

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EMERSON DA SILVA SEIXAS

**INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO MQL E MQL-
CRIOGÊNICO NO PROCESSO DE ROSCAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI
304L**

CURITIBA

2022

EMERSON DA SILVA SEIXAS

**INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO MQL E MQL-
CRIOGÊNICO NO PROCESSO DE ROSCAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI
304L**

**Influence of MQL and MQL-cryogenic lubrication systems in the threading
process of AISI 304L stainless steel**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica
e de Materiais, Programa Pós-graduação Engenharia
Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Eng. Milton Luiz Polli.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



EMERSON DA SILVA SEIXAS

INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO MQL E MQL-CRIOGÊNICO NO PROCESSO DE ROSCAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 13 de Setembro de 2022

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Antonio Xavier, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Dr. Paulo Andre De Camargo Beltrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/09/2022.

Dedico este trabalho à minha esposa Miria e ao meu
filho Lucas pelo apoio nos meus momentos de
ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e mente sóbria.

Ao meu prezado orientador, professor Dr. Milton Luiz Polli, pelo conhecimento transmitido, paciência exercida com que me guiou nesta trajetória e pela crença na ciência e na tecnologia.

Aos professores, Paulo André de Camargo Beltrão, PhD e Lucas Freitas Berti, Dr.; pelas valiosas sugestões durante o exame de qualificação e que tornaram parte deste trabalho.

À Witek Usinagem e AAM do Brasil, por propiciar o ambiente para a execução dos experimentos.

Ao mestre Alexandre José Gonçalves do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR pelo modo divertido de cooperar durante a aquisição das imagens.

Ao companheiro de profissão e mentor nesta linha de pesquisa Dr. Carlos Costa, que sempre me incentivou a avançar e nunca desistir.

Dedico aos meus tios Iris e Selma, ambos "*in memoriam*" que me acenderam a chama do mestrado/doutorado, ao colega Cássio Guimarães dos Santos "*in memoriam*" que contribuiu para a realização deste sonho e a minha sogra Antonina "*in memoriam*" ao qual me incentivou a vencer mais uma etapa.

Aos meus pais que foram sempre os maiores incentivadores ao estudo como meio para o alcance dos objetivos profissional e pessoal.

RESUMO

As empresas do setor metal-mecânico buscam novas soluções tecnológicas para otimizar processos de usinagem a fim de se manterem competitivas e promover uma manufatura verde. Devido a isso, soluções para o aumento de produtividade e eficiência nos processos de usinagem devem ser continuamente desenvolvidas. O processo de roscamento se torna um dos mais difíceis de se realizar quando se trata de aços inoxidáveis austeníticos, devido à formação e fluxo do cavaco na zona de corte. Este trabalho analisa a influência dos sistemas de lubri-refrigeração MQL e criogênico com CO₂ no roscamento por torneamento externo aplicando os métodos de penetração radial, flanco modificado e incremental no aço inoxidável 304L, e utilizando insertos de metal duro classe M com revestimento PVD (TiC, Al₂O₃ TiN) GC 1020. Para tal foi verificada a morfologia dos cavacos obtidos, comparado o grau de recalque resultante, analisados os desgastes das ferramentas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), e avaliadas as microdurezas dos flancos das roscas obtidas para cada método e sistema utilizado. Com a progressão dos testes observou-se que o método radial foi o que apresentou maior grau de recalque e desgaste da ferramenta em ambos os sistemas lubri-refrigerantes. O emprego dos métodos de flanco modificado e incremental resultou em melhor formação do cavaco com morfologias semelhantes, independentemente do sistema lubri-refrigerante aplicado. Em todas as condições de usinagem testadas ocorreu desgaste da ponta da ferramenta e de flanco, além de adesão de material da peça sobre o flanco e a face da ferramenta. Os melhores resultados foram obtidos com método de penetração incremental utilizando o sistema MQL-criogênico, sendo que este proporcionou menor grau de recalque, maior vida da ferramenta, melhor qualidade das peças usinadas, além de reduzir a microdureza resultante nos flancos dos filetes das roscas quando comparado aos demais métodos e sistemas analisados.

Palavras-chave: roscamento; usinagem criogênica; vida útil da ferramenta; AISI 304L; MQL e CO₂.

ABSTRACT

Companies in the metal-mechanic sector are looking for new technological solutions to optimize machining processes to remain competitive and promote green manufacturing. Due to this, solutions to increase productivity and efficiency in machining processes must be continuously developed. The threading process becomes one of the most difficult to perform when dealing with austenitic stainless steels, due to the chip formation and chip flow in the cutting zone. This work analyzes the influence of MQL and CO₂ cryogenic cooling systems on external turning threading by applying radial, modified flank, and incremental infeed methods on 304L stainless steel, and using PVD coated M-class carbide inserts (TiC, Al₂O₃ TiN) GC 1020. For this purpose, the morphology of the chips obtained was verified, the resulting chip ratio was compared, tool wear was analyzed through the scanning electron microscope (SEM), and the microhardness of the flanks of the threads was obtained for each method and system used. With the progression of the tests, it was observed that the radial method was the one that presented the lowest chip ratio and the highest tool wear for both cooling systems. The use of modified flank and incremental methods resulted in better chip formation with similar morphologies, regardless of the applied cooling system. For all the machining conditions tested, there was wear of the tool tip and flank, in addition to adhesion of the workpiece material on the flank and face of the tool. The best results were obtained with the incremental infeed method using the MQL-cryogenic system, which provided a higher chip ratio, longer tool life, and better quality of the machined parts, in addition to reduction of the resulting microhardness on the flanks of the threads when compared to other methods and systems analyzed.

Keywords: threading; cryogenic machining; tool life; AISI 304L; MQL and CO₂.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Métodos convencionais de torneamento de rosca	14
Figura 2 - Derivação do aço inoxidável austenítico em função de sua composição química.....	18
Figura 3 - Exemplo do ângulo de filete de rosca métrica 60° externa e interna	21
Figura 4 - Ciclo de Roscamento	22
Figura 5 - Classes ISO Metal Duro.....	24
Figura 6 - Dimensões básicas de um inserto para usinagem de rosca	25
Figura 7 - Entrada pelo método de penetração radial	26
Figura 8 - Entrada pelo método de penetração de flanco modificado	27
Figura 9 - Entrada pelo método de penetração de flanco modificado em diferentes sentidos.....	27
Figura 10 - Entrada pelo método de penetração incremental	28
Figura 11 - Formação do cavaco no roscamento do aço inoxidável 304L	30
Figura 12 - Diferentes formas de cavacos.....	31
Figura 13 - Tipos de cavaco em função das propriedades do material	32
Figura 14 - Tipos de cavaco em função das propriedades do material	33
Figura 15 - Tipos de desgaste na ferramenta de corte.....	35
Figura 16 - Diferentes componentes no desgaste da ferramenta.....	37
Figura 17 - Causas de desgaste no roscamento.....	38
Figura 18 - Usinabilidade Relativa dos aços Inoxidáveis	40
Figura 19 - Grupos e subgrupos de sistemas MQL.....	43
Figura 20 - Comprimento de usinagem.....	47
Figura 21 - Comparação entre tecnologias de usinagem com diferentes velocidades de corte	47
Figura 22 - Topologia de superfície para as diferentes alternativas de resfriamento testadas.....	48
Figura 23 - Microestrutura após torneamento usando usinagem a seco e MQL e CO ₂ comparado com a espessura da camada deformada	48
Figura 24 – Corpo de prova.....	51
Figura 25 – Insertos e respectivo suporte para roscamento	52
Figura 26 – Dimensões do inserto.....	52
Figura 27 – CNC ROMI Centur 30D	53
Figura 28 – Sistema MQL.....	54
Figura 29 – Sistema criogênico MQL e CO ₂	54
Figura 30 – Sistema com Microscópio Eletrônico de Varredura EVO MA 15 do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR	55
Figura 31 – Etapas para obtenção de imagens.....	56
Figura 32 – Micro-indentador Wilson-Wolpert Tukon 2100B.....	57
Figura 33 - Esquematização do filete com a marcação equidistantes dos pontos para verificação da microdureza	58
Figura 34 - Cavaco real obtido durante o último passe da quarta peça por meio da penetração radial e esquematização da seção transversal.....	60
Figura 35 - Representação das superfícies inferior e superior do cavaco para o método de penetração de flanco modificado.....	60
Figura 36 - Lado superior dos cavacos obtidos do método de penetração radial, para o último passe da oitava peça	61

Figura 37 - Lado superior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de penetração flanco modificado e incremental, para o último passe da oitava peça.....	62
Figura 38 - Lado inferior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de penetração radial, flanco modificado e incremental, para o último passe da oitava peça	63
Figura 39 - Grau de recalque em função do método de penetração radial durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO ₂	64
Figura 40 - Grau de recalque em função do método de penetração de flanco modificado durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO ₂ .	65
Figura 41 - Grau de recalque em função do método de penetração incremental durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO ₂	66
Figura 42 - Números de peças aprovadas para diferentes métodos de penetração .	67
Figura 43 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração radial após oitava peça	68
Figura 44 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração radial após a oitava peça para o sistema lubri-refrigerante MQL	69
Figura 45 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração radial após a oitava peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e CO ₂	70
Figura 46 - Ferramenta da décima primeira pelo método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL	71
Figura 47 – Ferramentas do método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	72
Figura 48 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e MQL com CO ₂	73
Figura 49 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após a décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL	74
Figura 50 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após a décima sexta peça o sistema lubri-refrigerante MQL e CO ₂	75
Figura 51- Ferramenta da décima nona pelo método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL	76
Figura 52 – Ferramentas usadas no método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	76
Figura 53 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração incremental após décima sexta peça	77
Figura 54 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração incremental após a décima sexta peça para o sistema de lubri-refrigeração MQL ...	78
Figura 55 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração incremental após a décima sexta peça com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	79
Figura 56 - Ferramenta da vigésima segunda pelo método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL	80
Figura 57 – Ferramenta do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	81
Figura 58 - Acabamento superficial obtido por meio do MEV para a oitava peça roscada por meio de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL	82
Figura 59 – Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	83
Figura 60 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração de flanco modificado com sistemas de lubri-refrigeração MQL	83
Figura 61 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	84

Figura 62 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração incremental com sistemas de lubri-refrigeração MQL	85
Figura 63 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	85
Figura 64 - Microdureza em função do método de roscamento no sistema MQL	87
Figura 65 - Microdureza em função do método de roscamento no sistema MQL e CO ₂	87
Quadro 1 - Tipos e aplicações de roscas	20
Quadro 2 - Tipos e formatos de roscas externas	21
Quadro 3 - Tipos de perfil de corte.....	24
Quadro 4 - Ocorrências e recomendações sobre a ferramenta	39
Quadro 5 - Tópicos empregados durante o desenvolvimento do trabalho	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade de corte recomendadas para a execução de roscas 60°, com ferramentas de metal duro em torno CNC	41
Tabela 2 - Diferentes técnicas de lubri-refrigeração	45
Tabela 3 - Composição Química (%) AISI 304 L.....	51
Tabela 4 - Propriedades mecânicas.....	51
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem para penetração radial, flanco modificado e incremental.....	53
Tabela 6 - Análise EDS da oitava peça por meio do método de penetração radial com sistemas de lubri-refrigeração MQL.....	69
Tabela 7 - Análise EDS da oitava peça por meio do método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	70
Tabela 8 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL.....	74
Tabela 9 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	75
Tabela 10 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL.....	78
Tabela 11 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO ₂	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de Corte [mm]
c	Perfil da crista da rosca
CO_2	Dióxido de carbono
d	Diâmetro maior
d_1	Diâmetro menor do parafuso (\varnothing do núcleo)
d_2	Diâmetro efetivo do parafuso (\varnothing médio)
D	Diâmetro maior da porca
D_1	Diâmetro menor da porca (furo)
D_2	Diâmetro efetivo da porca (\varnothing médio)
f	Perfil da raiz da rosca
h	Diâmetro do flanco
h_1	Diâmetro do flanco simples
h	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
H_A	Altura do triângulo teórico da ferramenta
H_c	Altura final do filete
h_e	Altura do filete do parafuso
i	Ângulo do flanco (60° para roscas Métricas e 55° para Roscas Whitworth)
LN_2	Nitrogênio líquido
M	Rosca Métrica [60°]
n	Rotação [rpm]
n_{ap}	Número de passadas
P	Passo da rosca
R_c	Grau de recalque
r_{re}	Raio de arredondamento da raiz do filete do parafuso
r_{ri}	Raio de arredondamento da raiz do filete da porca
r_e	Raio de ponta da ferramenta
s	Espessura do inserto
scCO_2	Dióxido de carbono supercrítico
VB_B	Profundidade de desgaste médio
VB_N	Profundidade de desgaste total
v_c	Velocidade de corte [m/min]
W	Rosca Whitworth [55°]
α	Ângulo do filete da rosca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos do trabalho.....	16
1.2	Organização do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aços inoxidáveis 304L	17
2.2	Características das roscas	19
2.3	Ferramentas para roscamento	22
2.4	Métodos de penetração de roscamento em tornos	25
2.4.1	Método de penetração radial.....	25
2.4.2	Método de penetração de flanco modificado	26
2.4.3	Método de penetração incremental	28
2.5	Mecanismos de formação do cavaco	29
2.5.1	Geometria do cavaco para os métodos de roscamento	33
2.6	Desgaste e critério de vida útil da ferramenta	34
2.7	Usinabilidade dos aços inoxidáveis	40
2.8	Usinagem com MQL	41
2.9	Usinagem MQL e CO ₂	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Material usinado	51
3.2	Ferramenta de roscamento	51
3.3	Máquina-ferramenta	52
3.4	Parâmetros de usinagem.....	53
3.5	Sistema lubri-refrigerante MQL	54
3.6	Sistema criogênico MQL e CO ₂	54
3.7	Medição das peças e aquisição de imagens.....	55
3.7.1	Medição da microdureza	57
3.7.2	Medição do grau de recalque	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Morfologia do cavaco.....	59
4.2	Grau de recalque	64
4.3	Vida da ferramenta	66
4.3.1	Desgaste de ferramenta para o método de penetração radial	67

4.3.2	Desgaste de ferramenta para o método de penetração de flanco modificado	73
4.3.3	Desgaste de ferramenta para o método de penetração incremental.....	77
4.4	Análise das roscas usinadas.....	81
4.5	Influência do método de penetração sobre a microdureza da peça	86
5	CONCLUSÕES	88
5.1	Sugestões para futuros trabalhos	91
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A - Quadro resumo de resultados.....	97
	ANEXO A - Certificado de caracterização do Aço Inoxidável 304 L.	99

1 INTRODUÇÃO

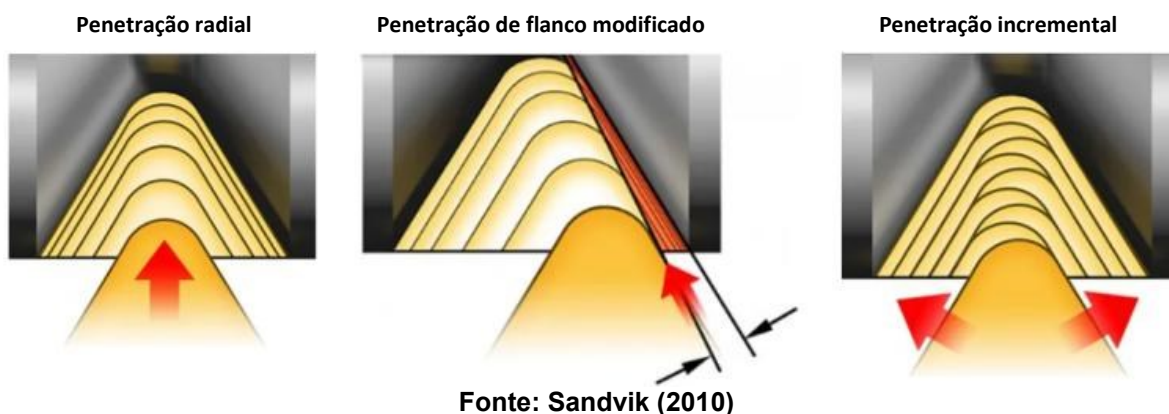
De todos os processos de fabricação, a usinagem é o que possui as mais variadas condições de operação empregadas na indústria metalmeccânica. Quase todos os metais e ligas são usináveis, sejam duros ou moles, dúcteis ou frágeis, com alto ou baixo ponto de fusão. Além da geometria da ferramenta existem os parâmetros de corte, o material da peça e da ferramenta que devem ser considerados. Portanto, o processo deve ser abordado de forma sistêmica e não linear. Entretanto, quando é considerado o processo de usinagem de roscas as dificuldades aumentam, visto que são necessárias ferramentas específicas para geração do perfil da rosca (TRENT e WRIGHT, 2000; NASCIMENTO e ABRAÃO, 2000).

O roscamento por usinagem é um processo mecânico de grande complexidade, que utiliza ferramentas de corte destinados à geração de filetes, por meio da abertura de sulcos helicoidais de passo uniforme em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. O roscamento pode ser externo ou interno, de uma ou múltiplas entradas de sentido para direita, ou esquerda, sendo as ferramentas responsáveis por reproduzirem suas geometrias sobre o material trabalhado por meio da remoção de cavaco (COSTA, 2022).

As roscas possuem conceito, nomenclatura e simbologia bem definidos. São estabelecidos pela NBR 5876/2011, onde uma rosca é uma superfície composta, originada por uma ou mais hélices (rosca cilíndrica) ou espirais cônicas (rosca cônica) coaxiais e de mesmo passo.

Existem três métodos principais de penetração da ferramenta de usinagem de roscas conforme a Figura 1 que podem ser por penetração radial, de flanco modificado ou incremental. O método de penetração determina como o inserto é aplicado à peça para criar o perfil de rosca. A escolha do método de penetração é influenciada pela máquina-ferramenta, geometria do inserto, material da peça, passo e perfil da rosca (SANDVIK, 2010).

Figura 1 - Métodos convencionais de torneamento de rosca



Os métodos de penetração se diferenciam significativamente no deslocamento da ferramenta em relação à peça a ser usinada. O método de penetração radial é perpendicular à linha de centro da peça, além de ser o método mais comum utilizado e o único possível em tornos convencionais. Por outro lado, a penetração de flanco modificado é o método preferido para proporcionar maior vida útil da ferramenta e melhor controle de cavacos. A maioria das máquinas CNC são pré-programadas para este método, desta forma, evita o atrito da aresta secundária do inserto na superfície da peça. Quanto à programação da máquina, o método de penetração incremental é o que apresenta maior dificuldade (SANDVIK, 2010).

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados difíceis de usar devido à suscetibilidade ao endurecimento que induz modificações mecânicas e heterogeneidade comportamental na superfície usinada, e leva à formação de cavacos instáveis e vibração (SAOUBI *et al.*, 1999). Portanto, a falha prematura da ferramenta e comprometimento do acabamento superficial podem ocorrer ao usar esses materiais. Deste modo, usar roscas em aços inoxidáveis sem a aplicação abundante de lubri-refrigerante exige um planejamento de processo criterioso de modo a atingir os requisitos de qualidade da peça e minimizar os custos de fabricação.

Atualmente, devido à necessidade de redução dos impactos ambientais ocasionados principalmente pela utilização de produtos que agredem à natureza, tem-se voltado a atenção à manufatura verde. Sendo assim, algumas empresas adotaram em seus processos de usinagem o sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), cujo princípio baseia-se em aspergir o lubri-refrigerante com auxílio de ar comprimido. Tal ação, está em consonância com as Normas ISO 9000 (Sistema de Gestão da Qualidade), ISO 14000 (Sistema de Gestão Ambiental) e ISO

45001 antiga OHSAS 18001 (Saúde Ocupacional e Série de Avaliação de Segurança). Uma alternativa à lubri-refrigeração MQL é a associação de fluidos criogênicos, aplicados somente na zona de corte de modo a reduzir a temperatura do local. Sendo que os gases criogênicos mais comuns utilizados para este fim são o nitrogênio líquido (LN₂) e dióxido de carbono (CO₂).

Estudos sobre o desgaste da ferramenta e integridade da superfície com a aplicação de sistemas associados de lubri-refrigerantes criogênicos MQL e CO₂ estão sendo feitos por vários pesquisadores, principalmente em aços de difícil usinabilidade. Recentemente a estratégia utilizada foi comparar sistemas MQL e a associação do MQL e CO₂ na usinagem do aço inoxidável AISI 304L. O estudo de WIKAYĚ *et al.* (2019) comprovou que em tais circunstâncias de usinagem não ocorreram diferenças aparentes na microdureza superficial entre os dois métodos de lubri-refrigeração, bem como não houve diferença significativa nas tensões residuais após a usinagem. Porém, houve acréscimo surpreendente na vida útil da ferramenta quando combinado o meio lubri-refrigerante MQL com CO₂, mesmo empregando uma velocidade de corte mais alta (WIKAYĚ *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2016).

Embora os benefícios do lubri-refrigerante MQL-criogênico sejam altamente estratégicos para o processo de usinagem, do ponto de vista da sustentabilidade, seus benefícios são muito mais amplos. Uma vez que, poderia ser reutilizado o CO₂ que é normalmente descartado na atmosfera em processos químicos convencionais. Além disso, após utilizar o CO₂ durante o processo de usinagem há possibilidade de um meio catalizador transformar esse gás em substâncias menos nocivas, o que não afetaria a camada de ozônio (PORUD, *et al.*, 2022).

Em um trabalho anterior realizado por Costa (2022) na linha de pesquisa de otimização de processos de usinagem do PPGEM-CT da UTFPR foi analisada a influência dos métodos de penetração no roscamento por torneamento a seco do aço inoxidável 304L. Apesar de ser uma opção altamente ecológica, a usinagem a seco não atinge os mesmos resultados da aplicação abundante de meios lubri-refrigerantes que são tradicionalmente empregados nesta operação. Neste contexto a presente dissertação é motivada em melhorar o desempenho de ferramentas de metal duro com revestimento (TiC, Al₂O₃ TiN) no roscamento externo do aço inoxidável austenítico AISI 304L propondo o emprego de alternativas sustentáveis como sistemas lubri-refrigerantes MQL e MQL e CO₂ combinados.

1.1 Objetivos do trabalho

Pretende-se avaliar a influência do uso de sistemas de lubri-refrigerantes (MQL, MQL e CO₂) em diferentes métodos de penetração (radial, de flanco modificado e incremental) no roscamento por torneamento externo, buscando assim uma contribuição para os estudos de usinagem de aços AISI 304L em relação à vida útil da ferramenta e a qualidade da rosca obtida.

Os objetivos específicos deste trabalho atendem aos seguintes tópicos:

- a) verificar a morfologia dos cavacos resultantes da aplicação de diferentes métodos de penetração e meios lubri-refrigerantes MQL, MQL e CO₂;
- b) comparar o grau de recalque resultante para os diferentes meios lubri-refrigerantes e métodos de penetração;
- c) analisar os desgastes de ferramenta nos diferentes meios lubri-refrigerantes e métodos de penetração;
- d) comparar a qualidade da rosca obtida com os sistemas lubri-refrigerantes MQL, MQL e CO₂; e
- e) avaliar a microdureza dos flancos da rosca obtidas com os diferentes sistemas (MQL, MQL e CO₂).

1.2 Organização do trabalho

O trabalho está desenvolvido em cinco capítulos fundamentais: O capítulo 1 apresenta a introdução sobre o assunto proposto, a descrição do problema que motivou o estudo, uma breve abordagem sobre o assunto, os objetivos gerais e específicos da pesquisa. O capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos tratados no trabalho e pontos necessários para compreensão dos problemas encontrados durante a pesquisa. Para o capítulo 3 descreve a metodologia, os materiais, equipamentos e instrumentos de medição utilizados no desenvolvimento e execução da pesquisa. O capítulo 4 aborda a apresentação das atividades experimentais e discussão dos respectivos resultados. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas no trabalho. E por fim, completando o trabalho, encontram-se as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica é apresentada uma base teórica de modo a fundamentar o estudo, considerando os principais tópicos que exercem influência na pesquisa:

- Os aços inoxidáveis 304L.
- Características das roscas.
- Aspectos principais no roscamento em torno.
- Estratégias de penetração aplicados ao roscamento em torno: penetração radial, de flanco modificado e incremental.
- Os mecanismos de formação do cavaco e a geometria do cavaco para os métodos de roscamento.
- Desgaste e critério de vida útil da ferramenta.
- Usinabilidade dos aços inoxidáveis.
- Usinagem com uso do MQL.
- Usinagem criogênica com uso do MQL e CO₂.

2.1 Aços inoxidáveis 304L

Por volta de 1912 o inglês Harry Brearly quando pesquisava sobre o aço liga Fe-Cr (13%) verificou que este material era resistente aos reagentes disponíveis na época. Denominou então tal liga de “*stainless steel*”, ou seja, “aço sem manchas” devido à impossibilidade do ataque pelos reagentes. Basicamente no mesmo período, Eduard Maurer na Alemanha estudava material semelhante, porém com o adicional de 8% de níquel. Obteve como resultado principal uma vida maior das propriedades da liga mesmo quando sujeita a vapores considerados de grande agressividade quando comparado aos aços até então pesquisados (CALLISTER, 2002). As ligas então obtidas aproximam-se dos atuais AISI 420 e o AISI 302 sendo o aço martensítico e o austenítico.

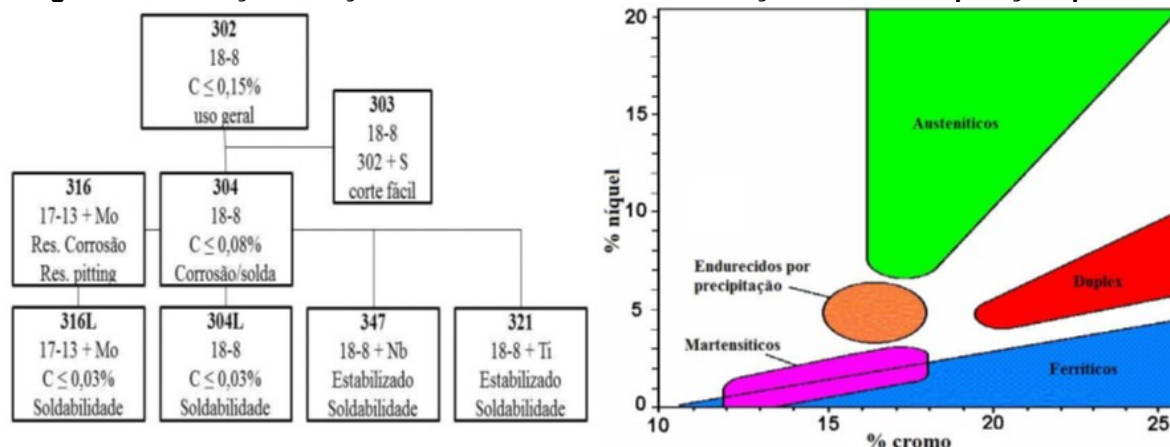
Apesar de criado há mais de um século, os aços inoxidáveis continuam despertando muito interesse nas indústrias química, petroquímica, alimentícia, aeronáutica e de equipamentos hospitalares (XIONG, *et al.*, 2015). Conforme o ISSF, (*International Stainless Steel Forum*) a demanda global de produtos fabricados em

aço inoxidável quase dobrou nos últimos vinte anos, sendo que em 2014 aproximadamente 42 toneladas foram produzidas (PAYLING, 2016).

O aço inoxidável tem como principal característica a resistência a corrosão, mesmo quando empregado a alta temperatura e condições adversas como a salinidade e esforços repetitivos. Os fatos devem-se a composição química, o que possibilita formar mais de 150 tipos diferentes, sendo mais conhecidos como: austeníticos, ferríticos, martensíticos, super-austeníticos e duplex (PAYLING, 2016).

A Figura 2 apresenta uma derivação do aço austenítico e o diagrama das cinco classes de aços inoxidáveis conforme a concentração de cromo e níquel (SILVA e MEI, 2006).

Figura 2 - Derivação do aço inoxidável austenítico em função de sua composição química



Fonte: Adaptado de SILVA e MEI (2006)

Os aços inoxidáveis austeníticos contêm em sua composição, o cromo, manganês e níquel, ou somente cromo e níquel, identificados pelas séries 200 ou 300. Como principais elementos, destacam-se o Cromo, com cerca de 18% e o Níquel, chegando a 8% do peso total do aço inoxidável 304, razão pela qual também é conhecido como inoxidável 18/8, (sendo este o utilizado como matéria-prima para o desenvolvimento deste trabalho). A reação do cromo com o oxigênio, favorece a formação de uma camada superficial protegendo o aço de agentes oxidantes. O baixo teor de carbono do AISI 304L evita a precipitação de carbonetos durante a soldagem e é vantajoso para seu uso como corrosão intergranular (PRASAD *et al.*, 2017). O teor máximo de carbono do aço inoxidável 304 L é de 0,03 %.

Dentre as principais aplicações do aço inoxidável austenítico destacam-se acessórios de aeronaves, componentes aeroespaciais, como buchas, eixos,

válvulas, vasos criogênicos, componentes para ambientes químicos severos e parafusos especiais (XAVIOR *et al.*, 2009). Muitos destes necessitam passar por operações de usinagem durante sua fabricação. Na usinagem do aço inoxidável austenítico há tendência de adesão do material da peça sobre as arestas de corte. Isto provoca o arrancamento de microlascas, abrindo microfissuras no revestimento, favorecendo o fim de vida da ferramenta, pelo excesso da força de corte localizada (AKASAWA *et al.*, 2003; KOSA & NEY 1989; MACHADO *et al.*, 2015).







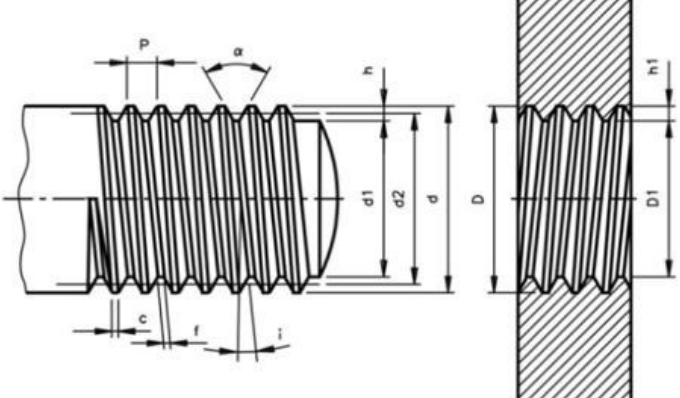
2.2 Características das roscas

Na engenharia de manufatura a produção de peças que possuem conexões roscadas, seja por processos de conformação, ou corte de metal é de extrema importância. Essas peças roscadas, tanto externas como internas, são bastante aplicadas em elementos de máquinas, usadas para fixação, ajuste, apoio e fuso transportador de movimento (KHOSH DARREGI & ALTINTAS, 2015).

Conforme a NBR 5876/2011, cada ponto na rosca segue sua própria hélice. Todas as hélices têm um eixo comum, o eixo da rosca e o mesmo passo, mas a tangente do ângulo de inclinação é inversamente proporcional à distância radial da hélice ao eixo. A rosca é uma projeção contínua dos filetes helicoidais de seções uniformes na superfície cilíndrica.

Sendo assim, podem ser classificadas quanto ao sentido do giro, ou seja, rosca direita ou esquerda, ou também quanto ao número de entradas, ou seja, por apenas um filete ou múltiplos filetes conforme mostrado no Quadro 1.

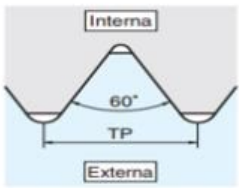
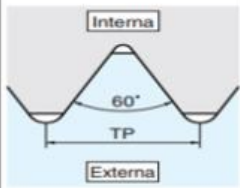
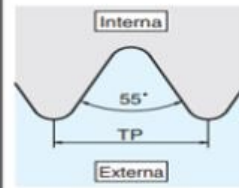
Quadro 1 - Tipos e aplicações de roscas

TIPOS DE ROSCAS (PERFIS) PERFIL DE FILETE	APLICAÇÃO
 <p>triangular</p>	<p>Parafusos e porcas de fixação na união de peças. Ex.: Fixação da roda do carro.</p>
 <p>trapezoidal</p>	<p>Parafusos que transmitem movimento suave e uniforme. Ex.: Fusos de máquinas.</p>
 <p>redondo</p>	<p>Parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços. Ex.: Equipamentos ferroviários.</p>
 <p>quadrado</p>	<p>Parafusos que sofrem grandes esforços e choques. Ex.: Pressas e morsas.</p>
 <p>rosca dente-de-serra</p>	<p>Parafusos que exercem grande esforço num só sentido Ex.: Macacos de catraca</p>
 <p>rosca direita</p> <p>rosca esquerda</p>	

Fonte: NBR 5876/2011 - ISO BS 3643-1/2007

Existem inúmeros modelos de perfis de roscas, como, por exemplo: triangular, trapezoidal, quadrado, redondo, dente-de-serra, métrica normal, métrica cônica, Whitworth, gás, entre outras. Um dos processos mais comuns para corte e geração de rosca externa é torneamento. O Quadro 2 apresenta os tipos de rosca métrica, unificada e tubo paralela, bem como seus respectivos formatos para roscamento externo são apresentados a seguir.

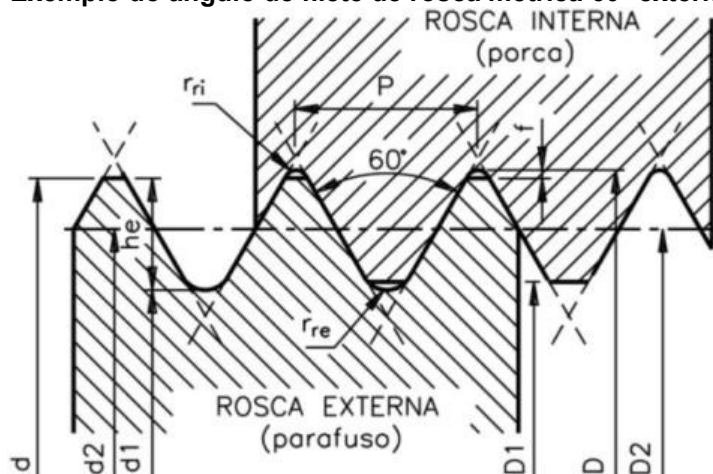
Quadro 2 - Tipos e formatos de roscas externas

Tipo de Rosca	Métrica	Unificada	Tubo Paralela
	M	UN, UNC UNF, UNEF	G(PF)
Formato da Rosca			

Fonte: Adaptado de Kyocera (2021)

A Figura 3 apresenta as características básicas da rosca triangular métrica uso geral a 60° com crista plana e raiz arredondada, conforme NBR ISO 261:2004.

Figura 3 - Exemplo do ângulo de filete de rosca métrica 60° externa e interna



Fonte: NBR 5876/2011 - NBR ISO 261:2004

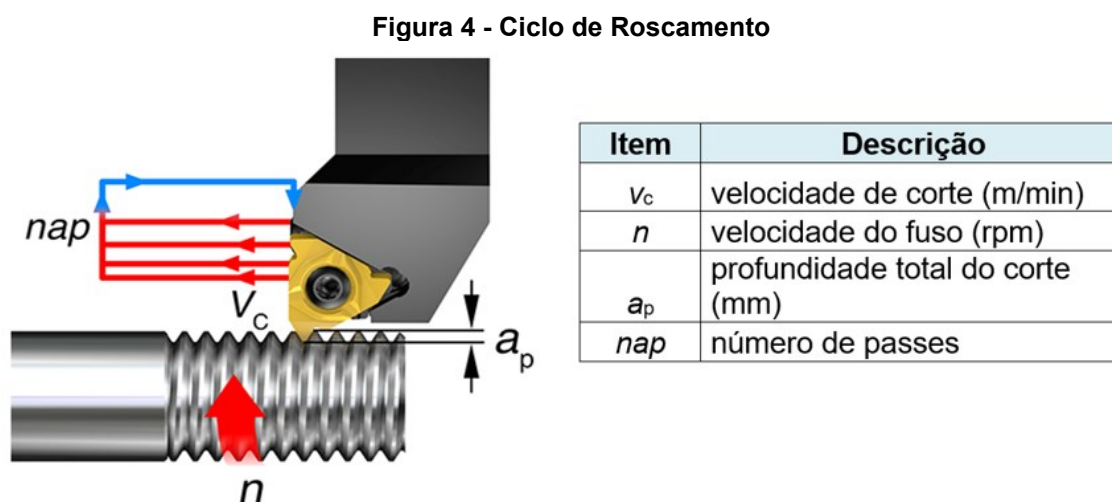
- Ângulo do perfil da rosca: $\alpha = 60^\circ$
- Diâmetro menor do parafuso (\emptyset do núcleo): $d1 = d - 1,2268P$
- Diâmetro efetivo do parafuso (\emptyset médio): $d2 = D2 = d - 0,6495P$
- Diâmetro maior da porca: $D = d + 2f$
- Diâmetro menor da porca (furo): $D1 = d - 1,0825P$
- Diâmetro efetivo da porca (\emptyset médio): $D2 = d2$
- Altura do filete do parafuso: $he = 0,61343P$
- Raio de arredondamento da raiz do filete do parafuso: $r_{re} = 0,14434P$
- Raio de arredondamento da raiz do filete da porca: $r_{ri} = 0,063P$

A fabricação de roscas por torneamento é bastante comum ser processada por torno CNC nas fábricas modernas. Para a fabricação de roscas por torneamento, é frequente o uso dos tornos CNC nas linhas de produção mais modernas, resultando em cortes mais eficientes e de alta qualidade (SONG e WANG, 2018).

2.3 Ferramentas para roscamento em torno

Devido à constante busca por maior produtividade, menores custos de produção, bem como segurança de operação, o investimento para se desenvolver ferramentas com maior vida útil tornou-se uma necessidade para as grandes empresas. Sendo assim, a geometria da ferramenta de corte exerce papel muito importante para o alcance desses resultados (MACHADO *et al.*, 2015).

A Figura 4 apresenta o ciclo do roscamento ao qual se nota a profundidade total de corte que corresponde à altura do filete – a_p (mm), alcançada pelo número de passes executados até chegar à altura do filete – n_{ap} , a velocidade de corte – v_c (m/min), e a velocidade do fuso ou rotação – n (rpm) (SANDVIK, 2010).



Fonte: Sandvik (2010)

Certamente, grande parte dessa aplicação se deve à diversidade das tarefas que esse processo possibilita de serem realizadas na mesma máquina, com pouca ou nenhuma etapa intermediária de setup, tornando o processo economicamente atrativo (TRENT e WRIGHT, 2000).

Os fabricantes de ferramentas têm concentrado esforços em pesquisas para desenvolvimento de substratos, coberturas e geometria que elevem cada vez mais

o desempenho das ferramentas, para atender de forma satisfatória as exigências impostas pela indústria, sobretudo na indústria metal mecânica, onde a utilização de máquinas cada vez mais rápidas e de novos materiais de construções mecânicas é frequente, submetendo as ferramentas a condições cada vez mais severas (SILVA, 2014).

As ferramentas de corte devem suportar simultaneamente altas cargas mecânicas e altas temperaturas. A temperatura na interface cavaco/ferramenta atinge mais de 700 °C em alguns casos no torneamento duro. Tendo isso em mente, os seguintes fatores devem ser considerados para um bom projeto de ferramenta de usinagem (DAVIM, 2011):

- A estabilidade química e física do material da ferramenta de corte deve ser mantida em altas temperaturas.
- A dureza do material da ferramenta deve ser mantida nas altas temperaturas que ocorrem no contato entre inserto e cavaco.
- O material da ferramenta deve apresentar alta resistência ao desgaste por abrasão e adesão.
- O material da ferramenta deve apresentar tenacidade suficiente para evitar fratura, principalmente quando a operação a ser executada implica em corte interrompido.

O acabamento da superfície de uma peça usinada é influenciada por mudanças na geometria da ferramenta, mecanismos de geração de cavacos, temperatura, fluxo de calor e desgaste da ferramenta. A compreensão dessas interações permite que os fabricantes de ferramentas avaliem o desempenho antes da fabricação e testes de campo caros (AGMELL *et al.*, 2017). Para ferramentas de metal duro utilizadas na fabricação de rosca em tornos, estas podem ser classificadas como de perfil simples ou completo, com uma ou múltipla entrada, como externa ou interna, estando em todos os casos relacionados ao material a ser trabalhado. Quanto a estes destacam-se as categorias P, M, K, N, S e H, Figura 5, direcionados ao aço carbono, ao aço inoxidável, ao ferro fundido, ao alumínio, ao titânio e aos aços endurecidos respectivamente (SANDVIK, 2010).




Figura 5 - Classes ISO Metal Duro

ISO	Material
P	Aços carbono e aços ligas
M	Aço inoxidável
K	Ferros fundidos
N	Alumínio, bronze, latão
S	Ligas resistentes ao calor – titânio
H	Aços endurecidos e fofo coquilhado

Fonte: Sandvik (2010)

Uma das características da ferramenta de metal duro, direcionada à usinagem de roscas, são os perfis. Nesse caso são três perfis, baseado na produtividade, representados no Quadro 3.

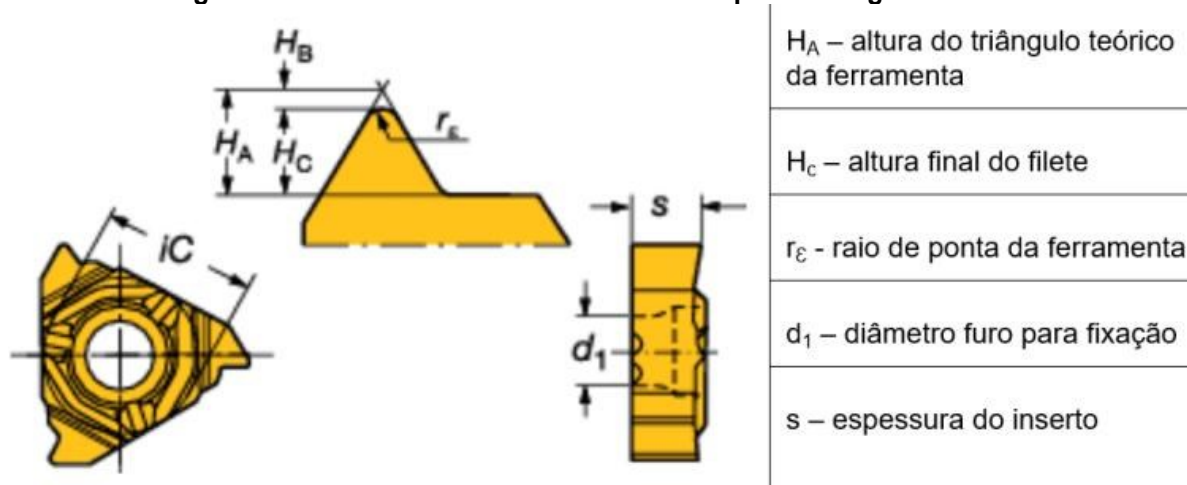
Quadro 3 - Tipos de perfil de corte

Perfil	Tipos e recomendações
	Perfil completo - para alta produtividade. Roscas para uso geral em todos os segmentos da indústria de engenharia, superfície da rosca sem rebarbas com alta qualidade, sobremetal deve ser deixado sobre o diâmetro, cada tamanho de passo requer um inserto específico
	Perfil em V - para roscamento de materiais endurecidos, as pontas das roscas tendem a ser agudas, o diâmetro interno ou externo da rosca precisa ser acabado antes de usinar a rosca, um inserto pode usinar vários tamanhos de passos
	Multiaresta - para roscamento econômico na produção em massa, sendo somente recomendada para método de avanço radial, tendo como vantagem a execução de menor número de passes

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010)

Desta forma, verifica-se a geometria e dimensões básicas de uma ferramenta direcionada a usinagem de rosca, somadas a estas destaca-se o ângulo do perfil ser gerado sendo de 60° para a M e 55° para a W (Whitworth) conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Dimensões básicas de um inserto para usinagem de rosca



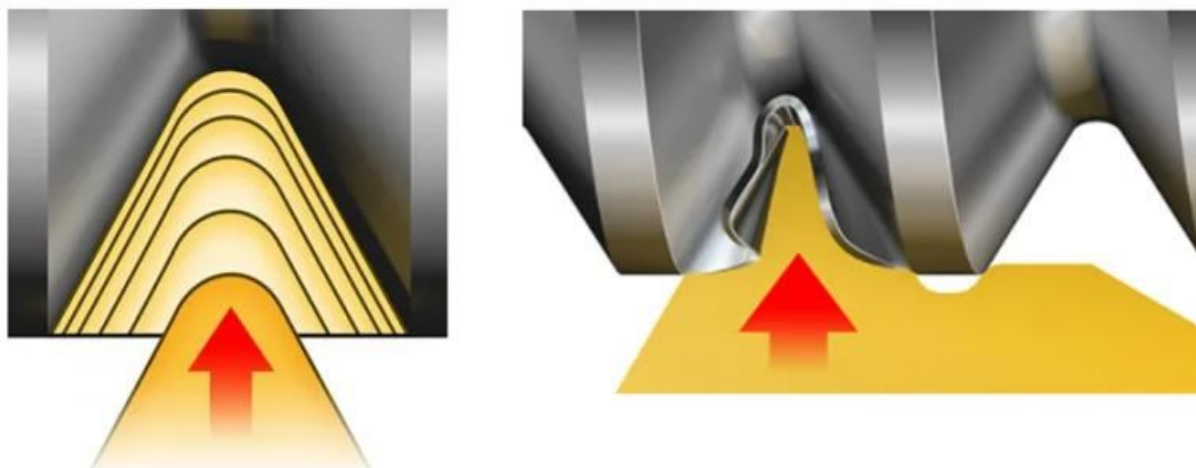
Fonte: Adaptado de Sandvik (2010)

2.4 Métodos de penetração de roscamento em tornos

Para o processo de roscamento em tornos, existem três métodos de penetração que são: radial, de flanco modificado e incremental.

2.4.1 Método de penetração radial

A Figura 7 apresenta a penetração radial também denominado roscamento por mergulho ou frontal é o método mais comum. Sendo utilizados em torno convencional, torno CNC ou centro de torneamento CNC, onde a trajetória do inserto de roscamento é alimentado a 90° em relação ao eixo de rotação da peça. O material sendo removido em ambos os lados dos flancos em forma de V ocasionando um desgaste uniforme em ambos os flancos do inserto. Este processo é mais adequado para passos finos, e insertos com geometrias quebra-cavacos não são adequadas para a penetração radial (SMITH, 2008).

Figura 7 - Entrada pelo método de penetração radial

Fonte: Adaptado de Sandvik (2010)

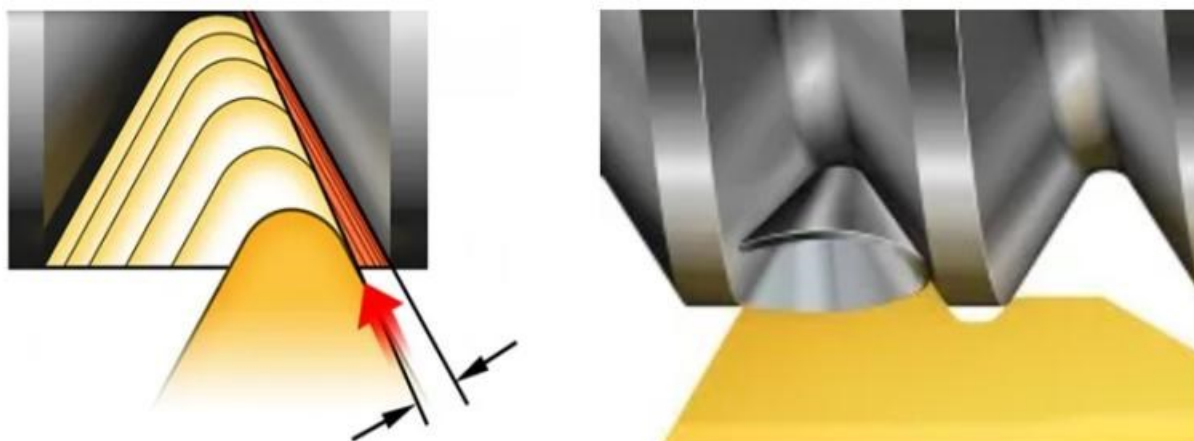
O fluxo de cavacos pode ser um problema devido ao formato do cavaco que é de difícil quebra. A cada passe ocorre o aumento da área de contato entre ferramenta e peça, sugerindo, pois, a necessidade da diminuição da profundidade indicado pela seta. Normalmente é recomendada para passos finos, também a primeira escolha para a usinagem de roscas em materiais endurecidos (SANDVIK, 2010).

Existe o risco de vibração para passos grossos. Além disso, como ambos os lados da ponta do inserto estão sujeitos a altas temperaturas e pressões, a vida útil da ferramenta geralmente será mais curta com este método do que com outros métodos de penetração (SMITH, 2008).

2.4.2 Método de penetração de flanco modificado

A Figura 8 demonstra a estratégia de penetração de flanco modificado, onde a ferramenta penetra o material paralelamente a um dos flancos da rosca.

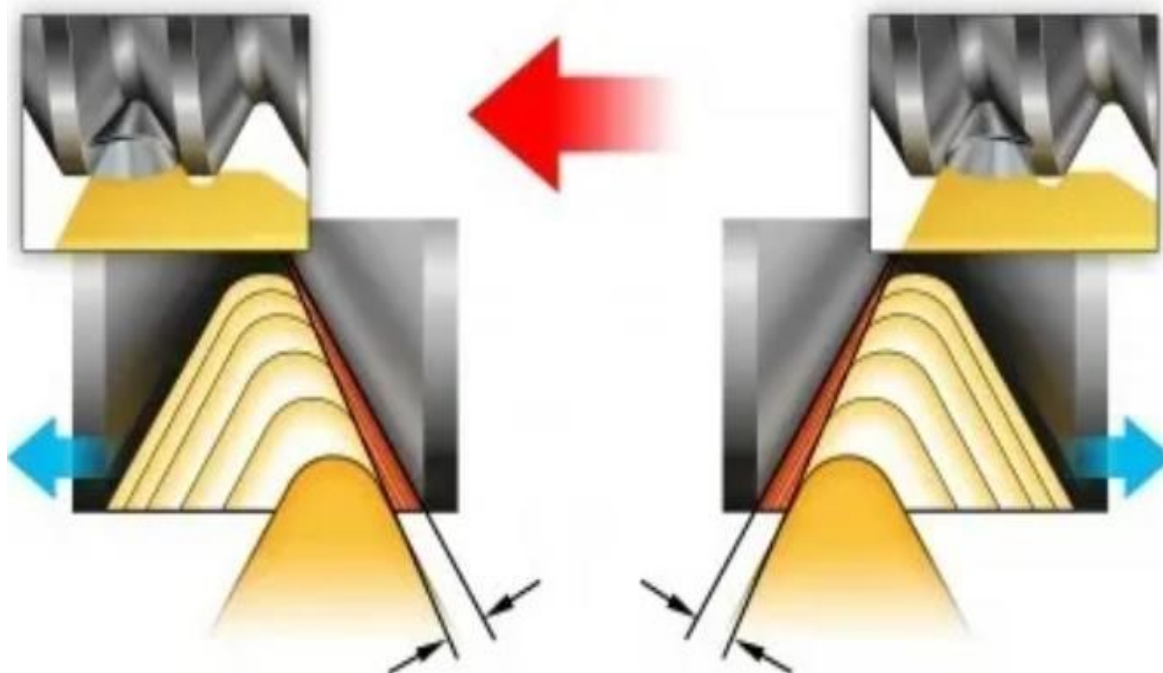
Figura 8 - Entrada pelo método de penetração de flanco modificado



Fonte: Adaptado de Sandvik (2010)

Neste caso a entrada da ferramenta acontece inclinada em relação ao ângulo da rosca, trabalhando semelhante à operação de torneamento de desbaste, permitindo a aplicação de maior profundidade de corte por passe. A proposição da ferramenta ilustrada na Figura 9 tende a direcionar o cavaco para fora da zona de corte, favorecendo a vida da ferramenta, independentemente do sentido da usinagem (SMITH, 2008).

Figura 9 - Entrada pelo método de penetração de flanco modificado em diferentes sentidos



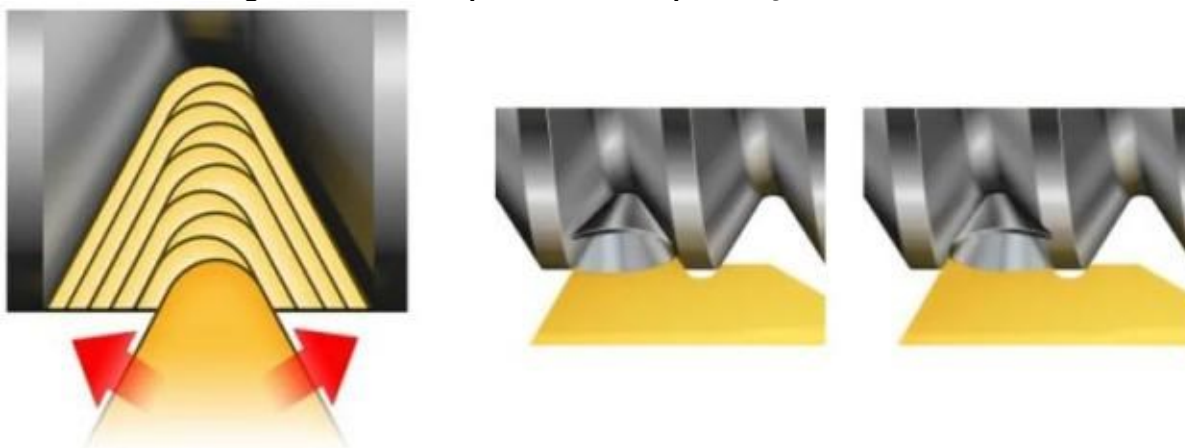
Fonte: Adaptado de Sandvik (2010)

De acordo com a altura do filete, recomenda-se realizar primeiro um desbaste, usando o avanço composto. Se necessário, a ferramenta usada pode ter ângulo de saída adequado, como uma ferramenta simples de torneiar, pois o corte se dará só de um lado, pela ação da aresta principal. A aresta secundária deve ter uma folga em relação ao segundo flanco de aproximadamente 1° (STEMMER, 2008).

2.4.3 Método de penetração incremental

Na penetração por avanço incremental a ferramenta entra no material produzindo um “zig zag” cortando o material com ambos os lados da ferramenta. Esta estratégia preserva a ferramenta de corte. Industrialmente esta técnica é pouco difundida, principalmente por exigir uma programação especial conhecida como parametrizada. Por meio deste método de penetração as arestas da ferramenta alternam sua posição de corte, principalmente no sentido lateral, direita e esquerda, até alcançar a altura final do filete conforme a programação. O método e a possibilidade de formação do cavaco são apresentados na Figura 10 (SANDVIK, 2010).

Figura 10 - Entrada pelo método de penetração incremental



Fonte: Adaptado de Sandvik (2010)

Normalmente este método de entrada é mais indicado para corte de roscas de grandes perfis. Esta aplicação tende ao desgaste uniforme dos dois lados da ferramenta visto que estes se alternam durante a operação, sendo que em função do fato recomenda-se um passe de acabamento. Se aplicado tal passe, principalmente no caso do aço inoxidável, este não deverá ser inferior a 0,03 mm dado que este material tende a aderir à ferramenta prejudicando o acabamento.

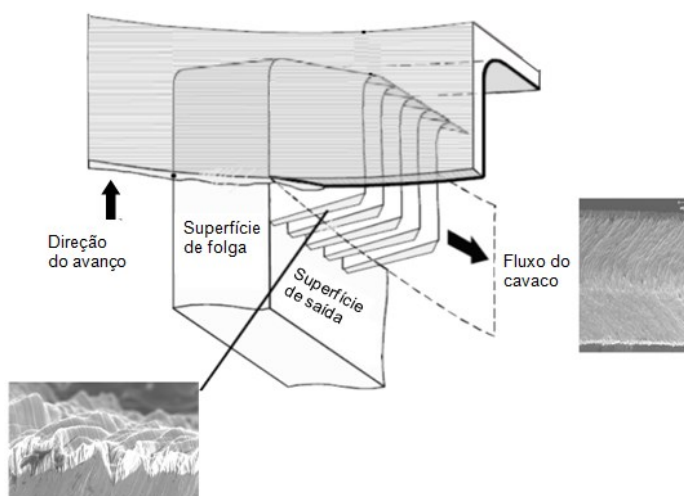
2.5 Mecanismos de formação do cavaco

Cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica regular. Entre os fenômenos ligados ao cavaco estão o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica de cavaco (FERRARESI, 2003). A formação de cavacos é o processo em que o material retirado da peça flui junto a face frontal da ferramenta. Geralmente ocorre por deformação plástica severa, em uma zona estreita, chamada zona de cisalhamento primária (XIULI *et al.*, 2018).

O estudo da formação do cavaco é um fator-chave para entender o processo de corte (ARTOZOUL *et al.*, 2014). O primeiro passo na consideração da mecânica da formação de cavacos é identificar corretamente o tipo de cavaco envolvido (contínuo, cisalhado e arrancado) (SHAW, 2005).

De acordo com Costa (2022), o mecanismo de formação do cavaco para uma operação de roscamento é verificado pela largura do cavaco, que pode ser dividida em zonas de contato entre o raio da ponta da ferramenta e o material, ou entre a aresta de corte e o material da peça. Basicamente, com o método de penetração radial, observa-se que os cavacos são limitados de um lado e livres do outro nas áreas onde o corte é realizado pela aresta de corte. Por outro lado, na área onde o corte é realizado ao longo do raio da ponta da ferramenta, os cavacos são limitados em ambos os lados. A Figura 11 mostra que à medida que a área de contato entre a ferramenta de corte e a peça aumenta a cada passe, a situação se torna importante, afetando a formação de cavacos e o deslizamento na superfície da ferramenta. Além das deformações que ocorrem nas áreas de corte primário e secundário, também é fundamental levar em consideração o atrito entre a ferramenta e o cavaco, pois o crescimento desse fator dificulta o escoamento.

Figura 11 - Formação do cavaco no roscamento do aço inoxidável 304L



Fonte: Costa (2022)

O perfil rugoso e serrilhado da borda (Figura 11) está presente na morfologia microscópica do cavaco. Os cavacos produzidos na usinagem do aço inoxidável 304L podem ser contínuos ou cisalhados, dependendo da operação e das condições de corte. Depende da deformação do material na zona primária, do contato entre o cavaco e a ferramenta na zona secundária e do aumento da temperatura devido à deformação nas duas zonas de corte (COSTA, 2022).

O tipo de cavaco formado no corte afeta diretamente o desgaste, a vida útil da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Suas características determinam a facilidade de remoção da zona de corte, esse fator é fundamental na escolha das ferramentas para o processo de usinagem (ADASKIN *et al.*, 2015).

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode ser ao mesmo tempo, evidência e causa de problemas no processo de usinagem. Ou seja, ao mesmo tempo, em que determinado tipo de cavaco pode gerar algum problema, como danos a superfície da peça ou estar ocupando volume excessivo, a sua forma e tamanho podem ser indicativos de problemas, relativos tanto a quantidade de material usinado quanto as condições da ferramenta de corte utilizada (AMORIM, 2002).

A forma e tamanho do cavaco são extremamente variáveis nas operações de usinagem, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Diferentes formas de cavacos

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

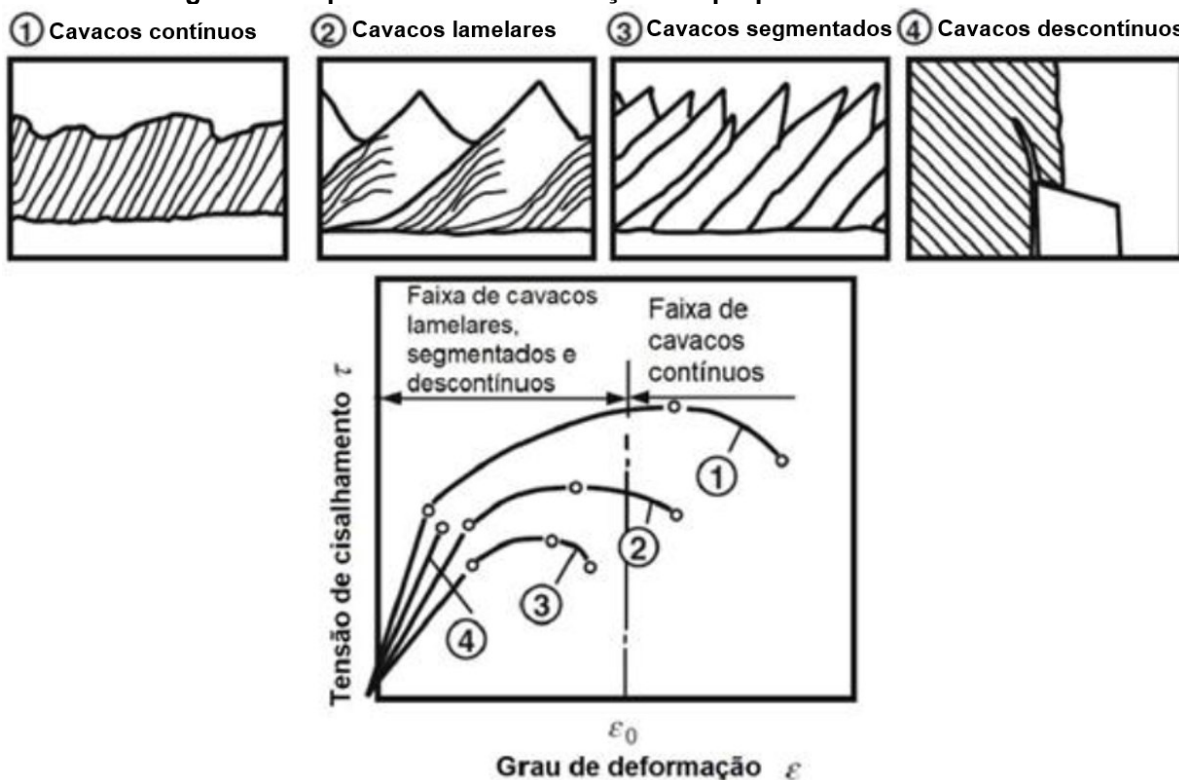
Fonte: Adaptado de NBR ISO 3585 (2017)

Conforme Stemmer (2008), os diferentes tipos de cavacos podem ser classificados em:

- Cavaco contínuo: as camadas de material de cavaco sobrepostas são dispostas consecutivamente e colocadas em grupos diferentes. Esses cavacos são formados ao usinar materiais dúcteis e homogêneos.
- Cavaco cisalhado: agrupamentos de do material justapostos e desiguais de cavaco. É formado devido à redução da resistência do plano de cisalhamento devido à deformação ou ao aumento da heterogeneidade da estrutura metalográfica.
- Cavaco arrancado: segmentos arrancados da peça usinada. Os agrupamentos de material de cavaco permanecem separados. Formados por materiais frágeis ou estruturas heterogêneas.

Os tipos de cavacos representados na Figura 13 podem ser contínuos, lamelares, segmentados e descontínuos. A faixa de cavacos lamelares, segmentados e descontínuos, bem como a faixa de cavacos contínuos estão representados conforme o gráfico tensão deformação de materiais com diferentes propriedades mecânicas (KONIG e KLOCKE, 1997).

Figura 13 - Tipos de cavaco em função das propriedades do material



Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Dependendo do tipo de cavaco produzido durante a usinagem, vários problemas podem surgir. O controle ineficaz de cavacos não apenas resulta em baixa produtividade e acabamento de superfície ruim do componente, mas também pode danificar ferramentas, máquinas e peças, além de ferir os operadores (WANG, 2001).

Para König e Klocke (1997), a formação dos cavacos pode ser descrita através dos seguintes passos:

- A partir da penetração da ferramenta, uma porção do material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- Tal porção sofre deformação plástica, a qual aumenta até atingir certo valor de tensão de cisalhamento, iniciando-se um deslizamento entre o material recalcado e a peça. Esse deslizamento ocorre segundo as direções dos planos de cisalhamento dos cristais da porção recalcada.
- Haverá então ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, realizando-se esta somente perto da aresta cortante para materiais

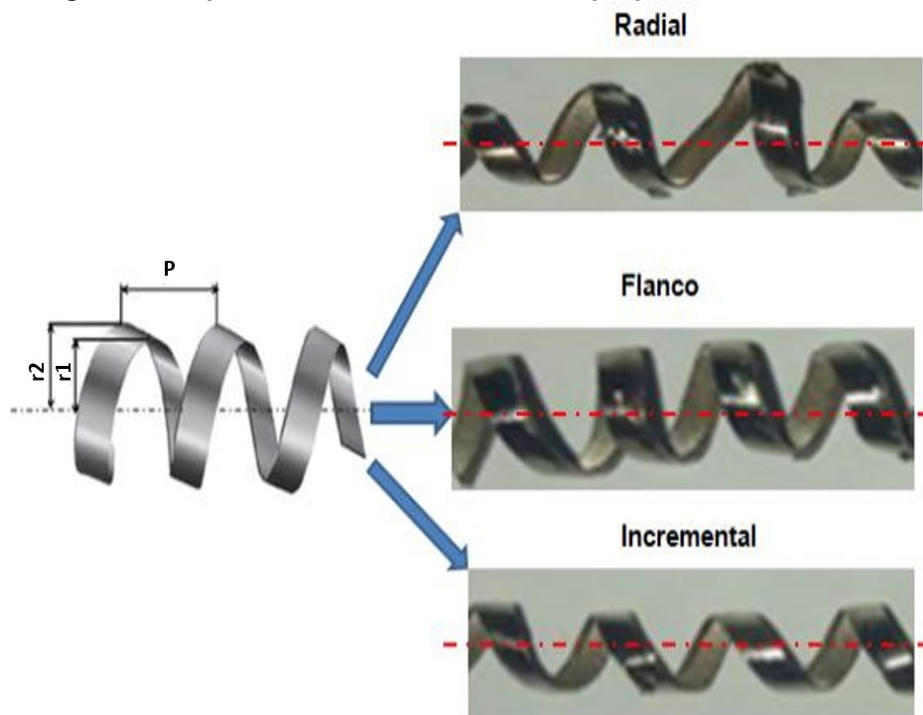
altamente deformáveis, formando cavacos contínuos. Para materiais frágeis, o cavaco originado é de cisalhamento ou ruptura.

- Continuando-se o movimento relativo entre ferramenta e peça, inicia-se o escorregamento da porção do material cisalhado sobre a superfície da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção do material se formando e cisalhando.

2.5.1 Geometria do cavaco para os métodos de roscamento

A geometria é teoricamente resultante da curvatura vertical, lateral e do fluxo do cavaco (DEVOTTA, 2015). A Figura 14 ilustra a análise da geometria do cavaco para os métodos de roscamento empregados durante a usinagem de roscamento. Observa-se que as principais variáveis são o passo (P), o raio externo do cavaco (r_1) e o raio interno do cavaco (r_2). Independentemente do método e do sistema lubri-refrigerante utilizado no estudo, prevaleceu o cavaco em formato de hélice longa. Sendo o lado externo da hélice refere-se ao lado inferior do cavaco, ou seja, o lado mais liso. Desta forma, o lado mais interno da hélice representa o lado mais rugoso e ao lado superior do cavaco (COSTA, 2022).

Figura 14 - Tipos de cavaco em função das propriedades do material



Fonte: Costa (2022)

A cinemática durante a formação do cavaco afeta diretamente sua geometria, pois diferentes velocidades ocorrem durante seu deslocamento na superfície de corte (lados interno e externo do cavaco), alterando sua curvatura lateral. Para os métodos de penetração analisados, o raio da ponta também deve ser considerado, especialmente para o caso de penetração radial. Como há dificuldade de formação e restrição ao fluxo do cavaco devido às propriedades do material e ao contato do raio de ponta e de ambos os lados da ferramenta, resultando em deformação adicional e alta tendência a formar bordas serrilhadas. Este fato leva a variações com maiores distorções e alterações no passo e diâmetro das hélices obtidas. Os métodos de roscamento de flanco modificado e incremental apresentaram cavacos semelhantes, sendo a principal diferença o diâmetro e o passo da hélice resultante. Independentemente do método de roscamento, os cavacos tendem ao endurecimento durante a operação. O atrito com a ferramenta favorece a formação de micro trincas. Somado a estes inconvenientes observa-se ainda a adesão de materiais que em muito prejudica a rugosidade da superfície usinada (COSTA, 2022).

2.6 Desgaste e critério de vida útil da ferramenta

O roscamento é um processo de corte ou deformação da peça que gera alta força de corte, alta temperatura e alto desgaste da ferramenta. Independentemente do processo de usinagem, diversos fenômenos ocorrem levando a ferramenta ao fim de vida.

Desta forma, o fim de vida da ferramenta é definido pelo tamanho ou nível de desgaste pré-estabelecido dependendo do processo, operação e finalidades desejadas para a peça usinada. São considerações determinantes do fato, a largura da marca de desgaste de flanco, profundidade da cratera, deficiência no acabamento superficial da peça, formação de rebarbas, número de peças usinadas, variação dimensional da peça, entre outras (MITSUBISHI, 2018).

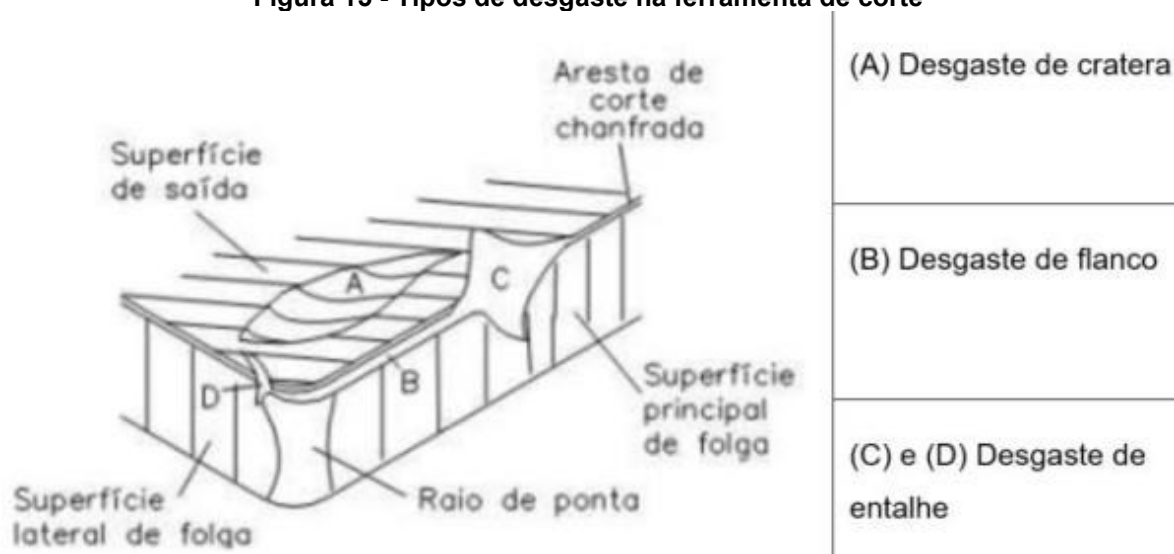
O desgaste da ferramenta é causado pela ação contínua do processo de remoção de cavacos e pode estar localizado em duas zonas da ferramenta (DAVIM, 2011):

- Desgaste na superfície de saída da ferramenta, que dá origem a um padrão como uma cratera.

- Desgaste no flanco ou superfície de folga, devido ao alto atrito da aresta da ferramenta com a nova superfície usinada. Geralmente tem padrão de abrasão.

A tecnologia envolvida nas operações de corte do metal avançou consideravelmente nos últimos anos, juntamente com o desenvolvimento em materiais. Eles também criam adesão (arestas postiças), que resultam em acabamento superficial ruim e redução da vida útil da ferramenta. Os mecanismos de desgaste podem acontecer de maneira simultânea, ou um deles pode dominar o processo, entre esses mecanismos podem ser listados abrasão, adesão e difusão (ALTINTAS, 2012). Quando combinados, os mecanismos de desgaste por abrasão, adesão e difusão, levam a aceleração do processo de degradação das superfícies da ferramenta de corte. A contribuição de cada mecanismo depende do carregamento mecânico e térmico no processo de usinagem. Na Figura 15 estão os principais padrões de desgaste observados são desgaste de cratera, desgaste de flanco, desgaste de entalhe, trincas, lascamento e quebra da ferramenta (HUANG, CHOU e LIANG, 2007).

Figura 15 - Tipos de desgaste na ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2015)

Os aços inoxidáveis austeníticos produzem cavacos tenazes, longos e contínuos que são difíceis de quebrar. Além disso, são propensos a endurecer durante a usinagem, produzindo superfícies e cavacos duros que causam desgaste por entalhe representados nas posições C e D da Figura 12 (MACHADO *et al.*, 2015).

O desgaste de cratera é causado principalmente por interações físicas, químicas ou termomecânicas entre a face do inserto e o cavaco quente. Acontece a dissolução do material da ferramenta no cavaco, estão envolvidos os fenômenos de abrasão e adesão (HUANG, CHUOU e LIANG, 2007). O atrito mecânico colabora para causar a cratera na face da ferramenta (DAVIM, 2011).

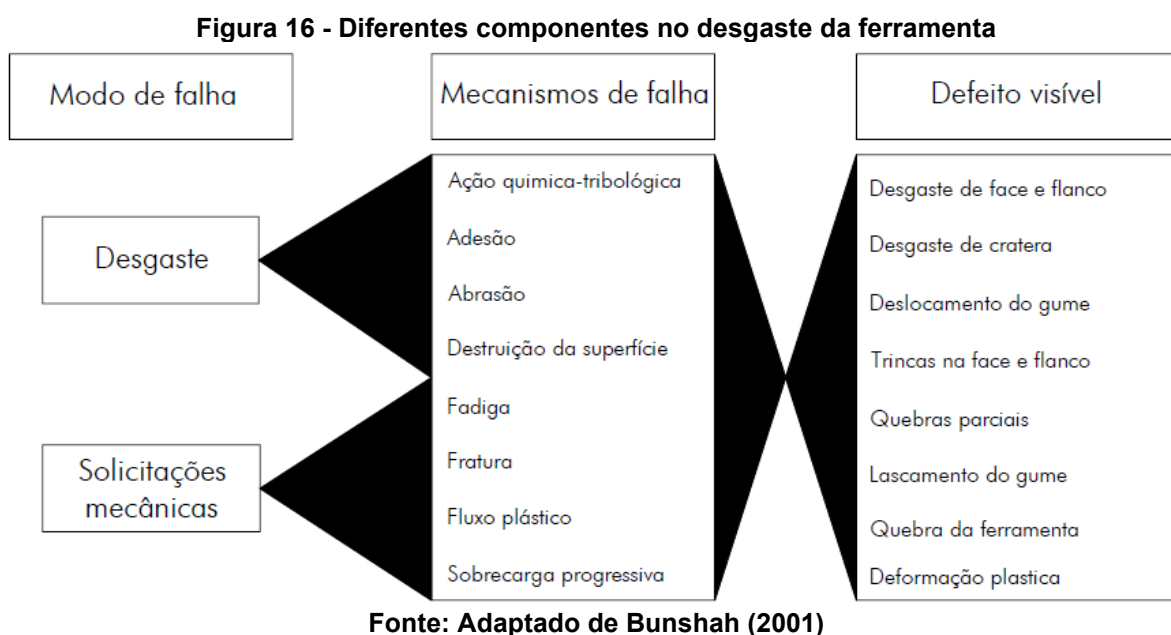
O desgaste de flanco acontece principalmente pelo contato entre a face do flanco do inserto e a peça usinada, esse desgaste é minimizado conforme a dureza da ferramenta utilizada (HUANG, CHUOU e LIANG, 2007). Ocorre mais comumente nos materiais endurecidos, onde não existe afinidade química entre ferramenta e material usinado, a abrasão é o principal mecanismo de desgaste (DAVIM, 2011). Este fator afeta a vida da ferramenta, bem como, a qualidade do produto usinado e o consumo de energia da máquina ferramenta. Conseqüentemente, o crescimento do desgaste deve ser controlado, para que a vida da ferramenta seja prolongada (SAHOO e SAHOO, 2013). Por conseguinte, decorre da perda de ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento na área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, gerando um maior atrito na região, o aumento da velocidade de corte pode incentivar esse tipo de desgaste. O principal mecanismo de desgaste é a abrasão. Possui um efeito negativo na integridade da superfície e precisão dimensional. Embora o desgaste seja complexo, há maneiras de controlá-lo e manter uma operação de usinagem consistente e confiável (CAMARGO, 2011; SANDVIK, 2012).

Em ferramentas de metal-duro o aumento das forças de corte no caso de um desgaste excessivo, a partir de microtrincas, provoca o lascamento e destruição da aresta. A utilização de uma ferramenta até este ponto é desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer uma aresta adequada (STEMMER, 2008; FERRARESI, 2003). Para a determinação da vida da ferramenta, na prática, são empregados testes de longa duração, com parâmetros de usinagem usuais. O fato exige elevado tempo de ensaio e conseqüentemente grande volume de material e tempo (WOSNIAK, 2011).

Assim que a ferramenta entra em contato com a peça, mecanismos de desgastes se iniciam geralmente relacionados ao grau de usinabilidade do material e parâmetros aplicados. Em geral, os mecanismos de desgaste se dividem em duas grandes categorias: processos físicos e processos químicos. Os mecanismos

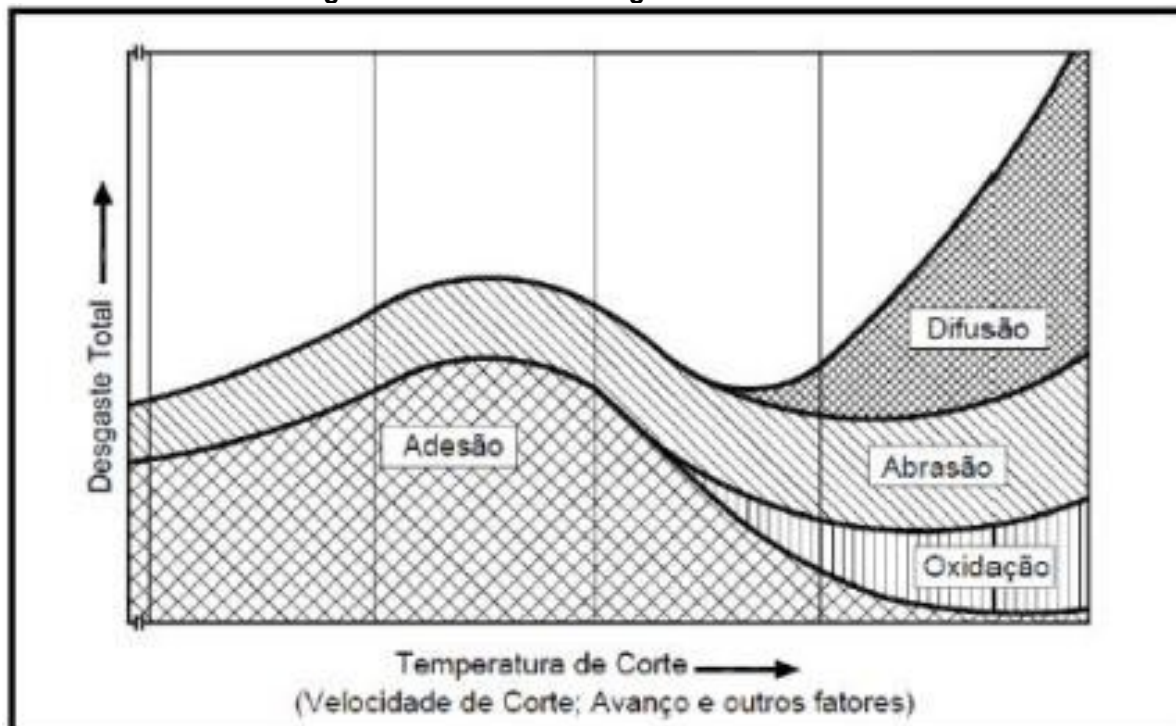
envolvidos são quatro principais: a adesão, a abrasão, a fadiga superficial e reações triboquímicas. Para um baixo índice de usinabilidade, alguns dos problemas usuais incluem desgaste rápido da ferramenta ou superaquecimento, adesão e lascamento de arestas de corte. Conseqüentemente, destacam-se o mau acabamento superficial, o aumento das forças necessários e a potência de corte (EZUGWU e OKEKE, 2001; STEMMER, 2008; ASTAKHOV, 2007).

Os diferentes componentes no desgaste da ferramenta são o modo de falha, os mecanismos de falha e o defeito visível. Em relação ao modo de falha verifica-se o desgaste, ou seja, a ação química-tribológica, a adesão, abrasão, destruição da superfície. Considerando as solicitações mecânicas são consideradas a fadiga, fratura, fluxo plástico e sobrecarga progressiva. Para o defeito visível é observado na Figura 16 o desgaste de face e flanco, o desgaste de cratera, o deslocamento da aresta, trincas na face e flanco, quebras parciais, lascamento da aresta, quebra da ferramenta e deformação plástica (BUNSHAH, 2001).



As propriedades específicas do material utilizado a ser usinado são a principal causa do desgaste da ferramenta. Desta forma, o desgaste progressivo da ferramenta, conforme Figura 17 é um fator importante, principalmente devido à capacidade de prever o número de arestas de corte necessários para produzir um determinado lote. Tipicamente os desgastes que ocorrem no roscamento são: adesão, oxidação, abrasão e difusão (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

Figura 17 - Causas de desgaste no roscamento








Fonte: König e Klocke (2002)

Contudo, as solicitações mecânicas e fadiga térmica excessiva provocam lascamento da aresta de corte, deformação plástica, quebra do inserto e o rápido desgaste de flanco (COSTA, 2022).

Na operação de roscamento vários fenômenos são verificados, os quais são responsáveis pela variabilidade da vida útil da ferramenta, afetando na qualidade e no resultado da peça (KÖNIG e KLOCKE, 2002; AKYIDILZ, 2013). As ocorrências mais comuns bem como e recomendações para se evitar refugo ou retrabalho são verificados no Quadro 4.

Quadro 4 - Ocorrências e recomendações sobre a ferramenta

Ocorrências	Rever a tecnologia
<p>Quebra da pastilha</p> 	<p>Adequar a classe da ferramenta ao material a ser rosqueado mantendo-a na altura do centro da peça de acordo com o diâmetro da mesma.</p>
<p>Lascamento e Aresta postiça</p> 	<p>Lascamento (A) é consequência de solicitações mecânica, Aresta postiça (B) afinidade termoquímica entre os materiais.</p>
<p>Deformação Plástica</p> 	<p>Analisar e implementar se necessário sistema de lubrificação e/ou aumento do número de passes; a evolução dos desgastes vai de (A) para (B).</p>
<p>Desgaste de flanco anormal</p> 	<p>Implementar método de avanço adequado (radial, flanco, ou incremental) pois os ângulos da ferramenta e o programado para o corte não estão concordantes.</p>
<p>Vibração</p> 	<p>Analisar a estabilidade dos sistemas de fixação, da peça e da ferramenta, proporcionando maior rigidez ao sistema.</p>

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010)

O desgaste abrasivo ocorre quando a ferramenta retira material da peça usinada. A uma taxa menor de remoção, a peça usinada retira material da ferramenta, as partículas da ferramenta ficam presas entre o inserto e a peça usinada (ALTINTAS, 2012).

No desgaste por adesão as partículas de materiais da peça usinada se prendem inicialmente ao inserto, o material aderido é instável e acaba se despreendendo. Nesse momento pequenos fragmentos da ferramenta também são arrancados causando desgaste (ALTINTAS, 2012).

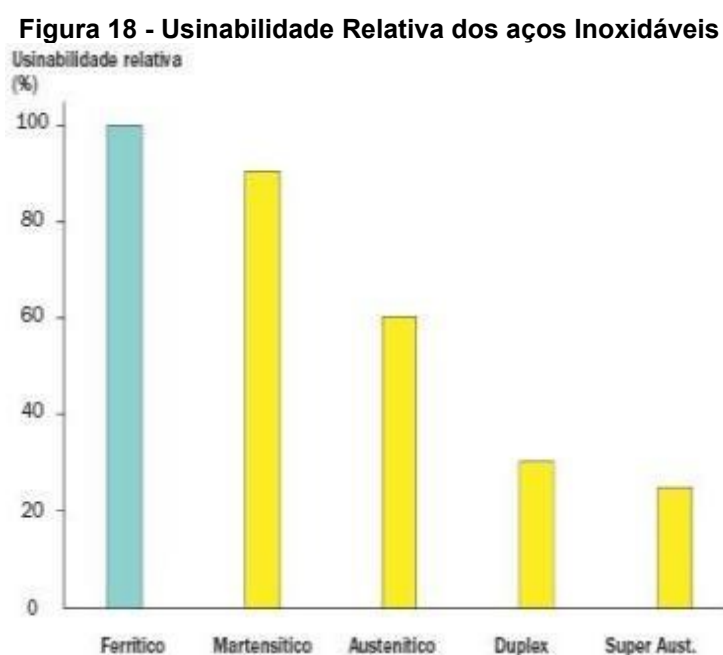
Quando as temperaturas da ferramenta e do material de trabalho aumentam no contato entre elas existe o mecanismo da difusão. A progressiva difusão de materiais da ferramenta no cavaco leva gradualmente a um enfraquecimento da aresta de corte e eventual lascamento ou quebra da ferramenta (ALTINTAS, 2012).

2.7 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

A usinabilidade está diretamente relacionada ao processo de remover o cavaco, podendo ser mais fácil ou mais difícil ocorrer a remoção. O aço inoxidável austenítico possui de baixo grau de usinabilidade por possuir comportamento diferente quando comparado aos aços carbono e outras ligas. A vida útil da ferramenta de corte está diretamente relacionada ao nível de usinabilidade do material, ou seja, aos critérios de força, morfologia dos cavacos, acabamento superficial, velocidade de corte, propriedades do material da ferramenta, as condições de corte, encruamento, sistema de refrigeração / lubrificação, entre outros (COSTA, 2022; DINIZ, *et al.*, 2014; KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2015).

As ferramentas de corte são submetidas a processos como revestimento de modo a melhorar seu desempenho e reduzir os custos de usinagem. Porém, o calor por atrito gerado pelo processo de usinagem resulta no desenvolvimento de gradientes de alta temperatura na zona de corte, levando ao rápido desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, à fratura ou falha catastrófica da ferramenta (MULYANA *et al.*, 2017).

A Figura 18 apresenta os principais aços inoxidáveis. Estes possuem diferentes índices de usinabilidade relativa, demonstrando a necessidade de ensaios específicos e parâmetros de usinagem caso a caso.



Fonte: Adaptado de SSINA (1995)

A Tabela 1 apresenta os valores iniciais de velocidades de corte para diferentes, materiais quando usinados com ferramentas de metal duro confirmam a baixa usinabilidade do aço inoxidável quando comparado a outros materiais.

Tabela 1 - Velocidade de corte recomendadas para a execução de roscas 60°, com ferramentas de metal duro em torno CNC

Material	Velocidade de corte (m/min)
Aços ABNT - 1140	65
Aços ABNT - 1040	60
Aços ABNT - 4120	55
Aços Inoxidáveis	25 a 30
Ferro fundido	50 a 70
Bronze	80 a 120
Alumínio	90 a 180

Fonte: Adaptado de Stemmer (2008)

A dificuldade de usinagem do aço inoxidável se deve aos seguintes fatos:

- Baixa condutividade térmica, ou seja, baixa dissipação de calor nos cavacos e na peça com maior concentração nas arestas de corte da ferramenta (KORKUT *et al.*, 2004; MAHDAVINEJAD e SAEEDY, 2011).
- Elevadas taxas de encruamento que causam deformação mecânica e o comportamento heterogêneo resultante da superfície leva à instabilidade associada à formação de cavacos (SAOUBI *et al.*, 1999, AKASAWA, 2003).
- Elevada resistência à fratura, dificultando a quebra dos cavacos e quase sempre favorece a baixa qualidade superficial (JIANG *et al.*, 1996).
- Elevado coeficiente de dilatação térmica, o que dificulta tolerâncias apertadas. E elevado coeficiente de atrito o que leva ao aumento de força e geração de calor (DINIZ *et al.*, 2014).

Os aços inoxidáveis AISI 304L possuem significativa tendência de encruamento, mesmo quando são submetidos a trabalhos em temperaturas criogênicas (KOPAC, 2009; KORKUT *et al.*, 2004).

2.8 Usinagem com MQL

A lubri-refrigeração por MQL é o procedimento de se nebulizar uma quantidade mínima de óleo (entre 10 ml/h e 200 ml/h de vazão) por um fluxo de ar

comprimido. Esta mistura ar-óleo, apesar de não possuir alta capacidade de refrigeração do processo, muitas vezes tem alta capacidade de lubrificação da região de corte (KLOCKE *et al.*, 2012; NOVASKI, DÖRR, 1999).

De acordo com Weinert *et al.* (2004) o objetivo do MQL é produzir peças usando uma mínima e otimizada quantidade de fluidos de usinagem para que a peça de trabalho, cavacos e ambiente permaneçam secos após o corte. O custo de utilização de fluidos de usinagem pode variar de 7 a 17% do custo total da peça manufaturada. Para Najiha *et al.* (2015) o MQL oferece várias vantagens como: nos cavacos, na peça de trabalho e no porta-ferramentas, pois como possui pouco lubrificante a limpeza e reciclagem de material são mais fáceis e econômicas, bem como o local de trabalho não é contaminado. Reduz o atrito, a força e a temperatura resultando em bom acabamento superficial e o aumento da vida da ferramenta (ANSHU *et al.*, 2009).

O sistema MQL funciona através de um jato de ar pressurizado que impacta em uma gota de óleo e a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e microgotas de óleo, denominado spray. Esta mistura é conduzida por tubulações até o furo de refrigeração interna da máquina, ao mandril-ferramenta, ou ao bico do aparelho. Quando esta mistura sai do furo de refrigeração interna da ferramenta ocorre uma expansão rápida que subtrai o calor da região de corte. Princípio semelhante à válvula evaporadora, que consiste em orifício onde ocorre a expansão de um gás pressurizado. Este fenômeno físico contribui para o resfriamento da ferramenta na região de corte. Em seguida, este spray pressurizado empurra o cavaco através do canal helicoidal da broca até a saída do furo (LAWAL *et al.*, 2013; WEINERT *et al.*, 2004; ANSHU *et al.*, 2009).

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

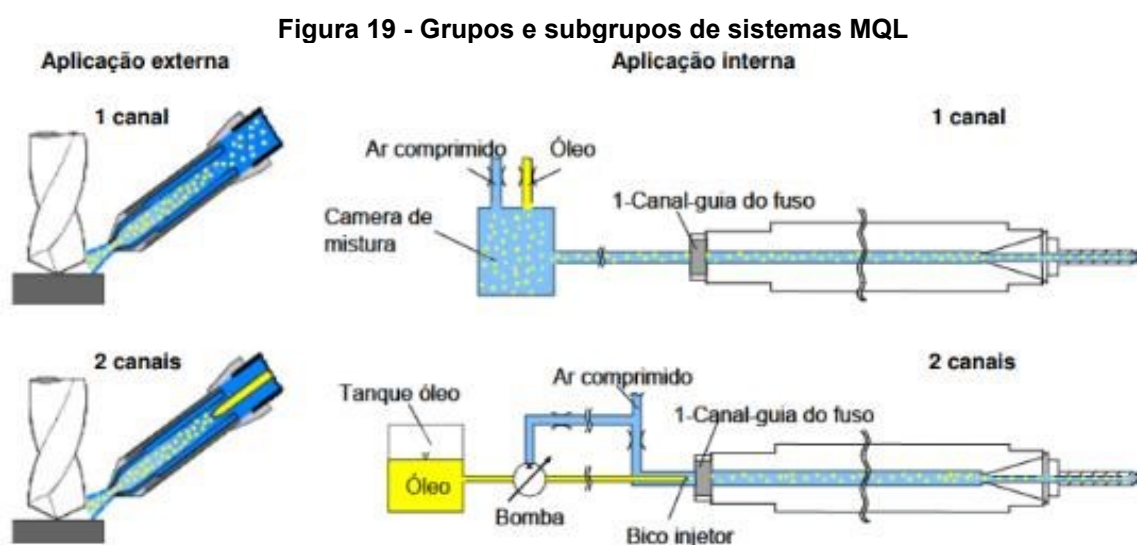
- Dispensa a instalação de um sistema de circulação devido à baixa quantidade de fluido de corte utilizada.
- Eliminação da aplicação de biocidas e fungicidas, visto que a quantidade de óleo presente no reservatório é renovada constantemente, o que impede que haja tempo para a ação de microrganismos.
- Reduz o volume de lubrificante impregnado com os cavacos.

- Os fluidos de corte convencionais aumentam a necessidade de manutenção e causam grandes problemas e custos relacionados ao despejo e descarte.
- As peças, ao final do processo, encontram-se praticamente secas, dispensando o processo de lavagem subsequente.

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

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

Para Weinert *et al.* (2004) a desvantagem deste sistema é que havendo a necessidade de se utilizar diversos tipos de ferramentas de corte é necessário adaptar ou reposicionar o bico injetor. Nos sistemas de dois canais, ilustrado na Figura 19, o fornecimento do fluido e ar comprimido é separado, e o bico injetor tem a função de realizar a mistura.



Fonte: Weinert *et al.* (2004)

2.9 Usinagem MQL e CO₂

A otimização do processo de usinagem é necessária para melhorar o desempenho da usinagem, prolongar a vida útil da ferramenta e melhorar a qualidade da superfície da peça usinada. Os processos de usinagem modernos geralmente usam óleos solúveis como fluidos de corte. Esses óleos solúveis proporcionam lubrificação para reduzir o atrito entre a ferramenta de corte e a superfície usinada, reduzindo assim a força necessária para remover o material e diminuindo a temperatura na zona de corte (WIKAYĚ *et al.*, 2019).

Embora a adequação do uso de fluidos de corte em operações de usinagem tenha sido demonstrada na literatura, na prática industrial o custo financeiro permanece alto, com fluidos de corte representando 17% do custo total dos processos de fabricação, envolvendo compras de materiais, fluidos de corte, manutenção e posterior descarte ao final de sua vida útil. Devido à exposição a esses fluidos, bem como, à poluição atmosférica, devem ser considerados os riscos à saúde e segurança do trabalhador (WIKAYĚ *et al.*, 2019).

Por décadas, os fluidos de corte têm sido usados para simplificar os processos de remoção de metal, prolongar a vida útil da ferramenta, aumentar a produtividade dos processos de usinagem e melhorar o acabamento e a integridade da superfície. É bem conhecido que o corte ortogonal gera calor por atrito e devido à deformação plástica nas zonas de cisalhamento primária e secundária. Isso resulta em um alto gradiente térmico na zona de corte que causa desgaste rápido da ferramenta, o que pode levar à quebra ou falha catastrófica da ferramenta. Para resolver este problema, várias técnicas de lubri-refrigeração são usadas no processo de usinagem, como por inundação, alta pressão, MQL ou, mais recentemente, os métodos avançados de resfriamento ou tecnologias criogênicas usando nitrogênio líquido (LN₂) ou dióxido de carbono (CO₂), e tecnologias de resfriamento híbrido quase criogênico como MQL e CO₂ conforme pode ser visto na Tabela 2 (AHMAD-YAZID *et al.*, 2010; TAPOGLOU *et al.*, 2017; WIKAYĚ *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Diferentes técnicas de lubri-refrigeração

Técnica de lubri-refrigeração	Características e descrição
MQL	Óleo de canola 0,92 g / cm ³ e aditivos biodegradáveis. Taxa de fluxo = 100 ml / h; pressão do ar = 6 bar
LN ₂	Usinagem assistida por nitrogênio líquido (15 bar, -196 °C)
CO ₂	Usinagem assistida por dióxido de carbono (15 bar, -78 °C)
MQL e LN ₂	MQL (100 ml / h) + LN ₂ (15 bar, -196 °C)
MQL e CO ₂	MQL (100 ml / h) + CO ₂ (15 bar, -78 °C)

Fonte: Pereira et al. (2016)

A maioria dos trabalhos de pesquisa sobre usinagem de aço inoxidável 304 com refrigeração avançada refere-se a operações de torneamento com nitrogênio líquido (LN₂). No entanto, um estudo comparativo de usinagem de aço AISI 304 com nitrogênio (LN₂) e dióxido de carbono supercrítico (scCO₂) mostra que o resfriamento criogênico de curto alcance com scCO₂ é um método eficaz para prolongar a vida útil da ferramenta (WIKAYĚ et al., 2019).

As altas temperaturas durante a usinagem implicam na menor vida útil da ferramenta devido aos efeitos térmicos de desgaste da ferramenta. Porém, ao utilizar o sistema MQL, o efeito de lubri-refrigeração implica em um aumento na vida útil da ferramenta. No entanto, o efeito térmico utilizando apenas sistema MQL não é suficiente para alcançar um processo viável. No caso da usinagem assistida criogênica, tanto utilizando LN₂ quanto CO₂, os resultados obtidos são mais favoráveis, com aumento na vida útil da ferramenta devido a sua contribuição na minimização dos efeitos térmicos (PEREIRA et al., 2016).

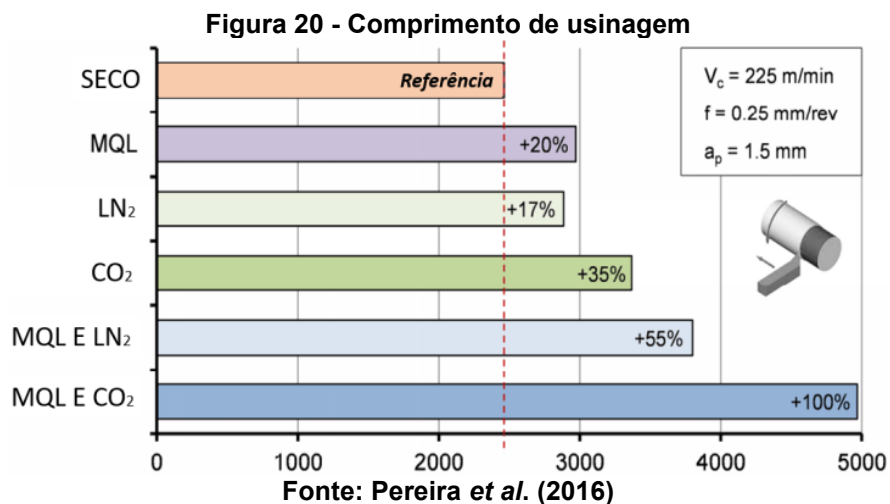
Para Proud, et al. (2022) a utilização do LN₂ supera os lubri-refrigerantes convencionais em uma ampla gama de índices de desempenho, como na melhoria considerável na vida útil da ferramenta, integridade da superfície, entre outros. No entanto, o CO₂ quando comparado à lubri-refrigeração por LN₂ apresenta vantagens associadas aos seguintes fatores:

- Ao usar lubri-refrigerantes a base de CO₂, há menor risco de queimaduras por baixas temperaturas ao operador.
- As estratégias de lubri-refrigeração com CO₂ são menos complexas por possuir temperatura mais elevada.
- Os lubri-refrigerantes a base de CO₂ não impedem o funcionamento normal da máquina de usinagem, pois não congelam a graxa lubrificante do fuso.

- O armazenamento de CO₂ não requer o uso de vaso de pressão isolado e rede de tubulação, o que torna a instalação do equipamento nas máquinas de usinagem mais convenientes.
- Ao usar lubri-refrigerantes a base de CO₂ não ocorre o risco de transformação microestrutural próxima à superfície da peça devido à temperatura ser mais elevada.

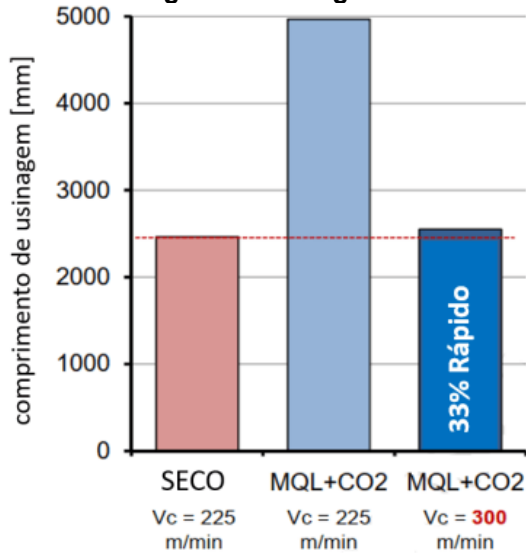
Em uma estratégia de usinagem criogênica LN₂ convencional, a ferramenta é resfriada por proximidade ao meio criogênico. Em tal cenário, o fluido extremamente frio serve como dissipador de calor, resfriando a ferramenta principalmente por convecção, impulsionada pelo gradiente de temperatura. Por outro lado, o CO₂ é fornecido à temperatura ambiente e como tal, a sua função como refrigerante não é consequência da temperatura criogênica no momento da aplicação, mas sim do efeito Joule-Thomson. Neste caso o fluido é estrangulado adiabaticamente através da válvula de saída do sistema de refrigeração e sofre uma queda repentina de pressão. Esta redução da pressão é acompanhada por um aumento na energia potencial do fluido. Para que a entalpia permaneça constante, a energia cinética térmica do fluido é reduzida para acomodar esse aumento de energia potencial, e é conseqüentemente gerado o efeito de resfriamento do sistema. (PROUD *et al.*, 2022). O CO₂ também pode ser empregado no estado supercrítico (scCO₂), pois nesta condição ele tem um alto coeficiente de difusão, baixa viscosidade equivalente ao gás, densidade semelhante ao líquido e boa solubilidade com uma tensão superficial próxima de zero (ZHANG X *et al.*, 2020). Além disso, scCO₂ é o solvente fluido supercrítico mais amplamente usado na indústria. Lubrificantes industriais comuns, como óleos vegetais e minerais, podem ser efetivamente dissolvidos em scCO₂ (LIU *et al.*, 2021).

Pereira *et al.* (2016) investigaram a influência dos parâmetros do processo de usinagem em aço AISI 304L nos sistemas a seco, MQL, LN₂, CO₂, e combinados o sistema lubri-refrigerante MQL e LN₂, e MQL e CO₂, usando as condições nominais de corte. A velocidade de corte foi de 225 m/min, avanço de 0,25 mm/rot e profundidade de 1,5 mm, conforme ilustrado na Figura 20.



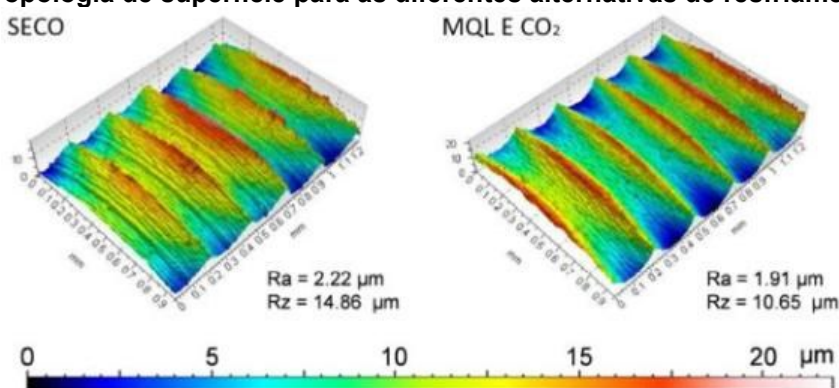
Os resultados obtidos ilustrados na Figura 21 mostraram ser possível aumentar a velocidade de corte para 300 m/min quando a usinagem MQL e CO₂ era usada, o que proporcionou uma redução no tempo de usinagem de 33%, duplicando a vida útil da ferramenta.

Figura 21 - Comparação entre tecnologias de usinagem com diferentes velocidades de corte



Conforme a Figura 22 a rugosidade superficial no sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂ foi melhor, pois indica um processo estável e controlável quando comparado ao processo a seco (PEREIRA et al., 2016).

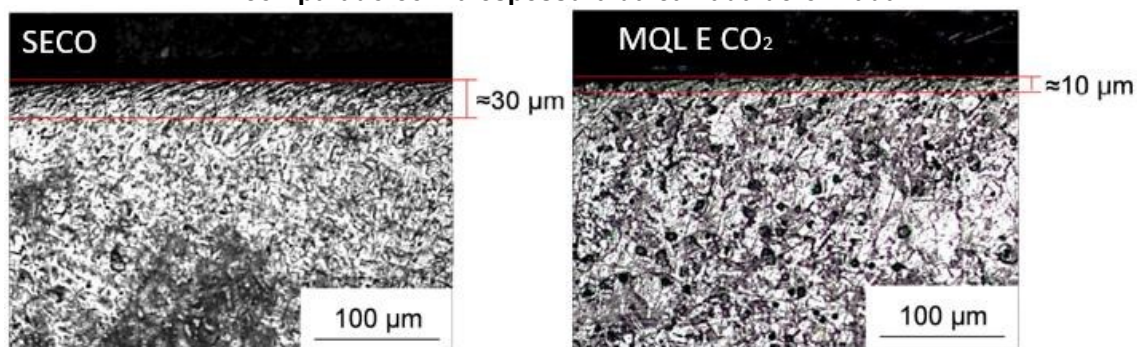
Figura 22 - Topologia de superfície para as diferentes alternativas de resfriamento testadas



Fonte: Pereira *et al.* (2016)

A análise microestrutural é essencial para determinar a zona afetada durante a usinagem. Desta forma, pode-se ver na Figura 23 a microestrutura de dois corpos de prova usinados a seco e com o sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂. Na usinagem a seco, a espessura da camada deformada foi notavelmente maior que o uso do sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂ ($\approx 30 \mu\text{m}$ de zona afetada para usinagem seca e menos de $10 \mu\text{m}$ usando alternativas criogênicas) (PEREIRA *et al.*, 2016).

Figura 23 - Microestrutura após torneamento usando usinagem a seco e MQL e CO₂ comparado com a espessura da camada deformada



Fonte: Pereira *et al.* (2016)

Além dos resultados mostrarem que o uso do sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂ implicarem num ganho de vida útil da ferramenta e de velocidade de corte, as forças de corte e a integridade da superfície são mantidas ou melhoradas em comparação com a usinagem a seco. Desta forma, a combinação de MQL e técnicas criogênicas são a chave para o sucesso, alcançando um equilíbrio entre questões técnicas e ambientais (PEREIRA *et al.*, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nessa dissertação está baseada no desenvolvimento de ensaios sistemáticos, visando a reprodução de situações que acontecem em ambiente industrial.

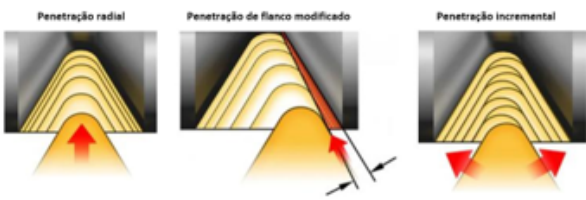
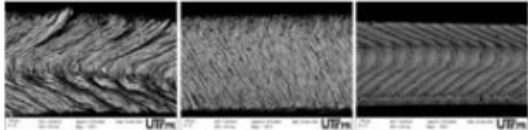


Neste capítulo são apresentadas as condições selecionadas nos ensaios de usinagem, o material utilizado e a sua forma/dimensão, o planejamento dos ensaios, a especificação das ferramentas utilizadas e os parâmetros de usinagem. Desta forma, pretende-se facilitar a compreensão da metodologia utilizada e assim possibilitar a reprodução deste processo, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Foram realizados ensaios em torno CNC na empresa de usinagem Metalúrgica Witek Usinagem Técnica Industrial, localizada em Curitiba. Foram empregados diferentes métodos de penetração: radial, flanco modificado e incremental com a aplicação de seção de usinagem constante, considerando seus efeitos sobre a formação do cavaco, vida da ferramenta e qualidade da rosca, nos dois sistemas de lubri-refrigeração propostos, ou seja, MQL e MQL e CO₂.

Durante os ensaios foram monitorados o desgaste da ferramenta, coletados os cavacos, e separados os corpos de prova, e ferramentas para posterior análise em laboratórios específicos da UTFPR e da AAM Araucária.

Os tópicos resumidos empregados durante o desenvolvimento do trabalho estão representados no Quadro 5.

Quadro 5 - Tópicos empregados durante o desenvolvimento do trabalho

Etapas	Ilustrações
Métodos experimentados (radial, flanco modificado e incremental) nos sistemas lubri-refrigerantes (MQL, MQL e CO ₂)	
Análise da morfologia dos cavacos resultantes da aplicação de diferentes meios lubri-refrigerantes	
Comparar o grau de recalque resultante para os diferentes métodos de penetração	
Análise do desgaste das ferramentas nos diferentes meios lubri-refrigerantes e métodos de penetração	
Análise da microdureza dos flancos da rosca obtidas com os diferentes sistemas (MQL, MQL e CO ₂)	

Fonte: Autoria própria (2022)

3.1 Material usinado

O material usinado foi o aço Inoxidável Austenítico AISI 304L. Sua composição química e propriedades mecânicas é apresentada na Tabela 3 e 4 (ASTM A276/16).

Tabela 3 - Composição Química (%) AISI 304 L

C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si	Fe
0.024	18.25	1.570	0.500	0.085	8.040	0.037	0.028	0.280	bal.

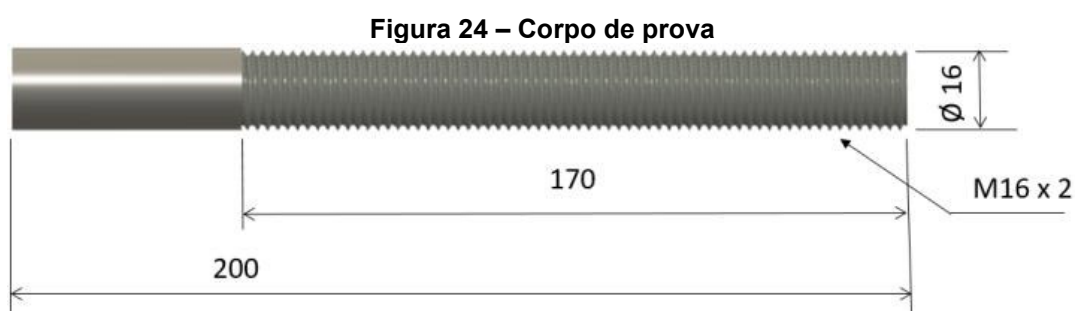
Fonte: GAVLAK & CIA Ltda. (2021)

Tabela 4 - Propriedades mecânicas

Característica	Valores
Dureza	218 HB
Limite de escoamento	629 MPa
Limite de resistência	737 MPa
Alongamento	42 %

Fonte: GAVLAK & CIA Ltda. (2021)

O desenho do corpo de prova empregado nos experimentos é ilustrado na Figura 24.

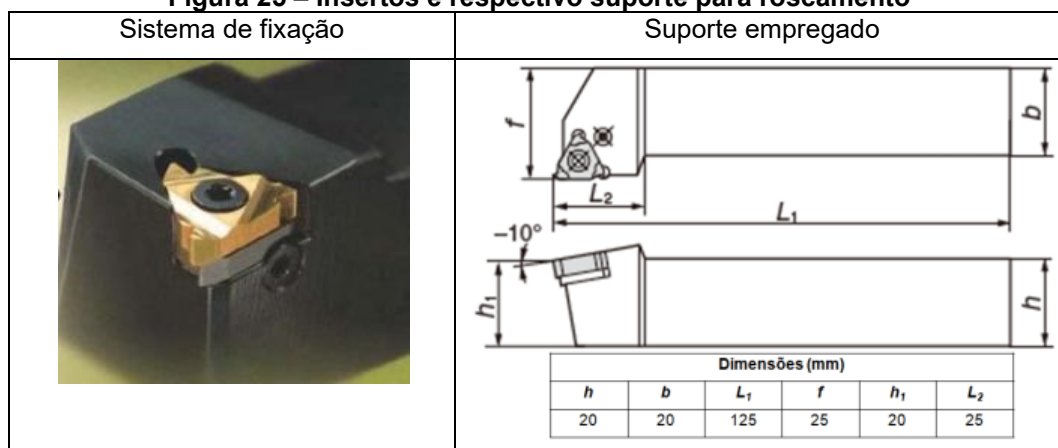


Fonte: Autoria própria (2021)

3.2 Ferramenta de roscamento

O suporte das ferramentas utilizado foi o R166.4FG-2020, conforme Figura 24. A codificação do inserto de metal duro usado foi R166.OG-16UNO1-200 (ISO S15-S25) classe M com revestimento PVD (TiC, Al₂O₃ TiN) classe GC 1020.

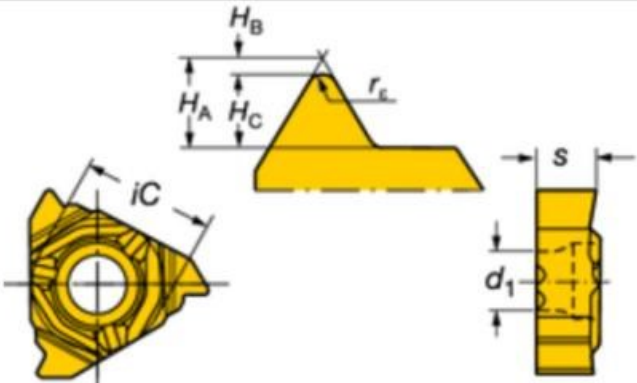
Figura 25 – Insertos e respectivo suporte para roscamento



Fonte: Adaptado de SANDIVIK (2012)

Apresentadas na Figura 26, estão as características do inserto bem como suas dimensões, para que os testes tenham maior confiabilidade nos resultados.

Figura 26 – Dimensões do inserto

Inserto utilizado	Dimensões (mm)
	<p>iC 9,525</p> <p>d_1 3,94</p> <p>S 3,81</p> <p>r_E 0,2</p>

Fonte: Adaptado de SANDIVIK (2012)

3.3 Máquina-ferramenta

Os ensaios foram realizados em um torno do CNC ROMI Centur 30D comando Siemens com a rotação máxima de 4000 rpm, conforme Figura 27, da Empresa Witek Usinagem Técnica Industrial.

Figura 27 – CNC ROMI Centur 30D



Fonte: Autoria própria (2021)

3.4 Parâmetros de usinagem

Os experimentos de roscamento (MQL, MQL e CO₂ combinados) foram realizados conforme as condições apresentadas na Tabela 5. Os parâmetros de corte foram similares aos empregados por Costa (2022), sendo que para os métodos de penetração radial e incremental a profundidade de corte por passada foi constante, enquanto para o método de flanco com uma de folga de 1° a seção do cavaco foi mantida constante.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem para penetração radial, flanco modificado e incremental

Parâmetros	Valores
Velocidade de Corte	51 m/min
Profundidade por passada constante (radial e incremental)	0,077 mm
Altura do filete	1,23 mm
Número de passes	16
Vazão MQL	50 ml/h
Pressão MQL	4,5 bar
Vazão CO ₂	3000 ml/h
Pressão de trabalho CO ₂	1,8 bar

Fonte: Autoria própria (2022)

3.5 Sistema lubri-refrigerante MQL

Na Figura 28 estão Ilustrados o Sistema nebulizador MQL e o fluido lubri-refrigerante para os testes. O Sistema MQL utilizado foi desenvolvido pela empresa chinesa Succkey com viscosidade líquida aplicável de até 68 mm²/s a 40 °C. Possui um canal de 1 mm de diâmetro interno do bico nebulizador, uma mangueira flexível de 300 mm e base magnética acoplada ao corpo da válvula. O fluido lubri-refrigerante para os testes com MQL utilizado puro foi Lubrix - Luxol A15. Neste teste o volume de névoa da micropulverização foi ajustado para 50 ml/h com uma pressão de 4,5 bar, conforme informado no catálogo do fabricante.

Figura 28 – Sistema MQL

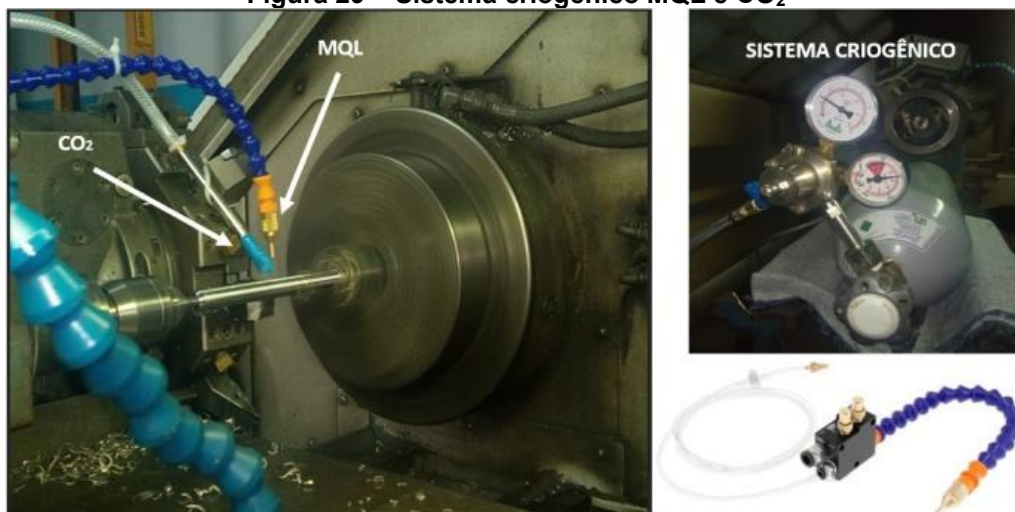


Fonte: A autoria própria (2021)

3.6 Sistema criogênico MQL e CO₂

Ilustrado na Figura 29 mostra o sistema criogênico MQL e CO₂ com vazão de 3000 ml/h realizado no experimento.

Figura 29 – Sistema criogênico MQL e CO₂



Fonte: A autoria própria (2021)

3.7 Medição das peças e aquisição de imagens

A medição dos desgastes de ferramenta, bem como a caracterização qualitativa dos filetes da rosca e a morfologia do cavaco, foi realizada com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo EVO MA 15 do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR, ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Sistema com Microscópio Eletrônico de Varredura EVO MA 15 do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR



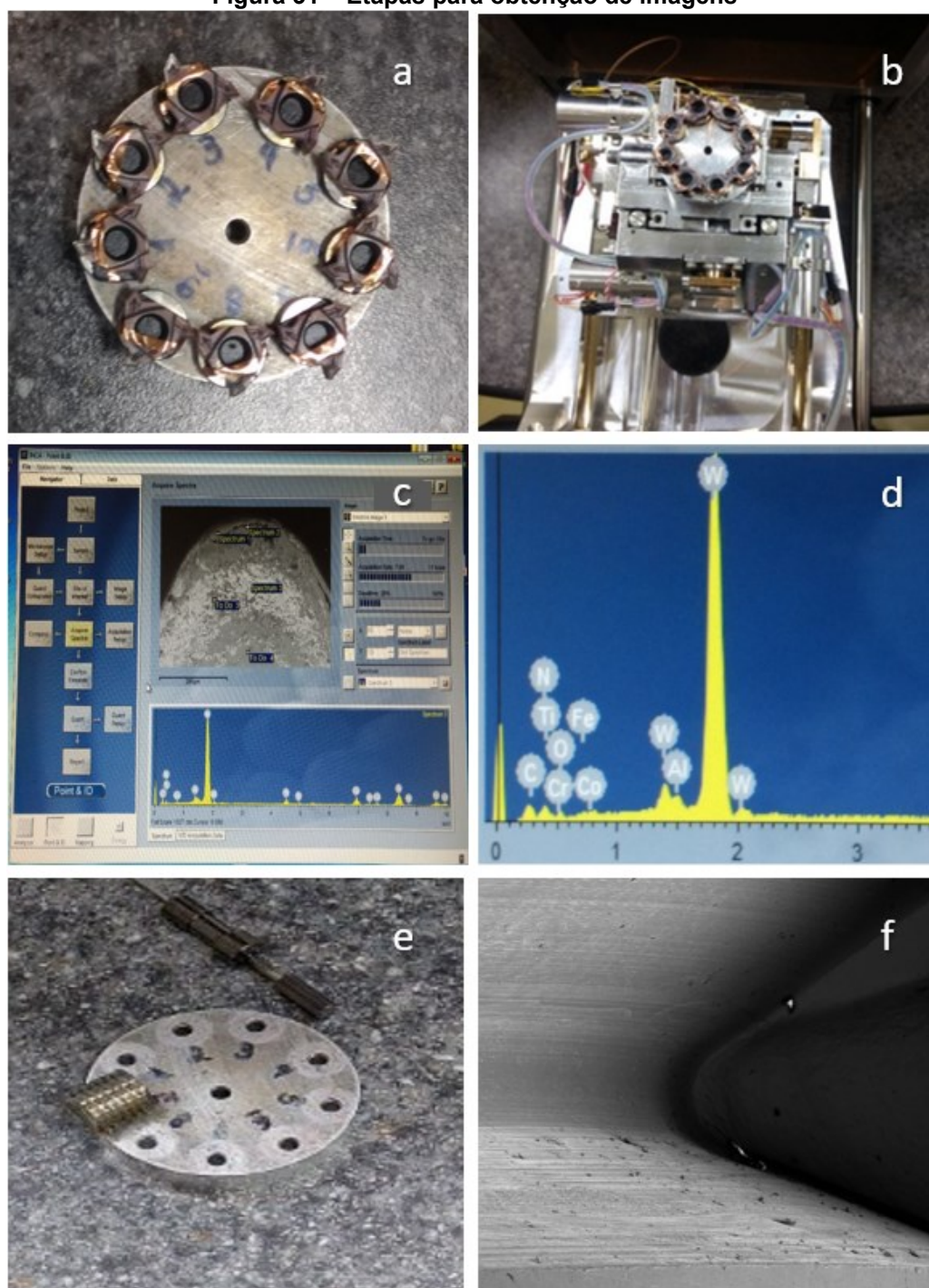
Fonte: Autoria própria (2021)

A preparação das etapas é ilustrada na Figura 31, sendo que em “a” é indicado o posicionamento de nove insertos na base de amostras, e em “b” as amostras fixadas no magazine para posterior acoplamento ao equipamento. Na posição “c” é mostrada a imagem da tela do *software*, e em “d” a análise EDS da peça em estudo. Na posição “e” é apresentada a rosca em corte transversal, e por último em “f” a imagem obtida pelo MEV do filete de rosca obtida.

Durante os experimentos, a cada múltiplo de quatro peças usinadas diferentes ferramentas foram selecionadas para análise das medições de desgaste, ou seja, a primeira ferramenta foi selecionada após usinar quatro peças, a segunda ferramenta foi selecionada após oito peças usinadas, a terceira ferramenta foi selecionada após a décima segunda peça, e assim por diante. Com esse procedimento realmente não foi possível obter a ferramenta da última peça aprovada para alguns casos. Para a análise do desgaste optou-se por selecionar a ferramenta

referente à oitava peça do método de penetração radial do sistema lubri-refrigerante MQL e compará-la com a ferramenta da oitava peça do sistema MQL-criogênico; no método de flanco modificado e também para o incremental foi analisada a ferramenta da décima sexta peça do sistema MQL e comparada com a ferramenta referente à décima sexta peça do sistema MQL-criogênico. Com a finalidade de identificar situações peculiares de cada sistema na mesma quantidade de peças usinadas.

Figura 31 – Etapas para obtenção de imagens



Fonte: Autoria própria (2021)

3.7.1 Medição da microdureza

As amostras foram preparadas por corte transversal e longitudinal de modo a possibilitar o embutimento para posterior lixamento, polimento e secagem das amostras. A avaliação da microdureza da superfície do filete após a operação de roscamento foi medida com o micro-indentador Wilson-Wolpert Tukon 2100B ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Micro-indentador Wilson-Wolpert Tukon 2100B

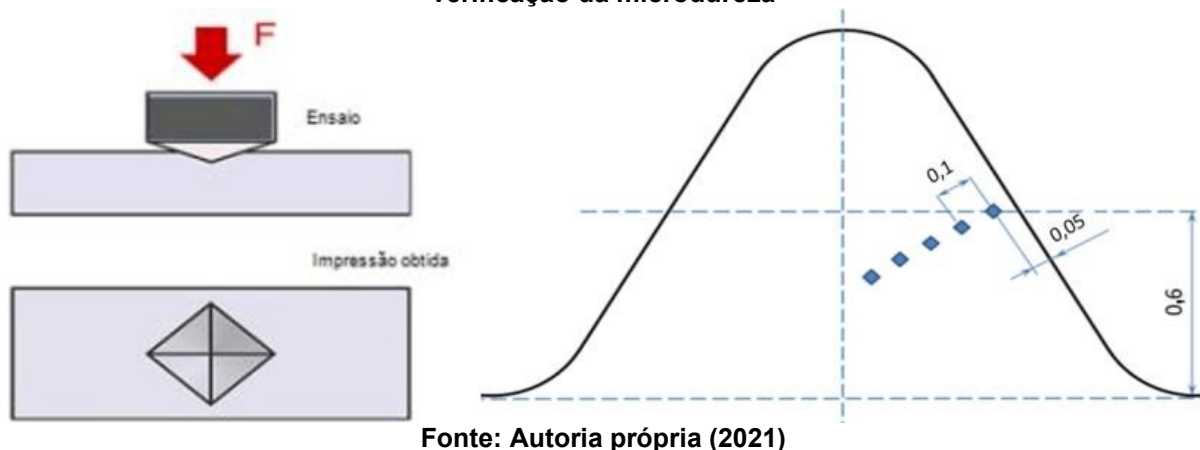


Fonte: Autoria própria (2021)

Os parâmetros aplicados foram: carga de 1 N com espaçamento de 5 pontos e do núcleo em cada amostra com tempo de aplicação de 15 s. O afastador utilizado é feito de diamante com dimensões tipo Vickers constantes, permitindo impressões independentes na aplicação da carga. Os dados eram adquiridos quando o indentador era pressionado contra a superfície da amostra de teste. Os resultados eram observados através do microscópio para verificação da mensuração, para posterior conversão do índice de dureza Vickers - HV.

As mensurações foram feitas em três amostras de filetes para cada condição, e considerada a média de três medições para cada conjunto de amostras. As medidas foram tomadas profundamente no material ao longo de uma linha reta perpendicular à superfície do flanco, conforme ilustrado na Figura 33. Os valores de microdureza foram observados diretamente no painel do microdurômetro.

Figura 33 - Esquemática do filete com a marcação equidistantes dos pontos para verificação da microdureza



3.7.2 Medição do grau de recalque

Para cada método empregado no decorrer do roscamento eram realizadas paradas estratégicas para coleta de cavacos. Os cavacos foram medidos usando um micrômetro digital para calcular o do grau de recalque (R_c) conforme equação 1. Inicialmente os cavacos foram cortados em segmentos de aproximadamente 10 mm. Para cada conjunto de parâmetros testados foram considerados três desses segmentos. Através de um micrômetro digital externo com ponta cônica 0-25mm resolução 0,001mm foram realizadas cinco medições e considerada a média para cada conjunto de cavacos.

$$R_c = \frac{h'}{h} \quad (1)$$

Sendo h = espessura de corte; h' = espessura do cavaco

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados por meio de gráficos, imagens, tabelas, e comentários os resultados e discussões dos testes experimentais realizados no aço inoxidável austenítico AISI 304L.

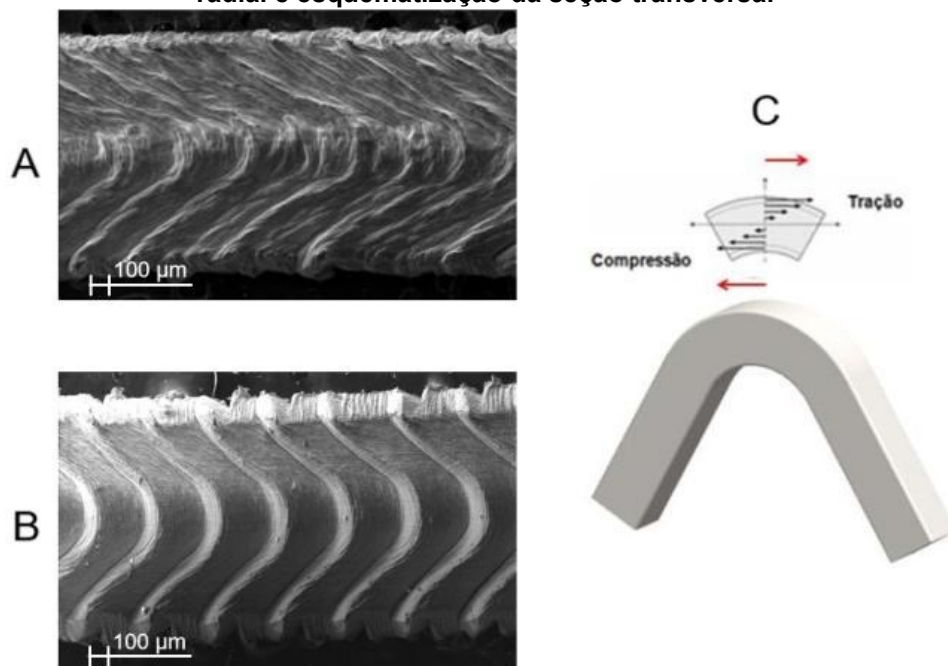
4.1 Morfologia do cavaco

Durante o processo de usinagem, os aços inoxidáveis caracterizam-se pela tendência de gerar cavacos longos e flexíveis, com grande possibilidade de adesão à ferramenta de corte, dificultando em muito o fluxo do mesmo, reduzindo a vida da ferramenta além de afetar a qualidade da superfície.

Após o último passe de roscamento da quarta peça pelo método de penetração radial nos dois sistemas de lubri-refrigeração MQL e criogênico foi coletado o cavaco para posterior análise no microscópio eletrônico de varredura. A Figura 34 possui as posições “A, B e C” que serão detalhadas na sequência abaixo.

Na posição “A” observam-se características predominantes na usinagem com o MQL cujo cavaco obtido possui aspecto proveniente da ação das arestas de corte e raio da ponta da ferramenta inerentes ao método de penetração radial. Na parte central é possível verificar a origem da formação do cavaco associada à formação da raiz do filete causada pelo contato entre o raio da ponta da ferramenta e o material da peça. Isto ocorre continuamente, porém com falta de uniformidade, o que pode estar associado ao desgaste da ferramenta. Na posição “B” as características predominantes do cavaco gerado pelo sistema MQL-criogênico são semelhantes às observadas com o sistema MQL, porém são uniformes, o que demonstra que a ferramenta apresenta pouco desgaste. Nota-se na posição “C” a representação da seção transversal do cavaco em forma de V, sendo que na parte superior prevalece a tração, enquanto na inferior ocorre a compressão (Costa, 2022).

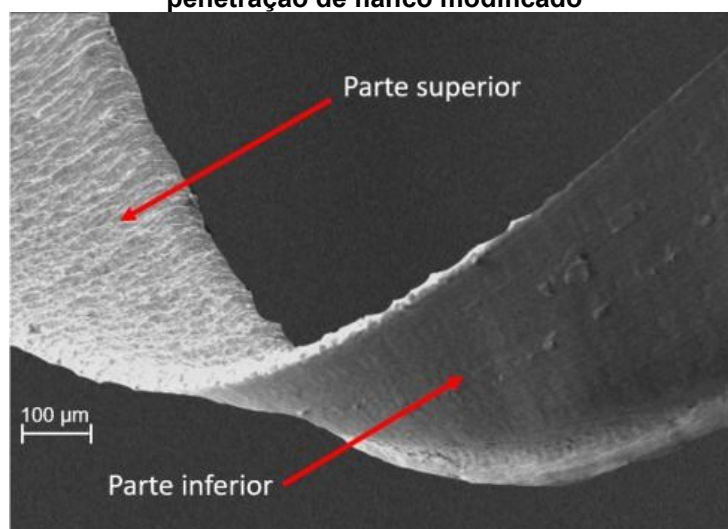
Figura 34 - Cavaco real obtido durante o último passe da quarta peça por meio da penetração radial e esquematização da seção transversal



Fonte: A) e B) Autoria própria (2022); C) Costa (2022)

Na Figura 35 pode ser visto que a superfície inferior do cavaco a qual se desloca sobre a superfície de saída da ferramenta é mais lisa. Enquanto a superfície superior possui maior irregularidade. Este fato ocorre independentemente do sistema de lubri-refrigeração e método de penetração empregados.

Figura 35 - Representação das superfícies inferior e superior do cavaco para o método de penetração de flanco modificado

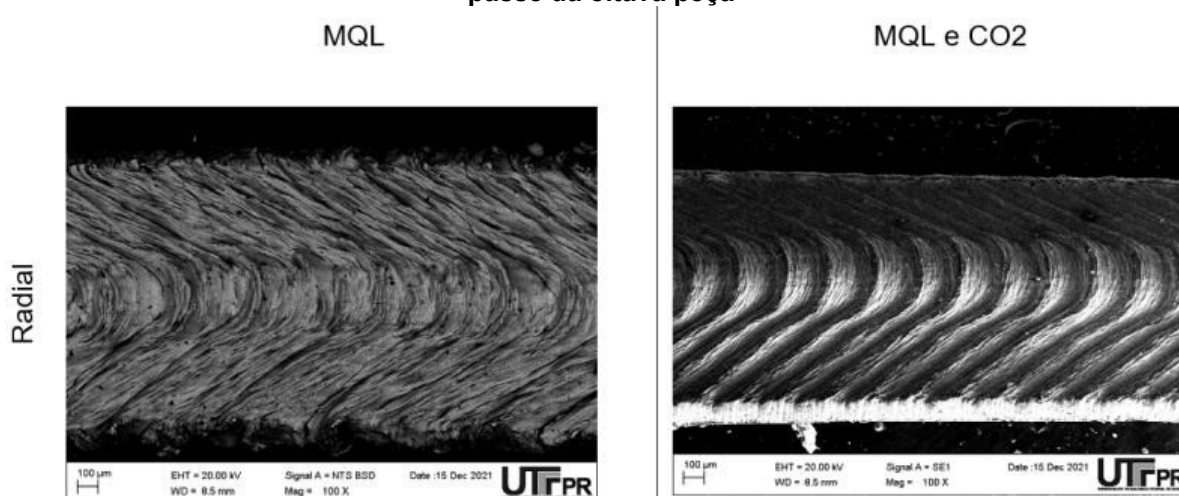


Fonte: Autoria própria (2022)

Após a usinagem referente ao último passe da oitava peça dos três métodos de roscamento, em cada sistema lubri-refrigerante experimentado foram coletadas amostras de cavacos para análise. O último passe realizado é o mais crítico, pois a área de contato entre a ferramenta de corte aumenta a cada passe realizado, tendo efeitos significativos sobre a formação e escorregamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta. A Figura 36 ilustra a superfície superior do cavaco obtida em cada sistema para o método de penetração radial.

A característica predominante para o método de penetração radial é a seção do cavaco em forma de V. É notório que para o meio lubri-refrigerante MQL o cavaco apresenta rebarbas em suas laterais, associadas à maior dificuldade na sua formação devido ao desgaste da ferramenta. Para o sistema MQL-criogênico as bordas do cavaco são lisas e uniformes, com poucas alterações em relação ao cavaco gerado na quarta peça. Para essa condição o desgaste da ferramenta não foi suficiente para alterar significativamente as condições de formação do cavaco.

Figura 36 - Lado superior dos cavacos obtidos do método de penetração radial, para o último passe da oitava peça

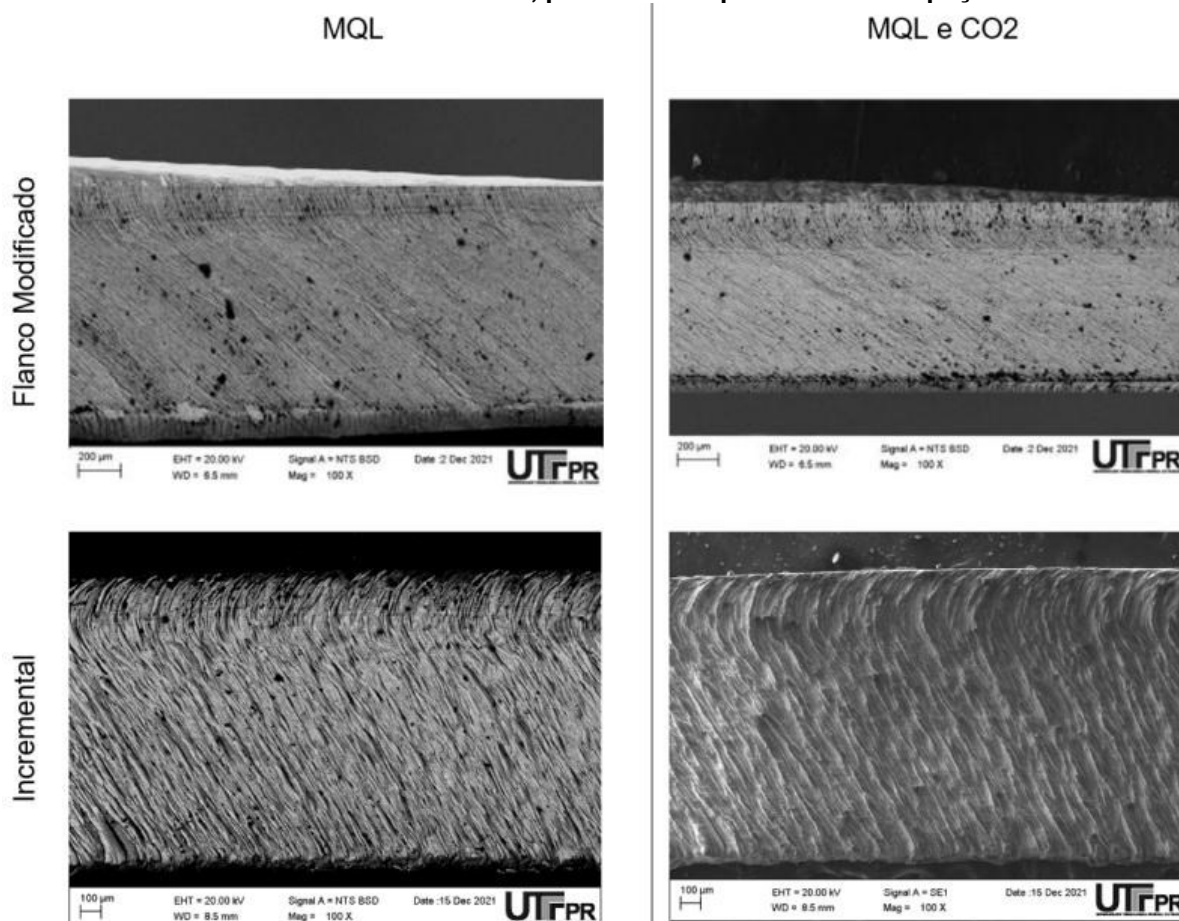


Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 37 observa-se o lado superior do cavaco no método de penetração de flanco modificado e também para o método incremental. Para o método de flanco modificado, o emprego dos dois sistemas lubri-refrigerantes resultou em características semelhantes quanto à morfologia do cavaco. Em comparação ao método de penetração radial, notou-se uma melhor geração de cavaco devido à menor restrição do seu fluxo. Neste caso, a formação do cavaco se caracterizou pelo

paralelismo em relação à aresta principal de corte que teve um comprimento de contato maior com o flanco do filete. Além disso, é possível observar a formação de uma pequena curvatura referente ao contato da ponta da ferramenta. Na mesma figura é ilustrado o método de penetração incremental, sendo que os cavacos obtidos são similares ao método de penetração de flanco. Para o sistema MQL-criogênico observa-se que a qualidade do cavaco é superior aos demais métodos analisados. Nota-se que não há protuberâncias devido à adesão de materiais, ou características de obstrução de escorregamento do cavaco, ou outra característica que indique aumento de sua deformação.

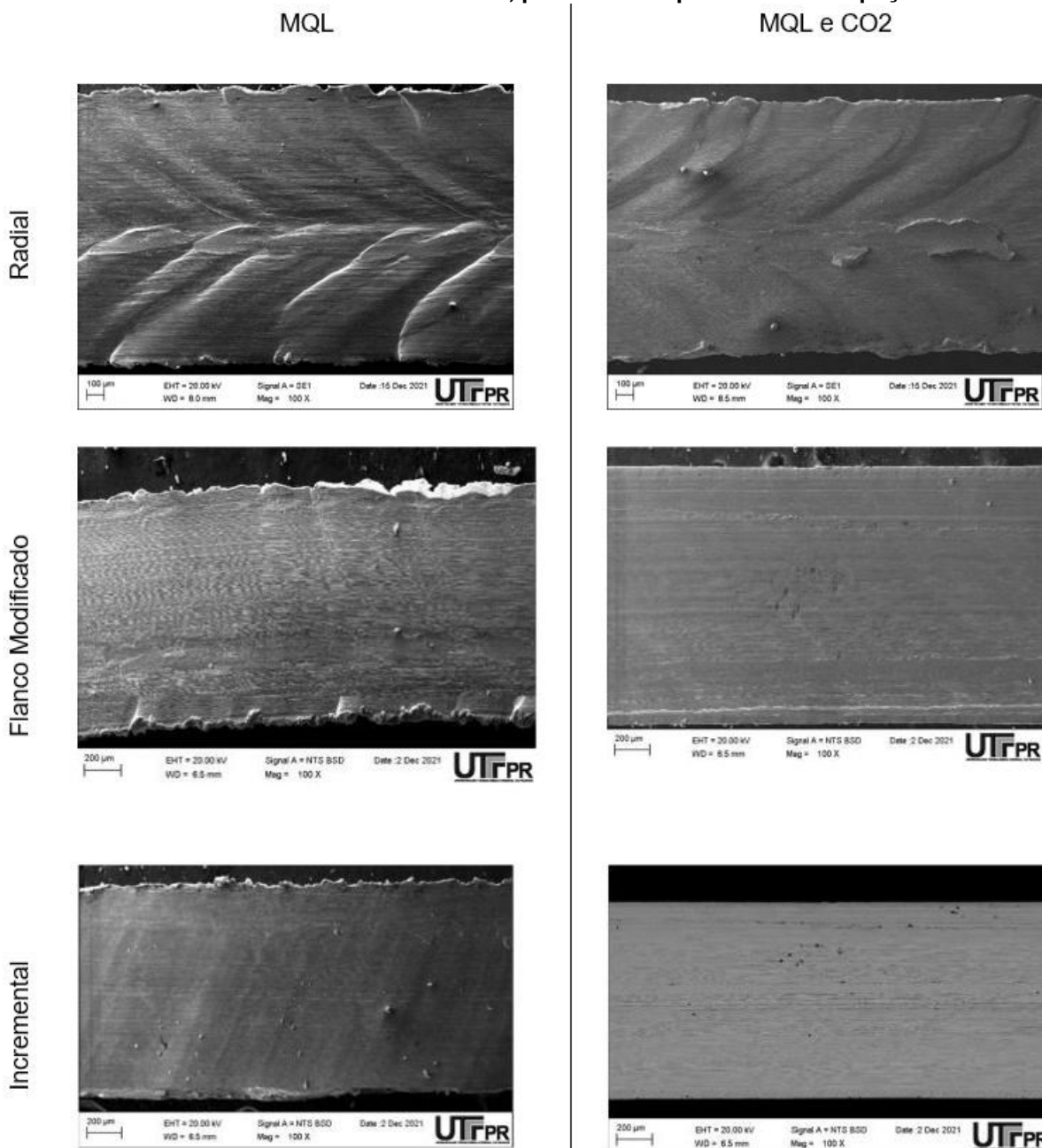
Figura 37 - Lado superior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de penetração flanco modificado e incremental, para o último passe da oitava peça



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 38 apresenta o lado inferior do cavaco obtido pelos métodos de penetração radial, flanco modificado e incremental dos sistemas de lubri-refrigeração MQL, MQL e CO₂ que tiveram contato com a superfície de saída da ferramenta.

Figura 38 - Lado inferior dos cavacos obtidos por meio dos métodos de penetração radial, flanco modificado e incremental, para o último passe da oitava peça



Fonte: Autoria própria (2022)

A característica do lado inferior do cavaco é ser mais lisa que a parte superior. É possível constatar que a influência do desgaste da ferramenta sobre o cavaco é mais preponderante no sistema lubri-refrigerante MQL, onde há adesão do material da peça sobre a superfície do cavaco para todos os métodos de penetração. Para o sistema MQL-criogênico isto não ocorreu de forma significativa.

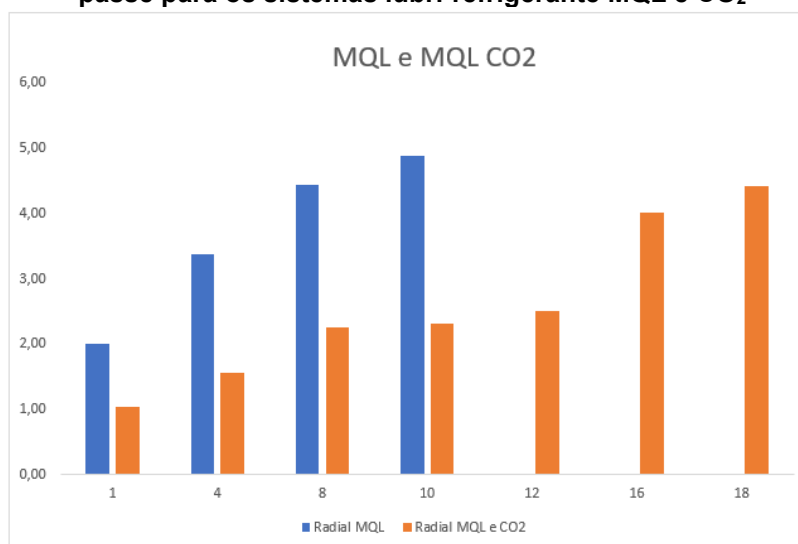
Durante o experimento de roscamento dos três métodos de penetração, independentemente do sistema de lubri-refrigeração empregado, notou-se que os

cavacos gerados foram longos em forma helicoidal em razão da pequena profundidade de corte, pois o valor do avanço foi relativamente alto por representar o passo da rosca. Esta característica é predominante de materiais dúcteis.

4.2 Grau de recalque

Os valores medidos do grau de recalque referentes ao último passe das peças roscadas no método de penetração radial para os sistemas lubri-refrigerante MQL e MQL-criogênico estão ilustrados na Figura 39. Observa-se que os valores de grau de recalque crescem à medida que aumentam o número de peças roscadas em função do desgaste das ferramentas. Nota-se que o grau de recalque na primeira peça do método de penetração radial com o sistema MQL já era relativamente elevado, esse fato ocorre por o corte ser realizado em V, aumentando o esforço de corte e há uma tendência ao encruamento do aço inoxidável austenítico durante o processo de usinagem. Com a progressão das usinagens, o grau de recalque no sistema MQL tornou-se maior a cada peça usinada. A última peça aprovada após a verificação com o calibrador foi a décima, sendo que o grau de recalque medido foi 4,89. Para o sistema MQL-criogênico o grau de recalque manteve-se mais baixo, atingindo um número maior de peças. A combinação do MQL com a criogenia permitiu uma redução na temperatura da zona de corte, mantendo assim a capacidade de lubrificação do filme de óleo por mais tempo. Neste caso a última peça aprovada foi a décima oitava, sendo que o grau de recalque resultante foi 4,43.

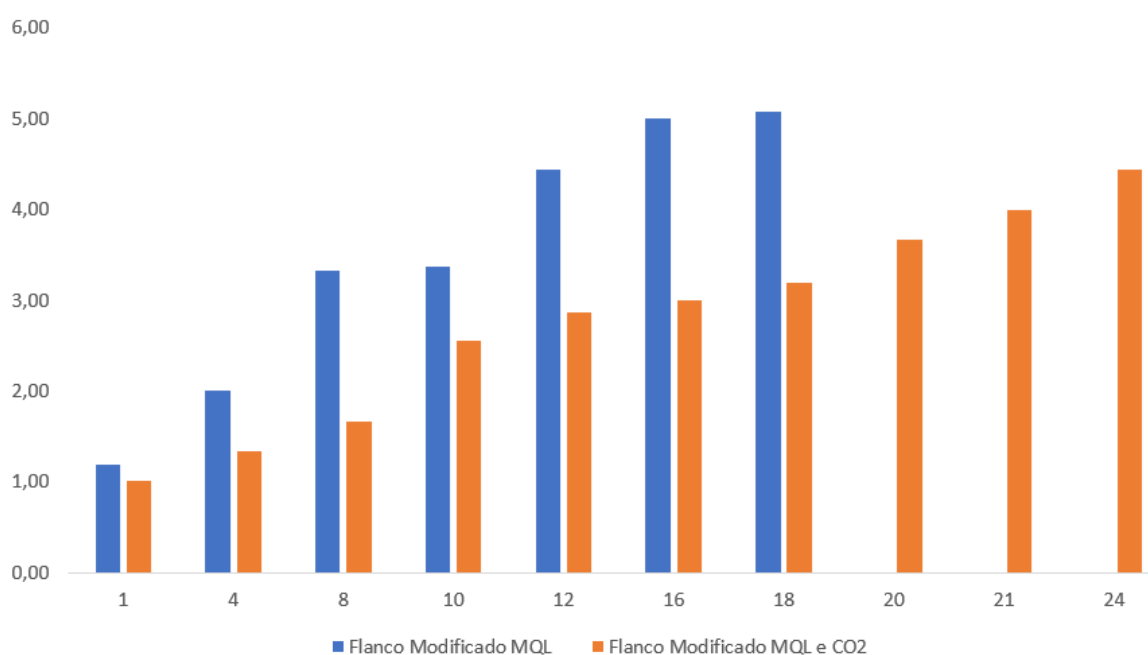
Figura 39 - Grau de recalque em função do método de penetração radial durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

Para os valores do grau de recalque no método de penetração de flanco modificado ilustrado na Figura 40, observa-se uma melhora quando comparado ao método radial. Os valores aumentam progressivamente com a quantidade de peças usinadas. No sistema MQL para a última peça aprovada, que correspondeu à décima oitava, o Rc ficou em 5,08. Enquanto para o sistema MQL e CO₂ a última peça aprovada foi a vigésima quarta, cujo grau de recalque resultante foi 4,44.

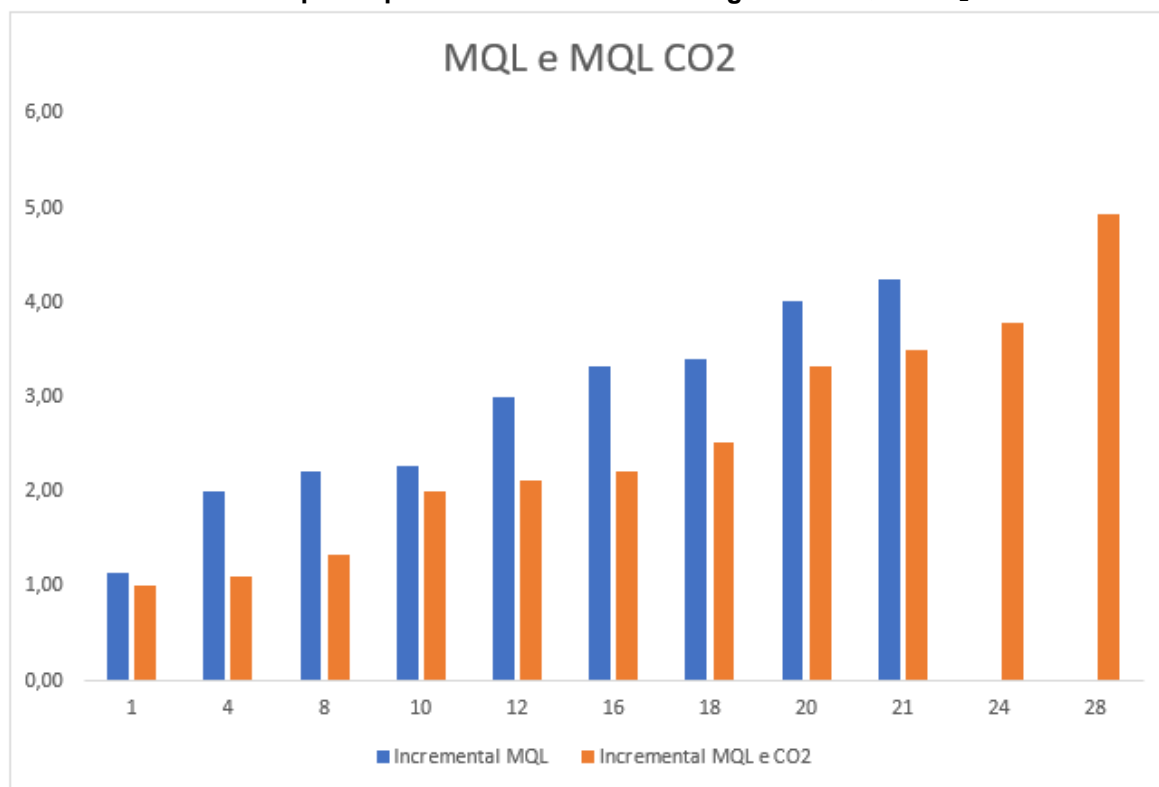
Figura 40 - Grau de recalque em função do método de penetração de flanco modificado durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO₂
MQL e MQL CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores referentes ao método incremental mostrados na Figura 41 demonstram melhora significativa no grau de recalque quando comparados aos métodos de penetração anteriores. Para o sistema MQL a última peça aprovada foi a vigésima primeira e seu Rc foi 4,24. Ao passo que para o sistema MQL e CO₂ a última peça aprovada foi a vigésima oitava com Rc de 4,94. Em todos os casos o sistema MQL-criogênico é o que apresenta os melhores resultados, pois favorece no aumento da vida útil da ferramenta e melhora a morfologia do cavaco independentemente do método de penetração.

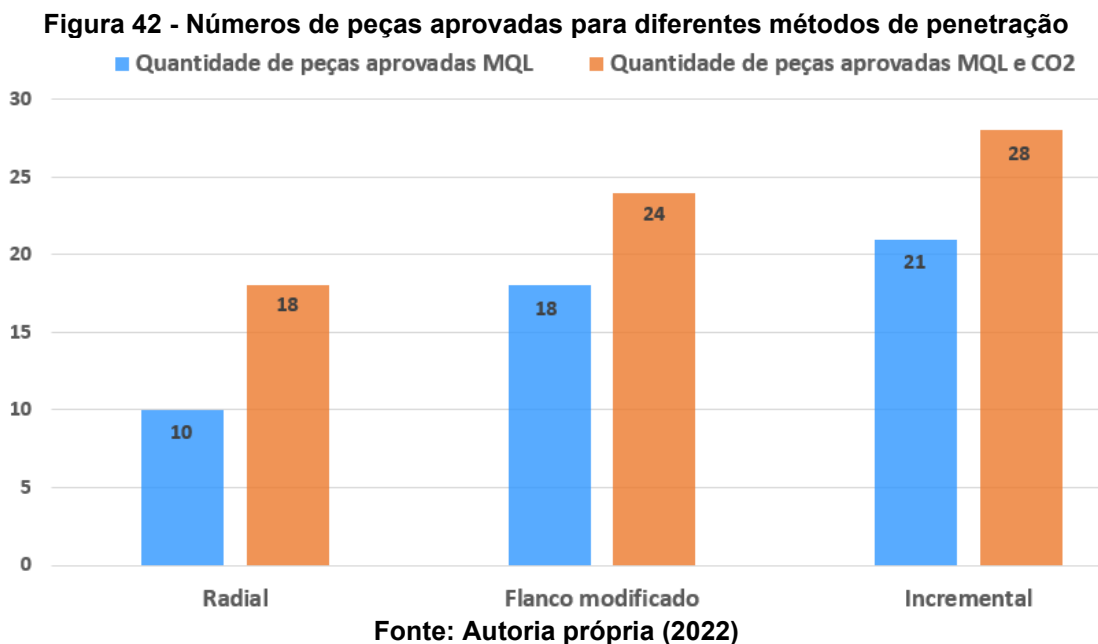
Figura 41 - Grau de recalque em função do método de penetração incremental durante o último passe para os sistemas lubri-refrigerante MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Vida da ferramenta

Foi estabelecido como critério de fim de vida da ferramenta o número de peças aprovadas por meio de verificação com calibrador P-NP (passa e não-passa) após os experimentos com os sistemas lubri-refrigerantes MQL e MQL com CO₂. A quantidade de peças aprovadas para cada condição é ilustrada na Figura 42. O número de peças aprovadas foi superior aos encontrados na pesquisa de Costa (2022) que foi realizada em corpos de prova semelhantes e com os mesmos parâmetros de corte, mas sem o uso de um meio lubri-refrigerante. Ele reportou que foram aprovadas sete, dezesseis e doze peças para os métodos de penetração radial, flanco modificado e incremental, respectivamente. Como era de se esperar, o emprego dos sistemas lubri-refrigerantes aumentou consideravelmente a vida das ferramentas, principalmente com a aplicação simultânea de MQL e CO₂.



O emprego de MQL proporciona um aumento na vida da ferramenta quando comparado ao corte a seco em função da lubrificação proporcionada pelo óleo. No entanto, conforme Li e Wong (2014), a viscosidade do óleo lubrificante diminui devido às altas temperaturas e pressões na zona de corte resultantes do progressivo desgaste da ferramenta. A película de óleo torna-se fina e pode se romper, resultando em atrito seco na interface ferramenta-peça e consequente redução da vida da ferramenta. A diminuição da temperatura resultante do emprego do sistema MQL-criogênico possibilita que a viscosidade do óleo seja suficiente para assegurar a manutenção da espessura do filme, proporcionando a separação completa das superfícies da ferramenta e da peça por mais tempo. Além disso, o sistema MQL-criogênico reduz os efeitos térmicos e diminui significativamente a adesão do material da peça sobre a ferramenta, permitindo um aumento considerável na sua vida útil.

4.3.1 Desgaste de ferramenta para o método de penetração radial

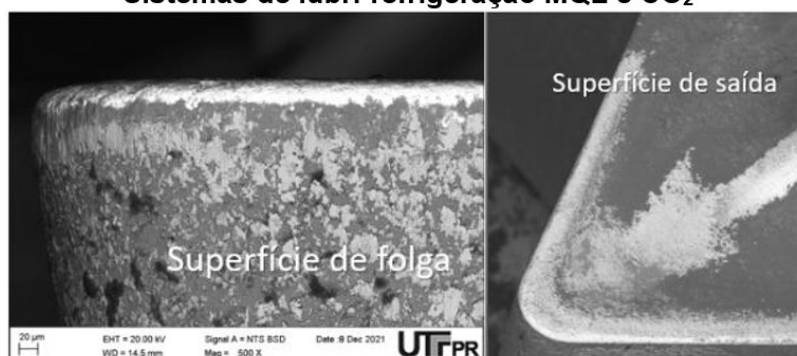
A Figura 43 ilustra as imagens após a usinagem do último passe da oitava peça aprovada para o método de penetração radial nos dois sistemas de lubrificação MQL e criogênico analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para a ferramenta empregada no sistema MQL ocorreu desgaste próximo ao raio de ponta. Isto pode ser explicado pelo fato de que no método de penetração

radial nas regiões onde o corte é realizado pelas arestas de corte o cavaco é restringido por um lado e é livre em outro. Ao passo que na região onde o corte é realizado pelo raio de ponta da ferramenta o cavaco é restringido em ambos os lados. Isto acarreta maiores tensões na ponta da ferramenta que podem ocasionar lascamentos e quebras. Somam-se ainda as condições críticas que ocorrem durante o processo de roscamento do aço inoxidável, como cavacos abrasivos, altas temperaturas, adesão e encruamento do material como descrito por Costa (2022). Conforme Kong *et al.* (2016) peças de materiais com altas taxas de encruamento produzem rebarbas duras, que causam alta tensão e atrito na superfície de folga da ferramenta. Com isso, o material da peça tende a aderir na superfície de folga da ferramenta alterando sua microgeometria. De acordo com Costa (2022), isto aumenta o atrito e a geração de calor, resultando em condições severas na ponta da ferramenta. Como consequência nota-se a acelerada redução na vida da ferramenta e comprometimento do acabamento da superfície da peça. Com relação ao desgaste da ferramenta no sistema MQL-criogênico, observa-se menor adesão do material da peça na aresta de corte, e há pouca adesão de material nas superfícies de folga e de saída, ao contrário do que ocorreu no sistema MQL que foi nitidamente maior.

Figura 43 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração radial após oitava peça Sistema de lubri-refrigeração MQL



Sistemas de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 44 retrata a superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração radial após a usinagem da oitava peça com o sistema lubri-refrigerante MQL. Conforme a Tabela 6 confirmou-se a presença dos elementos químicos da peça na superfície de saída da ferramenta através da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Figura 44 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração radial após a oitava peça para o sistema lubri-refrigerante MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 6 - Análise EDS da oitava peça por meio do método de penetração radial com sistemas de lubri-refrigeração MQL

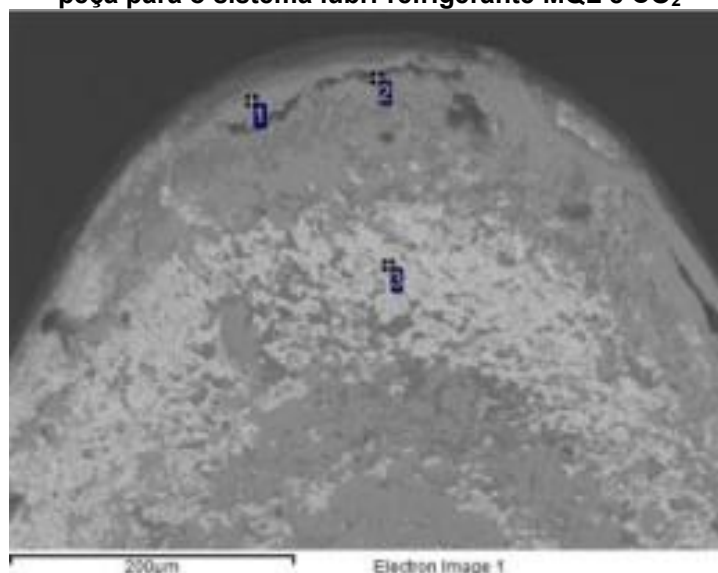
Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1			40.14	36.10	11.36
2			58.44	15.95	17.70
3			56.42	15.71	15.29

Fonte: Autoria própria (2022)

A tabela 6 indica que houve desgaste na ponta da ferramenta, sendo que os pontos 1, 2 e 3 não mais apresentavam os elementos do revestimento Ti e N. Em todos os casos houve adesão do material da peça na ferramenta indicada pela concentração elevada de Fe (40,14%) no ponto 1, assim como exposição do substrato da ferramenta com a presença de Co (36,10%) e W (11,36%). No ponto 2 os mesmos elementos possuem concentração de 58,44% 15,95% e 17,70%, respectivamente. E no ponto 3 são respectivamente 56,42%, 15,71% e 15,29%.

A Figura 45 retrata a superfície de saída da ferramenta após a usinagem da oitava peça com o sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂. A análise EDS é mostrada na Tabela 7.

Figura 45 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração radial após a oitava peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂



Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 7 - Análise EDS da oitava peça por meio do método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂

Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1			25.12	7.13	
2			22.60	2.92	7.78
3	32.98	1.26			27.51

Fonte: Aatoria própria (2022)

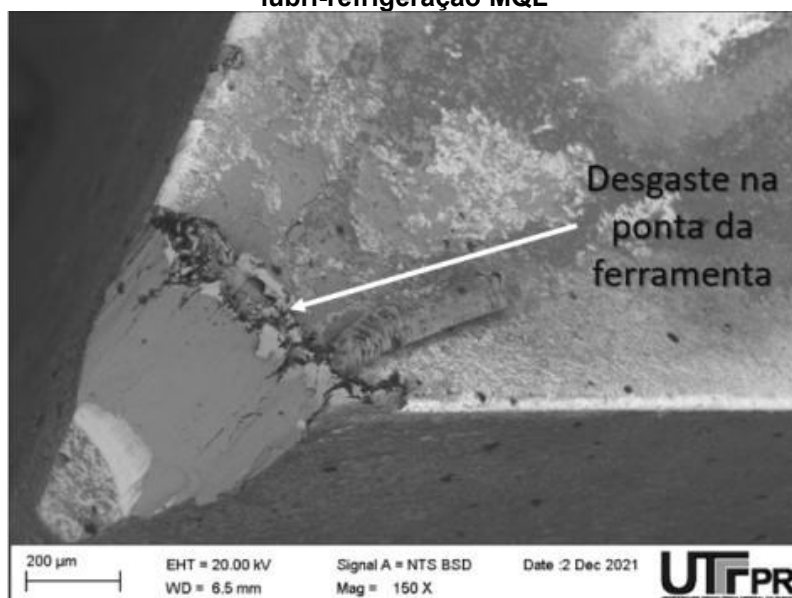
Assim como no sistema não MQL-criogênico analisado, as características do inserto de PVD foram comprometidas, no ponto 1, próximo à aresta de corte, há concentração de Fe com 25,12%, devido à adesão do material da peça à ferramenta de corte. Estão no ponto 2, os elementos do substrato da ferramenta Co e W contendo 2,92% e 7,78%, respectivamente. Foi detectada a presença de elementos do revestimento Ti e N com 32,98% e 1,26% respectivamente no ponto 3 e um aumento do elemento W do substrato com 27,51%. Desta forma, de acordo com os dados da análise EDS foram preservadas por mais tempo as características iniciais

do revestimento no sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂ quando comparado com o sistema de lubri-refrigeração MQL.

Com a progressão dos testes a décima primeira peça usinada no sistema de lubri-refrigeração MQL foi rejeitada, e da mesma forma ocorreu na décima nona do sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂, pois a alteração da geometria das ferramentas devido ao desgaste e as adesões influenciaram negativamente no perfil das roscas.

A Figura 46 mostra a imagem da ferramenta que usinou a décima primeira peça pelo método de penetração radial com o sistema de lubri-refrigeração MQL, a qual foi reprovada. É notório o desgaste excessivo na ponta da ferramenta.

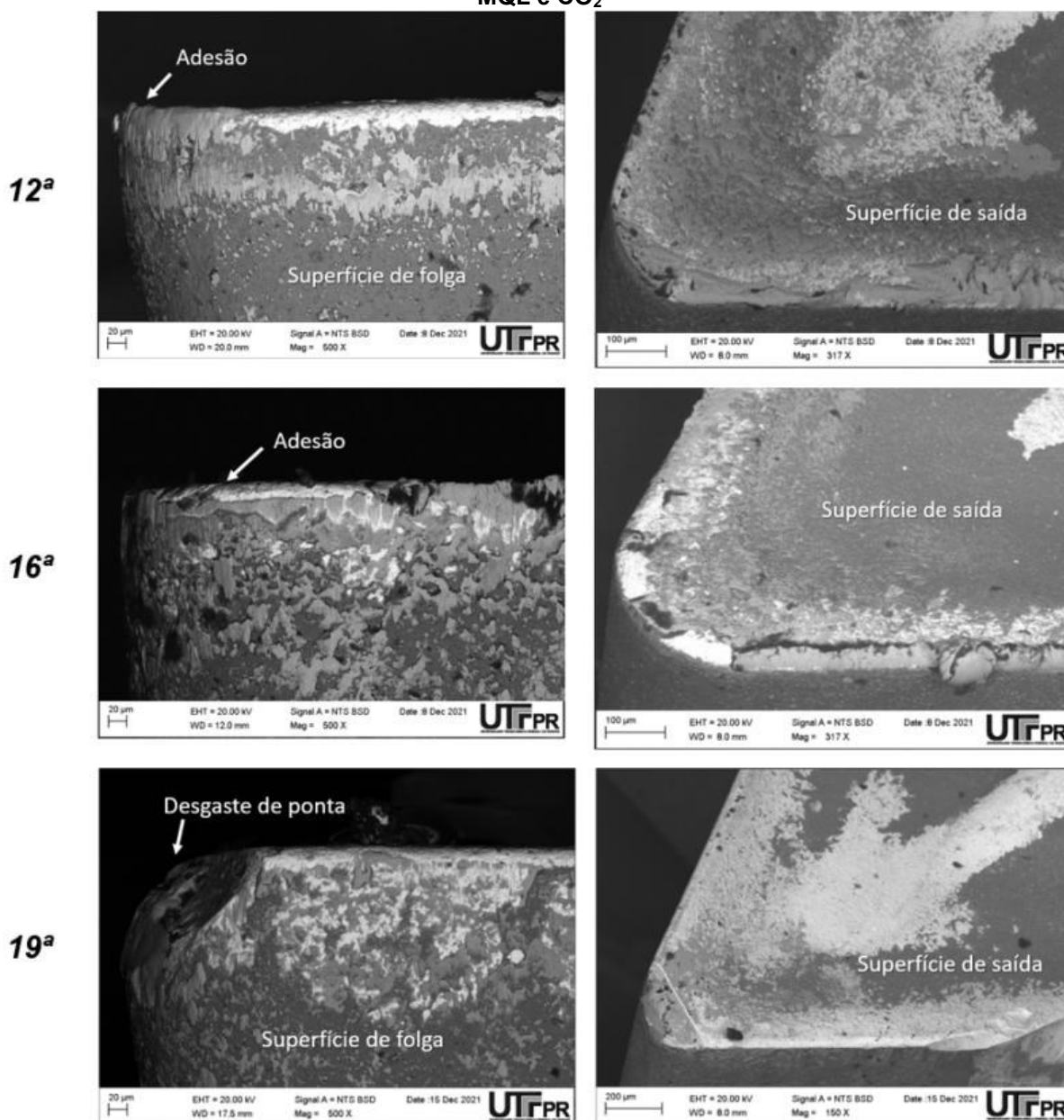
Figura 46 - Ferramenta da décima primeira pelo método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 47 mostra as ferramentas empregadas com o método de penetração radial e sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂ após a usinagem da décima segunda, décima sexta e décima nona peça.

Figura 47 – Ferramentas do método de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



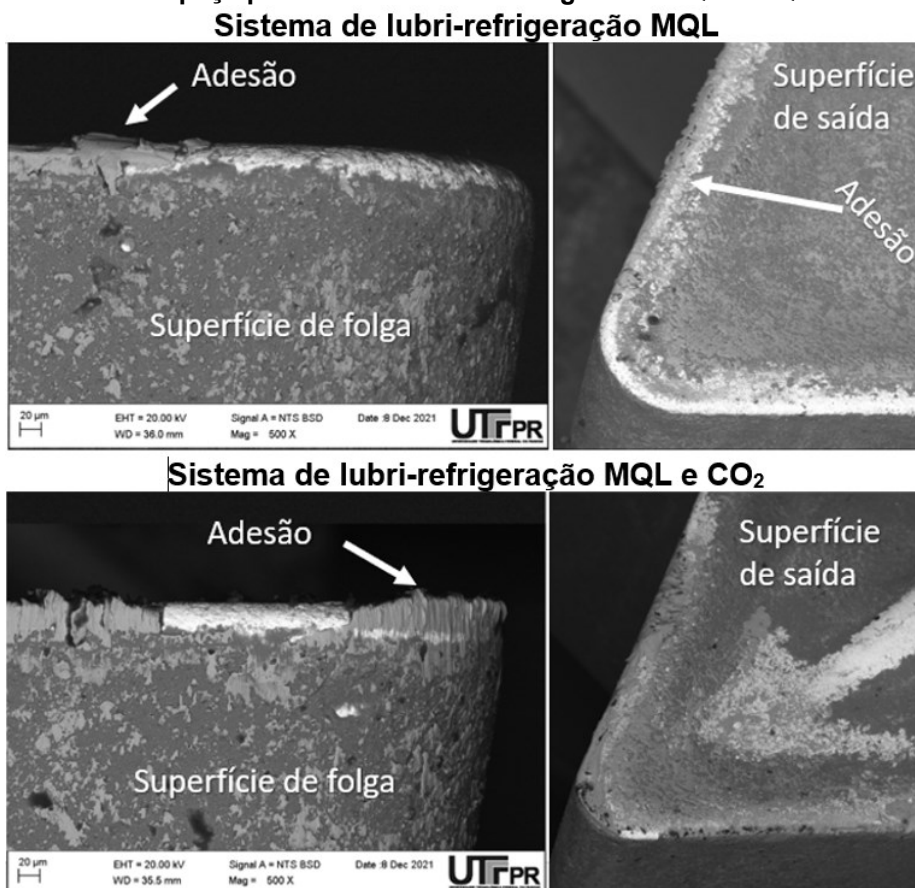
Fonte: Autoria própria (2022)

Na décima segunda peça observa-se o desgaste de flanco e a adesão do material da peça na ponta da ferramenta, na décima sexta torna-se mais evidente a adesão do material da peça na ponta da ferramenta e na décima nona (reprovada) nota-se o elevado desgaste na ponta da ferramenta.

4.3.2 Desgaste de ferramenta para o método de penetração de flanco modificado

Na Figura 48 observa-se a imagem da ferramenta após o último passe da décima sexta peça aprovada para o método de penetração de flanco modificado nos dois sistemas de lubri-refrigeração MQL e criogênico analisada no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para o sistema MQL ocorreu desgaste da ponta da ferramenta com adesão do material da peça na região da aresta de corte. Para o sistema MQL-criogênico os desgastes nas superfícies de folga e de saída foram menores. Porém, é possível verificar a adesão do material da peça no flanco da ferramenta.

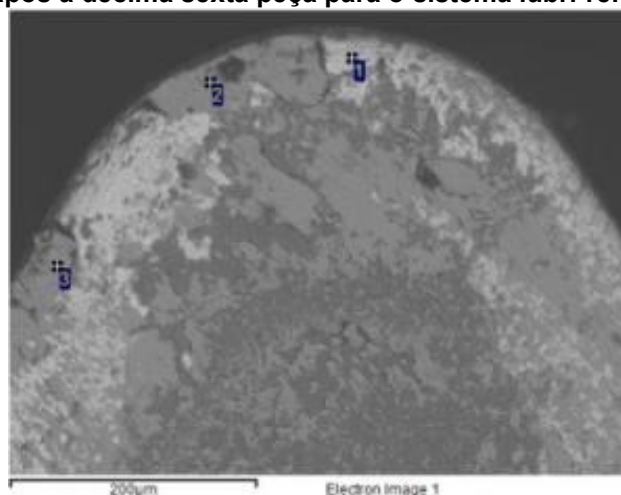
Figura 48 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e MQL com CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 49 ilustra a superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após a usinagem da décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e a Tabela 8 apresenta a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) dessa ferramenta.

Figura 49 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após a décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 8 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL

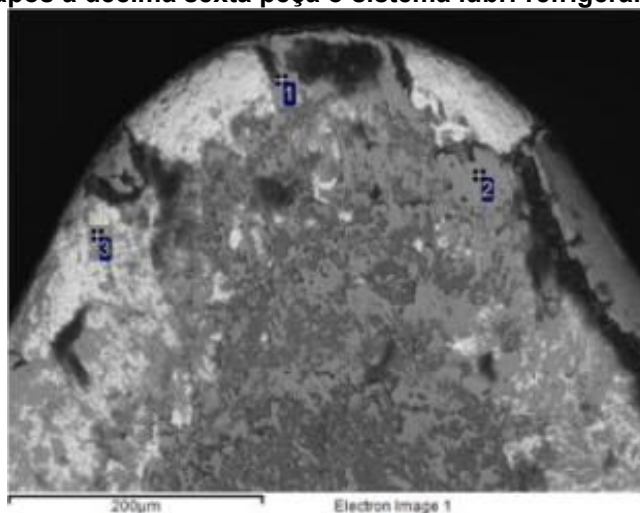
Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1	49.79	21.27	6.41		
2	0.45		7.12	6.21	70.05
3	0.24		60.09		

Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com a Tabela 8, as características do inserto de PVD foram preservadas no ponto 1, onde as concentrações de Ti e N são 49,79% e 21,27%, respectivamente. A adesão de Fe foi de 6,41%. No ponto 2 o elemento químico Ti foi encontrado, mas em baixa quantidade 0,45%, por outro lado, o substrato da ferramenta foi exposto com os elementos Co e W apresentando concentrações de 6,21% e 70,05%, respectivamente. Houve adesão do material da peça indicada pela presença de Fe (7,12%). No ponto 3 semelhantemente ao ponto 2 o elemento Ti foi encontrado em baixa quantidade com 0,24%. No entanto, houve também adesão do material da peça como indicado pela presença de Fe (60,09%).

Na Figura 50 é apresentada a superfície de saída da ferramenta usada no método de penetração de flanco modificado após a usinagem da décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂. A Tabela 9 apresenta os elementos químicos encontrados na peça na superfície de saída da ferramenta através da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Figura 50 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração de flanco modificado após a décima sexta peça o sistema lubri-refrigerante MQL e CO₂



Fonte: A autoria própria (2022)

Tabela 9 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂

Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1	1.44	9.52	42.78		
2	1.55		18.42	0,18	44.52
3	18.21		61.11		

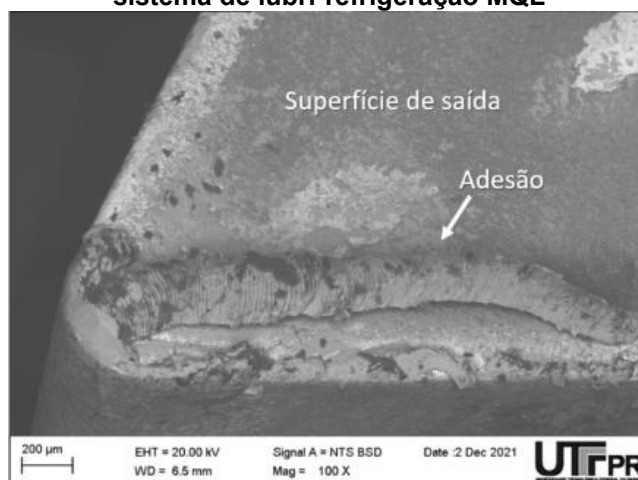
Fonte: A autoria própria (2022)

Conforme a Tabela 9 no ponto 1 os elementos Ti e N apresentam concentrações de 1,44% e 9,52% respectivamente. Houve adesão do material da peça com a presença de Fe (42,78%). No ponto 2 foi detectado Ti (1,55%) e também elementos do substrato da ferramenta Co (0,18%) e W (44,52%). No ponto 3 a concentração do elemento Ti do revestimento foi de 18,21%. A presença de material da peça foi confirmada com a concentração de Fe em 61,11%.

Com a progressão dos testes, a décima nona peça usinada no sistema de lubri-refrigeração MQL foi rejeitada, e da mesma forma ocorreu na vigésima quinta do sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂.

A Figura 51 mostra a imagem da ferramenta da décima nona peça, a qual foi reprovada pelo método de penetração de flanco modificado no sistema de lubri-refrigeração MQL. Pode-se observar desgaste de flanco e adesão de material da peça na ponta da ferramenta e na aresta de corte principal.

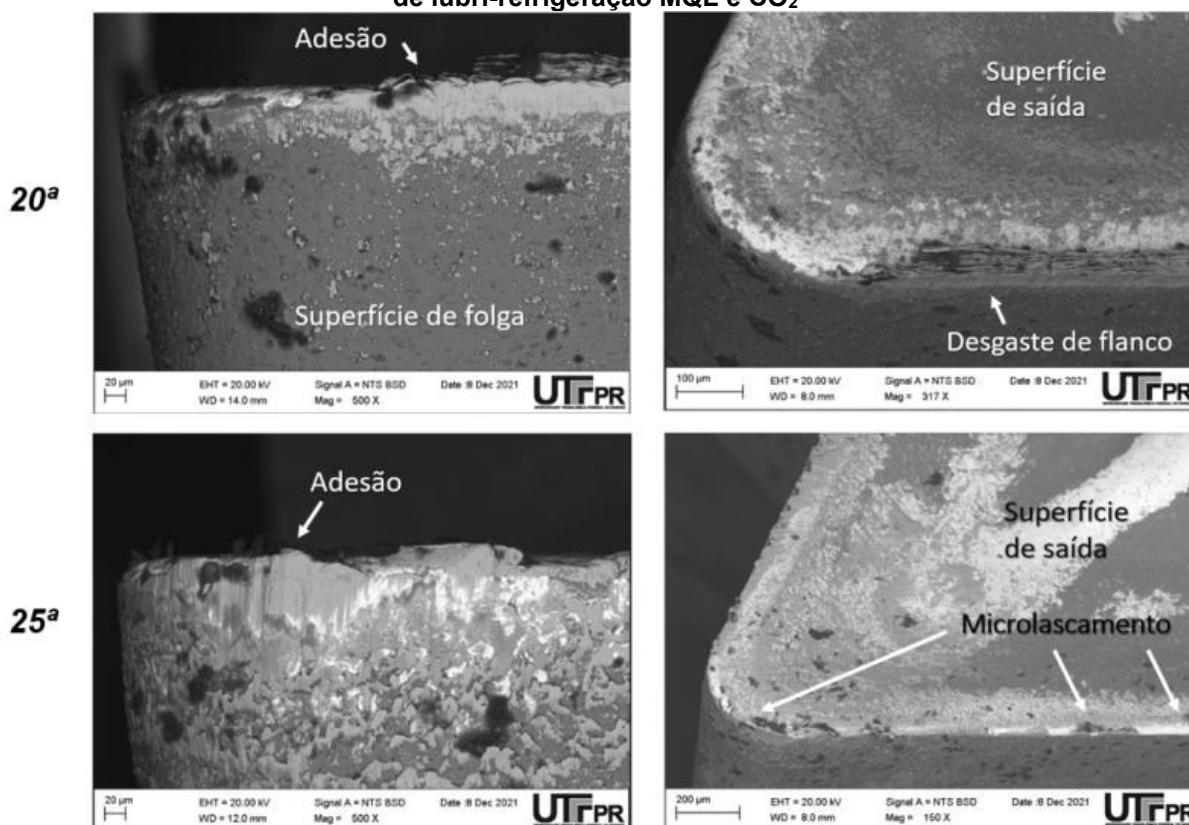
Figura 51- Ferramenta da décima nona pelo método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 52 mostra as ferramentas do método de penetração de flanco modificado no sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂ após usinagem para a vigésima e vigésima quinta (reprovada). Durante o experimento, a adesão do material da peça na ferramenta e o desgaste de flanco foram predominantes.

Figura 52 – Ferramentas usadas no método de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂

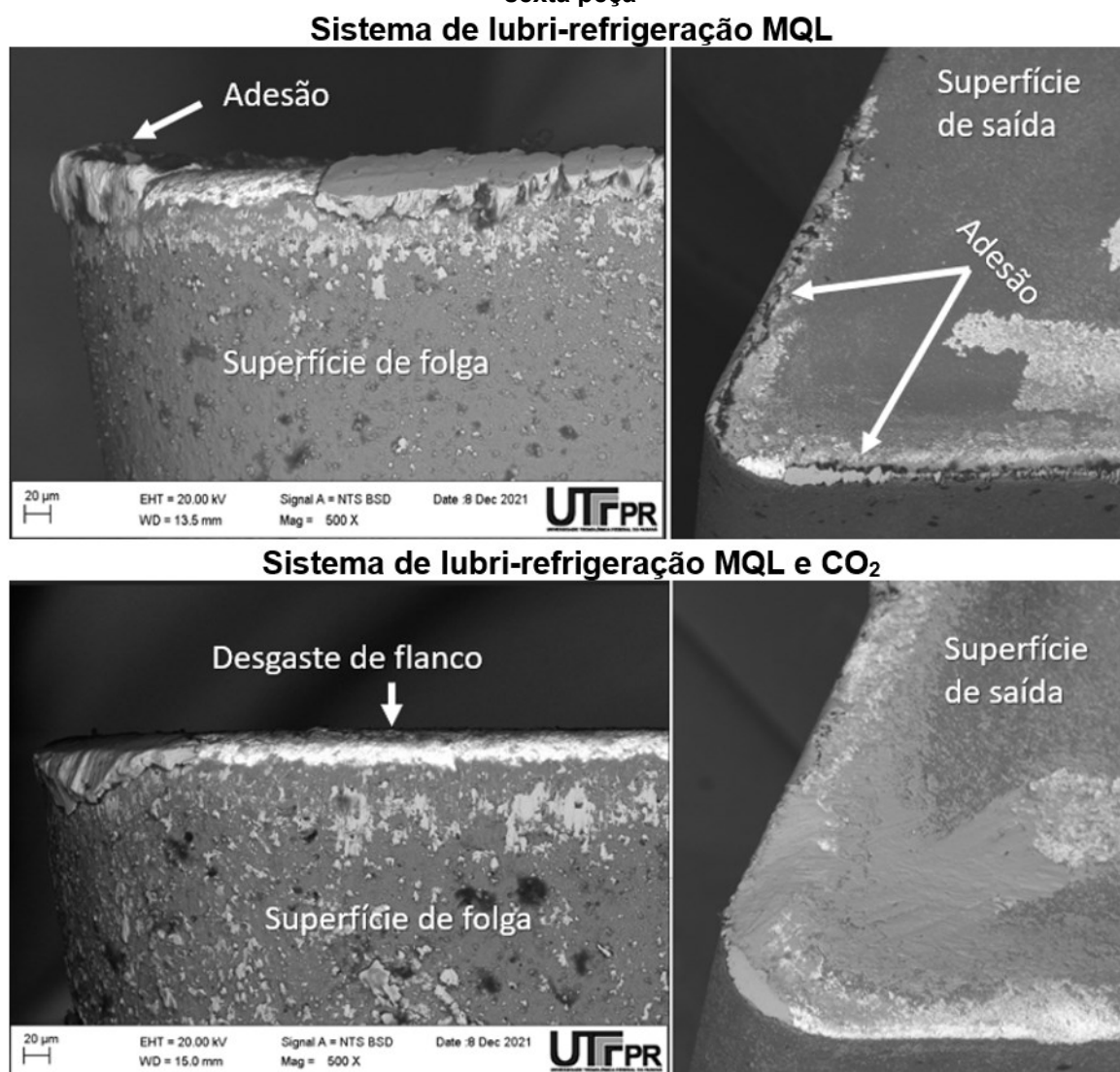


Fonte: Autoria própria (2022)

4.3.3 Desgaste de ferramenta para o método de penetração incremental

A Figura 53 ilustra a ferramenta após o roscamento do último passe da décima sexta peça aprovada para o método de penetração incremental para os dois sistemas de lubri-refrigeração analisados. Observa-se maior desgaste de flanco e aderência do material da peça para o sistema MQL.

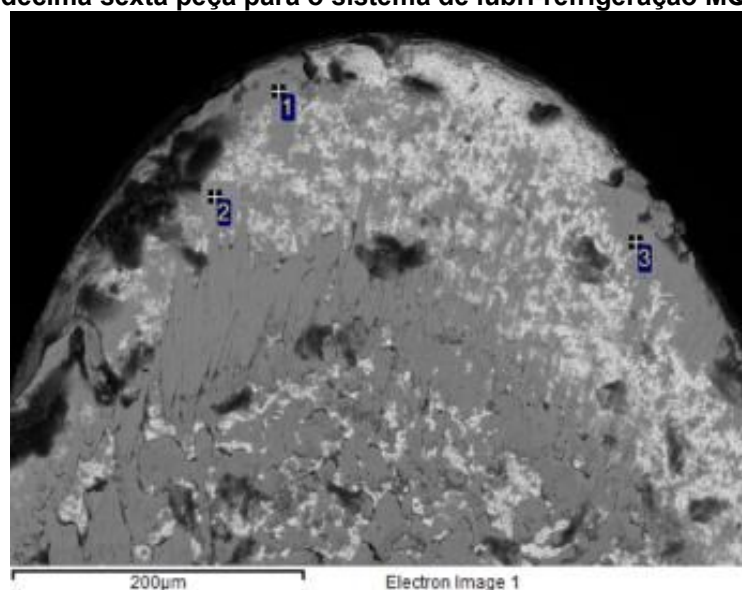
Figura 53 - Desgaste da ferramenta pelo método de penetração incremental após décima sexta peça



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 54 ilustra a superfície de saída da ferramenta após a usinagem da décima sexta peça para o sistema lubri-refrigerante MQL. Os dados da Tabela 10 comprovam que ocorreu adesão de materiais da peça na aresta de corte da superfície de saída da ferramenta.

Figura 54 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração incremental após a décima sexta peça para o sistema de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 10 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL

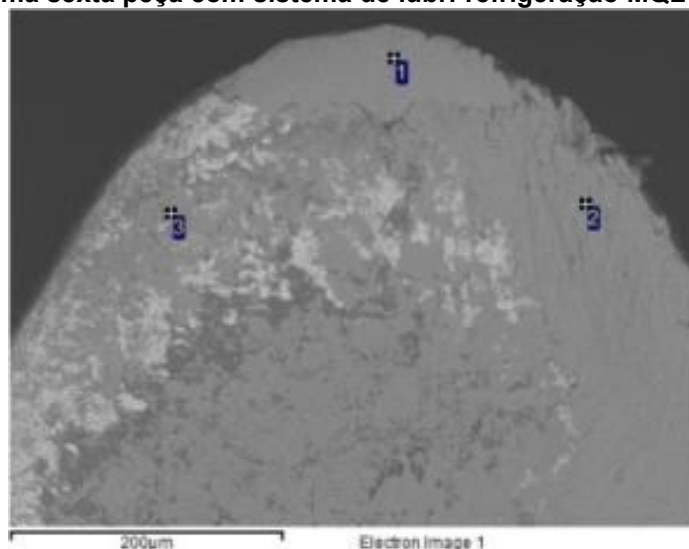
Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1	4.54		10.73	6.06	55.04
2	2.23		53.29		
3	0.97	0.15	60.09		

Fonte: Aatoria própria (2022)

No ponto 1 foi detectada baixa concentração de Ti (4,54%). Houve adesão do material da peça, onde a concentração de Fe foi de 10,73%, e também foi detectada a presença de elementos do substrato da ferramenta Co (6,06%) e W (55,04%). No ponto 2 a concentração de Ti foi de 2,23% e houve adesão do material da peça com a presença de Fe (53,29%). No ponto 3 os elementos do revestimento foram encontrados em baixas concentrações, sendo Ti (0,97%) e N (0,15%). A presença de material da peça foi confirmada com a concentração de Fe em 60,09%.

A Figura 55 retrata a superfície de saída da ferramenta após a usinagem da décima sexta peça no sistema lubri-refrigerantes MQL e CO₂. O EDS analisado é mostrado na Tabela 11.

Figura 55 - Superfície de saída da ferramenta pelo método de penetração incremental após a décima sexta peça com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Aatoria própria (2022)

Tabela 11 - Análise EDS da décima sexta peça por meio do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂

Ponto	Ti	N	Fe	Co	W
1	41.21	27.19	6.49		
2			4.25	7.21	72.35
3	2.67	2.10	16.66	10.95	20.15

Fonte: Aatoria própria (2022)

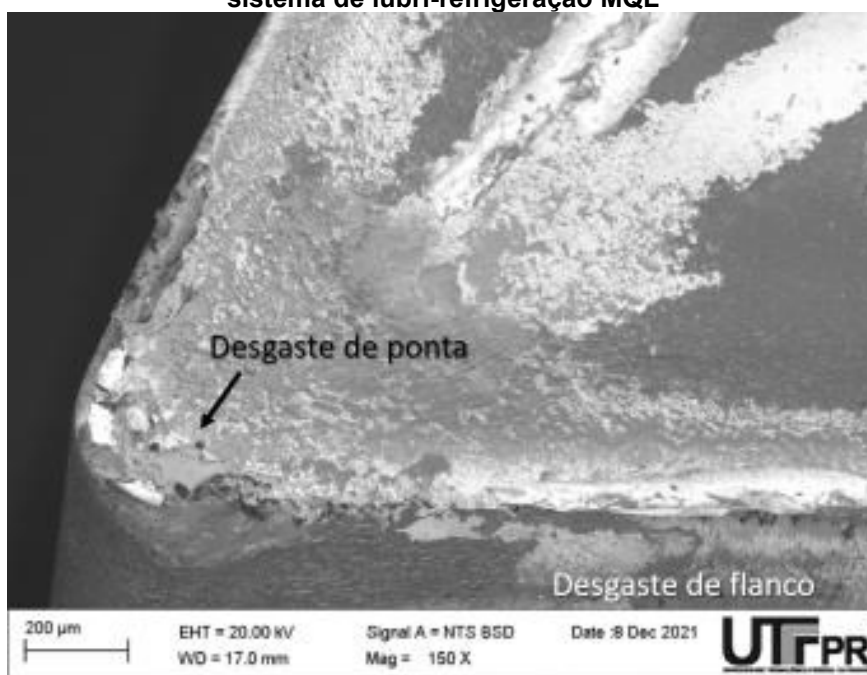
O sistema MQL-criogênico demonstrou ter melhor eficácia mesmo em situações severas de usinagem, preservando as características do revestimento do inserto no ponto 1, sendo que os elementos Ti e N do revestimento tiveram concentrações de 41,21% e 27,19%, respectivamente. Houve uma pequena adesão do material da peça indicada pela presença de Fe (6,49%). No ponto 2 houve exposição do substrato com os elementos Co e W apresentando concentrações de 7,21% e 72,35%, respectivamente. No ponto 3, há presença de Ti e N com 2,67% e 2,10% respectivamente, porém evidencia-se uma remoção parcial do revestimento com exposição do substrato da ferramenta indicada pela presença dos elementos Co (10,95%) e W (20,15%). Houve também adesão do material da peça na ferramenta indicado pela concentração de Fe com 16,66%.

Considerando todos os testes realizados, a melhor condição foi a usinagem criogênica com o método de penetração incremental, havendo preservação das

características da ferramenta por mais tempo, assim como adesão de material da peça. O desgaste foi relativamente uniforme em ambos os lados da ferramenta. Para o sistema MQL a vigésima segunda peça foi rejeitada e para o sistema MQL-criogênico a vigésima nona peça foi reprovada.

A Figura 56 mostra a imagem da ferramenta que usinou a vigésima segunda peça pelo método de penetração incremental com o sistema de lubri-refrigeração MQL, a qual foi reprovada. Nota-se o desgaste de flanco, desgaste de ponta da ferramenta e as adesões de material da peça nas superfícies de saída e de folga da ferramenta.

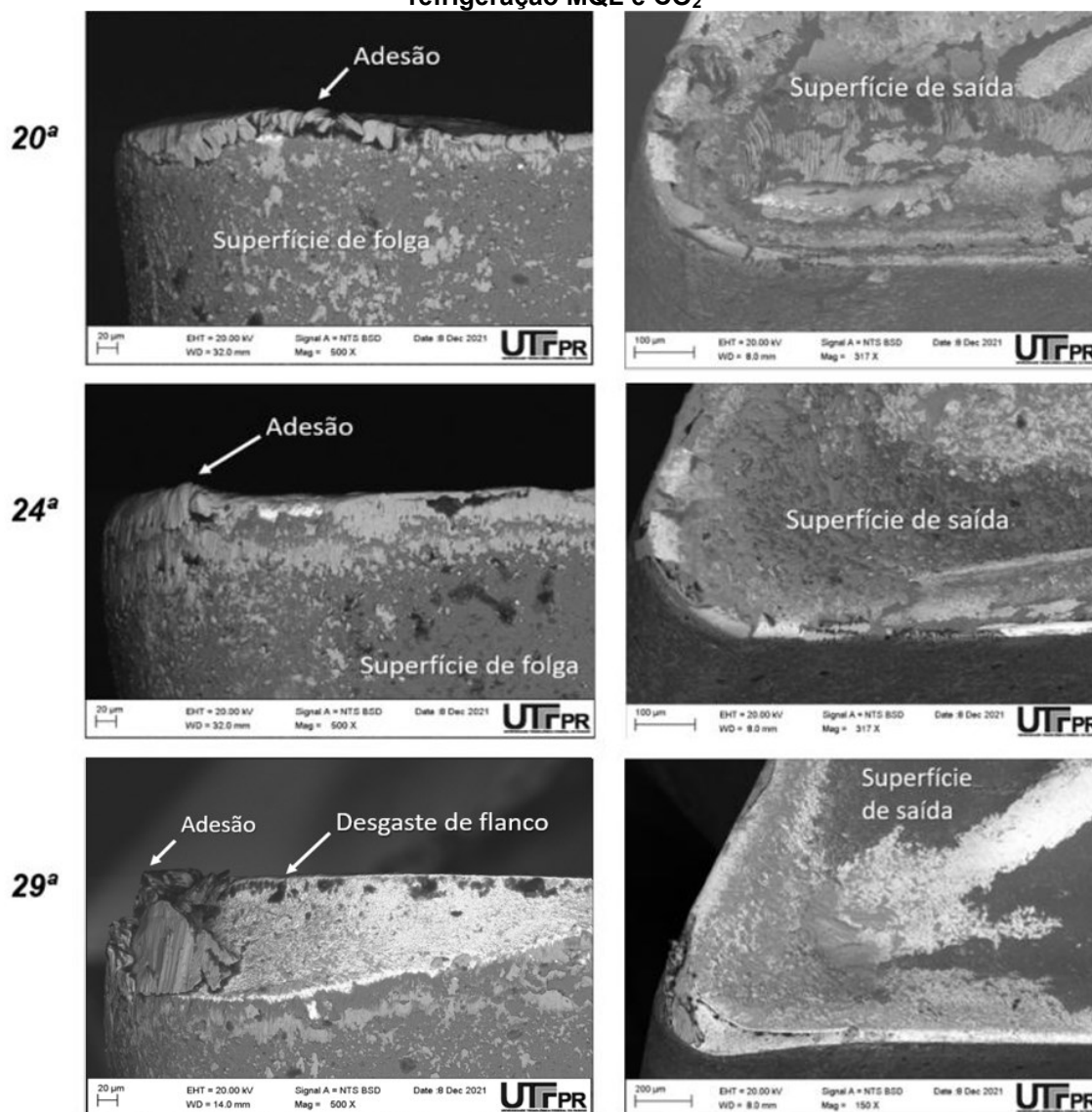
Figura 56 - Ferramenta da vigésima segunda pelo método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 57 ilustra as ferramentas empregadas com o método de penetração incremental e sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂ após a usinagem da vigésima, vigésima quarta e vigésima nona peça (reprovada).

Figura 57 – Ferramenta do método de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

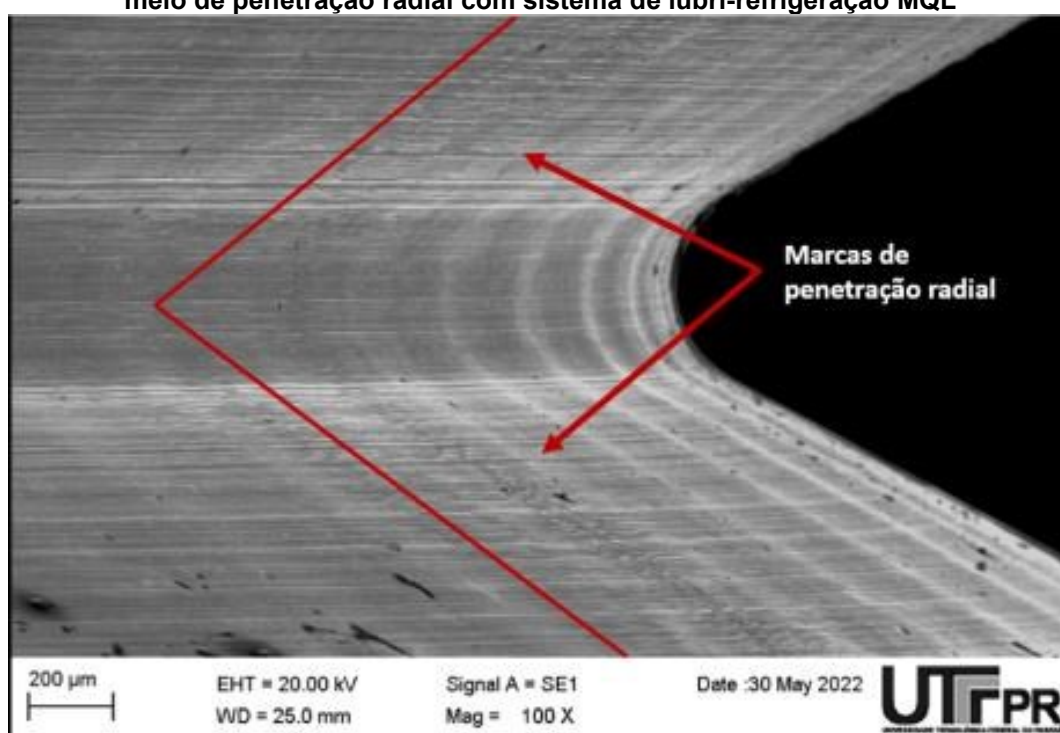
Nota-se que foi predominante a adesão do material da peça nas ferramentas, devido a esta ser uma característica do aço inoxidável. Na ferramenta que usinou a peça reprovada observa-se desgaste severo na ponta da ferramenta.

4.4 Análise das roscas usinadas

Para a análise da superfície das roscas por meio do microscópio eletrônico de varredura MEV foram verificadas as imagens da oitava peça roscada de cada método de penetração nos dois sistemas lubri-refrigerantes MQL, MQL e CO₂. Na sequência é mostrada a Figura 58 ilustrando o filete gerado pelo método de

penetração radial com o sistema de lubri-refrigeração MQL. A linha em V, na cor vermelha, evidencia o perfil do corte radial através das marcas deixadas pela ferramenta. Além disso, há vários pontos nos flancos do filete com material aderido. Neste caso o desgaste da ferramenta já influenciava negativamente o acabamento da superfície. Conforme apresentado anteriormente, nesta situação o cavaco apresentava rebarbas em suas laterais, associadas à maior dificuldade na sua formação e o valor do grau de recalque era de 4,44.

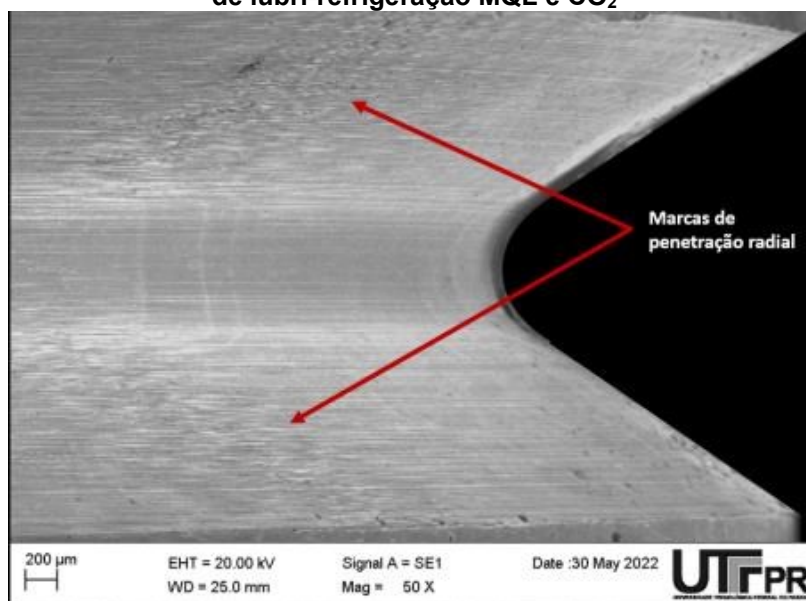
Figura 58 - Acabamento superficial obtido por meio do MEV para a oitava peça rosca por meio de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 59 mostra a imagem da peça usinada pelo método de penetração radial com o sistema de lubri-refrigeração MQL-criogênico. Neste caso o perfil do corte radial deixado pelas marcas da ferramenta é menos evidente e a qualidade da superfície dos flancos e da raiz da rosca é superior quando comparada ao sistema MQL. A influência do desgaste da ferramenta foi significativamente menor para esta condição e como apresentado anteriormente, as bordas do cavaco eram lisas e uniformes, com poucas alterações em relação ao cavaco gerado na quarta peça. Além disso, o grau de recalque do cavaco era aproximadamente a metade do valor medido para o sistema MQL.

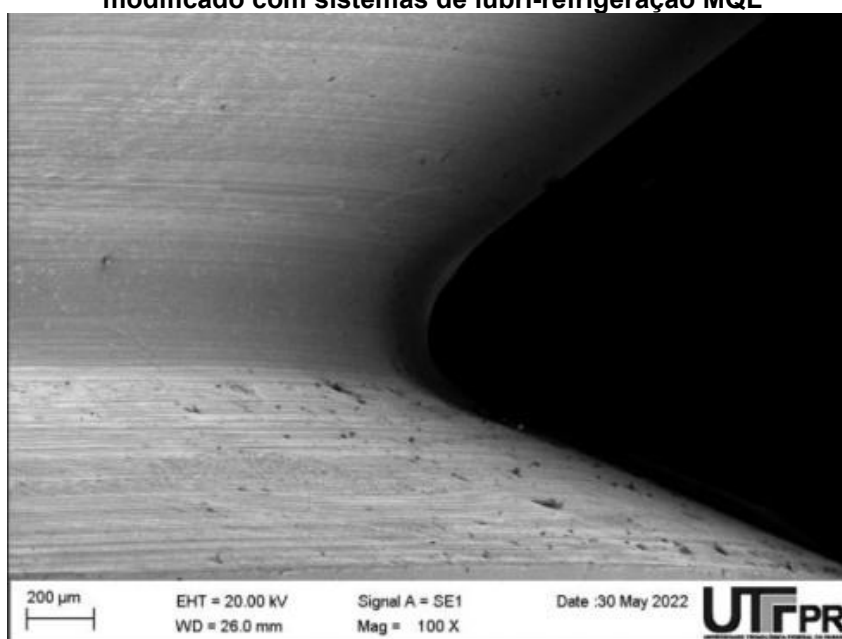
Figura 59 – Filete gerado na oitava peça rosca por meio de penetração radial com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 60 apresenta a imagem da peça usinada com o método de penetração de flanco modificado e sistema de lubrificação MQL. O acabamento da superfície do filete é melhor no flanco gerado pela aresta de corte principal. Nota-se que no flanco gerado pela aresta secundária há uma deterioração da superfície próxima à raiz do filete.

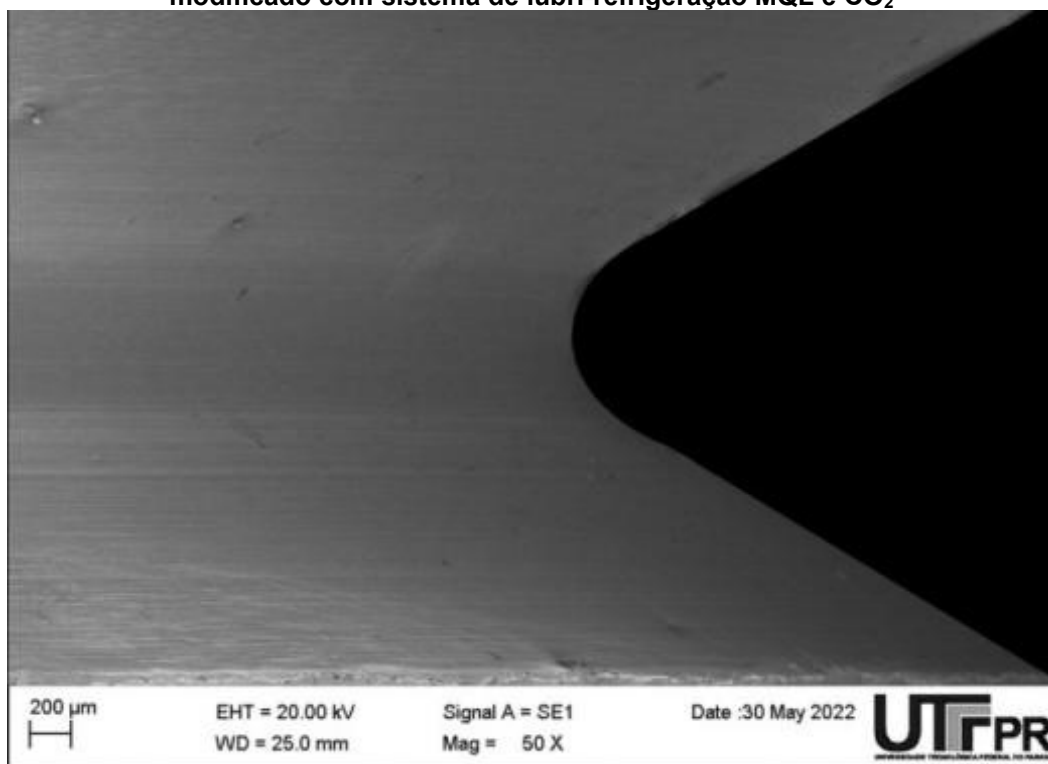
Figura 60 - Filete gerado na oitava peça rosca por meio de penetração de flanco modificado com sistemas de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 61 apresenta a imagem da peça roscada com o método de penetração de flanco modificado com o sistema de lubri-refrigeração MQL-criogênico. O filete apresenta um aspecto mais homogêneo com boa qualidade de superfície na raiz e em ambos os flancos. Apenas alguns pontos com material aderido podem ser observados. O acabamento do filete foi melhor que o do sistema MQL.

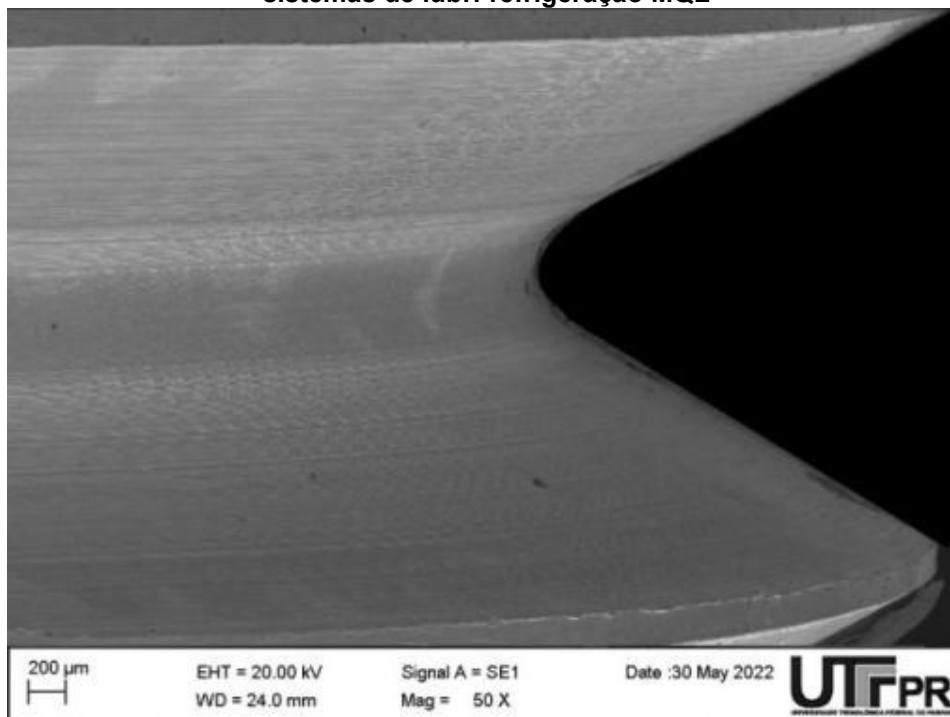
Figura 61 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração de flanco modificado com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

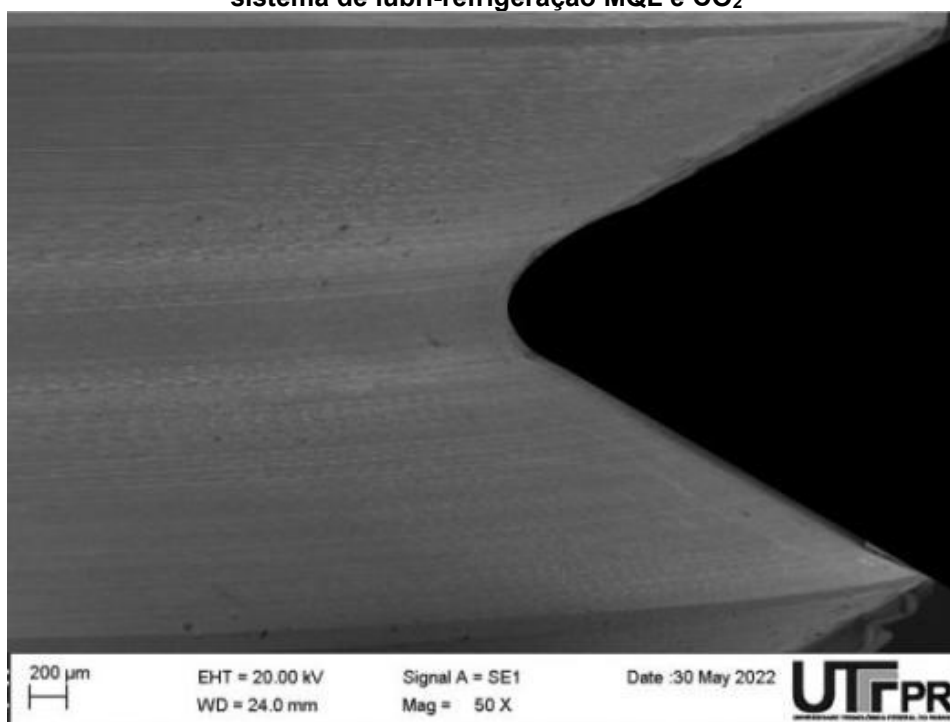
As Figuras 62 e 63 apresentam as imagens das peças roscadas pelo método de penetração incremental e com o sistema de lubri-refrigeração MQL e MQL com CO₂, respectivamente. Os filetes apresentam características semelhantes com boa qualidade de superfície tanto na raiz como nos flancos. Há algumas variações no aspecto visual das superfícies que podem estar associadas à alternância do corte pelas arestas característica do método de penetração incremental.

Figura 62 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração incremental com sistemas de lubri-refrigeração MQL



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 63 - Filete gerado na oitava peça roscada por meio de penetração incremental com sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂



Fonte: Autoria própria (2022)

4.5 Influência do método de penetração sobre a microdureza da peça

As Figuras 64 e 65 ilustram os valores de microdureza medidos no flanco da rosca para a quarta peça roscada nos diferentes métodos de penetração (radial, flanco modificado e incremental). O método de penetração radial, independentemente do sistema de lubri-refrigeração utilizado, alcançou os valores máximos de microdureza logo abaixo da superfície roscada devido aos efeitos térmicos e mecânicos como o atrito gerado por ambas as arestas de corte. A microdureza resultante próximo à zona de corte é muito superior ao núcleo em todos os métodos e sistemas testados. De acordo com Kaynak *et al.* (2014) durante o processo de usinagem, o material em torno da aresta de corte é deformado plasticamente e arrastado na direção de corte. Devido ao encruamento na camada deformada, a dureza na superfície resultante é maior que no metal base.

Na Figura 64, no sistema MQL o método de penetração radial registrou a maior microdureza com 372 HV, porém diminuiu gradativamente até 269 HV (valor próximo da microdureza do núcleo) na profundidade de 600 μm . O método de penetração de flanco modificado registrou menor encruamento comparado ao método de penetração radial devido ao menor atrito gerado e menor penetração de calor na camada superficial do material, com microdureza de 348 HV logo abaixo da superfície, e foi diminuindo gradativamente até 261 HV (microdureza do núcleo da peça). O método de penetração incremental obteve microdureza logo abaixo da superfície de 320 HV, ou seja, muito abaixo dos dois outros métodos analisados, e diminuiu rapidamente até a microdureza do núcleo da peça. Este resultado indica que os efeitos térmicos e mecânicos foram menores na superfície roscada para o avanço incremental, similarmente ao reportado por Costa (2022).

Na Figura 65 o sistema MQL-criogênico mostrou ser mais eficiente em relação ao sistema MQL, pois a microdureza logo abaixo da superfície no método de penetração radial foi de 348 HV, e reduziu ao valor próximo do núcleo com 264 HV na profundidade de 600 μm . A mesma redução repentina de microdureza ocorreu com os métodos de penetração de flanco modificado e incremental com respectivos 325 HV e 302 HV logo abaixo da superfície e com 261 HV na profundidade de 600 μm , ou seja, a mesma dureza do núcleo. O efeito de lubrificação do filme de óleo associado ao efeito criogênico pode reduzir a capacidade de adesão do material da peça sobre a ferramenta e diminuir consideravelmente a deformação plástica e

consequentemente o encruamento. Portanto, a aplicação do sistema MQL e CO₂ resulta na redução da microdureza nos flancos dos filetes das roscas.

Figura 64 - Microdureza em função do método de roscamento no sistema MQL

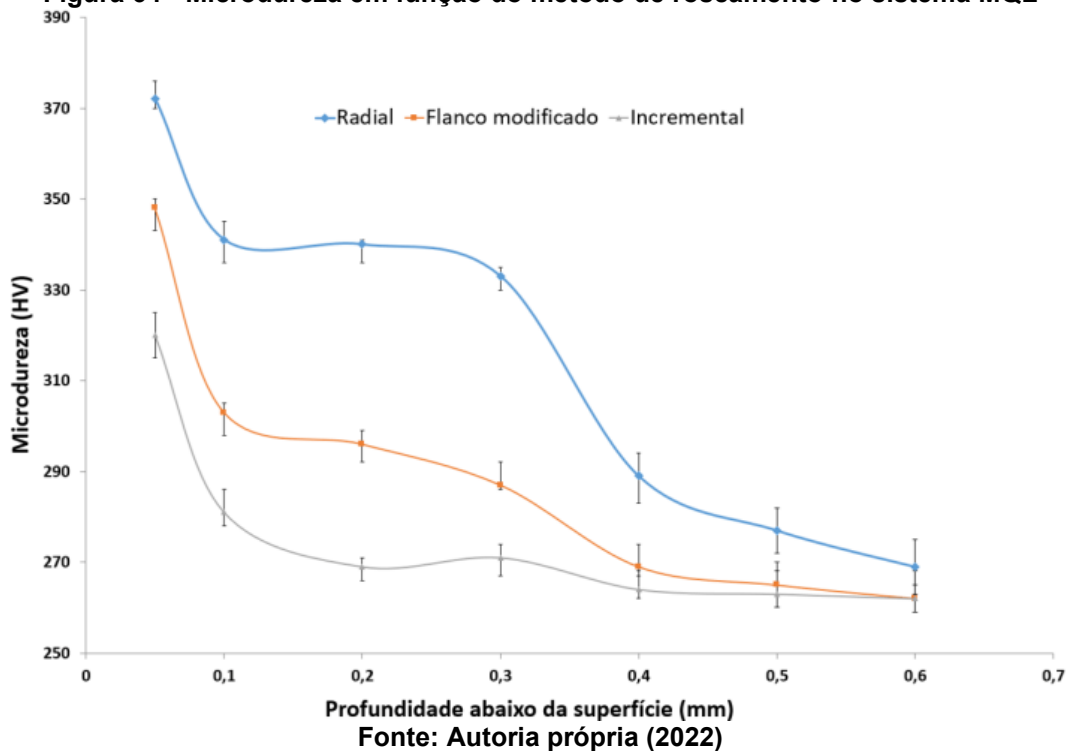
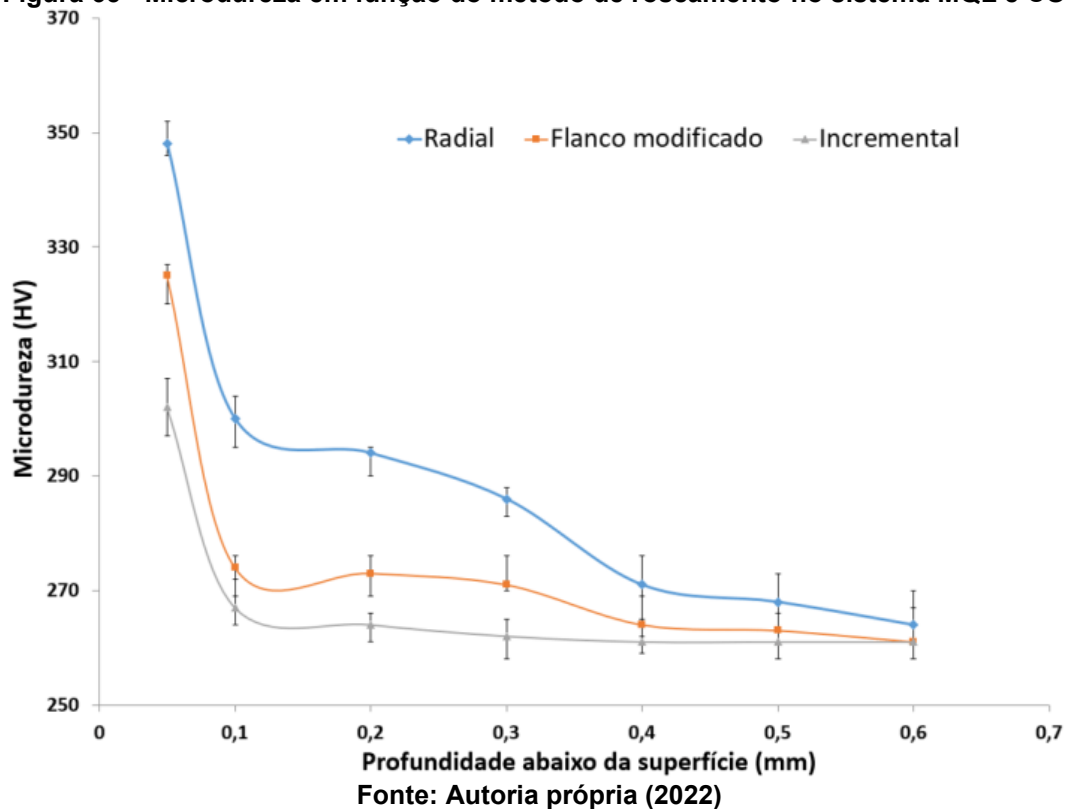


Figura 65 - Microdureza em função do método de roscamento no sistema MQL e CO₂



5 CONCLUSÕES

A partir da realização da pesquisa envolvendo a análise da influência do uso de sistemas de lubri-refrigeração MQL e MQL com CO₂ no roscamento por torneamento externo do aço inoxidável austenítico 304L, e conforme a metodologia proposta e resultados obtidos é possível chegar às seguintes conclusões:

- Cavacos em hélice longa foram predominantes para todas as condições ensaiadas. A seção do cavaco em forma de V proveniente da ação das arestas de corte e raio da ponta da ferramenta foi evidenciada para o método de penetração radial. Sendo que para o sistema MQL o cavaco apresentou rebarbas em suas laterais já durante a usinagem da oitava peça, o que não foi notório no sistema MQL com CO₂, cuja característica predominante do cavaco foi de ser mais uniforme devido à maior facilidade na sua formação em função do menor desgaste de ferramenta. Para o método de flanco modificado, o emprego dos dois sistemas lubri-refrigerantes resultou em características semelhantes quanto à morfologia do cavaco. Em comparação ao método de penetração radial, notou-se uma melhor geração de cavaco devido à menor restrição do seu fluxo. Neste caso, a formação do cavaco se caracterizou pelo paralelismo em relação à aresta de corte principal que teve um comprimento de contato maior com o flanco do filete. Além disso, foi possível observar a formação de uma pequena curvatura referente ao contato da ponta da ferramenta. Os cavacos gerados no método de penetração incremental foram similares ao método de penetração de flanco modificado, sendo que para o sistema MQL-criogênico as bordas do cavaco foram mais lisas e uniformes.
- O grau de recalque aumentou à medida que as peças foram usinadas, em função do desgaste, com valor acima de 4 já indicando que a ferramenta se aproximava do final de sua vida útil. Outro fator de aumento do grau de recalque é a tendência ao encruamento do aço inoxidável que é inerente ao processo de roscamento. Os maiores valores do grau de recalque foram obtidos durante o torneamento de roscamento no sistema MQL. A redução da temperatura da zona de corte com uso da combinação do sistema MQL e o MQL-criogênico foi fator determinante para que os valores do grau de

recalque se mantivessem mais baixos, o que se comprovou com um número maior de peças produzidas em cada método analisado, quando comparado ao sistema MQL.

- O emprego dos sistemas lubri-refrigerantes aumentou consideravelmente a vida das ferramentas, principalmente com a aplicação simultânea de MQL e CO₂. O número de peças aprovadas para o método de penetração radial com uso do sistema MQL-criogênico foi 80% superior ao do sistema MQL. Tanto para o método de flanco modificado quanto ao incremental, o número de peças aprovadas foi 33,3% superior no sistema MQL e CO₂. O método de penetração incremental no sistema MQL e CO₂ produziu 180% a mais de peças que o método de penetração radial com sistema MQL. O método de penetração incremental no sistema de lubri-refrigeração MQL e CO₂ foi o que apresentou os melhores resultados. A diminuição da temperatura resultante do emprego do sistema MQL-criogênico possibilita que a viscosidade do óleo seja suficiente para assegurar a manutenção da espessura do filme, proporcionando a separação completa das superfícies da ferramenta e da peça por mais tempo. Além disso, o sistema MQL-criogênico diminuiu significativamente a adesão do material da peça sobre a ferramenta, permitindo um aumentar sua vida útil.
- Observou-se que no método de penetração radial ocorreu desgaste pronunciado próximo ao raio de ponta da ferramenta para ambos os sistemas lubri-refrigerantes. Para o método de penetração de flanco modificado no sistema MQL ocorreu desgaste da ponta da ferramenta com adesão do material da peça na região da aresta de corte. E no método de penetração incremental no sistema MQL ocorreram adesões da peça na aresta de corte da ferramenta além de desgaste de flanco. Para o sistema MQL-criogênico observou-se maior preservação da ferramenta com menor adesão do material da peça na aresta de corte e nas superfícies de folga e de saída.
- Ao analisar a superfície das roscas observou-se que para o método radial são deixadas marcas em V pela penetração da ferramenta nos dois sistemas lubri-refrigerantes MQL, MQL e CO₂, porém no sistema criogênico, as marcas da ferramenta são menos evidentes e a qualidade da superfície dos flancos e da raiz da rosca é superior. Para o método de penetração de flanco modificado no sistema MQL-criogênico a superfície do filete foi mais homogênea, com

melhor qualidade na raiz e nos flancos em comparação com o sistema MQL. Com relação ao método de penetração incremental foram observadas algumas variações no aspecto visual das superfícies que podem estar associadas à alternância do corte pelas arestas. Este fato característico foi visível em ambos os sistemas lubri-refrigerantes. Porém, a qualidade da superfície da rosca usinada no método de penetração incremental com o sistema MQL-criogênico foi superior a todos os métodos experimentados.

- Constatou-se que a microdureza resultante logo abaixo da superfície roscada é muito superior ao núcleo em todos os métodos e sistemas testados, devido ao encruamento do material. Os valores máximos de microdureza foram obtidas para o método de penetração radial no sistema de lubri-refrigeração MQL, logo abaixo da superfície roscada devido aos efeitos térmicos e mecânicos como o atrito gerado por ambas as arestas de corte. Durante o processo de roscamento no sistema de lubri-refrigeração MQL por meio dos métodos de penetração radial, de flanco modificado e incremental houve o encruamento do material, elevando a microdureza do filete de 261 HV para 372 HV, 348 HV e 320 HV, respectivamente. Para o sistema MQL-criogênico os métodos de penetração radial, de flanco modificado e incremental também provocaram o encruamento do material, elevando a microdureza do filete de 261 HV para 348 HV, 325 HV e 302 HV, respectivamente. O efeito de lubrificação do filme de óleo associado ao efeito criogênico pode reduzir a capacidade de adesão do material da peça sobre a ferramenta e diminuir consideravelmente a deformação plástica e conseqüentemente o encruamento.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

- Analisar a influência dos sistemas de lubri-refrigeração MQL e MQL e CO₂ nos diferentes métodos de penetração no roscamento interno de aços inoxidáveis austeníticos.
- Verificar o efeito dos métodos de penetração sobre as vibrações no processo de roscamento externo e interno.
- Monitorar a vida da ferramenta nos sistemas de lubri-refrigeração MQL e MQL e CO₂ durante o processo de roscamento empregando vários sensores (força e temperatura).
- Realizar a medição da temperatura e a influência dos sistemas de lubri-refrigeração MQL e MQL e CO₂ nos diferentes métodos de penetração no roscamento em aços inoxidáveis austeníticos.
- Avaliar as tensões residuais resultantes dos métodos de penetração no processo de roscamento.

REFERÊNCIAS

- ADASKIN, A.M.; BUTRIM, V.N.; VERESHCHAKA, A.S.; KASHIRTSE, V.V. ***Influence of the cutting speed on chip formation in turning high-temperature chromium and nickel alloys***, Russian Engineering research, 4, p. 298-301, 2015.
- AGAMEL, M.; AHADI, A.; GUTNICHENKO, O.; STAHL, J.E. ***The influence of tool micro-geometry on stress distribution in turning operations of AISI 4140 by FE analysis***. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89, p. 3109-3122, 2017.
- AHMAD-YAZID, A.; TAHA, Z.; ALMANAR, I.P. ***A review of cryogenic cooling in high-speed machining (HSM) of mold and die steels***, Sci. Res. Essays 5, p. 412–427, 2010.
- AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TAKANO, K. ***Effect of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steel***, Journal of Materials Processing, Technology, p. 143–144, 2003.
- AKYILDIZ, H.K. ***Evaluating of Cutting Forces in Thread Machining***, It. J. Adv. Manuf. Technol, p. 1601 – 1612, 2013.
- ALTINTAS, Y. ***Manufacturing automation, metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design***, Second edition, University of British Columbia, 2012.
- AMORIM, H.J. ***Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro***. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, maio de 2002.
- ANSHU, D.J.; BALAJI, A.K. ***Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features***. Wear 267, p. 1723-1730, 2009.
- ARTOZOUL, J.; LESCALIER, C.; BOMONT, O.; DUDZINSKI, D. ***Extended infrared thermography applied to orthogonal cutting: Mechanical and thermal aspects***, Applied Thermal Engineering, 64, p. 441-452, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT, NBR 5876. Roscas, terminologia**, Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 261 - Rosca métrica ISO de uso geral - Plano geral**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASTAKHOV, V.P. ***Tribology of Metal Cutting***, Publisher: Elsevier Science, p. 392, 2007.
- BUNSHAH, R.F. ***Handbook of hard coatings - deposition technologies***, Park Ridge, New Jersey, USA, p. 550, Ed. Noyes Publications 2001.
- CALLISTER JR, W.D. ***Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução***, 5. Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.

- CAMARGO, J.C. **Construção de um modelo para representar o desgaste de ferramenta de corte em processo de torneamento de aço beneficiado**, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, p. 124, 2011.
- COSTA, C.E. **Influência dos métodos de penetração no roscamento do aço inoxidável AISI 304L**. Tese de Doutorado, UTFPR, Curitiba, fevereiro de 2022.
- DAVIM, J.P. **Machining of hard materials**. London: Springer-Verlag. 2011.
- DEVOTTA, A. M. **Characterization & modelling of chip flow angle & morphology in 2D & 3D turning process**, Licentiate Thesis, Production Technology. University West, 2015.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, São Paulo, Ed. Artliber, 9 Ed., 2014.
- EZUGWU, E.O.; OKEKE, C.I. **Tool life and wear of TiN coated tools in an intermittent cutting operation**, Journal of Materials Processing Technology 116, p. 10 – 15, 2001.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, Ed. Eddgard Blucher, São Paulo, 2003.
- HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluido e sua aplicação nos processos de corte**. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXIV, 385, p. 22-38, 1998.
- HUANG, Y.; CHOU, Y.K.; LIANG, S.Y. **CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses**. Int J Adv Manuf Technol, 35, p. 443-453, 2007.
- International Organization for Standardization. **ISO 3585 - Desgaste e as Variáveis de Medição do Desgaste em Ferramentas de Usinagem**, 2017.
- International Organization for Standardization. **ISO BS 3643-1 metric screw threads. Specification for selected limits of size**. Principles and basic data, 2007.
- JIANG, L.; PARO, J.; HANNINEN, H.; KAUPPINEN, V.; ORASKARI, R. **Comparison of grindability of IPED austenitic 316L duplex 2205 and super duplex 2507 and as cast 304 stainless steels using alumina wheels**. Journal of Materials Processing Technology, v. 62, p. 1–9, 1996.
- KAYNAK, Y.; LU, T.; JAWAHIR, I.S. **Cryogenic Machining-Induced Surface Integrity: A Review and Comparison with Dry, MQL, and Flood-Cooled Machining**. Machining Science and Technology: An International Journal, 18:2, 149-198, 2014.
- KHOSH DARREGI, M.R.; ALTINTAS, Y. **Generalized modeling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning**, Int. J. Mach. Tools Manuf. 98, p. 21–32, 2015.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres: Editora Springer, p. 517, 2011.

KLOCKE, F.; KRÄMER, A.; SANGERMAN, H.; LUNG, D. **Thermo-Mechanical Tool Load during High Performance Cutting of Hard-to-Cut Materials**. Procedia CIRP. 1, p. 295 – 300, 2012.

KONG, J.; XIA, Z.; XU, D.; HE, N. **Investigation on notch wear mechanism in finish turning pure iron material with uncoated carbide tools under different cooling/lubrication conditions**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 86, p. 97-105, 2016.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1**, 1997.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren**. Springer Verlag. 7 Ed. Berlin, 2002.

KOPAC, J. **Achievements of sustainable manufacturing by machining**. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering 34(2). June. 2009.

KORKUT, I.; KASAP, M.; CIFTCI, I.; SEKER, U. **Determination of Optimum Cutting Parameters During Machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel**. Materials and Design. Turkey, v. 25, p. 303-305. Oct. 2004.

KOSA, T.; NEY, R. **Machining of Stainless Steels**, Metals Handbook, 9 Ed., ASM Int., p. 681, 1989.

KYOCERA. **Roscamento**, Advancing Productivity, 2021.

LAWAL, S.A.; CHOUDHURY, I.A.; NUKMAN, Y.A. **Critical Assessment of Lubrication Techniques in Machining Processes: A Case for Minimum Quantity Lubrication Using Vegetable Oil-based Lubricant**. J. Cleaner Prod., 41, p. 210–221, 2013.

LI, B.; WONG, C.H. **Molecular dynamics study of ultrathin lubricant films with functional end groups: thermal-induced desorption and decomposition**. Computational Materials Science, 93: p. 11–14, 2014.

LIU, M., LI, C., ZHANG, Y. *et al.* **Cryogenic minimum quantity lubrication machining: from mechanism to application**. Front. Mech. Eng. 16, p. 649–697, 2021.

LUBRIX GmbH. Disponível em: <http://www.lubrix.de>. Acesso em: 14 mai. 2022.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B.; COELHO, R.T.; ABRÃO, A.M. **Teoria da usinagem dos metais**, 3 Ed., São Paulo; Edgard Blucher, 2015.

MAHDAVINEJAD, R.A.; SAEEDY, S. **Investigation of the Influential Parameters of Machining of AISI 304 Stainless Steel**, Academy Proceedings in Engineering Sciences, v.36, 6 Ed., p. 963 – 979, Dez. 2011.

MITSUBISHI. **Catálogo geral Mitsubishi Materials; Torneamento /fresamento /furação**; C008Z; 2018.

MULYANA, T.; ABD RAHIM, E.; MD YAHAYA, S.N. **The influence of cryogenic supercritical carbon dioxide cooling on tool wear during machining high thermal conductivity steel**, J. Clean. Prod. 164, p. 950–962, 2017.

- NAJIHA, M.S.; RAHMAN, M.M.; KADIRGAMA, K. **Machining performance of aluminum alloy 6061-t6 on**. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME), v. 11, p. 2699-2712, January-June, 2015.
- NASCIMENTO, G.; ABRAÃO, A.M. **Influência da geometria da ferramenta de corte na usinabilidade do aço ABNT 1045**. UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, 31.270-901, Belo Horizonte, MG, 2000.
- NOVASKI, O; DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n.399, p. 18-27, 1999.
- PAYLING, R. **Considerações sobre a Usinagem do Aço Inoxidável**, Artigos Técnicos, 2016.
- PEREIRA, O.; RODRÍGUEZ, A.; FERNÁNDEZ-ABIA, A.; BARREIRO, J.; De LACALLE, L.L. **Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304**. Journal of Cleaner Production, p. 139, 440–449, 2016.
- PRASAD, K. S.; PRABHA, K. A.; KUMAR, P. V. S. G. **Condition monitoring of turning process using infrared thermography technique – an experimental approach**. Infrared Physics & Technology, v. 81, p. 137–147, 2017.
- PROUD, L; TAPOGLOU, N.; SLATTER, T. **A Review of CO₂ Coolants for Sustainable Machining**. Metals, 12, p. 283, 2022.
- SAHOO, A.K.; SAHOO, B. **A comparative study on performance of multilayer coated and uncoated carbide inserts when turning X155 CrVMo 12-1 steel under dry environment**. Measurement, 46, p. 2695 – 2704, 2013.
- SANDVIK COROMANT, **Manual Técnico, Tecnologia da Usinagem dos Metais**, 2010.
- SANDVIK DO BRASIL S.A. **Ferramentas para torneamento**. Catálogo. São Paulo, 2012.
- SAOUBI, R.; OUTEIRO, J.C.; CHANGEUX, B.; LEBRUN, J.L.; MORÃO DIAS, A. **Residual Stress Analysis in Orthogonal Machining of Standard and Resulfurized AISI 316 Steels**, Journal of Materials Processing Technology, v. 96, p. 225 – 233, 1999.
- SHAW. M.C. **Metal cutting principles**; 2 Ed., Arizona; Oxford University Press; 2005.
- SILVA, A.; MEI, P. **Aços e ligas especiais**. 2 Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- SILVA, F.S, **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento com ferramenta de topo esférico do aço AISI D6 endurecido**, Dissertação de mestrado, UTFPR, Curitiba, 2018.
- SILVA, N. C. **Análise da frequência de interrupções no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de PCBN**; Campinas, SP, 2014.

SMITH, G.T. **Cutting Tool Technology: Industrial Handbook**, Springer Verlag, London, Limite, 2008.

SONG, Z.; WANG, W. **On Processing Methods and Skills of Trapezoidal Thread by Means of CNC Lathe**. International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms – MMSA, 2018.

SSINA – SPECIALITY STEEL INDUSTRY OF NORTH AMERICA. Stainless steel for machining. 11f, 1995.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte II**. 4. Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.

TAPOGLOU, N.; LOPEZ, A.M.I.; COOK, I.; TAYLOR, Ch.M. **Investigation of the influence of CO₂ cryogenic coolant application on tool wear**, Procedia CIRP 63, 2017.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4 Ed. Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 2000.

WANG, J. **Development of a chip flow model for turning operations**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, p. 1265-1274, 2001.

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WAKABAYASHI, T. **Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 53, 2 Ed., p. 511-537, 2004.

WIKAY, K.K.; LITWA, P.; HITCHENS, C. **Impact of supercritical carbon dioxide cooling with Minimum Quantity Lubrication on tool wear and surface integrity in the milling of AISI 304L stainless steel**. Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre, The University of Sheffield, Brunel Way, Rotherham S60 5WG, UK, 2019.

WOSNIAK, F.A. **Estudo da usinabilidade do aço 50CrMoS4 no processo de furação profunda**, 142 f., Dissertação Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2011.

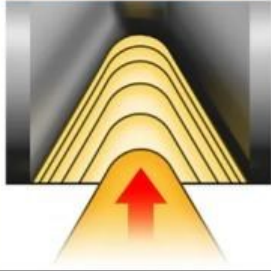
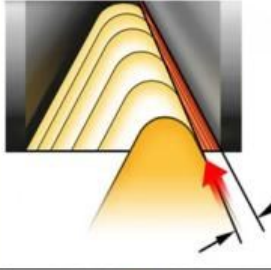
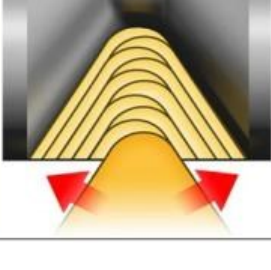
XAVIOR, A.; ADITHAN, M. **Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 209, p. 900-909, 2009.

XIONG, Y.; HE, T.; WANG, J.; LU, Y.; CHEN, L.; REN, F.; LIU, Y.; VOLINSKY, A.A. **Cryorolling effect on microstructure and mechanical properties of Fe-25Cr-20Ni austenitic stainless steel**. Material and Design. v. 88, p. 398-405, 2015.

XIULI, F.; WENXING, L.; YONGZHI, P.; WENTAO, L. **Morphology Evolution and micro-mechanism of chip formation during high-speed machining**, Int. J Adv Manuf Technol, 98, p. 165-175, 2018.

ZHANG, X; LI, L.F; DU Z.F.; HAO, X.L.; CAO, L.; LUAN, Z.D.; WANG, B.; XI, S.C.; LIAN, C.; YAN, J.; SUN, W.D. **Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system**. Science Bulletin, 65(11): p. 958–964 50, 2020.

APÊNDICE A - Quadro resumo de resultados.

Método de penetração		Sistema MQL	Sistema MQL e CO ₂	
Radial		Número de peças aprovadas	10	18
		Rc	4,89	4,43
		Microdureza da quarta peça aprovada (HV)	372	348
Flanco modificado		Número de peças aprovadas	18	24
		Rc	5,08	4,44
		Microdureza da quarta peça aprovada (HV)	348	325
Incremental		Número de peças aprovadas	21	28
		Rc	4,24	4,94
		Microdureza da quarta peça aprovada (HV)	320	302

ANEXO A - Certificado de caracterização do Aço Inoxidável 304 L.



GAVLAK & CIA LTDA
 CNPJ.: 75.762.641/0001-82
 END.: Rua D. Pedro II 1895
 Campo Largo - PR
 (41) - 33935225

Campo Largo, 28 de fevereiro de 2020

CERTIFICADO DE ANÁLISE QUÍMICA

Material: INOX 304 L Ø 5/8 X 200 MM - 30 pçs

Material (Product)									
Descricao (Description): Barra Redonda 304L - 15,87 mm (5/8") (BR 19/01542/1)-(3 pcs)								Num. Rast. BR 19/01542/1	
Corrida (Heat): 53341				Placa/O.P.:		Norma (Standard): ASTM A276/M-17 A		Peso (Weight): 29,00 KG	
Observacao (Observation): TREFILADO A FRIO / POLIDO / RECOZIDO 1050°C									
Análise Química (Chemical Composition)					Análise Mecânica (Mechanical Properties)				
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Ti	P	Limite de Escoamento (Yield Stress): 0,2% 623 MPa
0,012	0,260	1,63	18,12	8,08	0,28	0,0710		0,039	Resistencia a Tracao (Strizione): 721 MPa Dureza: 214 HBW
S	Cu	Al	N2	Nb	Co				Reduc. Area Minima (Reduction of Area): 72,00% Estricção
0,023	0,52				0,19				Alongamento (Elongation): 40,00% Tam. do Grao (Grain Size):

Material : Item 1 faturado através da Nota Fiscal do fornecedor n. 0087321 em 11/12/2019.

Obs.: O Material que esta sendo entregue V.Sas. possui um CERTIFICADO DE QUALIDADE DE ORIGEM, cujos resultados transcrevemos acima.

Forte Metais
 Emerson Gaviak
 3393 - 5225

GAVLAK & CIA LTDA

CNPJ N. 75.762.641 / 0001 - 82