emulsões, água (com aditivos), ar frio

ou gases fluidos. Nesta tecnologia o FC ou o ar são resfriados potencializando a capacidade de resfriamento do FC, isto é conseguido com ou sem um ar comprimido.

No caso de sistemas *airless*, a ferramenta é abastecida por uma bomba que produz gotículas individuais, sucessivas, finamente dosadas, geralmente de óleo. No segundo caso, o meio é atomizado em gotas ultrafinas com a ajuda de ar comprimido resfriado e fornecido como aerossol ao local de usinagem. Apesar de relativamente pouco usado e, portanto, pouco conhecido pelos usuários, pode, no entanto, contribuir para a solução de problemas térmicos na ferramenta ou componente em operações de usinagem a seco. (KLOCKE, 2011)

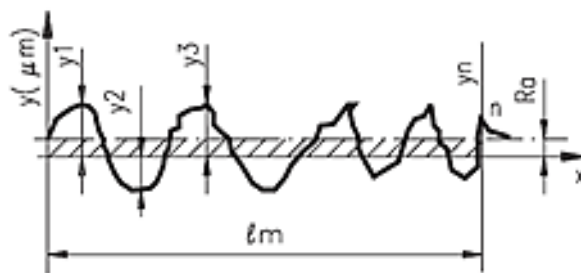
1.1.4 Parâmetros de Rugosidade Superficial

Qualquer superfície, por mais lisa que pareça, apresentará irregularidades superficiais ao ser observado em maior ampliação e esse é um fator importante na avaliação da qualidade de peças usinadas conhecido com rugosidade superficial.

Para Machado *et al.* (2015), a rugosidade ou textura de uma superfície é composta de erros micro geométricos (saliências e reentrâncias) presentes nas peças, que são resultantes dos processos de fabricação utilizados e dependem da interação entre o conjunto máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, da lubrificação e parâmetros de corte, dentre outros, sendo muito utilizada como parâmetro de saída para controle dos processos de usinagem.

A quantificação da rugosidade pode ser feita em diferentes parâmetros, sendo o mais comum à rugosidade média por meio dos parâmetros R_a , sendo a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos (Y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação a linha média ao longo do comprimento medido (l_m) Figura 13. (SANTOS e SALES, 2007; MACHADO *et al.*, 2015)

Figura 38 - Representação do parâmetro de rugosidade R_a



Fonte: adaptado de Camargo (2002)

O parâmetro R_a , por exemplo, expressa a altura média aritmética do perfil, definida como a distância média absoluta da altura do perfil à sua linha média num determinado comprimento de avaliação. Seu cálculo é feito conforme as expressões na Equação 4. Devido a simplicidade de medição e análise, esse parâmetro tem sido o mais utilizado nas análises superficiais historicamente. (SANTOS e SALES, 2007)

$$Ra = \frac{|y1| + |y2| + \dots + |yn|}{n}$$

Equação 7

No processo de torneamento a remoção contínua do cavaco associada a rotação da peça gera um perfil periódico ondulado fazendo com que o espaçamento dos vales acompanhe a v_f e o perfil do raio de ponta da ferramenta. Neste caso, o valor teórico de Ra pode ser calculado conforme a Equação 5, onde f é a v_f e r_e é o raio de pontada ferramenta. (MACHADO *et al.*, 2015)

$$Ra = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_e}$$

Equação 8

A verificação da rugosidade segue procedimentos determinados pelas normas NBR ISO 4287 e NBR ISO 4288 que orientam a medição e cálculo dos parâmetros de rugosidade para perfis periódicos e não periódicos, também recomendam valores para o comprimento de apalramento e comprimento de amostragem. (ABNT, 2002)

1.2 Micro e Pequenas Empresas

As Pequenas e Microempresas podem ser definidas por dois critérios, faturamento ou número de funcionários Quadro 1. O critério faturamento está previsto na Lei Complementar nº 123/06 (BRASIL, 2006), que institui o estatuto nacional da microempresa e da empresa de pequeno porte, onde também são previstos quais os tipos societários que podem ser adotados e as atividades que são vedadas para MPEs (micro e pequenas empresas).

Quadro 4 - Critério de classificação das empresas.

Porte	Indústria	Comércio e serviços	Renda anual (R\$)
Micro empresa	até 19 pessoas	até 9 pessoas	≤ 360 mil
Pequena empresa	de 20 a 99 pessoas	de 10 a 49 pessoas	> 360 mil e ≤ 4,8 milhões
Média empresa	de 100 a 499 pessoas	de 50 a 99 pessoas	> 4,8 milhões e ≤ 300 milhões
Grande empresa	500 pessoas ou mais	100 pessoas ou mais	> 300 milhões

Fonte: adaptado de DIEESE (2021) e BNDES (2022)

O setor industrial é responsável por 21,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, dos 467.744 estabelecimentos existentes, 93,8% deles são micros e pequenas empresas. Além disso, representam 32,9% dos empregos com registro em carteira do setor privado. A indústria paulista é responsável 42,2% da exportação nacional de produtos manufaturados. O estado de São Paulo é o estado com maior número de industriais no Brasil. São 120.901, que representam 25,8% da indústria nacional, destas 66,7% são microempresas e 25,5% são pequenas. O setor de produtos de metas e metalurgia representam juntos 5% das indústrias paulistas. (CNI, 2020)

Gestão de resíduos nas MPEs

O governo federal por meio de diversas leis determina a Política de Gestão de Resíduos Sólidos e Efluentes, nos diferentes segmentos econômicos. Porém, como visto anteriormente, apenas no segmento industrial no estado de São Paulo mais de 92% das indústrias, são micro e pequenas empresas. Estas empresas recebem tratamento diferente quanto as médias e grandes empresas no que toca a Gestão de Resíduos. (BRASIL, 2010)

Buson (2017) em seu trabalho de comparação entre as MPEs do Brasil e da União Europeia, conclui que o Brasil tem avançado muito na questão ambiental, mas deveria estar bem melhor, se não fosse o protecionismo dado as MPEs, porém ressalta as limitações imposta a essas empresas no que tange a possibilidade de faturamento.

Picchiai e Senigalia (2019) em seu trabalho buscaram evidenciar o conhecimento e a percepção dos administradores das MPEs quanto à legislação sobre a gestão dos resíduos sólidos na Região do ABC Paulista, por meio de coleta documental, entrevistas in loco e questionário. Verificou-se que mais de 60% dos administradores de MPEs não possuem conhecimentos básicos sobre as leis e normas que regem a gestão dos resíduos sólidos e demais compromissos ambientais, como a obrigatoriedade de possuir licenciamento ambiental quanto ao impacto local ou eventual obrigatoriedade de executar um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), extrapolando para os dados apresentados anteriormente.

Stumpf, Theis e Schreiber (2018) realizaram um estudo sobre conhecimento e aplicação da gestão de resíduos em quatro empresas da área metalmeccânica que possuíam certificação ambiental, localizadas na cidade de São Leopoldo, RS por meio de entrevista em profundidade, levantamento documental e observação não participante. Constataram que as empresas que possuem um sistema de gestão ambiental, apresentam resultados mais expressivos quanto a compreensão dos processos de gerenciamento de resíduos e da necessidade de ações de cunho ambiental junto aos colaboradores. Nas outras organizações estudadas, verificou-se dificuldade de entendimento quanto aos assuntos avaliados, por parte dos respondentes da pesquisa, principalmente no que se refere ao gerenciamento de resíduos.

2 CAMINHO METODOLÓGICO

Neste capítulo são detalhadas as metodologias usadas para a execução deste trabalho. As atividades foram divididas em cinco etapas, Bibliometria, Projeto e Montagem do Sistema MQCL, Elaboração dos ensaios, Tratamento e análise dos dados dos ensaios, e conclusão.

2.1 Bibliometria sobre MQCL no torneamento

De modo a verificar a relevância da pesquisa e formar uma base de informações foi realizado um estudo bibliométrico. Definida como uma ferramenta estatística que por meio da análise quantitativa das publicações científicas, permite a geração de indicadores que possibilitam a avaliação do desempenho de temas, pesquisadores, instituições *etc.*

Para Araújo (2006) a análise de citações é a parte mais importante da bibliometria, permitindo a identificação e descrição de diferentes padrões na produção científica. Através delas é possível identificar: os autores mais citados, os mais produtivos, fator de impacto dos autores, grupos de pesquisa, as instituições e países de origem das publicações; tipo de documento mais utilizado, idade média e a obsolescência da literatura utilizada *etc.*

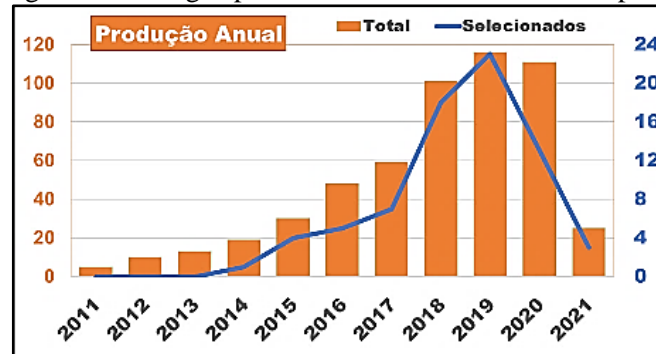
O fator de impacto é medido por diferentes índices, sendo o mais utilizado o *h-index*. Esse índice determina que um pesquisador tem índice “ $h=N$ ” se o seu número de publicações “ N ” receber um número “ N ” de citações cada uma, ou seja, um pesquisador com $h10$ tem ao menos 10 artigos com pelo menos 10 citações cada um. (HIRSCH, 2005)

A busca foi realizada através do software de recuperação e análise de citações acadêmicas, *Publisher o Perish* (PoP), nas bases de dados do *Google Scholar* e *Scopus*, excluindo citações e patentes, pela expressão “MQCL”, no período de 2011 a 2021.

Com o próprio PoP foram eliminados aqueles que não possuíam citações, sendo os resultados exportados para o *software* ENDNOTE, onde foi verificada a ocorrência de duplicidades e publicações em idioma que não fosse o Inglês, passando pela aplicação de filtros na análise do Abstract com as seguintes expressões AND “*turning*” e NOT “*grandinho*”, “*drilling*”, “*mailing*”, “*nano*”, dos resultados obtidos foram lidos os resumos para estabelecer a sua adesão ao tema. Para o tratamento bibliométrico foi feita uma padronização dos dados encontrados, de modo a eliminar incongruências, permitindo a criação de listas que exportadas para o Excel possibilitaram a representação gráfica dos resultados.

Através da busca com o PoP nas bases de dados, foram encontrados 909 trabalhos que com a eliminação dos não citados resultando em 600 estudos que exportados para o EndNote passaram por uma verificação onde foram eliminados os artigos duplicados e com idioma diferente do inglês, resultando em 537 artigos. Com a aplicação dos filtros, os resultados foram refinados para 74 artigos que após a verificação de disponibilidade seguida pela leitura dos resumos chegou-se à quantidade de 42 artigos que foram usados para a análise bibliométrica Figura 15.

Figura 39 - Artigos publicados durante o recorte temporal



Fonte: autor, dados coletados do Google Scholar (2021)

Esse estudo permitiu a verificação de possíveis redes de colaboração entre os autores e a relevância dos periódicos segundo classificação no Qualis-Periódicos da Plataforma Sucupira. De modo a incrementar a base de dados também foram realizadas buscas no portal de periódicos da Capes e em alguns dos repositórios das principais universidades brasileiras, além de buscas das referências bibliográficas dos artigos selecionados.

2.2 A metodologia *Design Science Research* (DSR)

A pesquisa é quantitativa de natureza aplicada com caráter exploratório e procedimentos experimentais. A metodologia adotada para este trabalho é a de *Design Science Research* (DSR). O método descreve uma sequência de passos a serem seguidos, contendo as seguintes diretrizes Quadro 2. (HEVNER *et al.*, 2004)

Quadro 5 - Diretrizes de pesquisa em DSR.

DIRETRIZES	DESCRIÇÃO
Diretriz 1: Design como um artefato	DSR deve produzir um artefato viável na forma de uma construção, um modelo, um método ou uma instanciação.
Diretriz 2: Relevância do Problema	O objetivo da DSR é desenvolver soluções baseadas em tecnologia para problemas importantes e relevantes para organizações e empresas.
Diretriz 3: Avaliação de Projeto	A utilidade, qualidade e eficácia de um artefato de design devem ser rigorosamente demonstradas por meio de métodos de avaliação bem executados.
Diretriz 4: Contribuições de pesquisa	Uma DSR eficaz deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas de artefato de design, fundamentos de design e / ou metodologias de design.
Diretriz 5: Rigor de Pesquisa	A DSR depende da aplicação de métodos rigorosos tanto na construção quanto na avaliação do artefato de design.
Diretriz 6: Design como um processo de pesquisa	A busca por um artefato eficaz requer a utilização dos meios disponíveis para alcançar os fins desejados e, ao mesmo tempo, satisfazer as leis do ambiente do problema.
Diretriz 7: Comunicação de Pesquisa	A DSR deve ser apresentada de forma eficaz tanto para pessoas orientadas a tecnologia quanto para a gestão

Fonte: adaptado de Hevner *et al.* (2004)

Para Lacerda *et al.* (2013) a DSR tem por responsabilidade idealizar e validar sistemas que ainda não existem, seja criando, recombinao ou alterando produtos, processos, *softwares* ou métodos de modo à aprimorar as condições existentes.

A DSR, por sua vez, permite ao pesquisador não apenas explorar, descrever ou explicar um determinado fenômeno, mas também projetar ou prescrever soluções para um determinado problema. A DSR é um método que associa intervenções ou sistemas aos resultados de modo a resolver problemas reais e não apenas teóricos, sendo dessa forma uma metodologia pragmática, que desenvolve conhecimento geral, válido para resolver problemas das demandas referentes à sua aplicação para o ambiente ao qual foi destinado. (LACERDA *et al.*, 2013; DRESCH *et al.*, 2015)

Desta forma entende-se o projeto MQCL como um artefato, para a solução de problemas referentes aos aspectos econômicos ambientais das micro e pequenas empresas da área de fabricação mecânica, possibilitando a elas acesso a tecnologias.

2.3 D.O.E – Design of Experiments

De modo a garantir o rigor científico da pesquisa elaborou-se um planejamento experimental, onde foi traçada a estratégia de experimentação com os parâmetros e os métodos de refrigeração definidos, utilizou-se do DOE–*Design of Experiments*, que proporciona uma abordagem direcionada e é capaz determinar a interação entre múltiplas variáveis de entrada e o resultado de saída também integrando métodos simples e poderosos de análises estatísticas que possibilitam conclusões sólidas (CAVAZZUTI, 2013).

PARK (2007) afirma que a metodologia DOE possibilita a alocação sistemática dos recursos e os resultados dos experimentos são analisados estatisticamente, permitindo que se obtenha o máximo de dados com uma quantidade mínima de experimentos.

A experimentação é parte fundamental desta pesquisa, assim como em diferentes problemas de engenharia, sendo geralmente usada para estudar o desempenho de sistemas e processos. Um processo como o torneamento, pode ser descrito como uma combinação de diferentes recursos como: máquinas, métodos, pessoas etc. e que transformam algumas variáveis de entrada em uma ou mais variáveis de saída (respostas observáveis). Algumas das variáveis do processo podem ser controladas, enquanto outras não podem (variáveis de ruído) como flutuações de temperatura ambiente, flutuações de umidade, variações de matéria-prima, etc. (CAVAZZUTI, 2013).

Os três princípios básicos para planejar experimentos (DOE) são: a replicação ou repetições dos experimentos, a randomização ou manutenção do acaso (aleatoriedade) de cada etapa, e a formação de blocos ou sistematização de conjuntos homogêneos para evitar erros devido à variabilidade dos elementos. A aplicação efetiva destes princípios visa minimizar os efeitos das variáveis ruído (ANTONY, 2003).

Dentre as diferentes estratégias existentes para o DOE será usada para este trabalho a do fatorial completo, a estratégia mais comum e intuitiva de planejamento experimental. Na forma mais simples, o fatorial completo de dois níveis, existe k fatores e $L = 2$ níveis por fator. As amostras são dadas por todas as combinações possíveis dos valores dos fatores. Portanto, o tamanho da amostra é $n = 2^k$ (CAVAZZUTI, 2013).

$$L^k = n^{\circ} \text{ ensaios}$$

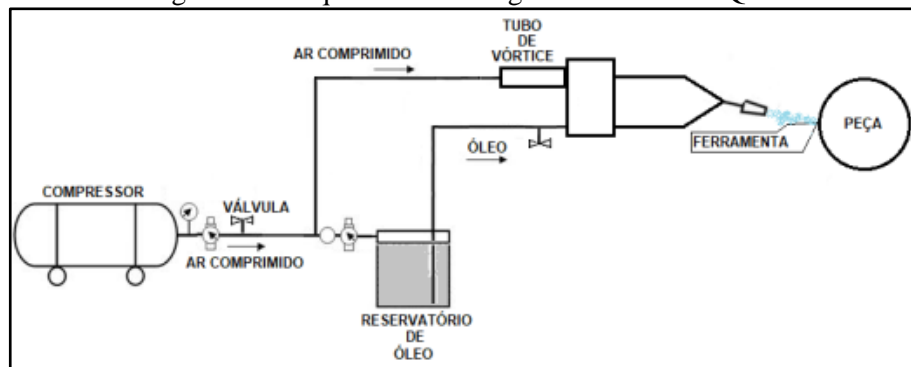
Equação 6

O mercado disponibiliza inúmeros *softwares* para identificação dos fatores significativos e análises estatísticas dos dados obtidos, foi escolhido o Minitab por ser uma ferramenta simples e poderosa para interpretação dos resultados (ANTONY, 2003).

2.4 Projeto do Sistema MQCL

O projeto do sistema de refrigeração MQCL abrange dois subsistemas: o subsistema de refrigeração do ar comprimido por meio de tubo de vórtice e o subsistema de pulverização, responsável por gerar a névoa do fluido lubrificadorrefrigerante. Os fluxos de ar comprimido resfriado e de névoa se misturam em um bico posicionado próximo a ZC na interface cavaco/ferramenta Figura 16.

Figura 40 - Esquema de montagem do sistema MQCL



Fonte: Autor

A alimentação de ar comprimido de todo o sistema é feito por um compressor de 20 pés, com capacidade de 200 Litros, pressão de 175 lbf/pol² e deslocamento teórico (vazão) de 576 l/min. A interação entre os dois subsistemas, fornece refrigeração na ZC a baixas temperaturas, entre 5°C e -5°C, variando em função da temperatura do ar comprimido fornecido pelo compressor.

Subsistema de resfriamento do ar comprimido

O subsistema de resfriamento do ar comprimido consiste de um tubo de vórtice comercial, adquirido para esta dissertação, fabricado em alumínio, com válvula de controle de fluxo, silenciador e válvula geradora de vórtice, possui para conexões para entrada de ar comprimido e para a saída do ar resfriado, pressão máxima de trabalho de 6,9 BAR.

O tubo de recebe ar comprimido por meio de um filtro secador acoplado ao subsistema de pulverização sem controle de fluxo, porém, com a pressão controlada em 6 BAR.

Subsistema de pulverização

O subsistema consiste em um reservatório de fluido refrigerante pressurizado a 2 bar, conectado a um sistema MQL fabricado para esta dissertação, composto por um bloco em alumínio com galerias internas e conexões para as entradas de ar, fluido pressurizado, e saída de névoa. As entradas possuem válvula de controle de fluxo simples para o ar comprimido e válvula de controle de fluxo com ajuste fino para o fluido refrigerante Figura 18.

Figura 41 - Subsistema MQCL



Fonte: autor

Seu funcionamento se dá pelo efeito Venturi, causando sucção de outro fluido introduzido por um terceiro duto na zona de estreitamento. (GROOVER, 2013)

A vazão do MQL foi ajustada para uma média de 60 ml/h, o fluxo foi coletado em uma proveta graduada por 5min, e repetido por cinco vezes de onde se tirou a média da vazão.

O sistema montado foi fixado ao castelo de ferramentas do torno com dois imãs de neodímio com capacidade de carga de 20 kg cada. O bico do sistema foi posicionado de modo a fornecer a refrigeração na ZC Figura 22.

Figura 42 - Sistema MQCL montado no Torno



Fonte: Autor

2.5 O Material do Corpo de Prova

Para os ensaios utilizou-se como corpo de prova uma barra cilíndrica de aço ABNT 1045, com canais que possibilitaram 6 amostras, permitindo a variação dos parâmetros de cada ensaio. Com Ø100 mm x 170 mm, em 6 partes de 20 mm com canais de 3 mm de largura por 8 mm de profundidade, reservando 35 mm como área de pega com diâmetro de 50 mm para as castanhas do torno, formando assim um comprimento de usinagem de 120 mm.

A composição química foi fornecida pelo fabricante conforme a Tabela 1.

Tabela 7- Composição química do material do corpo de prova

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	N	Al	Fe
Teor %	0,46	0,61	0,25	0,013	0,032	0,14	0,054	0,028	Balanço

Fonte: fabricante GGD metals.

A escolha do material se deu em função de ser um material comum a maioria das micro e pequenas empresas da área metalmeccânica.

2.6 Elaboração dos Ensaios de Usinagem

Seriam utilizados parâmetros, v_c (330 m/min) e v_f (0,25 mm/rev), recomendados pelos fabricantes de ferramentas para o material utilizado. Porém, devido as limitações do torno mecânico quanto a gama de rotações, as velocidades de corte e avanço foram recalculadas para avanços e rotações próximas as definidas pelos dados recomendados, conforme Equação 6.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 9}$$

As v_c s recalculadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 8 - Parâmetros recalculados

Parâmetros	v_c (m/min)	v_f (mm/rev)	a_p (mm)	RPM
Recomendados	298	0,251	1	9500
Condição econômica	188	0,125	1	600

Fonte: autor

Para a fase de planejamento foi definido um protocolo de ensaios, onde foram definidas três variáveis de entrada (v_c , v_f , meio de refrigeração) cada uma com 2 níveis (v_c 188 e 298 m/min, v_f 0,12 e 0,25 mm/ver, e o meio de refrigeração por Jorro e MQCL) sendo a variável de resposta (saída) a rugosidade R_a .

Com o auxílio do *software* Minitab®, foi criado um planejamento para realização dos experimentos fatoriais baseados em DOE. Foi escolhido o método de fatoriais completos por permitir combinações entre fatores e níveis de fatores, proporcionando a estruturação das rodadas do experimento. Os resultados obtidos a cada combinação vão determinar efeitos de interações em variáveis respostas em diferentes níveis. O Minitab® possibilita a ordenação aleatória das diferentes combinações dos fatores e níveis que serão avaliados em relação à cada rodada de experimentos, possibilita também a replicação, ou seja, a repetição de cada um dos experimentos mantendo a aleatoriedade.

Sendo 3 os fatores (k) com 2 níveis (n), resultam em 8 ensaios. Somadas a mais 2 réplicas (repetição dos ensaios), resultando em 24 ensaios. Os inserts foram substituídos após cada ensaio de maneira a evitar a possibilidade de que uma variável não controlável (ruído), como um possível desgaste ou avaria do inserto provoca-se alterações da rugosidade.

Para verificar a influência do método de refrigeração no desgaste de flanco da ferramenta também foram realizados ensaios de vida da ferramenta nas condições recomendadas pelo fabricante

com ap de 1 mm para cada método de refrigeração, conforme recomendações da NBR ISO 3685:2017, que descreve os procedimentos necessários para ensaios de torneamento com ferramentas de aresta única. (ABNT, 2017)

2.7 Máquinas e equipamentos

Os ensaios foram realizados no laboratório de usinagem da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, em ambiente com temperatura controlada em 21°C em um torno mecânico universal da marca Nardini modelo NODUS 220 GOLD, com 7,5 cavalos de potência com 18 rotações entre 30 e 2360 RPM, com 280 velocidades de avanço entre 0,04 e 10,09 mm/rev, com sistema de refrigeração de vazão máxima de 8 L/min.

A ferramenta utilizada nos ensaios foi o inserto intercambiável QNMG 120408 – TF com cobertura CVD IC 9025 fornecidos pela Iscar, com 8 arestas, com formato romboidal e ângulo de ponta de 80°, ângulo de folga de 0°, raio de ponta de 0,8 mm. Indicado para usinagem média com vc entre 150 e 300 m/min, vf de 0,12 a 0,35 mm/rev e ap entre 1,0 e 4,0 mm. O quebra cavaco do tipo TF possui comprimento de 1,8 mm e ângulo de saída de 13°. Montada em um suporte de ferramenta utilizado foi o PQLNR 2020K-12, com ângulo de posição de 95°, ângulo de folga de -6° e ângulo de saída de -6°.

Durante os ensaios de usinagem a rugosidade foi medida com um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest SJ-301. Foram realizadas três medições para cada ensaio, o corpo de prova foi rotacionado em 120° entre cada medição. Baseada na norma ABNT NBR ISO 4288 adotou-se um cut-off (λ) de 2,5 mm. (ABNT, 2008)

Para análise do desgaste das ferramentas e dos cavacos as micrografias foram feitas com um microscópio ótico digital resolução HD sob luz branca, conectado ao computador, assistido por *software* Cooling Tech com ampliações de 10x.

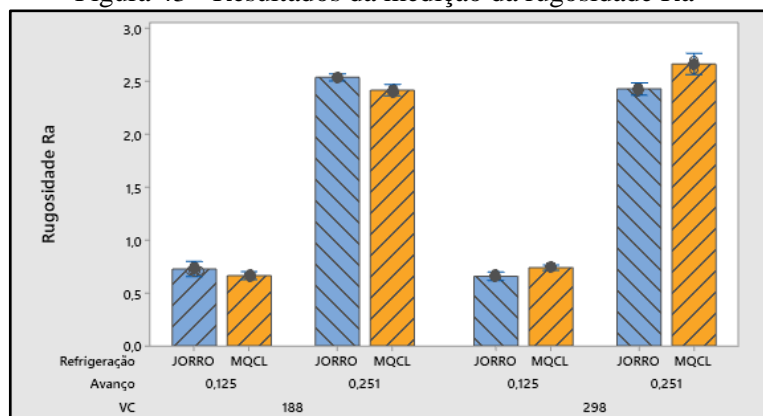
3 RESULTADOS (INOVAÇÃO/ INTERVENÇÃO/ RECOMENDAÇÕES)

A partir da utilização do sistema de refrigeração desenvolvido, foram realizados os ensaios, primeiramente para a análise da rugosidade e da morfologia cavaco, definidos pelo plano de experimentos elaborado por meio do D.O.E., em seguida a verificação do desgaste de flanco da ferramenta nas condições recomendadas pelo fabricante com ap de 1 mm para cada método de refrigeração, conforme recomendações da NBR ISO 3685:2017. (ABNT, 2017)

Análise da Rugosidade da Superfície Usinada Ra

As medições de rugosidade foram feitas após cada um dos ensaios, foram realizadas três medições para cada ensaio, com rotação do CP para as posições 0°, 120° e 240°. De modo a verificar graficamente as médias das rugosidades Ra para cada interação de fatores, foi elaborado um gráfico por meio do Minitab® sendo apresentadas na Figura 29.

Figura 43 - Resultados da medição da rugosidade Ra

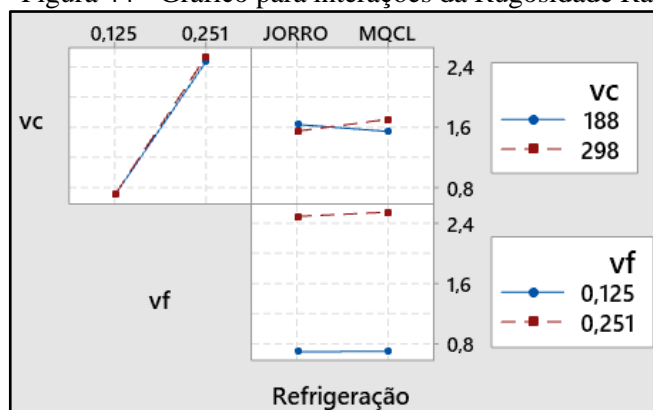


Fonte: autor

Observou-se que para a vc (188 m/min) mais baixa o sistema MQCL produz uma rugosidade 8,8% menor do que o Jorro para vf de 0,125 mm/rev e de 4,7% para a mesma vc com vf de 0,251 mm/rev. Já na vc (298 m/min) mais alta não ofereceu o mesmo desempenho, para a vf de 0,125 mm/rev a rugosidade foi 12,6% maior que a do jorro e para a vf de 0,251 mm/rev foi 9,7% maior.

As interações provenientes do planejamento de experimento, para a variável de saída rugosidade e os fatores de entrada: vc, vf, e método de refrigeração são apresentados na Figura 30.

Figura 44 - Gráfico para interações da Rugosidade Ra



Fonte: Autor.

Elaborou-se, por meio do *software* Minitab®, uma análise de variância preliminar (ANOVA) da rugosidade considerando todas as variáveis de entrada: meio de refrigeração, vc e vf. Foi adotado um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5% (Valor-p < 0,05) Tabela 6, observou-se que as variáveis: vc e meio de refrigeração não foram significativas, a variação delas não produz variação da rugosidade. A análise mostra que a variável vf causa alterações significativas o que vai de encontro a literatura, também a correlação entre vc e meio de refrigeração apresentou relativa significância para os ensaios realizados. O coeficiente de correlação (R^2) foi de 99,87%, para o Ra indicando que os fatores utilizados para esta análise explicam o comportamento dessas rugosidades.

Tabela 9 - Análise da variância preliminar da rugosidade Ra.

Variáveis	GL	SQ	Contribuição	QM	F	Valor-P
VC	1	0,0078	0,04%	0,0078	5,19	0,036
Avanço	1	19,7533	99,27%	19,7533	13109,81	0,000
Refrigeração	1	0,0064	0,03%	0,0064	4,28	0,054
VC*Avanço	1	0,0064	0,03%	0,0064	4,28	0,054
VC*Refrigeração	1	0,0946	0,48%	0,0946	62,77	0,000
Avanço*Refrigeração	1	0,0034	0,02%	0,0034	2,27	0,150
Erro	17	0,0256	0,13%	0,0015		
Falta de ajuste	1	0,0171	0,09%	0,0171	31,94	0,000
Erro puro	16	0,0085	0,04%	0,0005	*	*
Total	23	19,8976	100,00%			

Fonte: autor

Análise da morfologia do cavaco

Os cavacos foram coletados após cada ensaio, não foi verificada, alteração na forma do cavaco quando mantidos os parâmetros e meio de refrigeração, mesmo nas réplicas.

Os cavacos apresentaram uma coloração azul em todos os ensaios. Quanto à forma, variaram do tipo arruela para arruela com algum emaranhamento para as condições de jorro na vc de 188 m/min, ainda na condição de jorro, mas na vc de 298 m/min os cavacos apresentaram forma Helicoidal curta evoluindo um pouco no comprimento. Na condição de refrigeração MQCL a forma do cavaco fora predominantemente de cavacos em Arcos Conectados, com algumas variações para arcos soltos.

Análise do desgaste de flanco (VB)

Para a análise da superfície flanco, seguiu-se a NBR ISO 3685, fixaram-se os parâmetros na condição: vc de 300 m/min e vf em 0,25 mm/ver, com ap de 1 mm, os ensaios foram replicados. Como critério de vida foi fixado VB= 0,3 mm, não sendo admitido desgaste de entalhe KT de modo a evitar o colapso do inserto.

Durante os ensaios não foram percebidas a ocorrência de aresta postiça, porém percebe-se a alteração da coloração da cobertura do inserto pela elevação da temperatura causada pelo atrito, nota-se adesão de material a superfície de folga do inserto, causada pelo choque do cavaco antes de partir.

Nos ensaios com jorro foram executados 30 passes (6 min ou 5100 mm usinados) e nos ensaios com MQCL foram executados 11 passes (2,1 min ou 1785 mm usinados) até a ocorrência do desgaste de entalhe, não foram verificados desgaste de flanco significativo. Os ensaios foram interrompidos devido a ocorrência de desgaste de entalhe para as duas condições de refrigeração.

4 CONTRIBUIÇÕES PARA A ORGANIZAÇÃO E/OU SOCIEDADE

Os resultados do sistema MQCL na comparação com a refrigeração em jorro apresentam um sistema promissor, ainda necessitando de ajustes.

Ainda que em alguns pontos fique abaixo do método de jorro, se sobressai em pontos como:

- bb) a economia gerada, pela redução no uso de fluidos;
- cc) a eliminação de custos com pós-tratamento de resíduos;
- dd) a produção de cavacos limpos, isentos de fluidos.

Apesar de ter um custo mais alto (por volta de 30%) do que os fluidos refrigerantes usuais, ainda assim se justifica o uso de um fluido específico para MQCL, frente a grande redução na aplicação dele, acima de 95%. Como visto anteriormente o custo com o pós-tratamento dos efluentes pode representar até 20% do faturamento de uma empresa, o que para uma pequena ou microempresa, inviabiliza uma possibilidade de crescimento em função do comprometimento das receitas. Outra grande vantagem é a possibilidade da comercialização do principal subproduto da usinagem, “o cavaco”, por sair isento de resíduos e seco se torna mais atrativo para as siderúrgicas que trabalham com materiais reciclados.

Como continuidade deste trabalho devem ser executados novos ensaios com um inserto sem revestimento e com geometria diferente, para uma nova coleta de dados e verificação mais apurada da interação entre os diferentes parâmetros e rugosidade superficial, assim como a levantamento da vida útil a partir da análise do VB.

Deve-se verificar também a possibilidade da aplicação de fluídos mais sustentáveis como os do tipo orgânico a base de óleos vegetais com diferentes vazões a fim de se obter uma vazão ótima para esse tipo de fluido.

A utilização de um torno CNC ao invés do mecânico é uma mudança a ser considerada como facilitadora para a execução dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR ISO 4287:2002 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. , 2002.
- ABNT. NBR ISO 4288:2008 - Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. , 2008.
- ABNT. NBR ISO 3685:2017 - Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. , 2017.
- ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. DE. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Production*, v. 17, n. 1, p. 129–138, abr. 2007.
- ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 1. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2003.
- ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 10 dez. 2006.
- BRASIL. LEI COMPLEMENTAR Nº 123, de 14 de Dezembro de 2006. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. 2006.
- BRASIL. 12.305. Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. 2010.
- BUSON, L. S. L. *Gestão de Resíduos Sólidos Industriais em Micro e Pequenas Empresas: Uma comparação entre países da União Europeia e Brasil*. Porto: Faculdade de Economia do Porto, 2017.
- CAVAZZUTI, M. *Optimization Methods: From Theory to Design*. Modena: Springer Berlim, Heidelberg, 2013.
- CNI. CNI - Perfil da Indústria nos Estados. Disponível em: <<http://perfil.portaldaindustria.com.br>>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- DE CAMARGO, R. *Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento*. Santa Bárbara d'Oeste: Centro SENAI - Fundação Romi Formação de Formadores, 2002.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- DRAGIČEVIĆ, M. The Application of Alternative Techniques for Cooling, Flushing and Lubrication to Improve Efficiency of Machining Processes. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, v. 25, n. 5, out. 2018.
- DRESCH, A. et al. Uma análise distintiva entre o estudo de caso, a pesquisa-ação e a design science research. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, v. 17, n. 56, p. 1116–1133, 2015.
- EL-HOFY, H. A.-G. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- FIRKA, D. Statistical, technical and sociological dimensions of design of experiments. *The TQM Journal*, v. 23, n. 4, p. 435–445, 14 jun. 2011.
- GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems*. 5º ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- HEVNER et al. Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75, 2004.
- HIRSCH, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 102, n. 46, p. 16569–16572, 15 nov. 2005.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gestão & Produção*, v. 20, n. 4, p. 741–761, 26 nov. 2013.

LIANG, S. Y.; SHIH, A. J. Analysis of Machining and Machine Tools. New York: Springer, 2016.

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. 3^o ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

PARK, G.-J. Analytic Methods for Design Practice. [s.l.] Springer London, 2007.

PATWARI, A. et al. Thermal Investigation of Vortex Generated Green Coolant on Surface Texture for Drilling Process. *Procedia Engineering*, v. 105, p. 808–813, 1 jan. 2015.

PICCHIALI, D.; SENIGALIA, F. Gestão de Resíduos Sólidos Integrada às Responsabilidades das Micro e Pequenas Empresas e do Poder Público Municipal. *Desenvolvimento em Questão*, v. 17, n. 49, p. 112–135, 17 out. 2019.

REPORTLINKER. Carbide Tools Market Forecast to 2028 - COVID-19 Impact and Global Analysis By Tool Type, Configuration, and End-User. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2021/05/20/2233154/0/en/Carbide-Tools-Market-Forecast-to-2028-COVID-19-Impact-and-Global-Analysis-By-Tool-Type-Configuration-and-End-User.html>>. Acesso em: 23 fev. 2022.

SANDVIK COROMANT ACADEMY. Manual Técnico em Tecnologia de Usinagem. Sandviken: [s.n.].

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. ASPECTOS TRIBOLOGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS. São Paulo: ARTLIBER, 2007.

STEPHENSON, D.; AGAPIOU, J. Metal Cutting Theory and Practice by Stephenson and Agapiou. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

STUMPF, U. D.; THEIS, V.; SCHREIBER, D. Gestão de Resíduos Sólidos em Empresas Metalomecânicas de Pequeno Porte. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 2, p. 230–247, 9 maio 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal cutting. 4. ed. Woburn: Butterworth–Heinemann, 2000.

YOUSSEF, H. A.; EL-HOFY, H. Machining technology: machine tools and operations. Boca Raton: CRC Press, 2008.

ANEXO 1
DETALHAMENTO DO PRODUTO (CAPES)
RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO¹

Organização: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETEPS)

PPG: Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos

Autores:

Aluno: Vitor Marcelo Costa Halcsik

Professor Orientador: Alexandre Formigoni

Dissertação vinculada (título): Projeto de dispositivo de refrigeração para processo de usinagem por torneamento para micros e pequenas empresas com foco em desenvolvimento sustentável

Data da defesa: 27 / 08 /2022

Setor beneficiado com o projeto de pesquisa, realizado no âmbito do PPG: Produção e Serviços.

A produção técnica é constituída pelo próprio produto?

☒ Sim

☐ Não. Qual o grau contribuição diretamente aplicada ao produto:

☐ Excepcional; ☐ Incremental; ☐ Residual

Descrição do produto e finalidade (até 50 palavras):

Dispositivo de refrigeração de baixo custo e ambientalmente amigável para o processo de torneamento aplicável a micro e pequenas empresas com foco em desenvolvimento sustentável.

Avanços tecnológicos / grau de novidade:

☐ Produção com alto teor inovativo: Desenvolvimento com base em conhecimento inédito;

☒ Produção com médio teor inovativo: Combinação de conhecimentos pré-estabelecidos;

☐ Produção com baixo teor inovativo: Adaptação de conhecimento existente;

☐ Produção sem inovação aparente: Produção técnica.

Conexão com a Pesquisa:

PPG: Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos

Projeto de pesquisa vinculado à produção: Inovação de processos e desenvolvimento de produtos

Linha de pesquisa vinculada à produção: Gestão da produção e operações

☐ Projeto isolado, sem vínculo com o PPG

Conexão com a produção científica

Título: Métodos de refrigeração no torneamento: uma análise bibliométrica

Periódico: South American Development Society Journal

Outros dados: vol.6, n.18, (2020), páginas: 350 a 364

DOI: <http://dx.doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v6i18p350-364>

Aplicabilidade da Produção Tecnológica

Descrição da Abrangência realizada: O protótipo desenvolvido é aplicável a operações de torneamento podendo ser adaptado com algumas modificações pra outros processos de usinagem

¹ Definição: Texto elaborado de maneira concisa, contendo informações sobre o projeto/atividade, realizadas. Indica em seu conteúdo a relevância dos resultados e conclusão em termos de impacto social e/ou econômico e a aplicação do conhecimento produzido. Não se aplica a relatório de projeto de pesquisa financiado por agências de fomento

como, fresamento ou até mesmo a furação desde que não seja profunda. Os principais beneficiários são as micro e pequenas empresa, porem não há impedimento para sua utilização por empresas de grande porte.

Descrição da Abrangência potencial: O dispositivo proposto pode abranger outros tipos de operações com a variação da vazão de fluído ou do ar comprimido variando assim a temperatura do sistema de refrigeração.

Descrição da Replicabilidade: A replicação e validação dos experimentos são possíveis seguindo-se a metodologia adotada, entretanto há a possibilidade de resultados ligeiramente diferentes em função das variações inerentes ao processo quer sejam de equipamentos, ambiente ou material.