

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

MARCEL FARIAS OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DA USINAGEM LIMPA E DE PROCESSOS ALTERNATIVOS DE
REFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS
32750 (2507)

Rio Grande, 2022.

MARCEL FARIAS OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA USINAGEM LIMPA E DE PROCESSOS ALTERNATIVOS DE
REFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX
UNS 32750 (2507)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral

Rio Grande, 2022.

Ficha Catalográfica

O48i Oliveira, Marcel Farias.
Influência da usinagem limpa e de processos alternativos de refrigeração no fresamento do aço inoxidável super duplex UNS 32750 (2507) / Marcel Farias Oliveira. – 2022.
71 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

1. Desgaste da ferramenta 2. Rugosidade 3. Super duplex
4. Tratamento criogênico 5. Usinagem I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **5/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dez dias do mês de março de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **Marcel Farias Oliveira**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **INFLUÊNCIA DA USINAGEM LIMPA E DE PROCESSOS ALTERNATIVOS DE REFRIGERAÇÃO NO FRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS 32750 (2507)**. Referendado pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Luciano Volcanoglo Biehl e Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: **APROVADO**
2. Luciano Volcanoglo Biehl: **APROVADO**
3. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha: **APROVADO**

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____

CPF: 905.700.220-53

Documento assinado digitalmente
gov.br FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 10/03/2022 11:55:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

2. _____

CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente
gov.br Luciano Volcanoglo Biehl
Data: 10/03/2022 10:08:08-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

3. _____

CPF: 985.887.370-00

Documento assinado digitalmente
gov.br PEDRO HENRIQUE COSTA PEREIRA DA CUNHA
Data: 10/03/2022 11:47:21-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Marcel Farias Oliveira: _____

Marcel Farias Oliveira
Assinado digitalmente por Marcel Farias Oliveira
DN: C=BR, OU=Oliveira & Brignol Ltda, CN=Marcel Farias Oliveira, E=marcel@ppmec.furg.br, Reason: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.03.10 14:54:21-0300
Font Reader Versão: 10.1.0

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a vida, saúde e condições de realizar os meus objetivos.

Aos meus pais por todas as oportunidades possíveis a mim dadas e a torcida sempre presente, mesmo em outro plano.

A minha esposa Celia Centeno e minha filha Júlia por toda a paciência, colaboração e compreensão pelo tempo ausente;

Ao meu orientador, Fábio Augusto Dornelles do Amaral, pelo amparo e apoio disponibilizado em todo o período.

Aos professores Humberto Camargo Piccoli e Adriano Werhli pela carta de recomendação para a entrada no curso de Mestrado da PPMEc.

Ao colega André Guimarães Camargo por toda amizade e auxílio realizado durante todo o curso.

Ao colega e técnico da PPMEc, Jorge Airton Badin de Oliveira, pela disponibilidade em auxiliar em todas as atividades necessárias.

A FAPERGS pelo financiamento das atividades

Aos profissionais do Centro Integrado de Análises (CIA FURG) por toda a disposição demonstrada para a realização do tratamento criogênico.

Aos profissionais do CEME Sul pela disponibilidade e pelo suporte nas análises necessárias.

RESUMO

Durante o processo de usinagem, as ferramentas de corte são submetidas a diversos processos mecânicos, térmicos, químicos e tribológicos que se tornam inevitáveis. Toda essa exposição acaba provocando o desgaste da ferramenta, o que influencia tanto no tempo de vida do inserto como no acabamento superficial da peça usinada e no aumento dos custos operacionais. Assim, a procura por meios de refrigeração eficientes de acordo com o material empregado é fundamental para obter índices de produtividade com qualidade. Dessa forma, foi estudada a influência do uso do tratamento criogênico (TC) na usinagem de um aço inoxidável super duplex analisando o desgaste da vida útil da ferramenta de corte e a qualidade superficial da peça usinada a uma velocidade de corte de 250m/min, com avanço de 0,16 mm/dente e profundidade de 2 mm contra a refrigeração por fluido emulsivo e a usinagem a seco. Os resultados mostraram que a usinagem a seco teve vida útil 33% superior ao dos outros métodos. Na qualidade superficial, a rugosidade na fresagem com fluido foi 15% menor que a usinagem a seco. O desgaste de flanco dos insertos submetidos à TC foi menor entre os três métodos, porém a ocorrência de desgaste por entalhe reduziu a vida útil da ferramenta.

Palavras-chaves: Desgaste da ferramenta; rugosidade; super duplex; tratamento criogênico; usinagem.

ABSTRACT

During the milling, the tools are subjected to unavoidable process, such as: mechanical, thermal, chemical and tribological. All this exposure causing tool wear, which influences the lifetime of the insert as well as the surface finish of the machined part, causing an increase in operating costs. Thus, the companies searching for efficient means of refrigeration according to the material used is fundamental to obtain productivity rates with quality. In this way, the influence of the use of cryogenic treatment (CT) in the machining of a super duplex stainless steel was studied, analyzing the wear of the cutting tool life and the surface quality of the machined material at a cutting speed of 250 m/min, with feed of 0.16 mm/tooth and depth equal 2 mm against coolant and dry machining. The results showed that dry machining had a 33% longer service life than the other methods. In surface quality, the roughness in milling with fluid was 15% lower than in dry machining. Flank wear of inserts subjected to CT was lower among the three methods, but the occurrence of wear reduced tool life.

Keywords: Cryogenic treatment; milling; roughness; super duplex; tool wear.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Economias apresentadas no relatório Jost.....	14
Figura 2-Tipos de Faceamento	16
Figura 3- Exemplo de fresagem de faceamento.	16
Figura 4- a) Movimento Concordante; e b) Movimento Discordante	17
Figura 5- Triângulo de ligação química de materiais duros e propriedades associadas.....	19
Figura 6- Apresentação dos Desgaste de Flanco	21
Figura 7 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, onde A representa desgaste de cratera, B desgaste de flanco, C e D desgaste de entalhe.	23
Figura 8 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.	24
Figura 9 - Picos e vales de rugosidade são especificados em relação à linha média.....	25
Figura 10 - Microestrutura do aço UNS32750	29
Figura 11 – Usinabilidade relativa de aços inoxidáveis	31
Figura 12 - Geração de calor nas zonas de deformação primária, secundária e terciária.....	33
Figura 13 - Representação do Anel de Usinagem Sustentável	34
Figura 14 - Efeito do resfriamento na vida útil da ferramenta de corte T1, T2 e T3 no processo de torneamento de aço inoxidável duplex com e sem resfriamento;	36
Figura 15 - Sistema de Tratamento Criogênico na Usinagem.....	39
Figura 16 - a) Vista lateral da porta pastilha; b) Vista inferior da porta pastilha	41
Figura 17 - a) Representação genérica do porta-ferramenta; b) representação genérica da pastilha de corte;.....	42
Figura 18 - Corpo de Prova das Amostras com dimensões em mm.....	44
Figura 19 - Esquemático do Sistema de Nitrogênio Líquido	45
Figura 20 - Fluxograma das Atividades	46
Figura 21 - Desgaste da Ferramenta durante o Faceamento.....	52
Figura 22 - Desgaste de Flanco após 12 passes com Usinagem a Seco – Aumento 10x	53
Figura 23 - Desgaste de Flanco após 18 passes com Usinagem a Seco – Aumento 5x	53
Figura 24 - Visão geral da cratera (20x) em usinagem a seco.....	54
Figura 25 - Desgaste de ponta com 589 μm com Usinagem por fluído	55
Figura 26 - Desgaste de flanco com 345 μm	56
Figura 27 - Desgaste por entalhe 707 μm	57

Figura 28 - Ponta de Ferramenta após 12 passes com 5x	58
Figura 29 Desgaste por entalhe com 576 μm	59
Figura 30 - Imagem ampliada do desgaste do inserto de usinagem a seco após 18 passes	60
Figura 31 - Imagem ampliada do desgaste do inserto de usinagem com fluído após 12 passes	61
Figura 32 - Detalhe do Desgaste de Entalhe após usinagem com TC.....	62
Figura 33 - Valor da rugosidade Ra de acordo com a etapa de medição	63

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do metal duro para aço inoxidável	18
Tabela 2 - Sistema de Codificação	22
Tabela 3 - Características da Rugosidade Ra	26
Tabela 4 - Valores de rugosidade para Usinagem a Seco e com Fluido.	27
Tabela 5 - Composição Química dos Aços Inoxidáveis Duplex	30
Tabela 6 - Propriedade Mecânicas do UNS32750.....	30
Tabela 7 - Informações sobre os tipos de fluídos de corte	37
Tabela 8 - Valores operacionais para a pastilha de corte Sandvik 345R-13T5M	42
Tabela 9 - Parâmetros de Corte	43
Tabela 10 - Composição Química do Aço UNS32750.....	49
Tabela 11 - Tempo de vida útil da Ferramenta.....	50
Tabela 12 - Valores de Desgaste das Pastilhas de Corte (em μm)	51
Tabela 13 - Valores de Rugosidade Inicial e Final para cada Processo	62

LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

APMX: Profundidade de Corte Máximo

CNC: Centro de comando numérico;

CR: Contato Radial

CVD: *Chemical Vapor Deposition* (Deposição Química de Vapor)

DC: Diâmetro de Corte

DCX: Diâmetro de Corte Máximo

EP: Aditivos de Extrema Pressão

Fc: Força de Corte

KAPR: Ângulo de aresta de corte principal

LF: Comprimento total

mm: milímetros

PDC: profundidade de corte

PRE: *Pitting Resistance Equivalent* (Equivalente de Resistência a Pite)

PVD: *Physical Vapour Deposition* (Deposição Física a Vapor)

TC: Tratamento Criogênico

Vb: Desgaste de Flanco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
2. ESTADO DA ARTE	16
2.1 Aspectos Gerais do Faceamento de Aço Super Duplex	16
2.2 Métodos de Refrigeração	33
2.2.1 Usinagem a Seco	35
2.2.2 Usinagem com Fluido Refrigerante	36
2.2.3 Usinagem com criogenia	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Ferramentas de corte	41
3.2 Definições dos Parâmetros de Corte	42
3.3 Corpos de Prova (CPs)	43
3.4 Ensaios de Fresamento	44
3.5 Metodologia	45
3.6 Equipamentos	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Composição Química	49
4.2 Microdureza	49
4.3 Tempo de Vida Útil da Ferramenta	49
4.4 Desgaste da Ferramenta de Corte	50
4.5 Análise por MO	52
4.5.1 Usinagem a Seco	53
4.5.2 Usinagem com Fluido de Corte	54
4.5.3 Usinagem com Nitrogênio Líquido	57
4.6 Análises por Microscopia Eletrônica por Varredura	59
4.7 Rugosidade	62

5. CONCLUSÕES.....	64
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
7. REFERÊNCIAS	66
7.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS	66
7.2 REFERÊNCIAS POR EXTRATO.....	70
7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS	71

1. INTRODUÇÃO

A atividade industrial metalmeccânica está sempre em busca de otimização de processos, de forma a obter uma maior produtividade, com menor custos operacionais e com redução dos impactos ambientais existentes. Nesse período houve a introdução de fluídos de corte que apresentaram uma melhora significativa no processo industrial de usinagem, seja pelo aumento nos parâmetros de operação ou pela melhora na qualidade superficial da peça produzida. É de amplo conhecimento que o fluído de corte atua tanto para refrigerar a peça, como para lubrificar o processo e auxiliar na remoção do cavaco da interface peça/ferramenta, sendo dessa forma um componente importante no processo da usinagem.

Porém, o seu uso excessivo, os seus efeitos nocivos para a saúde dos operadores de máquina e o aumento da conscientização ambiental por parte das empresas e sociedade tornaram a busca por um processo produtivo mais sustentável cada vez mais necessário. Aliado a isso, há o custo dispendido pelas empresas para o tratamento desse fluído, estimados, por Klocke e Eisenblatter (1997), entre 7% e 17% dos custos operacionais. Logo, há uma crescente busca em reduzir, ou até mesmo eliminar, a utilização desses agentes de refrigeração.

Outra possibilidade adotada foi a usinagem a seco, que teve repercussão com o trabalho de Sreejith e Ngoi (2000) ao concluírem ser possível obter resultados satisfatórios sem a utilização de fluído de corte para usinagem de ferro fundido por CBN em alta velocidade. Krolczyk et al. (2016) conseguiu resultados superiores já em torneamento de aço inoxidável duplex. Outros estudos mostraram que existem fluídos refrigerantes como meio de reduzir a temperatura de corte, obtendo resultados satisfatórios. Como Yildiz e Nalbant (2008) que apresentaram o resfriamento criogênico com nitrogênio líquido com resultados positivos para o aumento da vida útil da ferramenta e para a redução do desgaste da ferramenta.

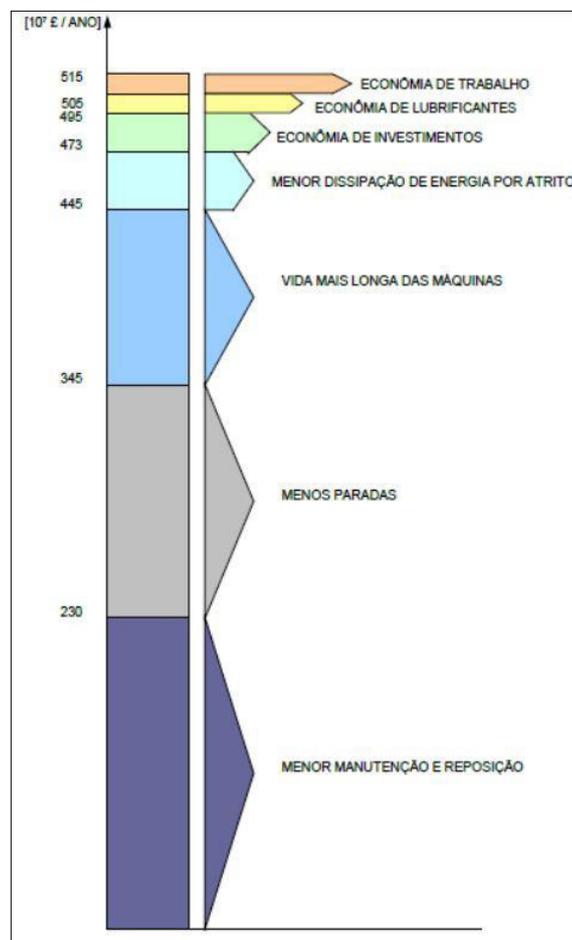
Dentro do fresamento, os estudos estão sendo ampliados para identificar os ganhos que os processos que utilizam uma quantidade menor de fluído refrigerante ou, até mesmo, completamente a seco possam ter. Análises prévias devem ser consideradas, uma vez que Ebner et al. (1999) já produziram um trabalho que demonstrou que o tipo de falha provocado pela ferramenta e a sua progressão dependem do material da ferramenta e do material térmico usado, bem como dos parâmetros do processo. Gaard (2008) descreveu que a superfície da

ferramenta está sujeita à uma combinação complexa de cargas mecânicas, químicas e tribológicas, que levam à fadiga, lascamento e desgaste da ferramenta.

Em relação ao tipo de material, os aços inoxidáveis super duplex aparecem como um desafio devido as características mecânicas que eles possuem. Amplamente utilizado na indústria de óleo e gás, Dhanaanchezin et al. (2017) informam que a usinabilidade deste material é considerada ruim em relação a outros aços-liga devido ao seu atributo de características como alta resistência à tração, ductilidade e tenacidade à fratura, baixa condutividade térmica e tendência ao encruamento. Essas condições acabam prejudicando o acabamento superficial da peça pois aumenta os valores de rugosidade da peça.

Por fim, a importância de obter peças usinadas com melhor acabamento superficial foi apresentada por Jost (1990) quando este divulgou o relatório Jost justificando uma economia anual de 515 milhões de libras nas operações industriais inglesas com a adoção de boas práticas tribológicas, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Economias apresentadas no relatório Jost.



Fonte: SINATORA (2005) adaptado Jost (1990)

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho será investigar a influência da usinagem limpa e de processos alternativos de refrigeração no fresamento do aço inoxidável super duplex UNS 32750 (SAF 2507), avaliando a resistência ao desgaste da ferramenta de corte quando submetida a um processo de fresagem com parâmetros elevados e a qualidade superficial da peça usinada. Para tal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a utilização de métodos alternativos de refrigeração no fresamento de aço super duplex UNS 32750;
- Avaliar a relação entre a usinagem a seco e os diferentes tipos de refrigeração na vida útil da ferramenta de corte e no tempo de vida útil da ferramenta;
- Analisar a influência dos métodos de refrigeração usados na qualidade superficial da peça usinada;
- Investigar os diferentes mecanismos de desgaste dos insertos de acordo com o tipo de refrigeração adotado.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Aspectos Gerais do Faceamento de Aço Super Duplex

O faceamento é uma operação de fresamento amplamente difundida no processo industrial, no qual usa a extremidade da pastilha de corte para obter uma superfície plana, conforme a Figura 2.

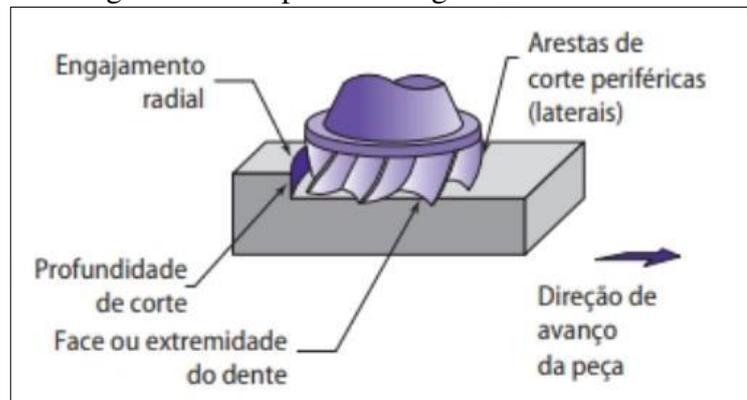
Figura 2-Tipos de Faceamento



Fonte: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx> (acessado em 27 de agosto de 2021)

Fitzpatrick (2013) descreve esse modelo de operação de maneira que a ferramenta de corte seja movida em direção à superfície da peça até a profundidade de corte (PDC), sendo então ajustado para engatar a peça a um determinado percentual do seu diâmetro, chamado de contato radial (CR), como mostra a Figura 3.

Figura 3- Exemplo de fresagem de faceamento.

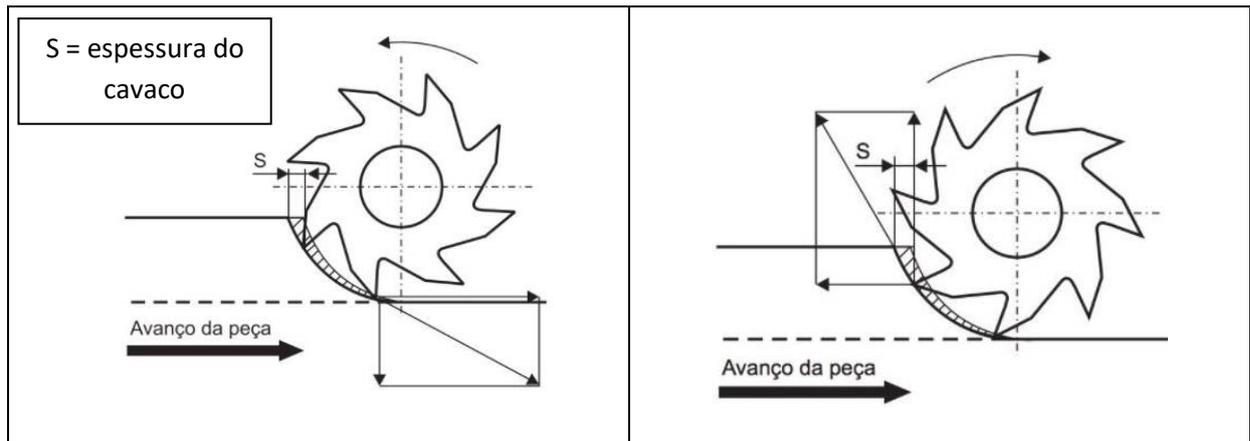


Fonte: Fitzpatrick (2013)

De acordo com o sentido de corte adotado no processo, ele pode ter sentido concordante ou discordante, e essa escolha está envolvida também nas forças de atuação de corte. Fitzpatrick (2013) apresenta os movimentos conforme exemplificado na Figura 4:

- Movimento concordante: a ferramenta de corte possui o avanço no mesmo sentido da rotação da peça;
- Movimento discordante: a ferramenta de corte avança na direção oposta à sua rotação.

Figura 4- a) Movimento Concordante; e b) Movimento Discordante



Fonte: Almeida (2015)

A diferença básica entre os dois métodos está na formação do cavaco obtido. Na fresagem concordante a espessura do cavaco no momento da entrada da ferramenta é mais espessa ocasionando um cavaco de espessura fina na saída. Porém no movimento discordante, ocorre o inverso, se obtém um cavaco fino no início do movimento com aumento da espessura ao longo do período de corte. A escolha do movimento adequado deve considerar as características particulares de cada trabalho.

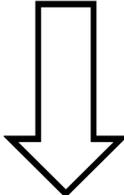
Para o fresamento de aços inoxidáveis duplex o tipo de material indicado para o processo é o metal duro. Esse material, amplamente conhecido na literatura, é o resultado do processo de metalurgia do pó, onde um carboneto é associado a um elemento ligante resultando em uma pastilha final com excelentes características mecânicas e com melhores parâmetros de usinagem. Valim (2018) comenta que a composição original apresentava além do carbono, somente tungstênio (em forma de carbonetos) e cobalto.

Para os aços inoxidáveis, a norma ABNT ISO 513:2013 padronizou a classificação do metal duro em três categorias:

- Classe P: caracterizada pela cor azul, possuem carbonetos de tungstênio e de tântalo que conferem uma elevada dureza a quente a maior resistência ao desgaste. Assim, são utilizadas para usinagem do aço, aço fundido e ferro fundido maleável, entre outros;
- Classe M: caracterizada pelo amarelo dourado, ficou utilizada para a usinagem de aços inoxidáveis, além de outros tipos de aço. Contém em sua composição menores quantidades de carbonetos de titânio e tântalo aos carbonetos de tungstênio (WC);
- Classe K: possui a cor vermelha e se tornou mais utilizável na usinagem de ferros fundidos, não metálicos e madeira, sendo constituídos de carbonetos de tungstênio.

Conforme a divisão apresentada pela ABNT ISSO 513:2013, fica estabelecida que a letra M caracteriza o tipo de ferramenta que deve ser utilizada para a usinagem dos aços inoxidáveis. Sendo assim, a Tabela 1 resume as características desse tipo de material.

Tabela 1 - Classificação do metal duro para aço inoxidável

Grupo	Subgrupo	Propriedades Mecânicas	
		Tenacidade	Resistência ao Desgaste
M	M10		
	M20		
	M30		
	M40		

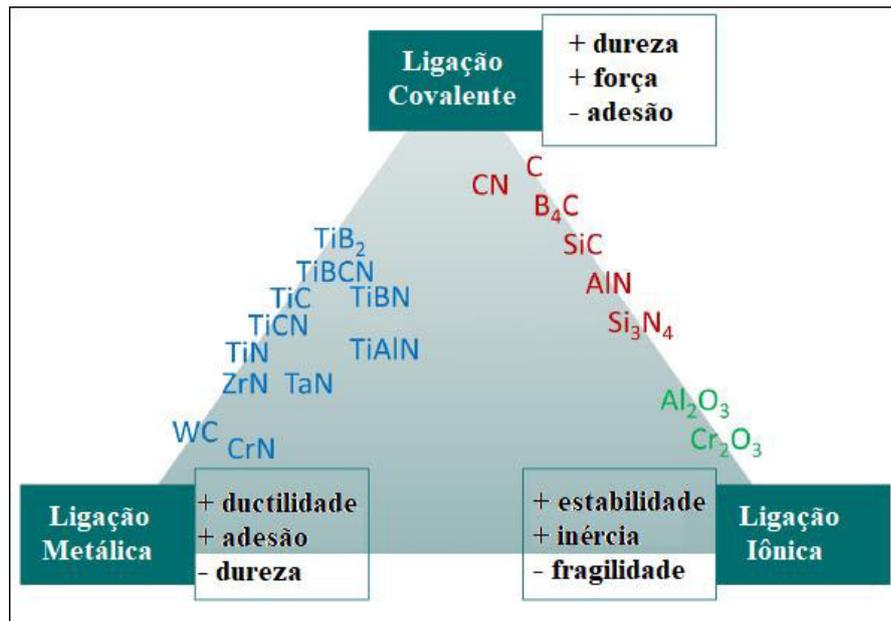
Fonte: adaptado pelo autor da ABNT NBR ISO 513:2013

A escolha correta do tipo de material da ferramenta de corte e as suas características de operação é fundamental para mitigar o processo de desgaste da ferramenta, visto que esta é uma condição inerente a atividade de usinagem, que promove a remoção de material mediante a uma ação de atrito provocada pela ocorrência de forças de cisalhamento. Logo, se o processo irá ocorrer, o fundamental é saber de que forma e como que esses desgastes e avarias ocorrerão.

Além do material do inserto de corte, outra característica da ferramenta de corte acaba impactando no processo, o tipo de revestimento empregado. Assim, Correa et al. (2018) definem que para melhorar a interação química entre a ferramenta e o material da peça, as superfícies da ferramenta de corte de metal duro devem ser resistentes à abrasão, duras e quimicamente inertes. Amanov et al. (2015) concluíram que as propriedades da superfície de uma ferramenta de corte como dureza, estabilidade térmica, coeficiente de atrito e inércia química são melhoradas pela aplicação de um revestimento.

Em estudo realizado por Schalk et al. (2022), os autores informam que os revestimentos rígidos de proteção - com espessuras de alguns micrômetros - são cultivados por deposição de vapor físico ou químico ferramentas de corte para melhorar seu desempenho de aplicação. Neste trabalho, é apresentado o triângulo de ligação química desenvolvido por Deng et al. (1995) demonstrado na Figura 5, no qual os materiais duros podem ser geralmente classificados de acordo com seu caráter de ligação covalente, por sua ligação metálica, ou sua ligação iônica.

Figura 5- Triângulo de ligação química de materiais duros e propriedades associadas.



Fonte: adaptado de DENG (1995)

Dos revestimentos utilizados na indústria, dois merecem destaque:

- **CVD: Chemical Vapour Deposition** (Deposição Química a Vapor)
Este processo ocorre dentro de uma câmara a vácuo no qual o elemento depositado vem da decomposição de um gás realizado por uma reação química. É um processo mais simples em relação ao PVD pelo fato de não apresentar a limitação da “linha de visão” das peças com relação à fonte das material a ser revestido. Dos exemplos de camadas obtidas, destacam-se: TiN, TiC, TiCN, TiBN, Al₂O₃.
- **PVD: Physical Vapour Deposition** (Deposição Física a Vapor)
É um processo que ocorre dentro de uma câmara sob vácuo no qual o material sólido é vaporizado por calor, ou *sputtering*. Após o vapor é recondensado sobre a superfície do substrato para formar o filme fino sólido. Como exemplos de camadas típicas tem-se: TiN, CrN, AlTiN, AlCrN, TiBN, TiCN.

Chinchanikar e Choudhury (2013) avaliaram o desempenho e o desgaste de uma ferramenta de metal duro multicamada revestida com CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) e outro inserto, de camada simples, revestido por PVD (TiAlN) no torneamento de um aço AISI 4340 endurecido. Os autores concluíram que a cobertura de CVD apresentou maior vida útil, resultado do revestimento mais espesso. Como principais mecanismos de desgaste, foi observado adesão e abrasão para as ferramentas por CVD, enquanto o desgaste de difusão foi verificado no inserto com a camada simples de PVD. Paiva et. al (2017) observaram que o processo CVD com TiCN + Al₂O₃, bem como os revestimentos aplicados por PVD, com AlTiN, quanto aplicados em metal duro são considerados ótimos revestimentos para a usinagem de aço inoxidável.

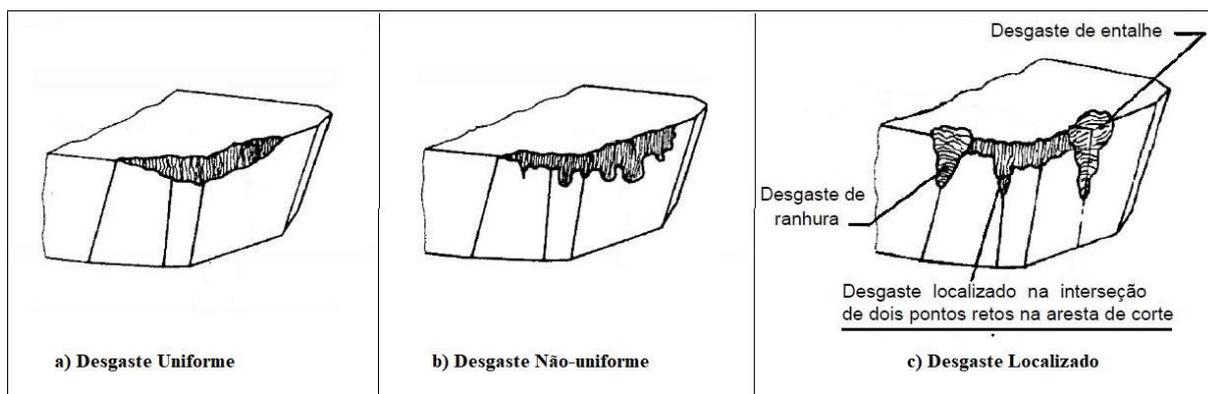
Em processos de usinagem é fundamental entender o tempo de vida útil da ferramenta. Na literatura é ampla a divulgação que a vida da ferramenta é o período que ela opera adequadamente até perder a capacidade de corte, considerando os parâmetros de medição adotados. De forma igual, é consenso que o desgaste de flanco é o critério mais utilizado, pois é o fator de maior influência na vida da ferramenta.

Astakhov (2004) já havia concluído isto ao afirmar que a vida da ferramenta é definida basicamente como o tempo necessário para atingir uma largura de desgaste de flanco predeterminada, de modo que as condições da ferramenta e os prognósticos de vida estão mais relacionados à identificação do desgaste da ferramenta. Zhang et al. (2021) por entenderem que o desgaste afeta diretamente a precisão da usinagem e qualidade da peça, definiram um método para definir as condições de desgaste.

A norma ABNT NBR ISO 8688 (2020) define desgaste de ferramenta como a “modificação da forma da parte de corte de uma ferramenta da sua forma original, resultando em uma progressiva perda de material cortante durante a operação de usinagem”. A norma apresenta que o critério de vida de uma ferramenta pode ser definido com um valor numérico de um desgaste específico recomendado, como por exemplo:

- Desgaste de Flanco (Vb): Perda de material do flanco da ferramenta durante a operação de corte, o que resulta no desenvolvimento progressivo de desgaste do flanco. Pode ocorrer de forma uniforme, não uniforme ou localizada, conforme apresentados na Figura 6.

Figura 6- Apresentação dos Desgaste de Flanco



Fonte: o autor (adaptado da NBR ISO 8688)

O desgaste localizado apresenta também o desgaste de entalhe, que é o resultado da ação de rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior do que na parte central do cavaco, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. Na região da formação do entalhe, a ferramenta de corte também é submetida a ação oxidante da atmosfera. O aumento progressivo do entalhe pode levar a piora do acabamento superficial e, posteriormente, a quebra da ferramenta. Para quantificar o tamanho do desgaste, a norma NBR 8688 adotou o “Critério de vida da ferramenta”, apresentada na Tabela 2, e que deve ser usado como a seguir:

- Normal (N): Os valores abaixo deste título são aplicados para as condições recomendadas de usinagem. Os valores selecionados são um compromisso razoável entre segurança, custo dos ensaios e intensidade da deterioração. Normalmente um dos valores é atingido antes da completa deterioração;
- Grande (L): Os valores abaixo deste título trazem mais informações sobre a capacidade de uma ferramenta sob certas condições de ensaio. O uso destes valores é recomendado especialmente nos casos em que o completo potencial de corte de peças e a causa da destruição final são determinados e onde os custos do maior consumo de material não for proibitivo;
- Pequeno (S): Os valores trazem menos informações sobre a capacidade de uma ferramenta sob certas condições de ensaio. O uso destes valores mínimos é somente permitido nos casos em que o custo do consumo de material é muito elevado.

Tabela 2 - Sistema de Codificação

Código			Descrição da deterioração da ferramenta				
Formação Básica	Distribuição	Subdivisão					
			Fenômeno da deterioração da ferramenta		Critério (mm)		
			S	N	L		
Vb		Desgaste do Flanco					
	1	Uniforme	0,20	0,35	0,50		
	2	Não Uniforme	0,90	1,20	1,50		
	3	Localizado	0,80	1,00	1,20		
Kt	1	Desgaste da superfície de saída					
		Cratera: Profundidade	0,05	0,10	0,15		
		Largura	-	-	-		
	Distância	-	-	-			
	2	Formas do degrau Prof.	0,25	0,30	0,35		
Prof./Larg.		-	-	-			
CH	1	Lascamento					
		Uniforme					
		2	Não Uniforme				
		3	Localizado				
			Comp.(mm)				
	A	Microlascamento	< 0,3	0,20	0,25	0,30	
	B	Macrolascamento	0,3 a 1	0,25	0,40	0,50	
	C	Fratura	> 1	-	-	-	

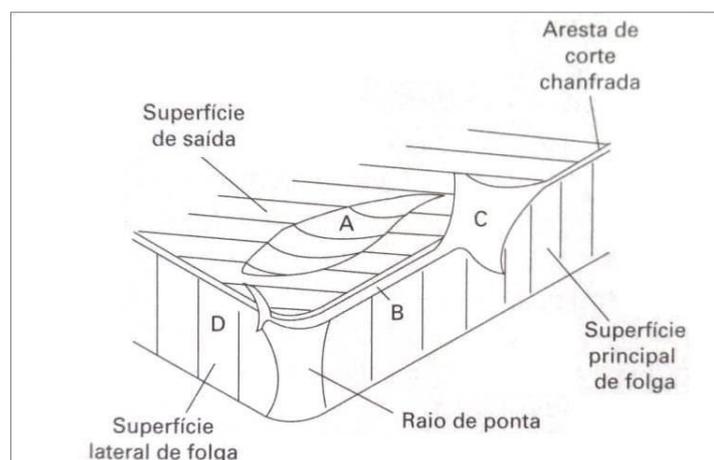
Fonte: o autor (adaptado da NBR ISO 8688)

Tepperneegg et al. (2014) verificaram que os insertos de metal duro revestidas possuem o desgaste e a fadiga térmica provocada pelo contato ferramenta-peça como o principal mecanismo de dano. Eles concluíram que no final da vida útil, os insertos que sofreram grande desgastes, apresentaram tensão residual de tração, enquanto as que tiveram predominância da fadiga térmica, apresentaram tensões residuais compressivas, provocando trincas ao longo da ferramenta.

Para Trent et al. (2000), o processo de desgaste sempre vai envolver alguma perda de material de superfície do material. Para Machado (2011) o conhecimento do processo de desgaste da aresta fornecerá subsídios para que haja evolução dos materiais. As principais formas de desgastes estão apresentadas na Figura 7, sendo distinguidas da seguinte forma:

- Desfalque de cratera: é formada na face da ferramenta em decorrência do contato entre o cavaco-ferramenta;
- Desfalque de flanco: ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado seu contato com a peça;
- Desfalque de entalhe: pode surgir nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Tem por característica acabar alterando a ponta da ferramenta e influenciando no acabamento superficial;
- Desgaste por deformação plástica: é a mudança da geometria da peça em função do deslocamento de material. Ocorre pelo cisalhamento devido as altas tensões atuantes na superfície das ferramentas de corte, e em casos mais graves, acaba gerando a destruição total da cunha cortante.

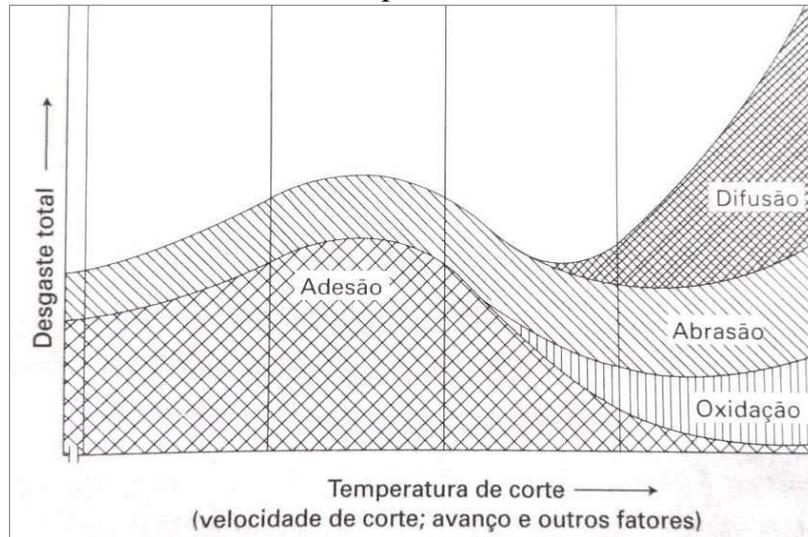
Figura 7 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, onde A representa desgaste de cratera, B desgaste de flanco, C e D desgaste de entalhe.



Fonte: Trent (2000), apud Machado (2011).

Além do desgaste ocorrido, o estudo praticado deve considerar também o mecanismo envolvido no processo de usinagem que possa ser o responsável pela ocorrência do processo. Na literatura tradicional, geralmente quatro mecanismos são destacados e tem as suas características dispostas conforme a temperatura de corte e o desgaste total produzido, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.



Fonte: Machado (2011).

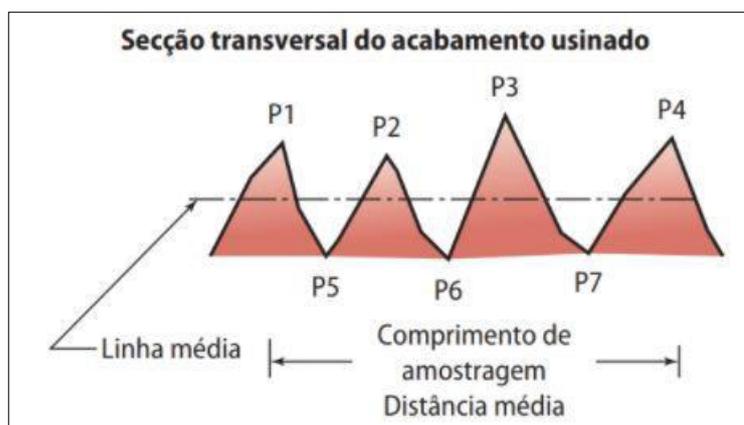
No trabalho produzido por Kursuncu (2020), na usinagem do Inconel 718, foram observados os efeitos do desgaste foram oxidação, abrasão e adesão. O autor ainda observou que a usinagem em altas temperatura fazem com que o material da peça usinada adere na ferramenta de corte, provocando desgastes na aresta postiça das faces de flanco. Foram verificados efeitos de desgastes por oxidação como resultado da alta temperatura.

Toda a atividade de usinagem acaba implicando na remoção de material da peça. Essa ação da ferramenta de corte acaba, inevitavelmente, provocando sulcos na superfície da peça. Assim, é necessário que se meça a intensidade dessas ranhuras existentes de forma a verificar se os valores obtidos estão de acordo com o valor médio aceitável. Lira (2015) informa que um valor de rugosidade alto acarreta problemas tribológicos, bem como de acoplamento, desgastes, condução de calor, entre outros. O instrumento amplamente utilizado na indústria para a medição de rugosidade é o rugosímetro.

Há atualmente a possibilidade de medição de diversos parâmetros. Porém o mais usual é que a análise contenha, ao menos, as quatro medições a seguir, descrita pela NBR ISO 4287 (2002):

- R_a = Rugosidade média: é a distância média de um perfil desde a sua linha média sobre um comprimento medido conforme a Figura 9;

Figura 9 - Picos e vales de rugosidade são especificados em relação à linha média.



Fonte: Fitzpatrick (2013).

- R_z = é a soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v ;
- R_y = É a soma da altura do pico mais alto (Z_p) a partir da linha média e da profundidade do vale (Z_v) mais profundo a partir da linha média;
- R_q = É a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil a partir da linha média, ao longo do comprimento de amostragem.

De todos os parâmetros observados, o R_a acaba sendo o de maior aplicação devido a sua facilidade de obtenção e que os riscos superficiais inerentes ao processo de usinagem, não alteram o seu resultado significativamente. Outro fato que sempre deve ser observado ao analisar a rugosidade de um processo de usinagem é quanto aos efeitos da vibração do sistema. Além da fixação adequada da fresa, o próprio movimento de corte de um aço inoxidável acaba gerando vibrações que aumentam a deterioração da superfície da peça.

A utilização de um inserto contendo o revestimento de Al_2O_3 pelo processo de CVD teve no trabalho de Rупpi (2005) o reconhecimento de que esta camada externa confere um No trabalho de Ginting et. al (2018) os autores observaram que o aumento da dureza e a

redução do coeficiente de fricção quando utilizado o TiN contribuiu para diminuir o valor de Ra da superfície da amostra.

A norma ABNT NBR ISO 8404:1984 apresenta uma relação de rugosidade, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Características da Rugosidade Ra

Classe de rugosidade	Desvio médio aritmético (Ra) μm
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Fonte: NBR 8404 (1984)

De forma geral, as classes entre N4 e N6 as recomendadas em processos de usinagem voltados a métodos mais precisos.

Em experimentos realizados por Airao et al. (2018) foram obtidas importantes conclusões, como o menor valor de rugosidade para a usinagem com fluído em virtude das partículas formarem uma fina camada de interface evitando o desgaste por abrasão e a formação de quebra-cavaco. Os autores também perceberam que a qualidade superficial da usinagem a seco foi pior em todas as velocidades de corte, principalmente nas mais baixas em virtude da ação capilar ocorrer mais facilmente nessas condições. Por fim, a equipe percebe

que para velocidades de corte constante, à medida que o avanço aumenta, a rugosidade da superfície também aumenta. A Tabela 4 apresenta um resumo dos valores obtidos no trabalho de Airao (2018).

Tabela 4 - Valores de rugosidade para Usinagem a Seco e com Fluido.

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Profundidade de corte (mm)	Ra1 - Seco	Ra2 - Seco	Ra1 Fluido	Ra2 – Fluido
62,80	0,08	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6
87,92	0,08	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3
113,04	0,08	0,5	0,6	0,5	0,8	0,8
62,80	0,12	0,5	0,7	0,5	0,6	0,8
87,92	0,12	0,5	0,7	0,5	0,5	0,4
113,04	0,12	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
62,80	0,16	0,5	0,8	0,8	0,6	0,8
87,92	0,16	0,5	0,6	0,5	0,3	0,3
113,04	0,16	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4

Fonte: adaptado de AIRAO (2018)

Resultados semelhantes tiveram Wu e Yin (2018) ao concluíram que para o fresamento plano e de topo, a rugosidade da superfície é menor quanto maior a velocidade do fuso e menor o avanço. Os autores ainda definiram as ordens de influência na rugosidade da superfície como sendo:

- Avanço > velocidade do fuso > profundidade de corte axial > profundidade de corte radial.

Para a utilização de aços inoxidáveis é fundamental entender que esse tipo de material é constituído à base de ferro com teor de cromo acima de 12%. Essa condição lhe permite ter uma excelente resistência à corrosão, pois há a formação de uma fina película de óxido de cromo (Cr₂O₃), tornando uma camada passiva. Como características, eles possuem uma composição química, microestrutura e propriedades mecânicas complexas em relação a outros

aços. Lewellyn e Hudd (1998) já afirmavam que eles apresentam uma ampla gama de utilização, desde a indústria química, farmacêutica e de geração de energia. Esse tipo de aço é classificado em 5 (cinco) categorias: Martensíticos, Ferríticos, Austeníticos, Duplex e Endurecidos por precipitação. O presente trabalho utiliza o aço inoxidável duplex (Ferrítico-austeníticos), definido por Silva Mei (2012) como microestruturas que possuem frações aproximadamente iguais de austenita e ferrita, e que são obtidas com composições de ferro, cromo (18% a 27%), níquel (4% a 7%) e molibdênio (1% a 4%) e outros elementos, em especial o nitrogênio. Combinam as propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos: elevada resistência mecânica, boa tenacidade, resistência à corrosão muito boa e excelente resistência à corrosão sob tensão e à fadiga.

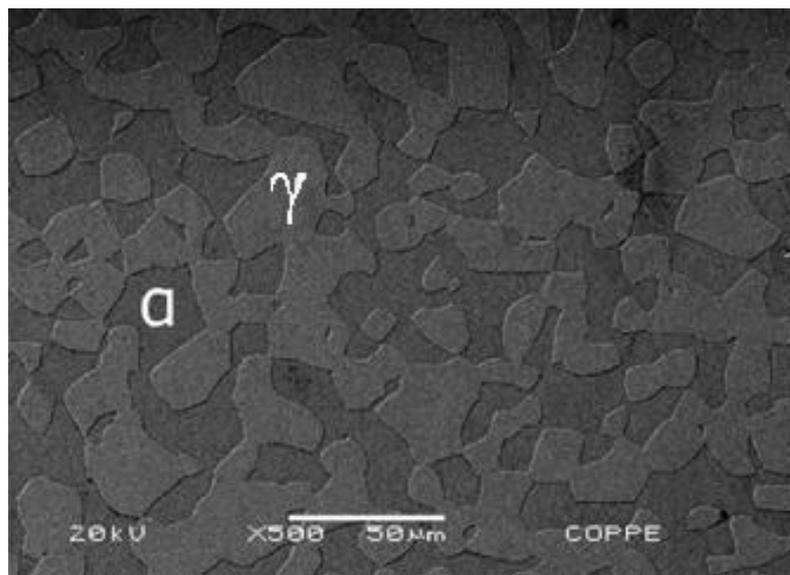
Dhananchezian et. al (2018) informam que nos últimos anos, os aços inoxidáveis duplex estão sendo amplamente utilizados nas indústrias química, de papel e celulose, construção, veículos espaciais, tratamento de águas residuais, marinha, defesa, nuclear, têxtil, produção de alimentos, biomédica e farmacêutica, etc. para inúmeras aplicações.

Como característica, os aços inoxidáveis duplex (*DSS – Duplex Stainless Steel*) são ligas bifásicas de cromo-níquel-molibdênio-ferro nas quais as proporções de tais elementos permitem otimizar o equilíbrio das frações volumétricas de austenita e ferrita. Essa microestrutura de fase dupla, lhes conferem uma excelente resistência a corrosão e uma alta resistência mecânica, sendo um material amplamente utilizados na indústria química e de petróleo e gás.

Nilson e Chai (2011) acrescentam que esses materiais possuem uma combinação atrativa de excelente resistência à corrosão com altas propriedades mecânicas, mesmo quando comparadas com os aços inoxidáveis austeníticos ou com os aços inoxidáveis ferríticos, especialmente o aço inoxidável super duplex (*SDSS – Super Duplex Stainless Steel*). Conclusão semelhante teve Kahar (2017) ao reportar que os aços inoxidáveis duplex foram amplamente utilizados devido a uma atraente combinação de excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e custo relativamente baixo em comparação com outros materiais de alto desempenho.

Mougo et al. (2018) demonstrou a microestrutura do aço super duplex UNS32750, conforme Figura 10.

Figura 10 - Microestrutura do aço UNS32750



Fonte: Mougo et al. (2018)

Na Figura 10 os autores apresentam com clareza a típica configuração da microestrutura composta da fase austenita (fase γ em cor mais escura) e a fase ferrita (fase α na cor mais clara). Com o uso de software *Image ProPlus* o autor conseguiu determinar o percentual volumétrico de 52% para austenita e 48% para ferrita.

Assim, o duplex tem conquistado cada vez mais espaço na indústria, principalmente em áreas de grande capacidade tecnológica. Conforme Martins e Castelletti (2006) “A crescente demanda da indústria do petróleo por materiais que tenham excelente desempenho em ambientes corrosivos exige do mercado soluções que justificam a complexidade das operações de exploração em alto mar e em altas profundidades, ou até mesmo, pelos riscos associados a estas operações.”.

Kansas e Chai (2016) informam que esse tipo de material ganhou popularidade no setor de petróleo e gás e é útil nos casos em que a resistência ao estresse do projeto é importante. Existem muitos tipos que foram projetados para essa finalidade, incluindo SAF2906 (UNS S32906), 3207HD (UNS 33207) e o 2507 (UNS32750).

Ao se tratar de aços inoxidáveis austeníticos e duplex é comum relacioná-los ao equivalente de resistência a pite ou PREN (*pitting resistance equivalente number*), termo amplamente utilizado na indústria e de acordo com a norma ASTM A890/A890M, essa grandeza pode ser calculada de acordo com a expressão: que pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + \%W) + 16(\%N)$$

Equação 1

Senatore et al. (2007) salienta que é preciso atentar para o fato de que apesar da boa correlação entre as expressões do PRE e resultados de diversos ensaios de corrosão, tais expressões devem ser usadas qualitativamente, visando, somente, a estabelecer um ranking aproximado entre diferentes aços. No caso dos aços inoxidáveis duplex, é necessário considerar a resistência à corrosão por pite das duas fases, haja vista que há diferença dos elementos de liga presentes na austenita e ferrita. Caso uma das fases apresente menor resistência à corrosão, esta determinará o comportamento do material. A Tabela 5 resume as características químicas dos aços duplex.

Tabela 5 - Composição Química dos Aços Inoxidáveis Duplex

Tipo	%Cr	%Ni	%Mo	%N₂	Nº PRE
Lean	20 a 24	1 a 5	0,1 a 0,3	0,1 a 0,22	24 a 25
Standard	21 a 23	4,5 a 6	2,5 a 3,5	0,1 a 0,22	33 a 35
Super duplex	24 a 29	4,5 a 8	2,7 a 4,5	0,1 a 0,35	>40
Hiper duplex	27	6.5	5	0.4	49

Fonte: Kahar (2017)

Rajaguru e Arunachalam (2020) apresentaram em seu trabalho as propriedades mecânicas do aço super duplex UNS32750, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedade Mecânicas do UNS32750

Propriedade	Valor
Resistência a Tração	850 Mpa
Densidade	7,8 g/cm ³
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Condutividade Térmica	14 W/m °C

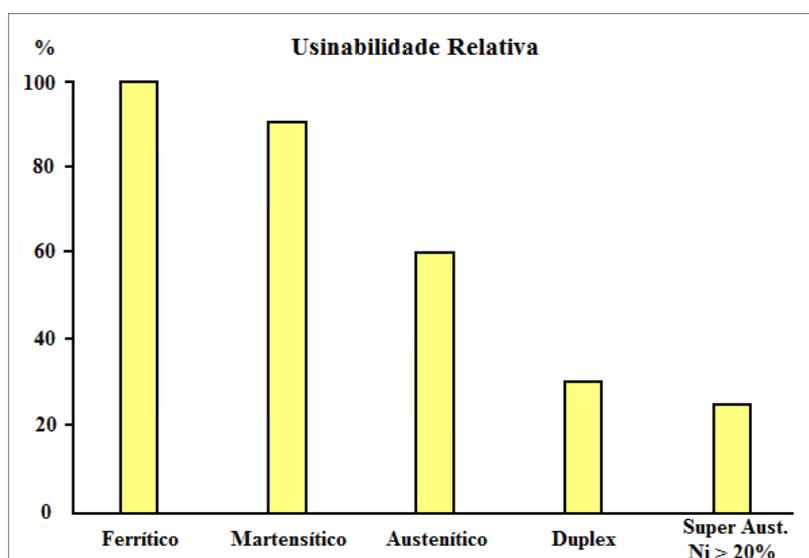
Fonte: RAJAGURU (2020)

Segundo Chail e Kangas (2016) a adição de molibdênio promove, principalmente, um aumento na resistência a corrosão enquanto a adição de nitrogênio provoca um aumento na estabilidade estrutural. Em seu trabalho os autores encontraram o valor de PRE de 42,5 para o aço super duplex 2507 (UNS32750).

Uma análise importante na utilização do aço inoxidável duplex em usinagem é que esse alto teor de austenita (aproximadamente 50%) acaba gerando uma grande dificuldade no trabalho a quente desse tipo de material. Em geral, aços inoxidáveis duplex tem baixa capacidade de trabalho a quente e, conseqüentemente, possui uma faixa estreita de processamento, o que acaba gerando grandes dificuldades durante o processamento industrial.

Krolczyk (2016) já afirmara que os aços duplex são considerados elementos de difícil usinabilidade. Além disso, os aços inoxidáveis apresentam, normalmente, limites de escoamento duas vezes maiores que os aços inoxidáveis austeníticos sem nitrogênio. Pelo fato de possuir pouco enxofre em sua liga, o cavaco formado durante a usinagem de material duplex é forte e abrasivo ao ferramental, originando quebra do cavaco. Essas características geram a necessidade de realizar a usinagem com forças de cortes mais altas, tornando o desgaste da ferramenta mais rápido, conforme publicado pela IMOA (2014). A usinabilidade torna-se mais difícil quando se utilizam ferramentas de carbonetos, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Usinabilidade relativa de aços inoxidáveis



Fonte: Catálogo da Sandvik

Como orientações gerais, o IMOA (2014) sugere que para a usinagem de aço inoxidável duplex deve-se:

- Utilizar máquinas potentes e rígidas e minimizar a vibração;

- As forças de corte para cortes similares serão normalmente mais altas para os aços inoxidáveis duplex do que para os aços inoxidáveis austeníticos;
- Favorecer uma geometria de borda para os carbonetos que promova uma borda afiada enquanto oferece resistência adequada;
- Usar velocidade adequada, mas não excessiva, para evitar a formação de rebarba e desgaste excessivo;
- Trocar as ferramentas em intervalos programados para garantir bordas corte preciso;
- Usar fluídos de resfriamento utilizando emulsões com aditivos EP

AMARO et al. (2020) ao investigarem a influência da estratégia de fresamento de corte na usinabilidade das ligas de duplex, confirmaram as constatações amplamente difundida na literatura, de que este tipo de material é considerado de difícil usinagem devido à sua alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alto grau de endurecimento do trabalho. Os autores tiveram diversas conclusões nos quais definiram que o dano principal se localizou nas bordas periféricas, durante uma usinagem de 5 minutos. Após esse período, surgiram danos da aresta da ferramenta provocado por um progressivo desgaste de flanco em todo o comprimento da aresta de corte. À medida que a usinagem continua, além do desgaste de flanco, foi identificado um processo cíclico de adesão localizada do cavaco à aresta de corte.

Na ampla revisão de literatura promovida por Gowthaman et al. (2020), os autores tiveram diversas conclusões como:

- Necessidade de usar insertos revestidos e com quebra-cavaco positivo;
- Maximizar a profundidade de corte e reduzir a taxa de avanço;
- Eliminar a velocidade de corte excessiva para evitar a formação da aresta postiça de corte
- Usar ferramentas que possuam raio de ponta pequena;
- Para reduzir o risco de deformação plástica é necessário aplicar uma taxa maior de corte;
- Uso de fluídos de corte com aditivos para extrema pressão;
- Aumentar a energia de falha de empilhamento para reduzir o encruamento
- Reduzir os elementos de liga de Nitrogênio e Molibdênio;
- As arestas de corte devem ser mantidas afiadas pois as arestas cegas causam o endurecimento excessivo do trabalho;

- Os quebra-cavacos devem ser usados para ajudar a garantir que os cavacos permaneçam livres do trabalho

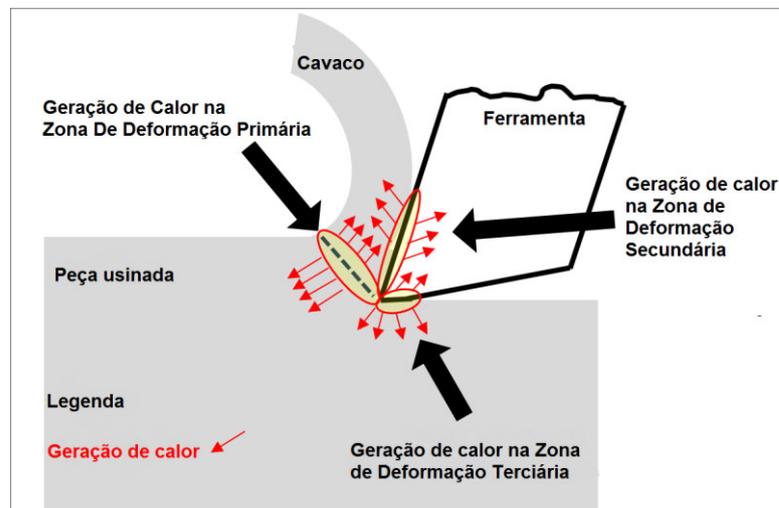
2.2 Métodos de Refrigeração

A utilização de fluidos de cortes sempre foi vista com imprescindível durante a operação de corte de material, pois possui grande influência na vida útil da ferramenta e na qualidade da superfície usinada. Drlička et al. (2014) afirmaram que “a extensão da vida útil da ferramenta está ligada à redução do atrito na interface ferramenta-cavaco, fornecendo lubrificação adequada, dissipação de calor devido ao resfriamento e evacuação eficiente de cavacos”.

Essa afirmativa é acompanhada por diversos outros cientistas que na literatura salientam que os danos que ocorrem nas ferramentas, como difusão, trincas, são oriundos da alta temperatura na interface de corte. Assim faz-se necessário um controle eficaz de temperatura no processo de usinagem que garanta tanto um acabamento superficial de qualidade como também não afete as características da peça usinada.

A Figura 12 apresenta os pontos de calor gerados durante a usinagem que foram descritos no trabalho de Pervaiz et al. (2018).

Figura 12 - Geração de calor nas zonas de deformação primária, secundária e terciária



Fonte: Pervaiz et al. (2018).

De acordo com a Figura 12 é possível verificar que uma dissipação de calor eficiente no processo de usinagem, resulta em danos menores à ferramenta e em uma melhor integridade da superfície.

Porém, quando se verifica as características ambientais dos fluídos de corte, se observa que a maioria dos fluídos convencionais é de natureza tóxica e não biodegradável (PERVAIZ et al., 2018). A necessidade econômica e ambiental pela redução do uso de fluído de corte na usinagem proporcionou a abertura de novos trabalhos que busquem novas ferramentas para otimização do processo industrial.

De acordo com Salaam et al. (2013), a indústria de manufatura está se esforçando para reduzir os impactos ambientais, introduzindo novos materiais com melhores características, que consomem menos poder de processamento e usam quantidades menores de refrigerante de processamento.

Dessa forma, Bermingham et al. (2012) realizaram um experimento para investigar as diferenças entre o líquido refrigerante de alta pressão e o fluído criogênico na vida útil da ferramenta e na morfologia do cavaco na usinagem de uma liga de titânio. Como resultado, obtiveram que o nitrogênio líquido e a emulsão de alta pressão são eficazes para prolongar significativamente a vida útil da ferramenta durante a usinagem a seco.

Krolczyk et al. (2016) conseguiram elaborar um anel de usinagem sustentável (Figura 13) que consiste em técnicas de usinagem amplamente aplicadas com impacto relativamente baixo para o meio ambiente.

Figura 13 - Representação do Anel de Usinagem Sustentável



Fonte: Krolczyk et al. (2016)

Dessa forma, essas novas ferramentas estão sendo discutidas e aprimoradas para que conseguir a redução do uso do fluido de corte, mas sem perder a capacidade produtiva e a qualidade superficial que o material oferece. Assim quatro técnicas serão discutidas a seguir, como forma de ampliar a discussão.

2.2.1 Usinagem a Seco

A técnica de usinagem a seco é a que possui o melhor conceito socioambiental, pois elimina completamente o uso de qualquer fluido de corte. Pervaiz et al. (2018) a definiu como a operação em que nenhum fluido de corte é aplicado durante a fase de corte, se tornando a opção mais sustentável quando se trata da aplicação de fluidos na usinagem em geral.

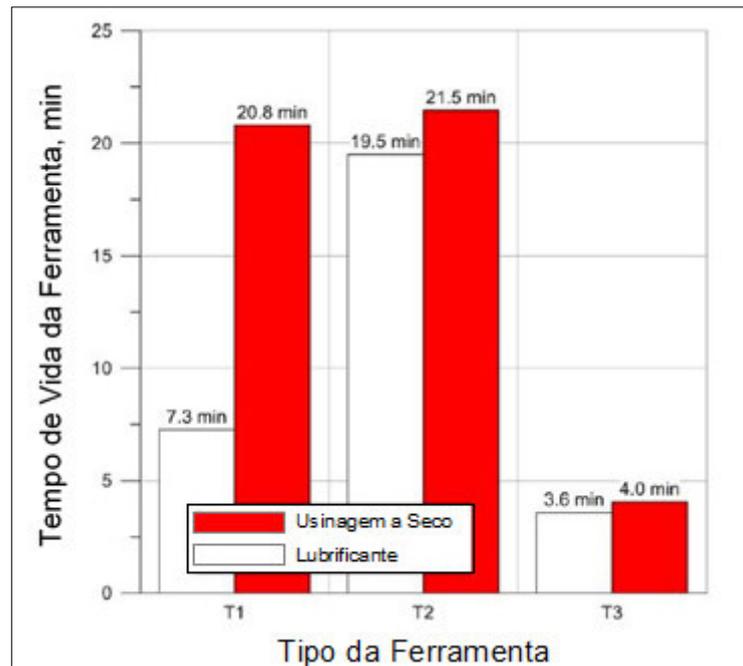
Como informado, o fluido de corte possui uma importância no controle da temperatura durante o processo de usinagem. Portanto, apenas remover o fluido da atividade provocará um aumento da geração de calor na zona de corte.

Para a aplicação da usinagem a seco, devem ser verificados os materiais envolvidos no processo, os parâmetros de corte aplicados, forma de eliminação do cavaco, geometria da peça e também a qualidade superficial desejada.

Os primeiros exemplos detectados por SREEIJTH P. e NGOI B. (2000) já apresentavam resultados satisfatórios para a usinagem a seco em ferro fundido utilizando ferramentas de CBN que possuem melhor condutividade térmica que as cerâmicas, conseguindo remover o calor com eficiência. Outra conclusão foi que o aumento da velocidade de tinha o impacto de reduzir o tempo de contato entre a peça e a ferramenta e não, simplesmente, reduzir o tempo de operação.

Já a usinagem de aço duplex sempre envolveu a utilização de fluidos de corte, porém, KROLCZYK et.al. (2016) conseguiram atingir resultados satisfatórios com uma produção limpa por torneamento de aço duplex. Seus resultados demonstraram que o torneamento a seco, com os parâmetros de usinagem e tipo de ferramenta bem definida conseguiu atingir uma vida útil quase três vezes superior ao tempo de vida obtido durante o corte com fluidos, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Efeito do resfriamento na vida útil da ferramenta de corte T1, T2 e T3 no processo de torneamento de aço inoxidável duplex com e sem resfriamento;



Fonte: adaptado de Krolczyk et. al (2016)

Em testes envolvendo a usinagem da superliga Inconel 718, Kursuncu (2020) realizou usinagem a seco variando a velocidade de corte e a tratamento térmico das ferramentas de corte. Como resultado, o autor teve que os valores de força diminuíram a medida que os valores de corte aumentavam.

2.2.2 Usinagem com Fluido Refrigerante

A introdução de fluido refrigerante na usinagem foi realizada por Frederick Winsliw Taylor em 1894 (MACHADO et. al. 2009) e partir de então foram amplamente utilizados nos processos de corte.

Valim (2018) afirma que altas temperaturas são alcançadas durante o processo de usinagem decorrentes do atrito da peça com a ferramenta de corte e que esse calor necessita ser dissipado. Almeida (2015) aponta que os fluídos de corte são substâncias desenvolvidas com a função de refrigerar a peça e a ferramenta de corte durante o durante a usinagem. As funções primárias dos fluídos são as seguintes:

- Refrigerar a ferramenta de corte e a peça;
- Ter uma ação lubrificante com a criação de uma película entre a aresta de corte e a superfície da peça;

- Reduzir o esforço cortante;
- Melhorar o acabamento superficial;
- Auxiliar na remoção do cavaco;
- Evitar que as partes da máquina sem proteção se oxidem.

Com o avanço nas pesquisas, novos tipos de fluídos e de aditivos foram surgindo e atualmente os tipos mais utilizados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Informações sobre os tipos de fluídos de corte

TIPOS	COMPOSIÇÃO	PROPRIEDADES				
		Resfriamento	Lubrificação	Proteção conta a corrosão	EP	Resistência à corrosão
ÓLEOS MINERAIS	Derivados de petróleo	-	Ótima	Excelente	-	Boa
ÓLEOS GRAXOS	Óleos de origem vegetal ou animal	-	Excelente	Boa	Boa	-
ÓLEOS COMPOSTOS	Mistura de óleos minerais e graxos	-	Excelente	Excelente	Boa	Boa
ÓLEOS “SOLÚVEIS”	Óleos minerais + óleos graxos, soda cáustica, emulsificantes, água	Ótimo	Boa	Ótima	-	Boa
ÓLEOS EP	Óleos minerais com aditivos EP (Enxofre, cloro ou fósforo)	Ótimo	Boa	Ótima	Excelente	Boa
ÓLEOS SULFURADOS E CLORADOS	Óleos minerais ou graxos sulfurados ou com substâncias cloradas	-	Excelente	Excelente	Excelente	Ótima
FLUÍDOS SINTÉTICOS	Água + agentes químicos (aminas, nitritos, nitratos, fosfatos) sabões, germicidas	Excelente	Boa	Excelente	Excelente	Excelente

Fonte: Almeida (2015)

Ao observar a Tabela 7 é possível perceber a dificuldade no momento da escolha do fluido de corte adequado. Para os aços inoxidáveis, por exemplo, é indicado a aplicação de óleos com aditivos EP à base de cloro e enxofre. Já para ligas de alumínio e de magnésio, usinagens a seco podem ser realizadas, desde que analisadas as velocidades de corte. Machado (2015) aponta ainda as recomendações quanto ao material da ferramenta, como por exemplo o metal duro, no qual o uso de um fluido refrigerante tem a capacidade de prolongar a vida da ferramenta.

A importância do fluido de corte na usinagem foi fundamental para o aumento da capacidade produtiva. Porém, tanto o seu custo - apontado como 16% do custo total de fabricação por Kopac (1998) - como o aumento da conscientização ambiental também nos processos produtivos, passaram a produzir questionamentos sobre os seus benefícios e desde então diversos estudos são realizados para minimizar o seu impacto e tornar o processo mais sustentável. Dessa forma, a sua utilização em quantidades adequadas reduz tanto o impacto financeiro da operação como também o impacto ambiental.

2.2.3 Usinagem com criogenia

A usinagem com criogenia é uma técnica que consiste em aplicar, geralmente, nitrogênio líquido, a uma temperatura próxima de -185°C (89 K), ao processo de trabalho a quente com o objetivo de reduzir a temperatura de corte. Na última década tem-se ampliado os estudos na utilização da criogenia para o tratamento das pastilhas de corte como forma de aumentar sua vida útil, dureza e resistência ao desgaste.

Nos processos de usinagem há duas possibilidades de utilizar nitrogênio líquido na operação. A primeira consiste no trabalho de Kreese et. al (2018), que se referiram ao tratamento criogênico (TC) como uma tecnologia de efeito não destrutivo para modificação de microestrutura, submetendo a ferramenta de corte por um determinado período a uma temperatura muito abaixo da temperatura de ambiente, geralmente cerca de -180°C .

Outra forma, consiste em utilizar o nitrogênio líquido como fluido refrigerante de forma a submeter toda a interface ferramenta-peça a uma temperatura extremamente baixa, com o benefício de ser uma usinagem limpa. Park et. al (2015) que já haviam identificado que o resfriamento da temperatura de corte na usinagem é muito importante para a melhoria da vida útil da ferramenta, principalmente quando se trata de materiais de trabalho que possuem baixa condutividade térmica. Como resultado, os autores tiveram na combinação de MQL (mínima quantidade de lubrificante) e resfriamento criogênico interno uma melhora na vida

útil da ferramenta de até 32% quando comparado com os métodos convencionais de resfriamento.

Dhahananchezian et. al (2017) realizaram um trabalho que investigou a influência do resfriamento criogênico - usando nitrogênio líquido como refrigerante - na temperatura de corte, os efeitos nas forças de corte, no valor de rugosidade, na morfologia do cavaco e no desgaste da ferramenta. Para isso, realizaram o torneamento - com três velocidades de corte (72, 119, 197 m/min), avanço de 0,111 mm/rotações e a profundidade de corte de 1 mm - de um aço inoxidável duplex 2205 sob condição de corte a seco e ao ambiente de resfriamento criogênico. Os autores constataram uma redução de temperatura de corte de 53 - 58 %, uma diminuição das forças de corte em 30 a 43 % e a melhoria no valor da rugosidade entre 18 e 23 %, quando comparado com o torneamento a seco. Também foi observado uma melhora no desgaste da ferramenta resultando em resultados melhores do que as condições de corte a seco. A Figura 15 mostra o processo de TC executado pelos autores.

Figura 15 - Sistema de Tratamento Criogênico na Usinagem



Fonte: Dhananchezian (2017) et. al

Em outro trabalho, Nandam et al. (2014) informaram que o fluido criogênico melhorou a usinabilidade de ligas pesadas de tungstênio, aonde a taxa de remoção de material e o acabamento superficial das amostras usinadas tiveram resultados extremamente bons quando comparados com o método de refrigeração convencional.

Chopra et.al. (2015) concluiu que se pode afirmar que a transformação de austenita retida em martensita e a precipitação de carbonetos secundários são os principais responsáveis

pela melhoria da usinagem, de forma que o tratamento criogênico tem sido aceito como um processo que melhora as propriedades do material e o seu desenvolvimento irá gerar novos benefícios e entendimentos maiores.

Villa et.al (2014) utilizando o tratamento criogênico conseguiram apresentar em seu trabalho uma redução no teor de austenita retida em aços de alto carbono a partir da melhora da estabilidade da região de austenita. Os autores descobriram que esta estabilidade na formação da austenita contra a martensita é aumentada pelo acúmulo de tensões de compressão. Os autores ainda explicaram que essa mudança se deve ao aumento da densidade de defeitos na austenita, que favorecem a decomposição da austenita pela fácil nucleação da ferrita. Villa destacou ainda que havia resultados contraditórios que precisavam ser melhores investigados, principalmente em relação a deterioração da resistência ao desgaste e as propriedades de tenacidade de aços para trabalho a frio e de alta velocidade após tratamento criogênico.

Dhahananchezian et. al (2011) em outro trabalho já haviam detectado que o desgaste de flanco da ferramenta é o desgaste de ferramenta mais importante que ocorre em uma operação de usinagem. O desgaste de flanco é atribuído principalmente ao atrito da ferramenta ao longo das superfícies mecânicas. No trabalho realizado, o desgaste de flanco aumentou com o aumento da velocidade de corte. Observou-se pelas curvas que o desgaste de flanco no resfriamento criogênico foi menor do que na usinagem úmida. Isso se deve ao controle dos mecanismos de abrasão e desgaste por atrito através da redução da temperatura da zona de corte e interações favoráveis cavaco-ferramenta e ferramenta de trabalho pela aplicação de nitrogênio líquido na zona de usinagem. A influência do resfriamento criogênico usando nitrogênio líquido reduziu o desgaste de flanco em 24 a 30% em relação à usinagem úmida

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os equipamentos, procedimentos e materiais utilizados neste trabalho, bem como o planejamento experimental utilizado ao longo deste trabalho.

3.1 Ferramentas de corte

Para os experimentos foi utilizado a porta ferramenta CoroMill® 345-050Q22-13H da empresa Sandvik Coromant, apresentado na Figura 16, em função de ser uma das principais escolhas industriais para faceamento em processos de alta produtividade.

Figura 16 - a) Vista lateral da porta pastilha; b) Vista inferior da porta pastilha



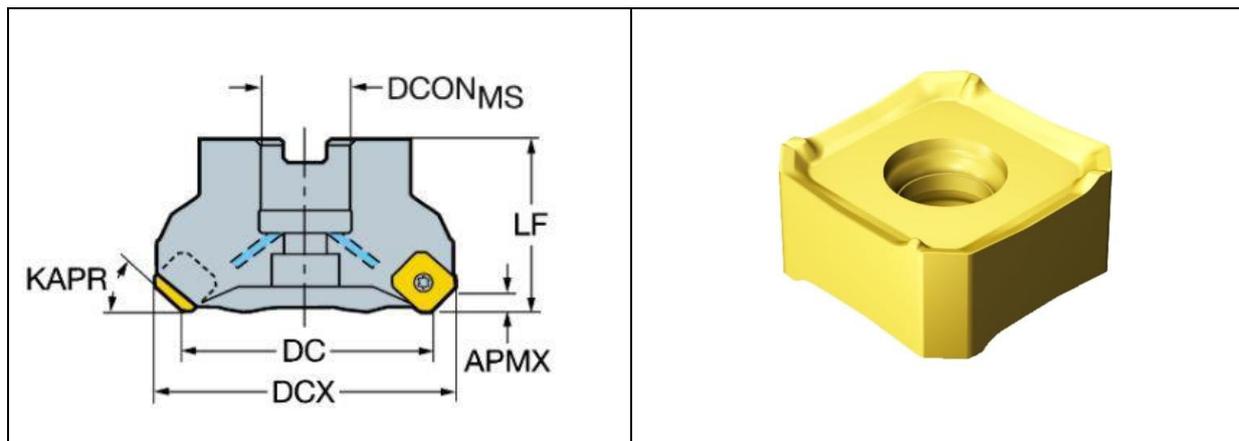
Fonte: o autor

Fonte: o autor

Para o faceamento, a fresa de 45° é uma ferramenta indicada pois, segundo o fabricante, gera cortes radiais e axiais equilibradas, exigindo menos potência da máquina. Dessa forma, pelas dimensões do fresamento, são esperados cavacos curtos que devem ser dissipar com facilidade pois a quantidade de matéria deverá ser reduzida no final do corte. A formação de cavacos finos permite alta produtividade, com a oportunidade de aumentar o avanço da mesa, mantendo moderada a carga sobre a aresta de corte.

A partir da definição da porta ferramenta foi escolhido o modelo de pastilha intercambiáveis ISO 345R-13T5M-MM 2040 que possui as representações gráficas descritas na Figura 17.

Figura 17 - a) Representação genérica do porta-ferramenta; b) representação genérica da pastilha de corte;



Fonte: Catálogo Sandvik

Fonte: Catálogo Sandvik

De acordo com o fabricante, a pastilha de corte do grupo M é a indicada para o faceamento de aços inoxidáveis, possui os valores operacionais descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores operacionais para a pastilha de corte Sandvik 345R-13T5M

Parâmetro	Valor
Avanço (fz)	0,16 mm (0,16 a 0,34 mm)
Velocidade de Corte (Vc)	170 m/min (195-145 m/min)
Número de Arestas de Corte	8
Comprimento Efetivo da Aresta de Corte (LE)	0,8 mm
Ângulo da Aresta de Corte Principal (KAPR)	45°
Cobertura	CVD TiCrN+Al ₂ O ₃ +TiN
Profundidade de Corte Máxima (APMX)	6 mm
Diâmetro de Corte (DC)	50 mm
Diâmetro de Corte Máximo (DCX)	64,8 mm

Fonte: autor (adaptado do catálogo da Sandvik)

3.2 Definições dos Parâmetros de Corte

Para a definição dos parâmetros foram consideradas inicialmente as faixas de valores indicadas pelo fornecedor das ferramentas de corte e da fresadora vertical. A seguir foi

calculada a velocidade de corte do processo considerando o comprimento do trajeto da ferramenta de corte e a rotação escolhida. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de Corte

Parâmetro	Valores
Velocidade de Corte (Vc)	251 m/min
Avanço (fz)	0,16 mm
Profundidade	2 mm
Rotação	1600 rpm

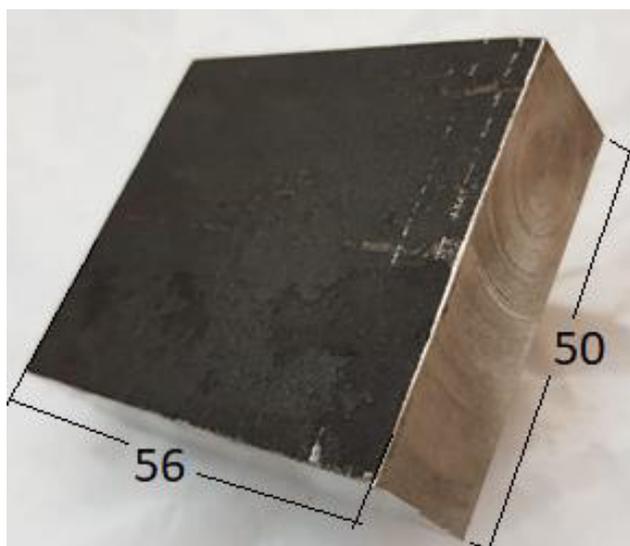
Fonte: o autor

Nesse ponto deve-se salientar que a escolha por uma profundidade maior é devido ao fato de se optar por uma usinagem mais agressiva, de forma a submeter a ferramenta de corte a um processo mais severo de desgaste. Outro fato observado também, é que as principais referências analisadas costumam trazer profundidades superior a 1 milímetro. Dessa forma, é que foi definido o valor de 2 milímetros para a profundidade de corte da peça.

3.3 Corpos de Prova (CPs)

O material utilizado para a usinagem foi o aço inoxidável super duplex UNS S32750 (SAF2507), que foram adquiridos em barras laminadas, submetidos a solubilização, de 50mmx300mm com espessura de $\frac{3}{4}$ ". As barras foram preparadas e cortadas para as dimensões de 56mm x 50mm x 19mm. As dimensões foram definidas baseados no suporte inicialmente montado para o faceamento no centro de usinagem, que por fim, não foi de possível utilização. No momento da utilização da fresa vertical, foi construída uma fixação de forma a posicionar o corpo de prova na maior cota da peça, garantindo assim um maior número de passes. As dimensões do corpo de prova são apresentadas na Figura 18

Figura 18 - Corpo de Prova das Amostras com dimensões em mm.



Fonte: o autor

3.4 Ensaios de Fresamento

As atividades ocorreram no Laboratório de Usinagem do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FURG. Os ensaios foram realizados em fresa vertical Strigom MS400-02.

Os ensaios seguiram a seguinte sequência:

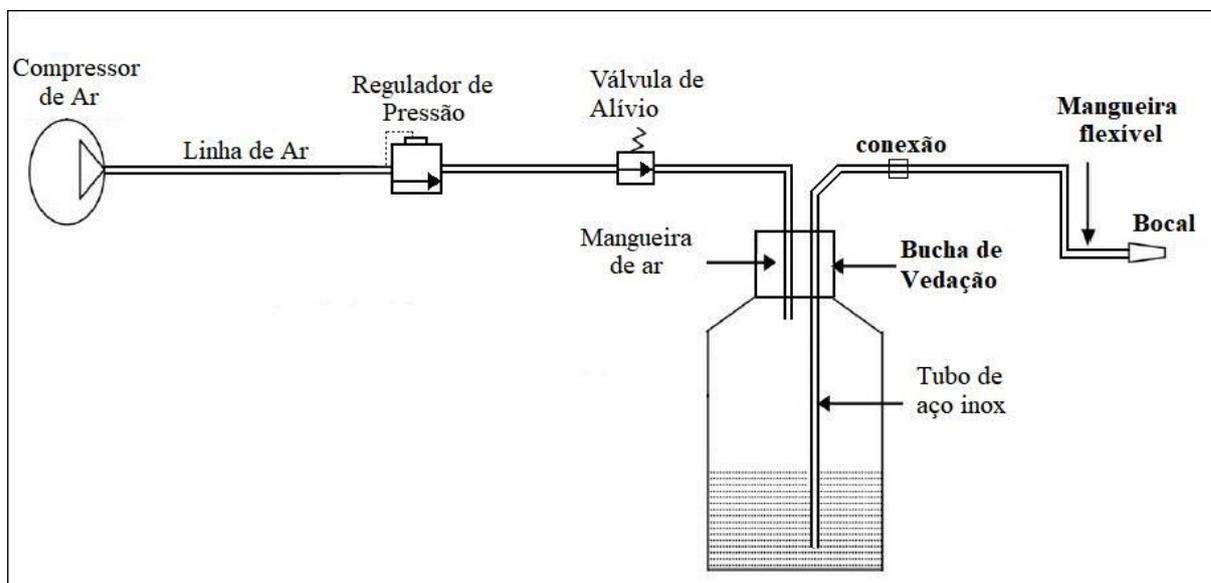
- 1º) Usinagem a seco
- 2º) Usinagem com fluido de corte;
- 3º) Usinagem com Nitrogênio Líquido

Pelo fato da montagem do ensaio de usinagem a seco ser o processo mais rápido de preparação e não requerer a utilização de nenhum fluido, ele acabou sendo o primeiro processo. Para a usinagem com fluido foi utilizado o fluido de corte Quimatic Jet – Tapmatic. Este material é um fluido integral sintético a base de água, sendo indicado para corte de metais ferrosos e aços inoxidáveis, inclusive com a utilização de pastilhas de metal duro. O fluido é recomendado para aumentar a vida útil dos metais, de forma que lubrifica e refrigera o processo de usinagem, evitando também a perda de dureza da ferramenta de corte, além de possuir proteção anticorrosiva.

Para a usinagem utilizando tratamento criogênico foi utilizado um cilindro de 20 litros de nitrogênio líquido - cedido pelo Centro Integrado de Análises – no qual foi elaborado um

sistema de inserção de ar comprimido para que fosse possível retirar o nitrogênio líquido, conforme Figura 19.

Figura 19 - Esquemático do Sistema de Nitrogênio Líquido



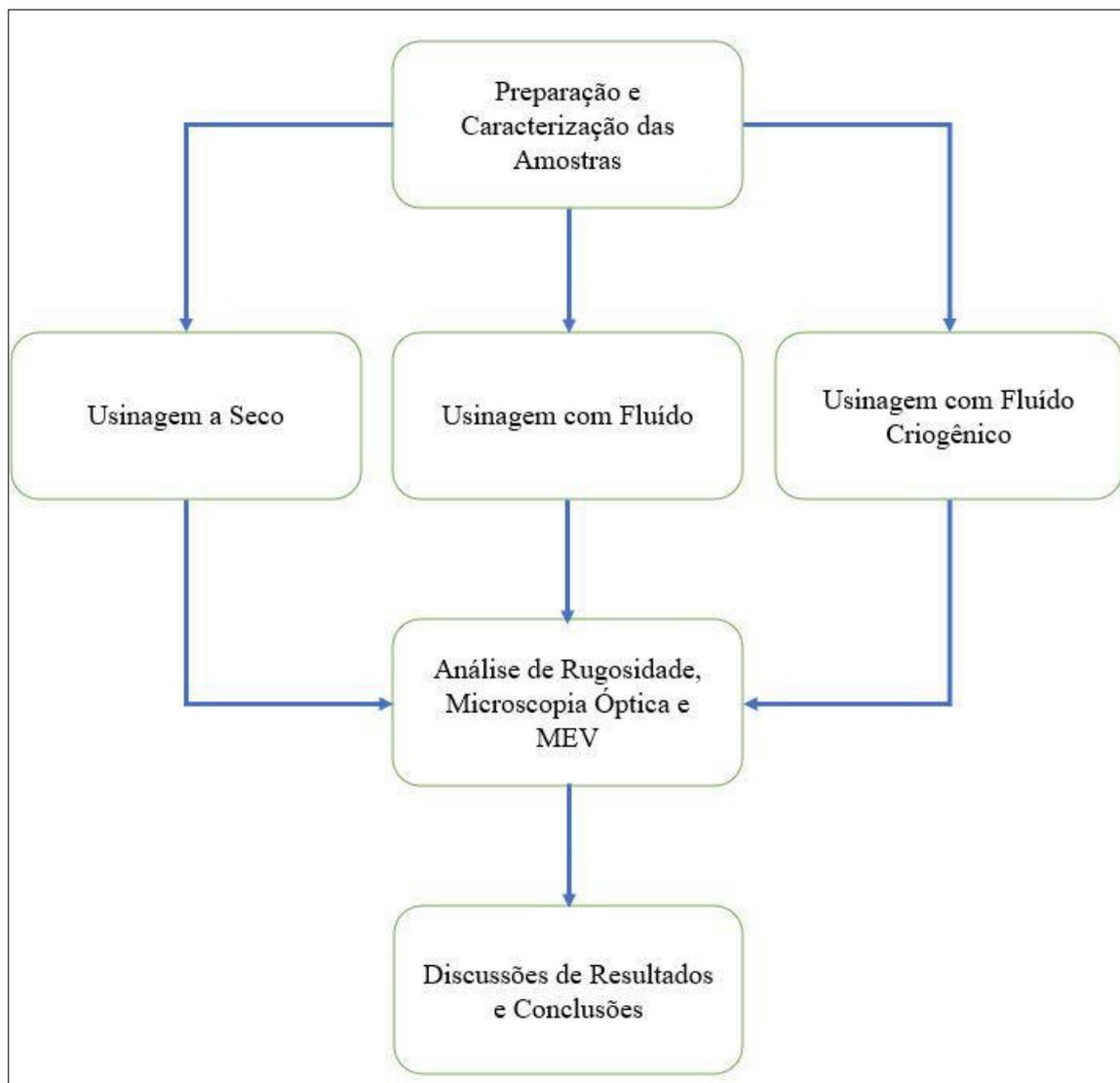
Fonte: O autor - adaptado de Dhananchezian (2011).

A utilização do nitrogênio líquido foi controlada através do regulador de pressão da linha, marcado entre 2 a 4 libras, de forma a evitar acúmulo de pressão no interior do cilindro. O ponto mais importante do processo é controlar a vazão de nitrogênio, de forma a garantir que haja a saída de um fluxo constante de nitrogênio na forma líquida atingindo a interface ferramenta-peça antes da evaporação do nitrogênio para o estado gasoso.

3.5 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho está apresentada no fluxograma da Figura 20. Todos os procedimentos experimentais foram realizados na FURG, nos Laboratórios de Fabricação Mecânica e Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica, e no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-Sul). O projeto do sistema de refrigeração com nitrogênio líquido, bem como a obtenção do mesmo foi feita no Centro Integrado de Análises da FURG.

Figura 20 - Fluxograma das Atividades



Fonte: o autor

As barras foram preparadas para as dimensões definidas e uma amostra foi dimensionada para o ensaio de microdureza.

Durante o procedimento de fresagem as amostras foram submetidas a medições periódicas para a avaliação da rugosidade superficial do material usinado e do desgaste da ferramenta de corte.

Durante o faceamento a seco foi possível observar o primeiro ponto de aumento expressivo de temperatura, que foi o 7º passo. Este acabou sendo definido como o primeiro passo para análise de medições. Os demais pontos de parada dos testes foram definidos no 12º e 18º passo, também em virtude de observações visuais obtidas durante a usinagem a seco e

de medições de rugosidade e análise microscópica realizadas. Durante a usinagem com fluido e com nitrogênio líquido, o aumento expressivo de temperatura ocorreu próximo ao 12º passo.

Para a medição da vida útil da ferramenta foram adotados os procedimentos indicados na NBR ISO 8688, que descreve as seguintes avaliações:

- Medição do desgaste do flanco (VB)

Deve ser executada paralelamente à superfície do desgaste da guia e na direção perpendicular à aresta de corte original, ou seja, a distância da aresta de corte original ao limite do desgaste da guia, a qual intersecta o flanco original.

Para a análise dos dados foi considerado o valor de 350 μm como desgaste de referência, para desgaste de flanco normal e o valor de 1000 μm para o desgaste por entalhe conforme descrito pela ABNT NBR 8688.

Após a conclusão da usinagem a seco, foi iniciada a usinagem com o fluido refrigerante emulsivo. O procedimento de análises repetiu os mesmos pontos, sendo esse fato repetido na usinagem com nitrogênio líquido.

3.6 Equipamentos

3.6.1 Microdureza

O ensaio de microdureza do material de trabalho foi realizado no Laboratório de Metalografia da FURG, no equipamento da marca Shimadzu, modelo HMV-2, em triplicata, com uma carga de 0,3 kgf (2,492N).

O teste foi realizado em uma amostra do corpo de prova do aço inoxidável super duplex em três pontos distintos e equidistante entre si.

3.6.2 Microscopia Ótica

As análises foram realizadas no microscópico óptico (MO) da marca Olympus, modelo GX51, do Laboratório de Metalografia da FURG, aonde foram analisados os desgastes provocados na ferramenta de corte.

3.6.3 Microscopia eletrônica de Varredura

Os insertos de metal duro foram enviados para análise no CEME-Sul da FURG no equipamento Jeol, modelo JSM-6610LV cuja tensão aplicada foi de 15kV.

3.6.4 Análise Superficial

Os testes de rugosidade foram realizados com o instrumento SURFTEST SJ201P da marca Mitutoyo, localizado no Laboratório de Metrologia da FURG. Foram realizadas

três medições consecutivas, sendo a primeira medição após o primeiro passe e as subsequentes junto as medições de desgaste da ferramenta; A face usinada foi dividida em quatro regiões e o resultado da rugosidade foi obtido pela média dessas áreas

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos conforme a metodologia aplicada e que serão discutidos com a base bibliográfica utilizada.

4.1 Composição Química

A composição química do material foi obtida com o fornecedor, a empresa Multialloy Metais e Ligas Especiais Ltda, confirmada durante ensaio e sendo apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição Química do Aço UNS32750

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Cu	Al	N
%	0,017	0,41	0,6	0,026	0,001	25,0	3,74	6,6	0,09	0,02	0,09	0,015	0,29

Fonte: o autor

De acordo com a equação de %PREN, tem-se que:

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + \%W) + 16\%N$$

$$PRE = 42,05$$

Tanto os valores da composição química, bem como o resultado do PRE estão dentro dos parâmetros apresentados por KAHAR (2014) na Tabela 1 deste trabalho, sendo classificados como aço inoxidável super duplex.

Outro fato importante para ser observado é a baixa presença de enxofre nesse tipo de liga. O enxofre possui papel fundamental na

4.2 Microdureza

O ensaio realizado apresentou, após as três medições, um valor médio de 415 ± 9 HV. Esse valor é ligeiramente superior ao apresentado no trabalho de Rajaguru e Arunachalam (2020).

4.3 Tempo de Vida Útil da Ferramenta

O tempo de usinagem medido em cada passe foi de 26 segundos e a vida da ferramenta variou conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Tempo de vida útil da Ferramenta

Tipo de Refrigeração	Números de passes	Tempo total
Usinagem a Seco	18	468 segundos
Fluído Refrigerante	12	312 segundos
Tratamento Criogênico	12	312 segundos

Fonte: o autor

Embora a usinagem com fluído refrigerante tenha como finalidade retirar calor da interface ferramenta-peça, o aço inoxidável possui uma grande dureza e uma baixa usinabilidade. Essa condição foi observada tanto na usinagem com fluído solúvel como com nitrogênio líquido. A redução da vida da ferramenta nesses casos ocorre devido a oxidação na aresta primária do inserto, gerando um cavaco com dureza maior nas bordas, com um encruamento maior, causando um desgaste de entalhe progressivo mais acentuado na fresagem com nitrogênio líquido. Essa ocorrência foi descrita por SANTOS e SALES (2007), mas segundo eles ainda não existe um consenso na literatura que explica exatamente o mecanismo que provoca esse desgaste.

Ainda sobre o tempo de atuação da ferramenta de corte, AMARO (2018) já havia identificado a necessidade de troca de ferramenta no período de 5 minutos com identificação de um progressivo desgaste de flanco em todo o comprimento da aresta de corte. Esse mecanismo foi mais atuante nos processos realizados com fluído de corte solúvel.

4.4 Desgaste da Ferramenta de Corte

De uma forma geral, é comum que haja expectativa de redução do desgaste da ferramenta de corte em processos que utilizem fluídos de corte e nitrogênio líquido. Porém diversos fatores precisam ser analisados em conjunto para que a validação desse conceito esteja correta. As características do material utilizado, os parâmetros de corte determinados e as condições de usinagem são determinantes para que se identifique o fenômeno de desgaste existente no processo.

Assim, para a análise do desgaste da ferramenta foram efetuadas medições em MO com o objetivo de traçar o perfil de desgaste analisado para cada método de refrigeração, de forma que os valores estão apresentados na Tabela 12 e na Figura 21.

Tabela 12 - Valores de Desgaste das Pastilhas de Corte (em μm)

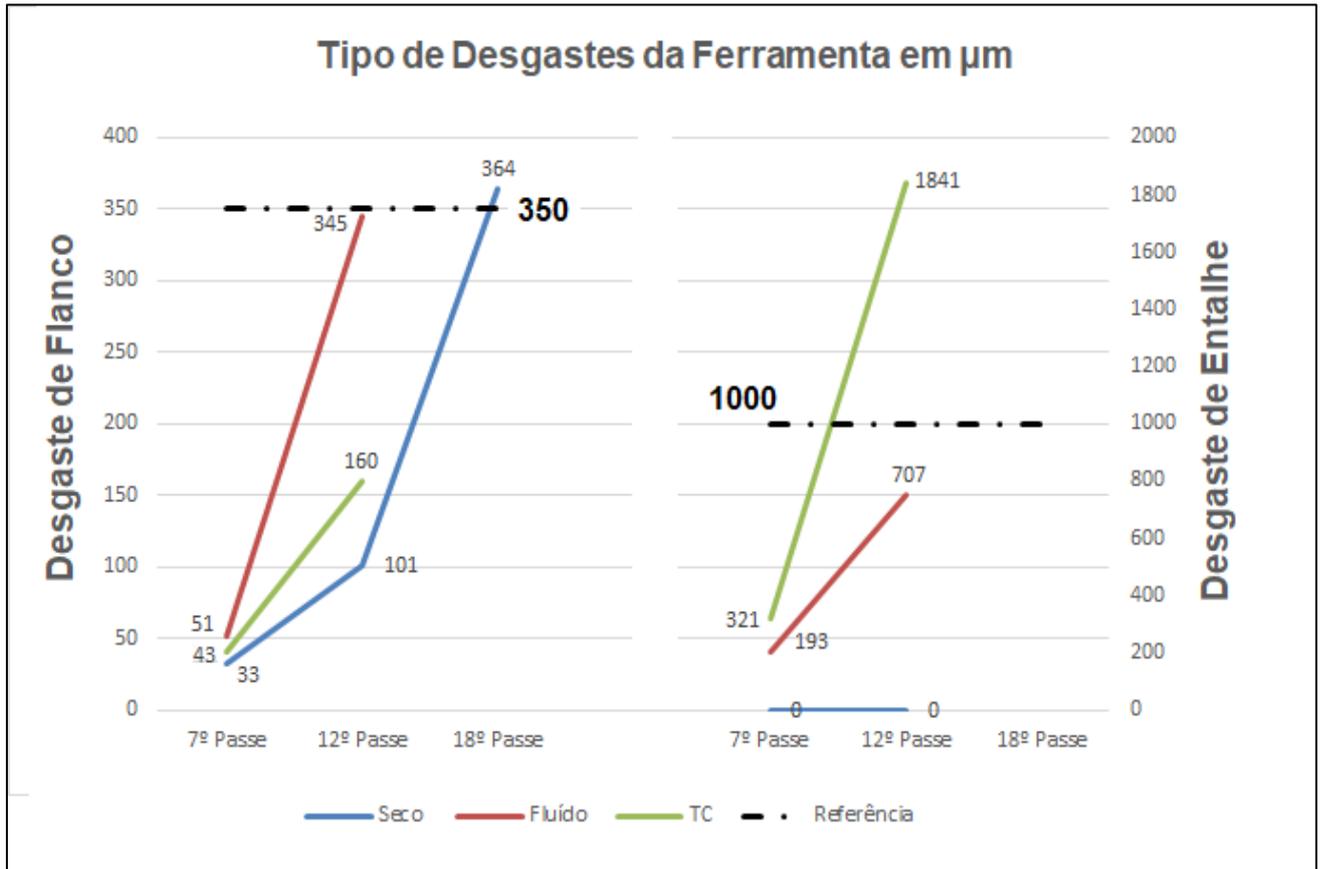
Tipo de Desgaste	Etapa do Corte	A Seco	Com Fluido	TC
Desgaste de Flanco	7° Passe	33	51	43
	12° Passe	101	345	160
	18° Passe	364	-	-
Desgaste de Entalhe	7° Passe	-	193	321
	12° Passe	-	707	1841
	18° Passe	-	-	-

Fonte: o autor

Pela Tabela 12 é fundamental observar alguns que durante os passos da usinagem a seco, os valores de desgaste de entalhe não foram significativos ao ponto de serem medidos. A medição de desgaste de entalhe teve importância para as usinagens úmidas. Porém para o desgaste de flanco foi adotado o valor de 350 μm como valor de referência, sendo essa métrica atingida pelo corte a seco no 18° passo e considerado como fim da vida útil da usinagem com fluido no 12° ponto. Para a usinagem com nitrogênio líquido, o desgaste de flanco foi baixo, praticamente desprezível em comparação com o desgaste de entalhe

Dentre todas as técnicas estudadas, a usinagem a seco foi a que apresentou maior resistência ao desgaste. Segundo KROLCZYK et.al. (2016) apesar dos fluidos de corte serem comumente usados como forma de redução de atrito e da temperatura na interface ferramenta e material usinado, o desgaste das ferramentas ocorrem em condições de alta temperaturas e forças de corte que geram uma fricção interna nas camadas deformadas do material. Com a alta profundidade utilizada, há um aumento nas forças de cortes atuantes e na transferência de calor gerada na zona de corte, efeitos que foram mais acentuados na usinagem com fluidos de corte devido a produção de um cavaco com maior dureza. A razão típica por trás da redução da vida da ferramenta sob condições de corte com lubrificantes é causada pelo controle da geometria dos cavacos que foi menos efetiva na usinagem com resfriamento.

Figura 21 - Desgaste da Ferramenta durante o Faceamento



Fonte: o autor

Conforme observado na figura acima, a vida da ferramenta fresada a seco teve um resultado 33% maior em comparação com o tempo de vida da ferramenta do processo com fluido de corte, devidas as razões anteriormente apresentadas. O processo de usinagem com fluido também apresentou um baixo consumo do lubrificante, podendo ser otimizado em outros processos. Quanto ao processo refrigerado por criogenia a baixa vida da ferramenta também tem relação com o fato de que o sistema de refrigeração usado foi externo a ferramenta e devido ao baixíssimo ponto de ebulição do nitrogênio líquido, a maior parte do fluido atingiu a interface ferramenta-peça de trabalho na forma gasosa, reduzindo a sua efetividade na remoção do calor. A utilização de um sistema em que o refrigerante é conduzido a região de corte por dentro da ferramenta poderia gerar melhores resultados.

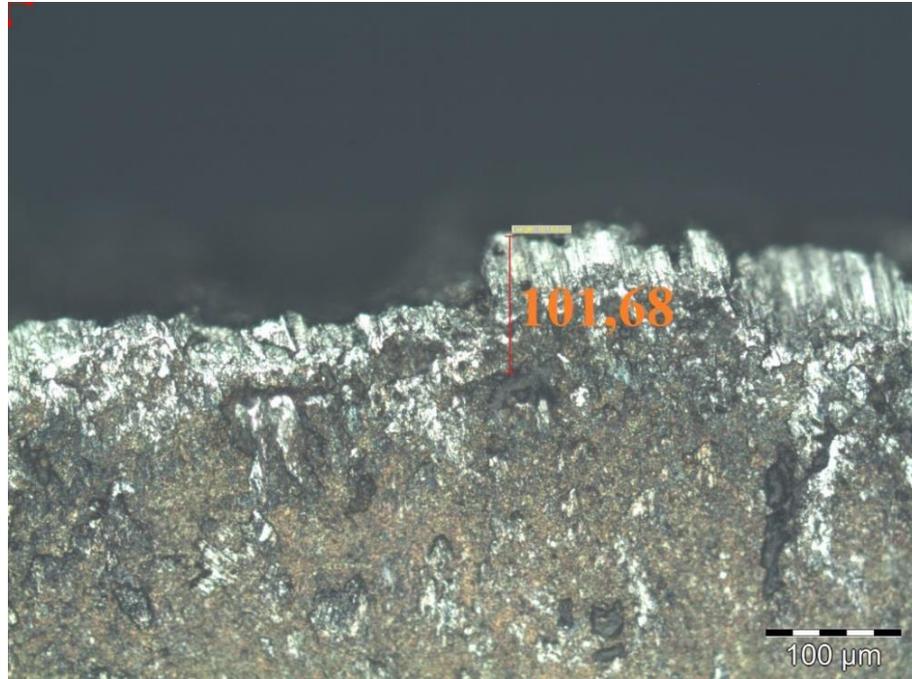
4.5 Análise por MO

Nessa seção serão apresentados e discutidos os tipos e os mecanismos de desgaste observados nos procedimentos executados.

4.5.1 Usinagem a Seco

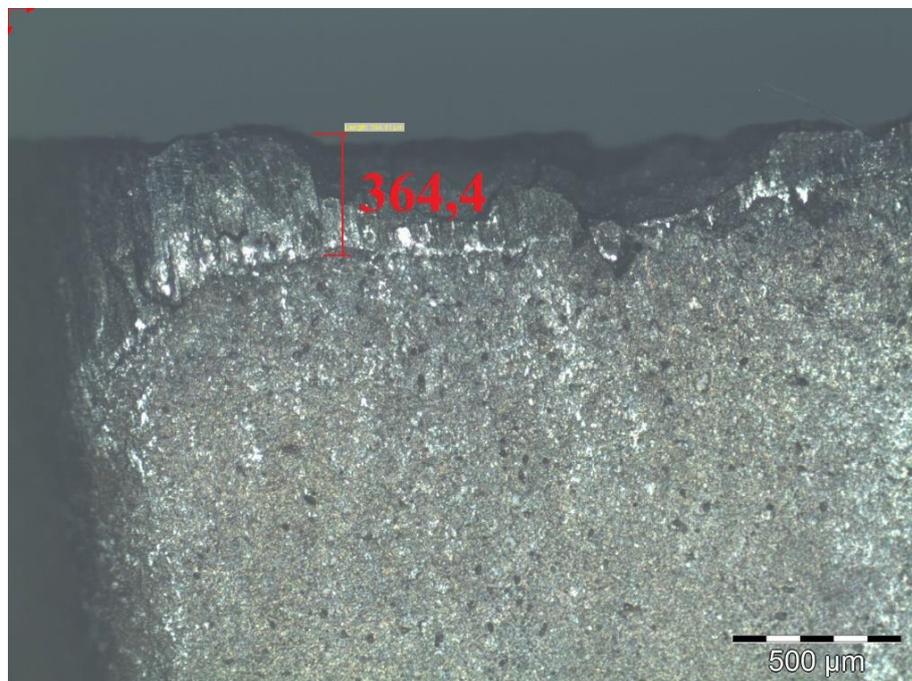
Nos ensaios de fresagem a seco o desgaste de flanco foi predominante, conforme podemos ver nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Desgaste de Flanco após 12 passes com Usinagem a Seco – Aumento 10x



Fonte: o autor

Figura 23 - Desgaste de Flanco após 18 passes com Usinagem a Seco – Aumento 5x

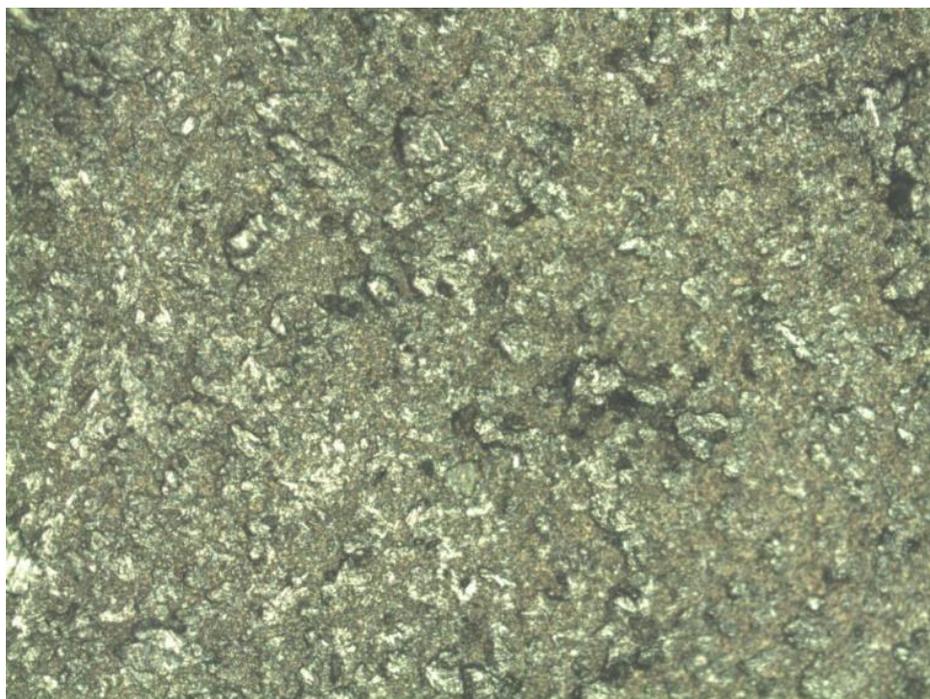


Fonte: o autor

Pelas figuras anteriores é possível perceber que durante a usinagem a seco houve um aumento progressivo do desgaste de flanco de 101 μm para 364 μm após 18 passes. Esse efeito é comum em operações de faceamento a seco, principalmente porque em elevadas temperaturas ocorre a dissolução dos carbonetos de tungstênio, com conseqüente formação de carbeto misto e duplo (o carbono liberado é dissolvido e difunde em direção ao aço). Outro fato abordado por SREEJITH (200) já discutia o fato da ocorrência da difusão do Cobalto (fase auxiliar do metal duro) formar uma camada maciça de cristais mistos. Esse desgaste por difusão ocorre progressivamente devido a transferência de material da ferramenta para o cavaco, enfraquecendo a estrutura do metal duro e facilitando a ação do mecanismo de abrasão mecânica.

Foi observado também uma pequena ocorrência de desgaste de cratera durante a usinagem a seco após 12 passes, provavelmente devido a adesão do material do cavaco (Figura 24).

Figura 24 - Visão geral da cratera (20x) em usinagem a seco



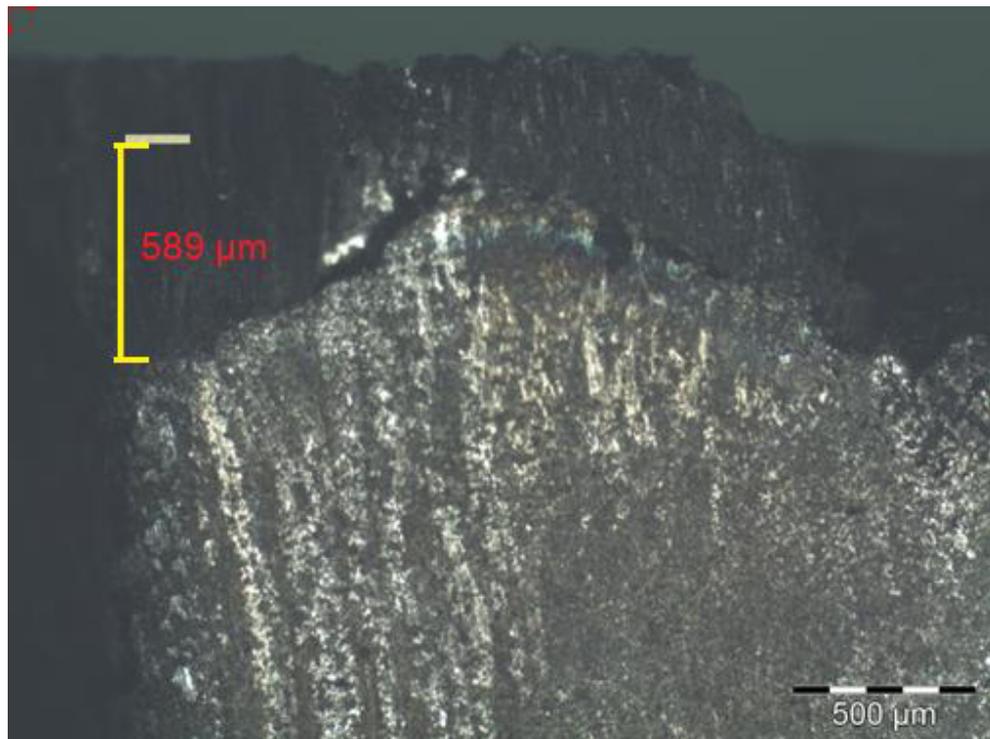
Fonte: o autor

4.5.2 Usinagem com Fluido de Corte

As Figuras de 25 a 27 apresentam as imagens obtidas para os processos de usinagem com fluido de corte.

Foram observados dois mecanismos atuantes, sendo que na Figura 25 notamos um excessivo desgaste de flanco na ponta da ferramenta após 12 passes, relacionado a abrasão mecânica, o que pode ser explicado pelo aumento da força de atrito que ocorre à medida que a ferramenta se desgasta. Nesta imagem também pode-se observar o desgaste de entalhe, gerado pelo martelamento do cavaco na profundidade de corte. Conforme as afirmações já discutidas anteriormente sobre os resultados obtidos por KROLCZYK et.al. (2016), mostraram a influência da velocidade e da profundidade de corte aumentam o efeito do martelamento no processo.

Figura 25 - Desgaste de ponta com Usinagem por fluido

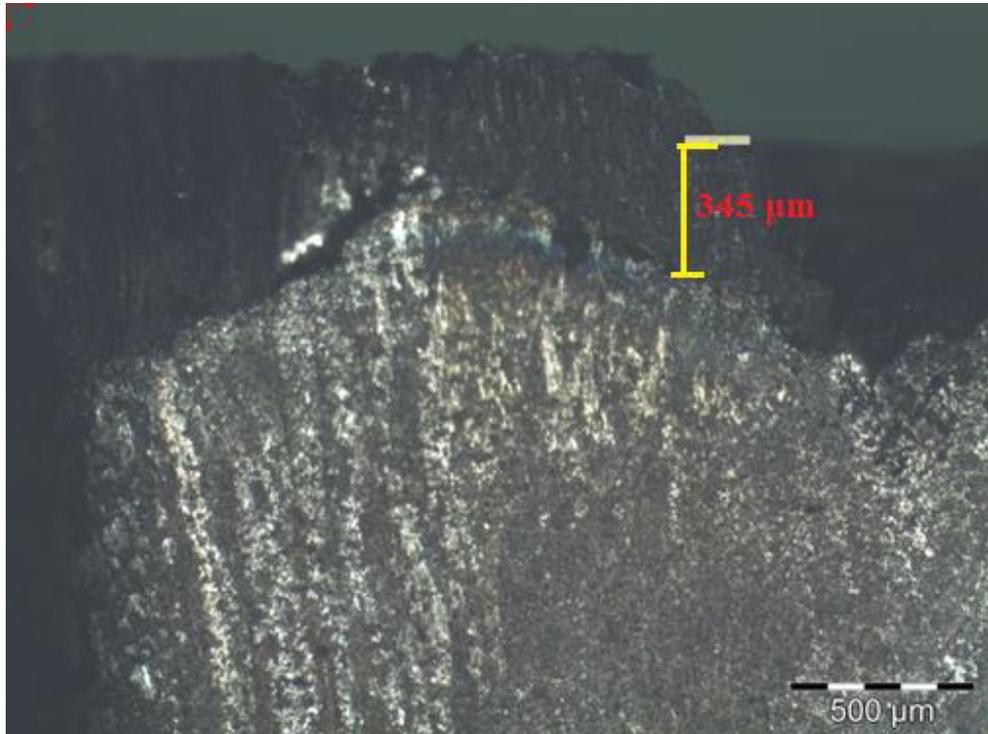


Fonte: o autor

A Figura 26 é possível observar o valor de 345 μm para o desgaste de flanco da usinagem com fluido de corte após o 12º passe. Devido ao fato do valor está bem próximo do limite estabelecido pela NBR 8488, o ensaio foi encerrado. Esse tipo de mecanismo de desgaste também foi observado em outro trabalho de KROLCZYK et.al. (2014), que traz o efeito do quebra-cavacos na face de saída, no qual o fato da pastilha de ferramenta intercambiável utilizada possuir um quebra-cavacos com geometria positiva, impacta na formação do cavaco. E ao obter cavacos mais frios, cria-se um cavaco contínuo e longo com tendência de aderir ao material da ferramenta de corte. É importante atrelar a esse resultado, a

disposição do movimento cortante, uma vez que o mesmo foi da forma discordante, o que influencia ainda mais na formação de um cavaco mais rígido, fato já difundido na literatura.

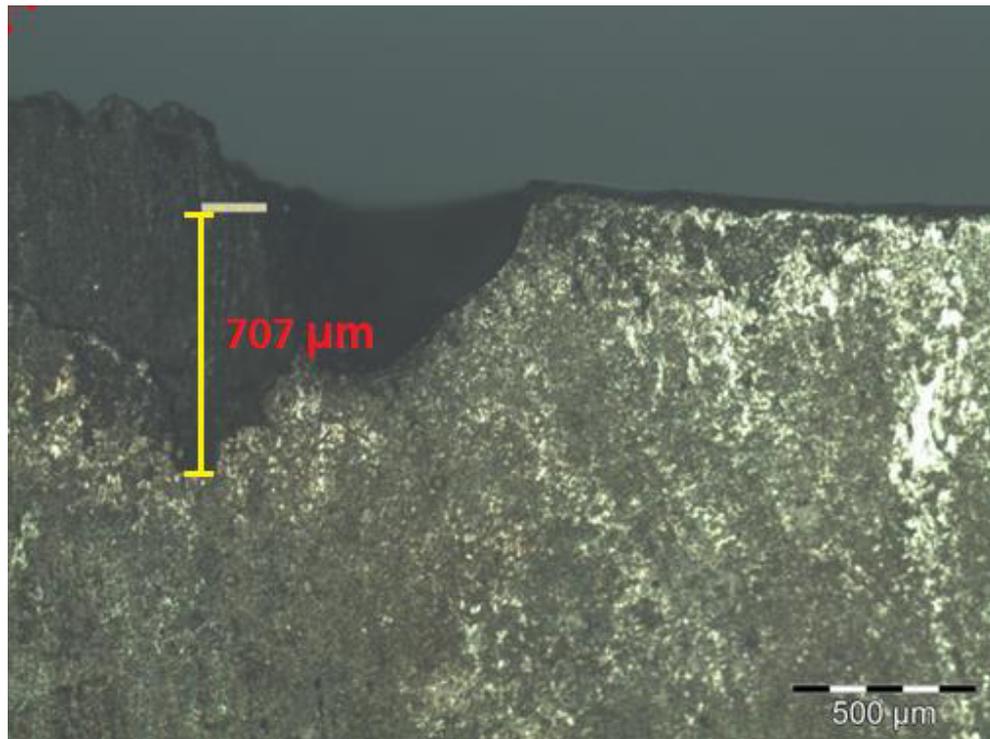
Figura 26 - Desgaste de flanco com uso de fluido após 12 passes



Fonte: o autor

Também é consenso na literatura que a velocidade de corte é um parâmetro que, normalmente, mais influência no desgaste da ferramenta devido à elevação da temperatura. Nesse trabalho, ao principal efeito do desgaste da ferramenta não foi apenas a temperatura, mas o choque mecânico causado pelo cavaco removido da superfície da peça, conforme vemos na Figura 27.

Figura 27 - Desgaste por entalhe com uso de fluido após 12 passes



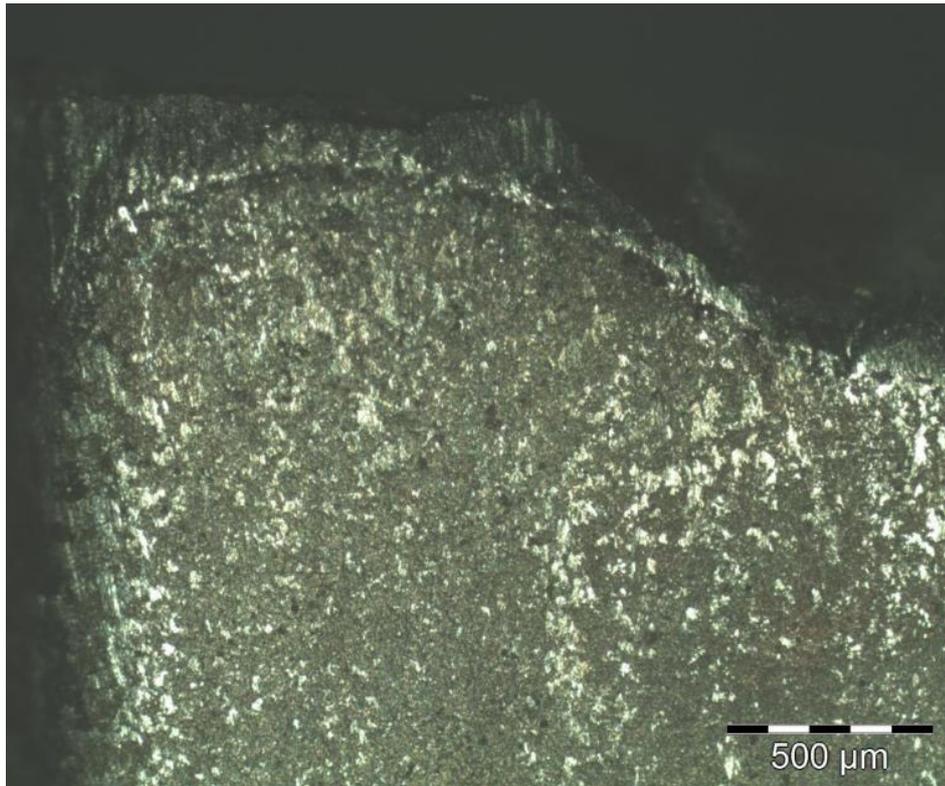
Fonte: o autor

Na usinagem com fluido refrigerante não foi observado desgaste de cratera, devido a ação do fluido refrigerante na superfície de saída da ferramenta, que impediu a adesão de partículas do cavaco.

4.5.3 Usinagem com Nitrogênio Líquido

Na usinagem com refrigerante criogênico a aplicação do nitrogênio líquido na superfície de folga e de saída de corte reduz a taxa de difusão entre o material da peça e o da ferramenta gerando uma redução no desgaste de flanco, como podemos observar na Figura 28. Conforme discutido por DHANANCHEZIAN (2018) é possível observar claramente um baixo desgaste de flanco ao longo da aresta de corte, fato devido a ação do nitrogênio líquido.

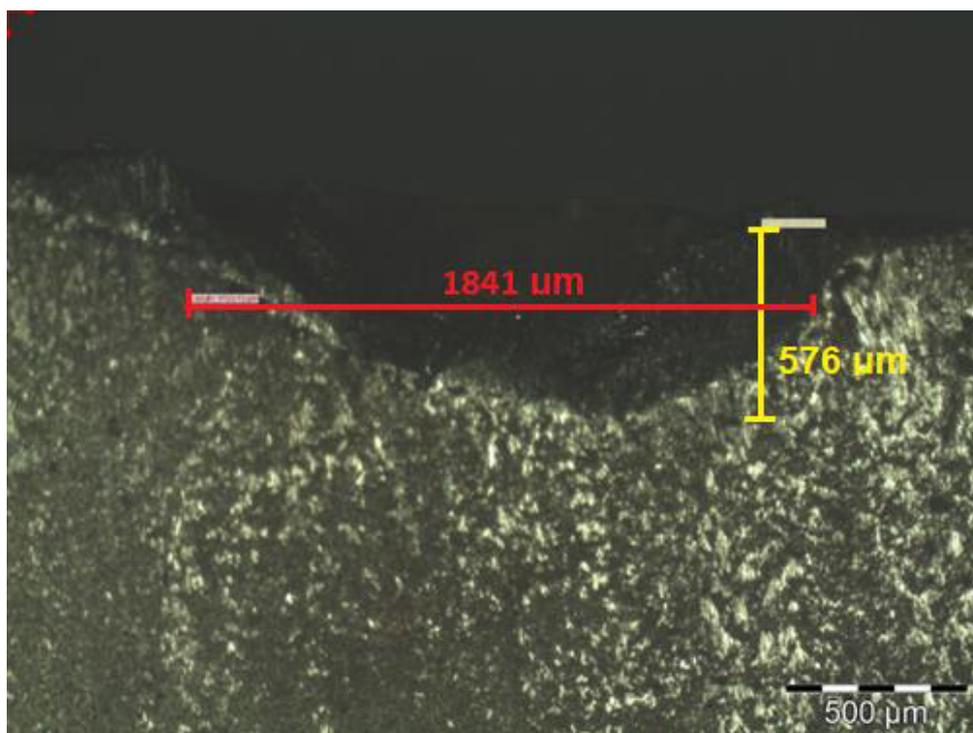
Figura 28 - Ponta de Ferramenta em usinagem TC após 12 passes



Fonte: o autor

Apesar de reduzir o efeito de desgaste de flanco, foi observado que a partir do 7º houve o surgimento de desgaste de entalhe na aresta primária de corte, e que o mesmo teve aumento progressivo chegando a mais 1 mm de largura, o que gerou o enfraquecimento acentuado da ferramenta, forçando o encerramento do ensaio, de acordo com a NBR 8488. O trabalho de Kahar (201) já havia detectado que durante usinagens com fluídos, a ocorrência do mecanismo de oxidação, que provocara uma maior deterioração da aresta lateral de corte, piorando rapidamente o acabamento superficial e, por conseguinte, reduzindo a vida útil da ferramenta. Em metais duros a oxidação inicia em temperaturas entre 700°C e 800°C, sendo mais acentuada em ferramentas de metal duro a base de carbonetos de tungstênio (WC), que é o caso deste estudo.

Figura 29 Desgaste por entalhe em usinagem TC após 12 passe



Fonte: o autor

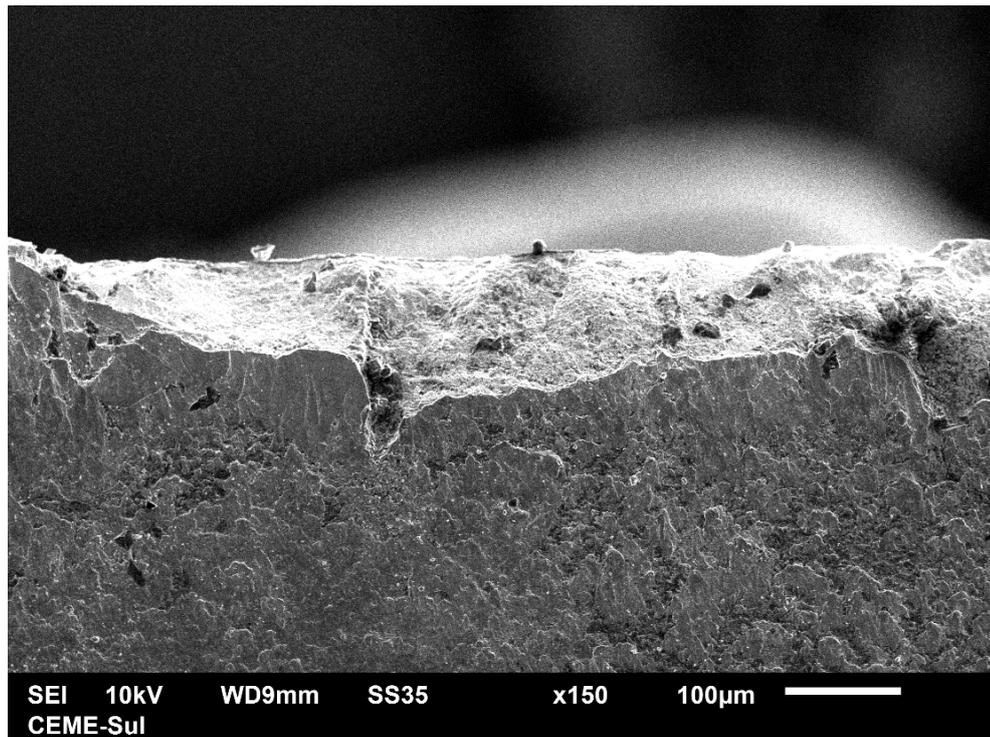
Novamente a formação e crescimento do desgaste por entalhe durante a usinagem foi influenciada pela aresta lateral do cavaco que devido ao seu alto encruamento e dureza leva ao enfraquecimento da aresta lateral de corte, a piora do acabamento superficial e a redução da vida da ferramenta, conforme debatido por VOGEL. Outro fator que se deve considerar reside no fato deste método alterar as propriedades da peça, resultando em possíveis aumentos nos esforços de corte, gerando valores maiores do que a usinagem a seco ou do que outras técnicas de refrigeração.

Deve-se observar também que é consenso na literatura que uma baixa presença de enxofre na liga do material usinado está diretamente atrelado a sua baixa capacidade de eliminação do cavaco, contribuindo para que o cavaco formado seja duro e passe a atuar como abrasivo para as pastilhas de ferramenta intercambiáveis.

4.6 Análises por Microscopia Eletrônica por Varredura

A figura 30 apresenta os resultados das análises por MEV dos insertos fresados a seco após o final de cada ensaio realizado de acordo com o tipo de refrigeração adotado.

Figura 30 - Imagem ampliada do desgaste do inserto de usinagem a seco após 18 passes



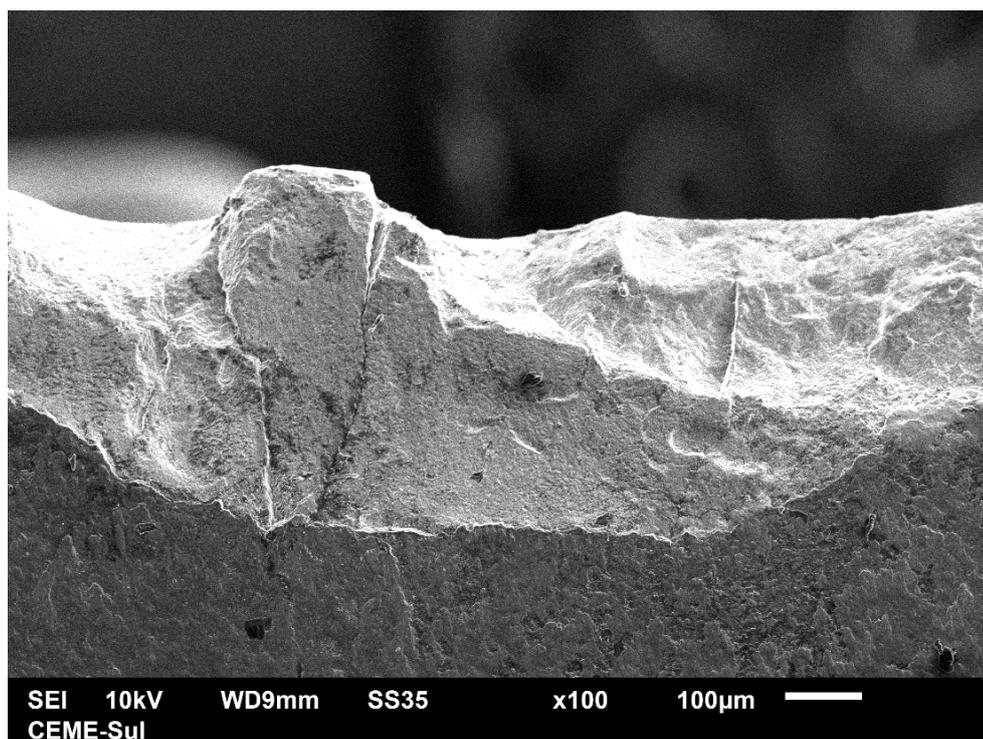
Fonte: o autor

Podemos observar pela Figura 30 um desgaste de largura de flanco acentuado além de alguns sinais de adesão do material da peça de trabalho, o que corrobora os resultados obtidos por microscopia óptica. As observações realizadas nas análises por MEV apresentam o desgaste de flanco como o principal efeito apresentado na usinagem a seco. Durante as análises, não foi possível detectar nenhum outro desgaste significativo na ferramenta de corte.

A Figura 31 apresenta o MEV do inserto ao final da usinagem com fluido solúvel, onde é visível o desgaste de entalhe causado pelo martelamento da rebarba lateral do cavaco na profundidade de corte o que propiciou a extrusão do material aderido, causando aderência ao material da ferramenta, gerando choques mecânicos na mesma, o que provocou o desgaste por entalhe.

Outro fator de importante discussão foi o fato das condições de usinagem serem, propositalmente, mais severas, de forma a gerar um maior efeito na ferramenta de corte. Essa ação gera um aumento tanto da temperatura de corte como também das condições do cavaco, que impactam no resultado final obtido.

Figura 31 - Imagem ampliada do desgaste do inserto de usinagem com fluido após 12 passes

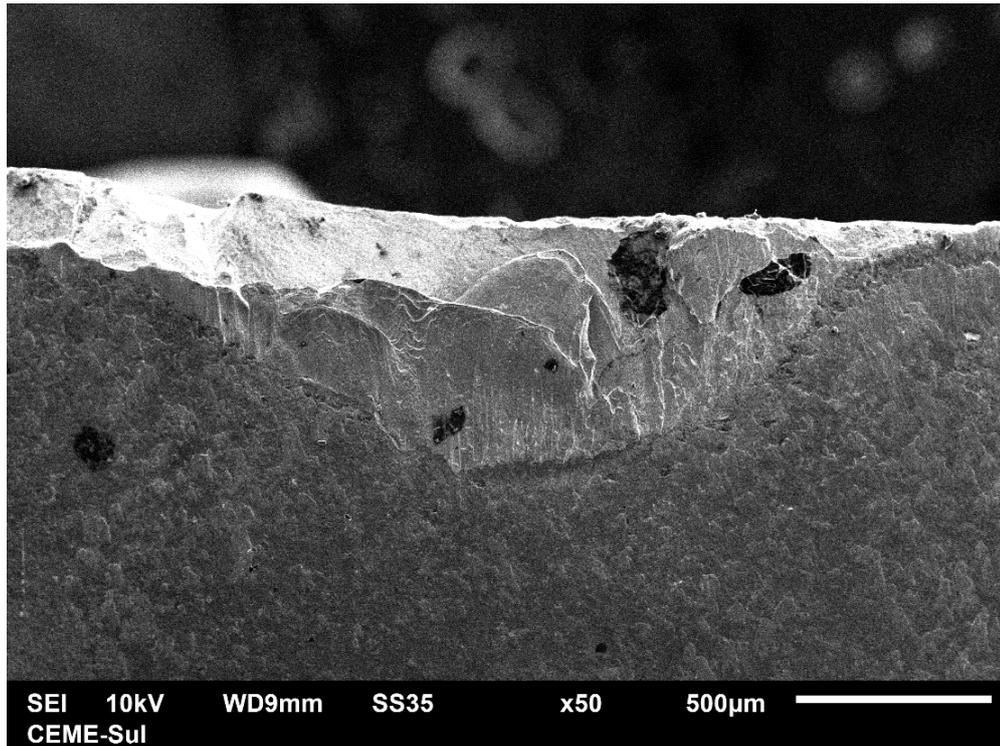


Fonte: o autor

A figura 32 mostra o desgaste de entalhe na ferramenta após a usinagem com nitrogênio líquido, cuja causa é semelhante ao processo com fluido solúvel, com a diferença da aparição de fragmentos da peça de trabalho aderidos a ferramenta. Essa ocorrência, possivelmente, teve origem na mudança de fase do nitrogênio líquido ao entrar e contato com o ar, o que reduziu o poder de retirada de calor da interface ferramenta-peça de trabalho e devido ao elevado gradiente térmico gerado na aresta lateral da ferramenta levou a maior adesão de partículas.

Essa condução do nitrogênio líquido até a ferramenta de corte é de extrema importância para o processo de usinagem. A ocorrências de espasmos na distribuição do nitrogênio líquido impactou no resultado final. O processo de criogenia exige que a inserção de nitrogênio ocorra de maneira contínua e próxima da interface ferramenta-cavaco de forma a reduzir o gradiente de temperatura envolvido no processo e também auxiliar na remoção do cavaco. Essas duas ações são fundamentais para reduzir o efeito de adesão do cavaco na ferramenta de corte.

Figura 32 - Detalhe do Desgaste de Entalhe após usinagem com TC.



Fonte: o autor

4.7 Rugosidade

A Tabela 8 apresenta os valores de rugosidade inicial e final dos três processos executados.

Tabela 13 - Valores de Rugosidade Inicial e Final para cada Processo

	SECO INICIAL	SECO FINAL	FLUÍDO INICIAL	FLUÍDO FINAL	TC INICIAL	TC FINAL
RA	0,68	0,86	0,42	0,75	0,42	1,00
RY	5,92	6,27	3,88	6,94	3,84	6,77
RZ	5,92	5,77	3,22	4,8	3,44	5,89
RQ	0,98	1,09	0,54	0,99	0,55	1,22

Fonte: o autor

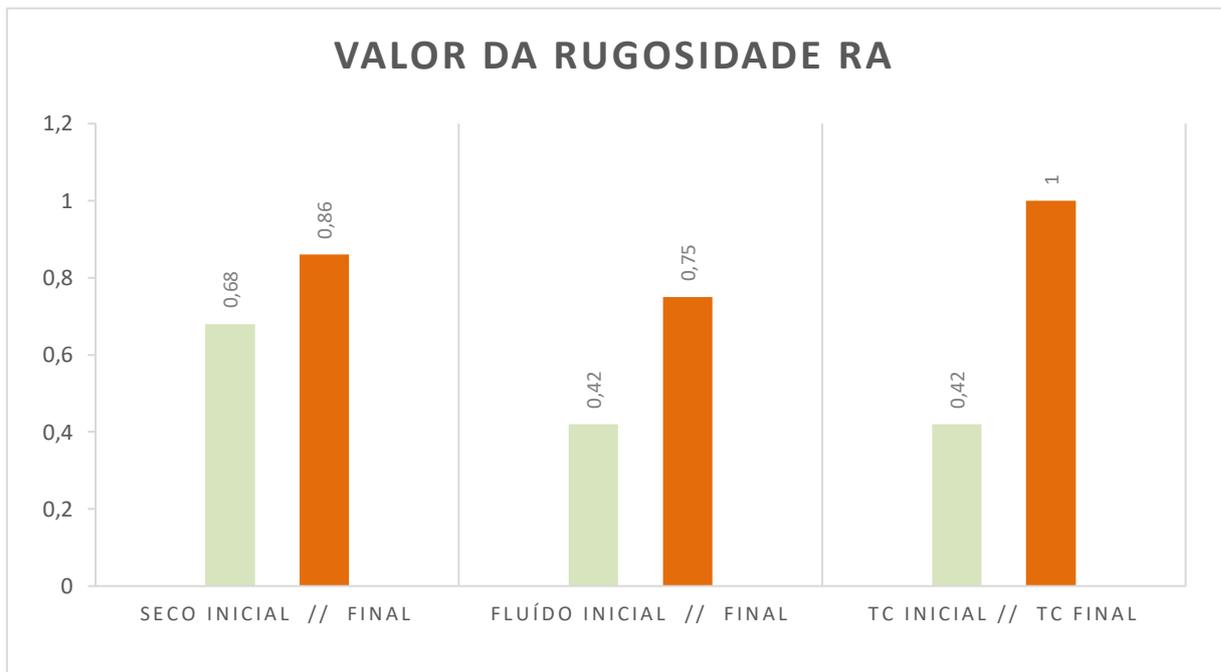
De acordo com os valores obtidos podemos observar que o uso do fluído de corte e da criogenia foram efetivos na redução do atrito, que aliada a influência dos parâmetros de corte, notadamente a profundidade de corte que, em valores mais altos gerou uma menor rugosidade

média inicial do que na usinagem a seco. É importante salientar que parâmetros de cortes mais severos tendem a induzir um valor maior de vibração ao próximo, e esse também acaba por ter impacto negativo no valor final da rugosidade.

Devido ao excessivo desgaste de entalhe, ocorrido na ferramenta refrigerada criogenicamente, os valores de rugosidade média final deste ensaio foram maiores do que os outros dois métodos utilizados. Os menores valores de rugosidade média final foram obtidos nos processos realizados com lubrificante solúvel, fato já havia sido observado por AIRAO (2018).

Deve-se salientar que ao impor condições mais severas de usinagem, tende-se a aumentar os níveis de vibração do processo e este aumento da vibração resulta em um pior acabamento superficial. A Figura 33 mostra o diagrama de barras relativos a rugosidade inicial e final dos experimentos realizados.

Figura 33 - Valor da rugosidade Ra de acordo com a etapa de medição



5. CONCLUSÕES

Com a realização dos experimentos ao longo deste trabalho foi possível concluir que:

- Em relação a vida da ferramenta de corte, a usinagem a seco apresentou o melhor resultado, isto se deve a influência do mecanismo de oxidação das ferramentas na zona de contato durante a usinagem com fluídos refrigerantes;
- O mecanismo de desgaste predominante tanto na usinagem com fluído solúvel como na usinagem com nitrogênio líquido foi o de entalhe, enquanto na usinagem a seco a predominância foi do desgaste de flanco;
- Os melhores resultados de rugosidade média foram alcançados na usinagem com fluído lubrificantes, sendo que, na usinagem com nitrogênio líquido o desgaste excessivo da ferramenta elevou esses valores acima dos obtidos com fluído solúvel;
- A fresagem com nitrogênio líquido demonstrou um bom potencial de utilização nos experimentos realizados, mas o método de condução do fluído até a zona de corte mostrou-se como um ponto decisivo nos resultados;

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os ensaios utilizando diferentes parâmetros de corte;
- Avaliar as forças de cortes durante o decorrer dos processos de usinagem;
- Utilizar outras formas de condução do fluido criogênico até a área de corte;
- Estudar a influência da temperatura na vida da ferramenta e na qualidade superficial

7. REFERÊNCIAS

7.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

AIRAO J, CHAUDHARY B., BAJPAIC V., KHANNAD N., An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. **Materials Today: Proceedings** 5 (2018) 3682–3689

ALMEIDA, P.S. Processos de Usinagem: Utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes. 1ª ed. São Paulo: Erica, 2015

AMANOV A., KIM J., CHO I., The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of highspeed steel under dry conditions. **Tribology International** 81 (2015) 61-72

AMARO P., FERREIRA P., SIMÕES F., Comparative Analysis of Different Cutting Milling Strategies Applied in Duplex Stainless Steel. **Procedia Manufacturing** 47 (2020) 517-524.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 513**: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas. Rio de Janeiro: 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) -Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8404**: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos - procedimentos. Rio de Janeiro: 1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8688**: Ensaio de vida da ferramenta no fresamento – Parte 1: Faceamento. Rio de Janeiro: 2020

ASTAKHOV v., The assessment of cutting tool wear. **Machine Tools & Manufacture** 44 (2004) 637-647.

BERMINGHAM, M. J., PALANISAMY, S., KENT, D., DARGUSH, M.S. “A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti–6Al–4V cutting,” **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 212 (4), pp. 752-765, 2012.

CATALOGO SANDVIK FACEAMENTO disponível em <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/milling-tools.aspx>

CHAIL G., KANGAS P., Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties and applications. **Procedia Structural Integrity** 2 (2016) 1755-1762.

CHINCHANIKAR S., CHOUDHURY K., Investigations on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools,

International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 38 (2013) 124–133. doi:10.1016/j.ijrmhm.2013.01.013.

CHOPRA S., SARGADE V., Metallurgy behind the Cryogenic Treatment of Cutting Tools: An Overview. **Materials Today: Proceeding.** 2, 1814–1824 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.119>.

CORREA J., SCHOETER R., MACHADO Á., Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels. **Tribology International**, 105, 102–117. doi:10.1016/j.triboint.2016.09.035

DHANANCHEZIAN M., PRIYAN M., RAJASHEKAR G., NARAYANAN S. Study The Effect Of Cryogenic Cooling On Machinability Characteristics During Turning Duplex Stainless Steel 2205. **Materials Today: Proceedings** 5 (2018) 12062–12070.

DENG J., BRAUNS M., Multilayer PVD coatings for wear protection. **Diamond and Related Materials** 4 (1995) 936-943.

DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8ª ed. São Paulo: ArtLiber, 2013.

DRLICKA, R., KROCKO, V., MATÚS, M., 2014. Machinability improvement using high-pressure cooling in turning 60, 70–76.

FITZPATRICK M., Introdução aos Processos de Usinagem. 1ª ed. McGraw-Hill, 2013.

GAMARRA J. B., Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750). Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo, 2017

GEHRICKE B., SCHRUFF I., Trends in Plastic Mould Steel Applications. In: F. Jeglitsch, R. Ebner, H., Leitner (Eds.) **Proceeding of the Fith International Conference on Tooling**, Austria, 1999, p. 775

GINTING A., SKEIN R., CUACA D, HERDIANTO. The Characteristics of CVD- and PVD-Coated Carbide Tools in Hard Turning of AISI 4340. **Measurement** (2018) doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.072>

HILSCH R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process. **Review of Scientific Instruments** 1947;18(2):108–13.

IMOA International Molybdenum Association. Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis duplex. Londres, p. 64, 2009

JOST P. Tribology – friction and wear of engineering materials. **Wear** 136 (1990) 1-17.

KAHAR, S., 2017, Duplex Stainless Steels – An overview. **International Journal of Engineering Research and Application**; 2017, pp.27-36

KASNAS, P., CHAI, G., 2016, Duplex stainless steels for oil&gas applications, in Proc. 17th APCCC.

KRESSE T., MEINHARD D., BERNTHALER T., SCHNEIDER G., Hardness of WC-Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, 75, 287-293, set, 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

KROLCZYK G.M., NIESLONY O., MARUDA R.W., WOJCIECHOWSKI. Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production **Journal of Cleaner Production** (2016) 1-12

KURSUNCU B., Influence of cryogenic heat-treatment soaking period and temperature on performance of sintered carbide cutting tools in milling of Inconel 718; **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Vol. 92, November 2020.

LIRA F., Metrologia dimensional: técnicas de medição e instrumento para controle e fabricação industrial – 1ª edição – São Paulo – Érica, 2015.

MACHADO, A.R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M., DA SILVA, M.B. Teoria da Usinagem dos Materiais, Edgard Blucher, São Paulo, 2011

MARTINS. M., CASTELETTI, L. C. “Caracterização microestrutural-mecânica e resistência a corrosão do aço inoxidável super duplex ASTM 890/890 M Grau 6a”- Tese de Doutorado, Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2006.

MOUGO A., CAMPOS F., ARAUJO A., Mechanistic study on micromilling of the super duplex stainless steel UNS S32750. **Journal of Manufacturing Processes** 34 (2018) 31-39 doi:10.1016/j.jmapro.2018.05.017

NANDAM, S. R., RAVIKIRAN U., and ANAND RAO A., “Machining of tungsten heavy alloy under cryogenic environment,” 3rd International Conference on Materials **Processing and Characterization** (ICMPC 2014), pp. 296-303, 2014.

NILSSON, J-O., CHAI, G., 2011, The physical metallurgy of duplex stainless steels, in Proc. Duplex stainless steels 2010, 369-390.

PAIVA J. Frictional and wear performance of hard coatings during machining of super duplex stainless steel. **International Journal Advanced Manufacturing Technology** 92 (1-4) (2017) 423-432.

PERVAIZ S., KANNAN S., KISHAWY H., An Extensive Review of The Water Consumption and Cutting Fluid Based Sustainability Concerns in The Metal Cutting Sector, **Journal of Cleaner Production** (2018).

RAJAGURU J. ARUNACHALAM N., A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. 276 (2020)

RUPPI S. Deposition, microstructure and properties of texture-controlled CVD α -Al₂O₃ coatings, **International Journal Refractory Metals and Hard Materials**. 23 (4–6) (2005) 306–316

SANTOS A. G., Microfresamento de Aço Inoxidável Duplex UNS S32205 com Ferramentas de Metal Duro Revestidas com Nitreto de Titânio. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Minas Gerais, 2016.

SCHALK N. TKADLETZ M., MITTERER C., Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. **Surface & Coatings Technology** 429 (2022)

SENATORE M., FINZETTO L., PEREA E., Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Revista Escola de Minas** 60 (2007) 175-181. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000100027>

SINATORA A., Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte. Universidade de São Paulo (2005).

SINGH G., SARKAR P., Dry Machining: A Step towards Sustainable Machining - Challenges and Future Directions, **Journal of Cleaner Production** (2017),

SREEJITH P.S., NGOI N., Dry machining: Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology** 101 (2000) 287-291

TEPPERNEGG T., KLUNSNERA T., ANGERERA P., TRITREMMELA C. Evolution of residual stress and damage in coated hard metal milling inserts over the complete tool life; **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials** 47 (2014) 80-85

TRENT, E.M., WRIGHT, P.K. Metal Cutting, 4^a ed. Woburn: Butterworth-Heinemann. 446 p.2000

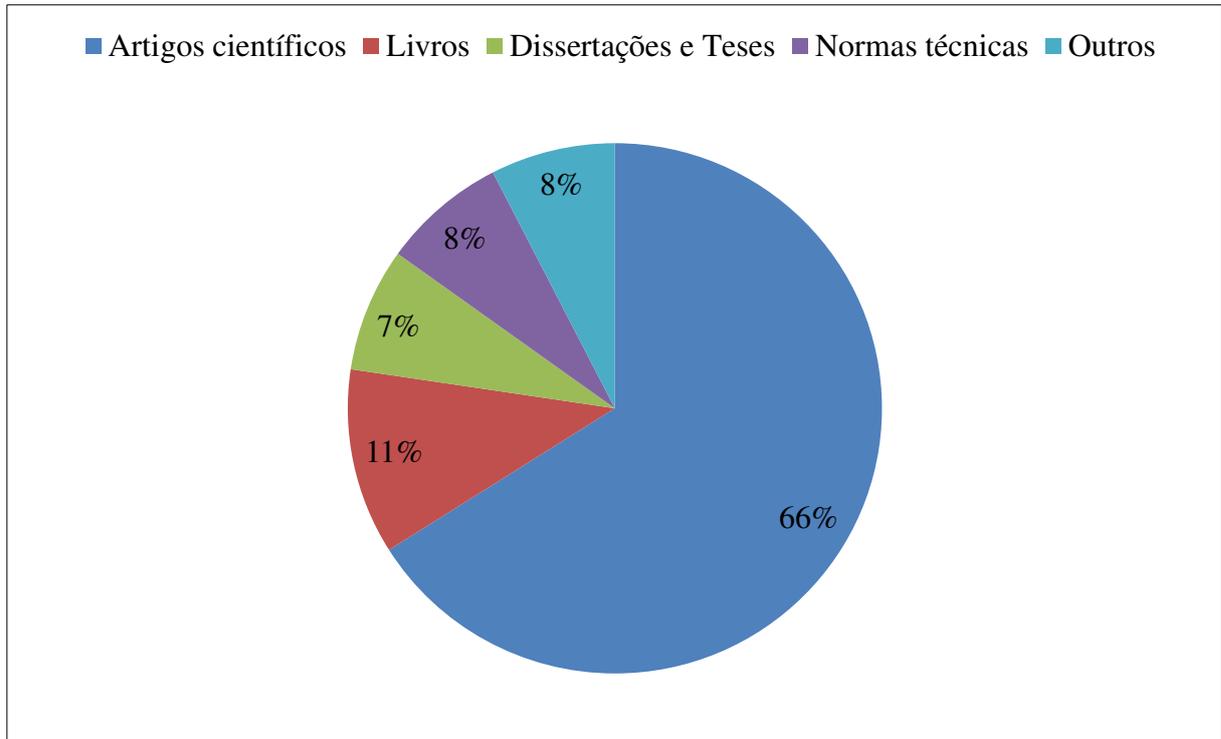
VILLA M PANTLEON K. Evolution of compressive strains in retained austenite during sub-zero Celsius martensite formation and tempering. **Acta Material** 65, 383–392.

VOGEL J.P., NERY W.A., ARAUJO A.C. Estudo do Efeito do Avanço nas Forças e no Acabamento de um Torneamento de Aço Superduplex. 7^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Rio de Janeiro, 2013

YILDIZ Y., NALBANT M., A Review of Cryogenic Cooling in Machining Processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 48 (2008) 947–964

ZANG Y., ZHU K., DUAN X. Tool wear estimation and life prognostics in milling: Model extension and generalization. **Mechanical Systems and Signal Processing** 155 (2021) 107617

7.2 REFERÊNCIAS POR EXTRATO



7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS

