

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÁDER MARJAM BORGES VIANNA

**USO DO TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DE CRIOGÊNIA PARA AUMENTO DA
RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE METAL DURO**
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO GRANDE, RS

2024

JÁDER MARJAM BORGES VIANNA

**USO DO TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DE CRIOGÊNIA PARA AUMENTO DA
RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE METAL DURO**

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles

RIO GRANDE, RS

2024

Ficha Catalográfica

V617u Vianna, Jäder Marjam Borges.
Uso do tratamento sustentável de criogênia para aumento da
resistência ao desgaste em ferramentas de metal duro / Jäder Marjam
Borges Vianna. – 2024.
70 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio
Grande/RS, 2024.
Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

1. Tratamento criogênico 2. Resistência ao desgaste
3. Ferramentas de metal duro 4. Torneamento 5. Usinagem
sustentável 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
PPGEMec



Ata nº **18/2024** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos onze dias do mês de outubro de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **JÁDER MARJAM BORGES VIANNA**, nacionalidade brasileiro, dissertação ligada a linha de pesquisa simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **USO DO TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DE CRIOGENIA PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE METAL DURO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Luciano Volcanoglo Biehl e o convidado Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha sob a presidência do Professor Fábio Augusto Dornelles do Amaral. 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:

Documento assinado digitalmente
gov.br **FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL**
Data: 11/10/2024 16:50:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1. _____
CPF: 905.700.220-53

Documento assinado digitalmente
gov.br **LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL**
Data: 11/10/2024 17:39:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. _____
CPF: 575.195.100-00

3. 
CPF: 985.887.370-00

Documento assinado digitalmente
gov.br **JADER MARJAM BORGES VIANNA**
Data: 11/10/2024 17:35:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jáder Marjam Borges Vianna: _____

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu pai, Marco
Aurélio, minha mãe Janice Vianna, meu amor
Etiene Dias, familiares, padrinhos e a todos
meus ancestrais, que lutaram e sofreram para
fazer este trabalho ser realidade.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao meu pai, que está presente espiritualmente em todos os momentos deste trabalho, assim como familiares e amigos, os quais forneceram carinho e alicerce contra os obstáculos no caminho. Da mesma maneira, agradeço ao Prof. Dr. Fábio Amaral, o qual tenho grande apreço e gratidão pelos ensinamentos e orientação neste trabalho.

Agradeço a FURG por disponibilizar toda a sua estrutura e corpo técnico para realização deste estudo, em especial ao CEME-SUL (Centro de Microscopia Eletrônica do Sul) e ao CIA (Centro Integrado de Análises)

RESUMO

Hoje em dia, um dos maiores desafios nas operações de usinagem reside em realizar melhorias na resistência ao desgaste e na dureza em ferramentas de corte, principalmente as confeccionadas com carbonetos metálicos. Esse tema pode ser solucionado por diversas formas, desde a utilização de fluidos de corte, mudanças na geometria da ferramenta ou através de tratamentos criogênicos, que melhorem essas propriedades. Com a crescente importância da inserção do tema da sustentabilidade ambiental no setor industrial, a possibilidade da redução ou eliminação do uso de fluidos lubri-refrigerantes, durante processos de usinagem, é um tema cada vez em foco. Os tratamentos criogênicos envolvem a refrigeração dos materiais em temperaturas abaixo do 0 °C, mantendo-os por certo período de imersão e depois recuperando a sua temperatura ambiente. Com esse procedimento busca-se melhorar as propriedades mecânicas do inserto, prologando a sua vida e possibilitando, em alguns casos, a execução da usinagem à seco. Este estudo investiga o uso de tratamento criogênico para aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas de metal duro empregadas no torneamento do aço SAE 8640. O tratamento foi realizado utilizando nitrogênio líquido em diferentes tempos de imersão (8,16, 24,32 e 40 horas) e posteriormente foi analisada a influência do tratamento na mudança microestrutural das ferramentas tratadas, avaliada a variação da dureza e realizados ensaios de torneamento com objetivo de comparar o desgaste dos insertos utilizados no experimento. Os resultados demonstraram que o tratamento criogênico promoveu uma significativa redistribuição microestrutural, resultando em um aumento da dureza e uma redução do desgaste de flanco em comparação com as ferramentas não tratadas. A análise revelou que o tratamento prolongado favoreceu a estabilidade dos carbonetos de tungstênio, resultando em um desempenho superior das ferramentas durante o torneamento, sendo o tempo de 32 horas de imersão no nitrogênio líquido o parâmetro que apresentou a maior dureza e melhor resistência ao desgaste, comprovando o potencial desse processo como uma abordagem sustentável para melhorar a durabilidade das ferramentas de corte, contribuindo para a eficiência dos processos de usinagem e redução de custos operacionais.

Palavras-chave: Tratamento criogênico; resistência ao desgaste; ferramentas de metal duro; torneamento; usinagem sustentável.

ABSTRACT

Nowadays, one of the biggest challenges in machining operations is improving wear resistance and hardening cutting tools, especially those made with metal carbides. This issue can be solved in several ways, from the use of cutting fluids, changes in the geometry of the tool or through cryogenic treatments, which improve these properties. With the growing importance of the insertion of the theme of environmental sustainability in the industrial sector, the possibility of reducing or eliminating the use of lubricating-cooling fluids during machining processes is an increasingly important topic. Cryogenic treatments involve cooling materials at temperatures below 0 °C, keeping them for a certain period of customization and then recovering their room temperature. This procedure seeks to improve the mechanical properties of the insert, shortening its life and enabling, in some cases, dry machining. This study investigates the use of cryogenic treatment to increase the wear resistance of carbide tools used in turning SAE 8640 steel. The treatment was performed using liquid nitrogen at different immersion times (8, 16, 24, 32 and 40 hours) and subsequently the influence of the treatment on the microstructural change of the treated tools was verified, the hardness variation was evaluated and turning tests were performed to compare the wear of the inserts used in the experiment. The results demonstrated that the cryogenic treatment promoted a significant microstructural redistribution, resulting in an increase in hardness and a reduction in flank wear compared to untreated tools. An analysis revealed that prolonged treatment favored the stability of tungsten carbides, resulting in superior tool performance during turning, with the 32-hour application time in liquid nitrogen being the parameter that presented greater hardness and better wear resistance, proving the potential of this process as a sustainable approach to improving the durability of cutting tools, contributing to the efficiency of machining processes and reducing operating costs.

Keywords: Cryogenic treatment; wear resistance; carbide tools; turning; sustainable machining.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Características da usinagem sustentável.
- Figura 2: Arranjo da usinagem sustentável.
- Figura 3: Gráfico de temperatura versus tempo para o processo de tratamento criogênico.
- Figura 4: Aparelho experimental para fluido criogênico.
- Figura 5: Diagrama de fases WC-Co
- Figura 6: Desgaste de flanco em ferramentas de corte de metal duro.
- Figura 7: Efeito da velocidade de corte na temperatura da ponta da ferramenta.
- Figura 8: Comportamento do aço SAE 8640 em variadas temperaturas.
- Figura 9: Torneamento Cilíndrico Externo.
- Figura 10: Exemplo do material usinado.
- Figura 11: Inserto de torneamento negativo de dupla face.
- Figura 12: Fluxograma do processo.
- Figura 13: Microscopia óptica da amostra STC.
- Figura 14: MEV da amostra STC.
- Figura 15: Microscopia óptica da amostra com 8 horas de TC.
- Figura 16: MEV da amostra com 8 horas de TC.
- Figura 17: Microscopia óptica da amostra com 16 horas de TC.
- Figura 18: MEV da amostra com 16 horas de TC.
- Figura 19: Microscopia óptica da amostra com 24 horas de TC.
- Figura 20: MEV da amostra com 24 horas de TC.
- Figura 21: Microscopia óptica da amostra com 32 horas de TC.
- Figura 22: MEV da amostra com 32 horas de TC.
- Figura 23: Microscopia óptica da amostra com 40 horas de TC.
- Figura 24: MEV da amostra com 40 horas de TC.
- Figura 25: Evolução da área com o tratamento criogênico.
- Figura 26: EDS da amostra STC.
- Figura 27: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra STC.
- Figura 28: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra STC.
- Figura 29: EDS da amostra com 8 horas de TC.
- Figura 30: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 8 horas de TC.
- Figura 31: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 8 horas de TC.

Figura 32: Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 8 horas de TC.

Figura 33: EDS da amostra com 16 horas de TC.

Figura 34: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 16 horas de TC.

Figura 35: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 16 horas de TC.

Figura 36: Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 16 horas de TC.

Figura 37: EDS da amostra com 24 horas de TC.

Figura 38: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 24 horas de TC.

Figura 39: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 24 horas de TC.

Figura 40: Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 24 horas de TC.

Figura 41: EDS da amostra com 32 horas de TC.

Figura 42: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 32 horas de TC.

Figura 43: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 32 horas de TC.

Figura 44: Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 32 horas de TC.

Figura 45: EDS da amostra com 40 horas de TC.

Figura 46: Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 40 horas de TC.

Figura 47: Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 40 horas de TC.

Figura 48: Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 40 horas de TC.

Figura 49: Médida de dureza, HV, das amostras, conforme tempo de imersão.

Figura 50: VBBmáx da ferramenta sem tratamento criogênico após 20 passes.

Figura 51: VBBmáx da ferramenta com 8 horas de tratamento criogênico após 20 passes.

Figura 52: VBBmáx da ferramenta com 16 horas de tratamento criogênico após 20 passes.

Figura 53: VBBmáx da ferramenta com 24 horas tratamento criogênico após 20 passes.

Figura 54: VBBmáx da ferramenta com 32 horas tratamento criogênico após 20 passes.

Figura 55: VBBmáx da ferramenta com 40 horas tratamento criogênico após 20 passes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço SAE 8640.

Tabela 2: Composição das diferentes fases da amostra STC por peso.

Tabela 3: Composição das diferentes fases da amostra com 8 horas de TC por peso.

Tabela 4: Composição das diferentes fases da amostra com 16 horas de TC por peso.

Tabela 5: Composição das diferentes fases da amostra com 24 horas de TC por peso.

Tabela 6: Composição das diferentes fases da amostra com 32 horas de TC por peso.

Tabela 7: Composição das diferentes fases da amostra com 40 horas de TC por peso.

Tabela 8: Valores de dureza Vickers dos insertos com diferentes tempos de TC.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI - American Iron and Steel Institute
ARBL - Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM - American Society for Testing and Materials
CEME-SUL - Centro de Microscopia Eletrônica do Sul
CIA - Centro Integrado de Análises
CNC - Controle Numérico Computadorizado
CVD - Chemical Vapor Deposition (Deposição Química de Vapor)
DCT - Deep Cryogenic Treatment (Tratamento Criogênico Profundo)
EDS - Espectroscopia de Dispersão de Energia
FURG - Universidade Federal do Rio Grande
HRC - Escala de Dureza Rockwell C
HV - Dureza Vickers
ISO - International Organization for Standardization
LN2 - Nitrogênio Líquido
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
m/min - Metros por minuto
mm/volta - Milímetros por volta
MO - Microscopia Óptica
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PVD - Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)
SAE - Society of Automotive Engineers
STC - Sem Tratamento Criogênico
TC - Tratamento Criogênico

LISTA DE SÍMBOLOS

α (alfa) - Fase alfa
 β (beta) - Fase beta
 η (eta) - Fase eta
 μm - Micrômetro
 $^{\circ}\text{C}$ - Graus Celsius
 Al_2O_3 - Óxido de Alumínio
C - Carbono
Co - Cobalto
CrN - Nitreto de Cromo
HRC - Dureza Rockwell C
HV - Dureza Vickers
K - Kelvin
LN2 - Nitrogênio Líquido
MPa - Megapascal
N2 - Nitrogênio Gasoso
Ti - Titânio
TiAlN - Nitreto de Titânio e Alumínio
TiCN - Carbonitreto de Titânio
TiN - Nitreto de Titânio
VBBmáx - Largura máxima do desgaste de flanco
W - Tungstênio
WC - Carboneto de Tungstênio
WTiC - Carboneto de Tungstênio e Titânio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS GERAIS	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 USINAGEM SUSTENTÁVEL	17
2.2 TRATAMENTO CRIOGÊNICO NA USINAGEM	23
2.3 DESGASTE DE FERRAMENTA DE METAL DURO	28
2.4 AÇO AISI/SAE 8640	33
2.5 PROCESSO DE TORNEAMENTO	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 MATERIAIS	41
3.1.1 Aço SAE 8640	41
3.1.2 Ferramenta	41
3.1.3 Equipamentos	42
3.2 METODOLOGIA	42
3.2.1 Tratamento Criogênico	43
3.2.2 Ensaio de Usinagem	44
3.2.3 Avaliação do Desgaste da Ferramenta	44
3.2.4 Análise Microestrutural	45
3.2.5 Ensaio de Dureza	45
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
4.1 Análise Microestrutural por microscopia óptica e MEV	46
4.2 Análise das Fases Por EDS	55
4.3 Medição da dureza Vickers (Macro)	68
4.4 Avaliação do desgaste de flanco da ferramenta	69
5. CONCLUSÕES	74
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
7. REFERÊNCIAS	76
a. REFERÊNCIAS NOMINAIS	76
b. REFERÊNCIAS POR ESTRATO	82
c. REFERÊNCIAS POR QUALIS	82
d. REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS	83

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de usinagem fazem parte de nosso dia a dia, estando presentes na grande maioria de peças produzidas mundialmente, tanto em materiais metálicos quanto em outros tipos. Junto com a evolução de maquinário, processos e tecnologias, a vida das ferramentas são um fator de grande importância dentro dessa importante cadeia de fabricação e dependem principalmente dos diferentes mecanismos de desgaste que os materiais que as compõem possuem (DOLINŠEK; ŠUŠTARŠIČ; KOPAČ, 2001).

Nas últimas décadas está cada vez mais em destaque a importância dos cuidados com o meio ambiente, visando sua preservação e também atendendo as legislações ambientais, preservar a saúde dos operados e reduzir os custos de produção, mantendo os parâmetros de qualidade, produtividade e da relação entre custo de produção e lucratividade. A produção sustentável é uma atividade que não representa uma ameaça para as gerações futuras (SREEJITH; NGOI, 2000). A implementação de produção limpa não tem que significar aumento de investimentos financeiros, sendo que os principais métodos de redução do impacto ambiental no processo de fabricação envolvem redução da poluição gerada pelo uso de lubrificantes, campo onde as técnicas de aumento da resistência ao desgaste de ferramentas são de vital importância (KROLCZYK et al., 2017). Alternativas como uso de lubrificantes vegetais, processos usando mínima quantidade de lubrificantes (MQL), refrigeração criogênica e utilização de camadas de coberturas em insertos de usinagem são técnicas que tem sido amplamente analisadas hoje em dia.

Dentre essas técnicas, o uso de tratamentos criogênicos (TC) para melhorar as características de resistência ao desgaste de vários materiais para ferramentas tem sido estudado por vários pesquisadores, entre eles podemos destacar trabalhos como os de Dhande et al. (2018) e Patil (2012). O processo de tratamento criogênico envolve o resfriamento gradual do material abaixo da temperatura de zero graus Celsius, mantendo-o por um determinado período denominado tempo de imersão e depois aquecendo-o progressivamente de volta à temperatura ambiente.

Esta pesquisa investiga o tratamento térmico sustentável de criogênia como uma alternativa sustentável para aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas de metal duro, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9

e 12 ao promover inovação em processos industriais e consumo responsável de recursos. Haja visto que foi realizado o tratamento criogênico, com nitrogênio líquido, em ferramentas de metal duro, utilizadas em processos de torneamento do aço SAE 8640, em diversos tempos de imersão buscando aumentar a resistência ao desgaste e, por conseguinte, a vida desses insertos. A escolha do aço a ser usado foi motivada por ser uma liga de alta resistência mecânica, alta tenacidade, boa usinabilidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade, o que faz com que seja amplamente usado na fabricação de uma grande variedade de peças, desde eixos, bielas e virabrequins para indústria automobilística, na indústria agrícola, de máquinas e equipamentos, entre outras aplicações.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Os objetivos gerais deste trabalho é realizar o tratamento térmico de criogenia em diferentes condições de tempos de imersão em ferramentas de metal duro, avaliando o seu comportamento no torneamento do aço SAE 8640.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar tratamentos criogênicos em ferramenta de metal duro, com diferentes tempos de imersão;
- Avaliar a variação da dureza dos insertos tratados nos diferentes tempos em relação a ferramenta bruta;
- Analisar a variação na concentração e densidade das diferentes fases nos insertos;
- Realizar ensaios de torneamento comparando o desgaste de flanco das ferramentas nas condições de tratamento criogênico utilizadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 USINAGEM SUSTENTÁVEL

A fabricação sustentável abrange métodos de produção que não poluem o meio ambiente, conservam energia e são ecologicamente corretos. Isso inclui o uso eficiente de recursos, a utilização de materiais recicláveis, redução de resíduos e do consumo de energia, aumento da vida útil das ferramentas, gestão eficaz de fluidos de usinagem e óleos lubrificantes. Todos esses fatores contribuem significativamente para a sustentabilidade na usinagem, promovendo um impacto positivo no meio ambiente e na economia (CHINNASAMY et al., 2022).

A manufatura ecológica visa reduzir impactos negativos causados pela usinagem usual, a qual grande quantidade de fluídos, oriundos dos extratos de petróleo bruto, são utilizados para lubrificar o contato entre a peça e a ferramenta de corte. O uso intensivo desses fluidos gera grande preocupação devido às implicações ambientais e de saúde. O descarte do fluido de corte é outro desafio significativo, pois, se não for tratado corretamente, pode resultar em poluição do solo e da água. Outrossim, a evaporação do fluido de corte pode criar uma névoa no ambiente de produção o que pode ser prejudicial à saúde dos trabalhadores, levando a problemas respiratórios e outras doenças (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015).

(JAWAHIR et al., 2016) apresentam uma revisão abrangente sobre os avanços de novas técnicas sustentáveis, os quais destacam os fluidos criogênicos, como o nitrogênio líquido (LN2), que trazem diversas vantagens para a usinagem. Nesse trabalho, foi observado que os fluidos sustentáveis reduzem a temperatura durante o processo de fabricação, mantendo a integridade das ferramentas e peças, resultando em cortes mais precisos e acabamentos de alta qualidade. Pois, segundo os autores, o LN2 minimiza o desgaste das ferramentas, reduzindo atrito e calor, conjunto de fatores que prolonga a vida útil dos materiais envolvidos na manufatura. Ademais, os resultados do artigo demonstram que essa abordagem melhora significativamente a performance funcional, aumentando a resistência ao desgaste, à corrosão e a vida útil dos componentes, visto que a usinagem criogênica permite taxas de remoção de material mais altas, o que resulta em maior produtividade e melhor qualidade superficial, com acabamento aprimorado e menor rugosidade. Além disso, os autores ratificam que a substituição de fluidos de corte convencionais por gases criogênicos,

como o nitrogênio líquido, oferece uma alternativa não tóxica e ambientalmente amigável.

Por esses motivos, é crucial introduzir métodos mais amigáveis ao ecossistema. A busca por alternativas sustentáveis, como o uso de fluidos de corte biodegradáveis, técnicas de usinagem a seco e a reutilização de materiais, somado a implementação de sistemas de gestão de resíduos eficientes e a adoção de tecnologias avançadas para monitoramento e controle de poluentes são essenciais para garantir uma produção mais limpa e sustentável, figura 1. Destarte, é pertinente, do prisma de custo e saúde, suprimir os fluidos de corte tradicionais, derivados do petróleo. Isso posto, a usinagem a seco é um procedimento ecologicamente correto e mais amigável ao meio ambiente. Ao eliminar a necessidade de fluidos de corte, reduz-se o impacto ambiental e os riscos à saúde dos trabalhadores, além de diminuir os custos operacionais associados ao manejo desses fluidos (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015)

Figura 1 – Características da Usinagem Sustentável



Fonte: Adaptação (CHETAN; GHOSH; VENKATESWARA RAO, 2015)

Em seu trabalho, (KROLCZYK et al., 2019), realizaram uma análise abrangente das tendências ecológicas em processos de usinagem de materiais difíceis de cortar, como aços duros e ligas à base de titânio e níquel. O artigo foca na melhoria desses

processos, com ênfase na redução da poluição gerada por refrigerantes e emulsões. Áreas de interesse incluem corte a seco, lubrificação de quantidade mínima, resfriamento criogênico, refrigerante de alta pressão e óleos vegetais biodegradáveis. A abordagem proposta visa minimizar o uso de refrigerantes e lubrificantes, adotar ferramentas de corte adequadas e condições de usinagem que reduzam custos, força de corte, consumo de energia e temperatura, enquanto melhoram a qualidade da superfície, o volume de material removido e prolongam a vida útil da ferramenta. Além disso, considerações como impacto na saúde do operador, qualidade do ar e remoção de cavacos também são abordadas. Este estudo serve como uma base valiosa para avanços recentes e futuras pesquisas sobre usinagem sustentável.

À luz disso, (LIU et al., 2021), relatam que o fluido de corte é essencial para o resfriamento e a lubrificação no corte de materiais metálicos, mas o uso intensivo na usinagem por inundação traz sérios impactos ambientais e riscos à saúde dos trabalhadores. Tecnologias alternativas, como o corte a seco, a lubrificação por quantidade mínima (LQM) e o resfriamento criogênico, têm sido exploradas, embora o LQM com gás comprimido em temperatura ambiente e a lubrificação criogênica isoladamente apresentem limitações que restringem sua aplicação industrial. O estudo destaca que a combinação dessas abordagens, resultando na lubrificação criogênica de quantidade mínima (LCQM), pode superar os desafios mecânico-térmicos em materiais difíceis de cortar, especialmente na indústria aeroespacial. Liu et al. revisam os avanços na tecnologia LCQM, analisando formas de aplicação e características de dispositivos em processos como torneamento, fresamento e retificação. O trabalho também revela o mecanismo de resfriamento e lubrificação do LCQM e seu impacto em fatores como dureza do material, força de corte, desgaste da ferramenta e qualidade da superfície, mostrando que o LCQM oferece desempenho superior em comparação com o uso isolado de tecnologias criogênica ou LQM. Finalmente, o estudo aponta as limitações e perspectivas da LCQM, fornecendo uma base para seu desenvolvimento e aplicação em engenharia.

No artigo de (JAIN et al., 2019), os autores discutem o uso de fluidos de usinagem (FUs), como óleos solúveis, óleos sintéticos, lubrificantes sólidos e biolubrificantes, em processos de manufatura, destacando seu papel no resfriamento e lubrificação durante a usinagem. Esses FUs, que contêm água, óleo mineral, óleos vegetais e derivados de petróleo, causam sérios danos ao meio ambiente e à saúde

humana, especialmente quando descartados inadequadamente, como por queima ou despejo no solo e em corpos d'água, resultando em poluição e doenças transmitidas pelo ar. Para mitigar esses impactos, os autores exploram a técnica de usinagem sustentável com o uso de nitrogênio líquido para resfriamento e lubrificação. No estudo, a modelagem por elementos finitos (MEF) foi utilizada para simular o microfresamento de extremidade em diferentes condições da peça de trabalho, incluindo a combinação de criogenia com pré-aquecimento e a criogenia isolada. A análise da morfologia do cavaco e a medição das forças de corte sob essas condições confirmaram que a condição ideal foi alcançada ao aplicar criogenia com a peça pré-aquecida a 473 K, utilizando um refrigerante ecologicamente amigável. O estudo oferece conhecimentos valiosos sobre o comportamento da criogenia em processos de usinagem e propõe uma solução viável para os problemas ambientais associados aos FUs tradicionais.

Em seu trabalho sobre usinagem em ligas de Titânio, (MIA et al., 2019) mencionam que as indústrias de manufatura modernas buscam processos energeticamente eficientes, limpos e sustentáveis, mas isso é desafiador na usinagem do Ti-6Al-4V, que mantém suas propriedades em altas temperaturas. O uso de nitrogênio líquido criogênico (LN2) surge como uma alternativa limpa, melhorando a usinabilidade do Ti-6Al-4V e promovendo a sustentabilidade com baixas emissões de carbono. O estudo destaca que a orientação e o número de jatos de LN2 afetam diretamente a energia de corte, qualidade e produtividade do processo, sendo necessário equilibrar consumo de energia e qualidade-produtividade para uma produção sustentável. A pesquisa, dividida em três partes, avalia os fatores nos parâmetros de saída, otimiza esses parâmetros e analisa o ciclo de vida (CV) da usinagem assistida por LN2. A abordagem Grey-Taguchi identificou jatos duplos de LN2 como mais eficazes na redução do consumo energético e da temperatura, melhorando a qualidade da superfície. Os parâmetros ótimos foram uma velocidade de corte de 140 m/min e uma taxa de avanço de 0,16 mm/rev. O CV revelou que a estratégia de resfriamento afeta diretamente o desempenho de usinagem da liga Ti-6Al-4V e aspectos ambientais como recursos, energia, saúde humana e biodiversidade.

De acordo com as conclusões de (SHARMA; JHA; PAHUJA, 2021), os líquidos minerais tradicionais, amplamente utilizados em processos de usinagem para

resfriamento e lubrificação, são fontes significativas de problemas ambientais e de saúde. Os autores sugerem a adoção de métodos mais sustentáveis para mitigar esses impactos negativos, como a redução do uso de líquidos de corte e a aplicação de alternativas como nitrogênio líquido, óleos vegetais ou ar comprimido. Estes líquidos, quando utilizados em abordagens mais ecológicas, são reconhecidos como biodegradáveis e amigáveis ao meio ambiente. O estudo analisa práticas de usinagem ecologicamente corretas, mostrando que essas técnicas sustentáveis melhoram a qualidade da superfície usinada, aumentam a vida útil das ferramentas e reduzem as temperaturas e forças de corte em comparação com as técnicas tradicionais. O objetivo principal é promover o uso dessas estratégias sustentáveis na usinagem de metais, figura 2, tornando o processo mais econômico e ambientalmente responsável.

Figura 2 – Arranjo da Usinagem Sustentável.



Fonte: Adaptação (SHARMA; JHA; PAHUJA, 2021)

Devido à grande disponibilidade, o nitrogênio líquido (LN2) é tipicamente utilizado na criogenia, uma área da ciência que estuda os efeitos das temperaturas extremamente baixas em materiais e processos. Em 1968, a expressão usinagem criogênica foi empregada pela primeira vez por Uehara e Kumagai, referindo-se ao uso de nitrogênio líquido como meio de resfriamento em processos de usinagem. Essa técnica inovadora trouxe avanços significativos na indústria, permitindo a melhoria do

desempenho das ferramentas e a redução do desgaste durante a usinagem (JAWAHIR et al., 2016).

Observou-se, nas bibliografias, que tanto a usinagem a seco quanto a usinagem com nitrogênio líquido, devido à sustentabilidade dos processos, receberam muita atenção da comunidade acadêmica. Essas abordagens inovadoras têm sido objeto de estudos e pesquisas que buscam compreender suas vantagens e aplicações na indústria. A crescente preocupação com os impactos ambientais e a saúde dos trabalhadores tem levado a um aumento do interesse em métodos de usinagem que minimizem o uso de fluidos de corte tradicionais e que adotem soluções mais ecológicas. Como resultado, essas técnicas têm se destacado nas discussões sobre práticas de manufatura sustentáveis e eficientes (MIA et al., 2019). Além de ser operada como alternativa aos fluidos refrigerantes convencionais, que são geralmente à base de água e óleo, a usinagem criogênica contribui tanto na transformação do material da ferramenta de corte quanto na peça manufaturada. Esse método inovador também desempenha um papel importante na dissipação de calor ocasionado na zona de corte, permitindo que a temperatura se mantenha sob controle durante o processo de usinagem.

Dessa forma, a usinagem criogênica não apenas melhora a eficiência e a qualidade do trabalho realizado, mas também prolonga a vida útil das ferramentas, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e sustentável. Ademais, o dióxido de carbono (CO₂), quando utilizado como líquido criogênico, tem a capacidade de reduzir o desgaste em diversas áreas da ferramenta devido à diminuição de temperatura. Essa ação é especialmente eficaz no desgaste de flanco, desgaste de nariz e, somado a isso, no desgaste de entalhes na profundidade da linha de corte. A utilização do CO₂ criogênico contribui para a melhoria do desempenho das ferramentas, permitindo que elas mantenham suas propriedades de corte por mais tempo e, assim, proporcionando um processo de usinagem mais eficiente e sustentável (BAGHERZADEH; BUDAK, 2018).

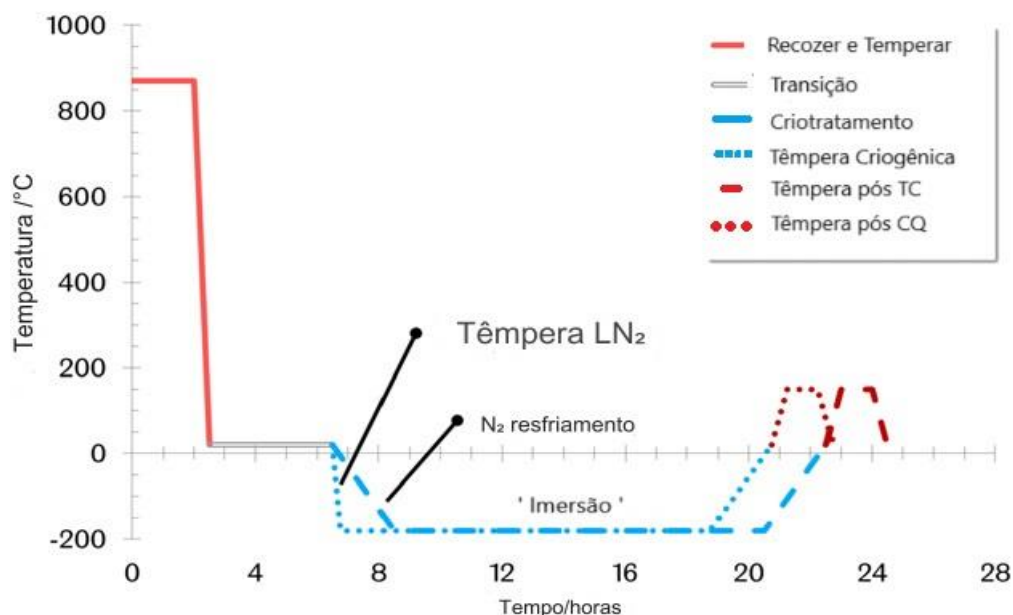
A atual metamorfose de padrão na fabricação mecânica está se movimentando em direção a tecnologias verdes, tendo em vista as seguintes tendências: o prolongamento da vida útil da ferramenta de corte, a condição de lubrificação e refrigeração sustentável, e a determinação de parâmetros funcionais de superfícies manufaturadas. Somado a isso, o objetivo da tecnologia de usinagem é fabricar com

a mínima despesa possível, mas, concomitantemente, com elevada exatidão dimensional. Essa abordagem não apenas visa a eficiência econômica, mas também a redução do impacto ambiental, promovendo processos de fabricação que sejam mais sustentáveis e que atendam às demandas da indústria moderna (KROLCZYK et al., 2019).

2.2 TRATAMENTO CRIOGÊNICO NA USINAGEM

A Cryogenic Society of America define como temperaturas criogênicas aquelas que estão em valores que são inferiores a 120 K (-153,5 °C). De fato, existem algumas divergências em relação a essas temperaturas, pois diferentes instituições podem adotar faixas ligeiramente distintas. Por exemplo, o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) arbitra que a faixa para este fenômeno começa a partir de 93,5 K (-179,6 °C) (JAWAHIR et al., 2016). Além disso, pode haver uma discussão bastante interessante entre o tratamento criogênico raso e o tratamento criogênico profundo. O tratamento criogênico raso ocorre em temperaturas que variam entre 203 K (-70 °C) e 153 K (-120 °C), em que, durante esse processo, o componente é envelhecido por um período relativamente curto de tempo, geralmente variando entre 1 a 2 horas. Em contraste, o tratamento criogênico profundo ocorre em temperaturas que estão na faixa de 123 K (-150 °C) até 77 K (-196 °C). Nesse caso, o componente é resfriado até a temperatura desejada e mantido nessa condição por várias horas, figura 3. Essa manutenção prolongada em temperaturas extremamente baixas é fundamental para garantir que as propriedades desejadas do material sejam alcançadas (BLINN et al., 2021).

Figura 3 - Gráfico de temperatura versus tempo para o processo de tratamento criogênico



Fonte: Adaptação (SLATTER; THORNTON, 2017).

O tratamento criogênico (TC), descrito por (GILL; SINGH, 2013), é um processo complementar ao tratamento térmico convencional que envolve o congelamento profundo de materiais em temperaturas criogênicas, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas e físicas. Este método não se limita apenas à conversão da austenita retida em martensita, como se pensava anteriormente, mas também resulta em melhorias significativas em materiais não ferrosos, como ferramentas de corte de carboneto de tungstênio, materiais eletrônicos, plásticos, compósitos e polímeros. A aplicação de TC pode aumentar a resistência ao desgaste, a dureza e a estabilidade dimensional das ferramentas, reduzindo o consumo e o tempo de parada das máquinas-ferramenta, o que leva a uma redução nos custos operacionais. Para polímeros, o TC também demonstra melhorias na resistência ao desgaste, dureza, estabilidade dimensional, cristalinidade, resistência à tração e alongamento. Apesar das evidências de que o TC pode prolongar a vida útil de ferramentas e melhorar as propriedades dos polímeros, os mecanismos exatos e o grau de melhoria ainda permanecem ambíguos.

De acordo com (KARA et al., 2023) que investigaram os efeitos do tratamento criogênico superficial e profundo no aço para ferramentas Sleipner, comparando as alterações em microdureza, microestrutura, coeficiente de atrito e taxa de desgaste.

Os corpos de prova foram submetidos a dois tipos de tratamento criogênico: superficial a 193 K (-80 °C) e profundo a 93 K (-180 °C), com tempos de retenção variados (12h e 24h para o tratamento superficial e 12h, 24h e 36h para o tratamento profundo). O tratamento criogênico causou um aumento de 6,53% na microdureza do aço, além de promover uma microestrutura mais homogênea e a formação de precipitações secundárias de carboneto. No que diz respeito ao coeficiente de atrito, a amostra submetida ao tratamento criogênico profundo a 93 K, com 12 horas de imersão, apresentou o menor valor, 0,58, enquanto a amostra convencional tratada termicamente teve o maior valor, 0,63. Após a realização dos testes de desgaste por deslizamento seco, a menor taxa de desgaste foi observada na amostra de 36 horas de imersão para ambos os valores de carga, evidenciando a eficácia do tratamento criogênico profundo em melhorar a resistência ao desgaste.

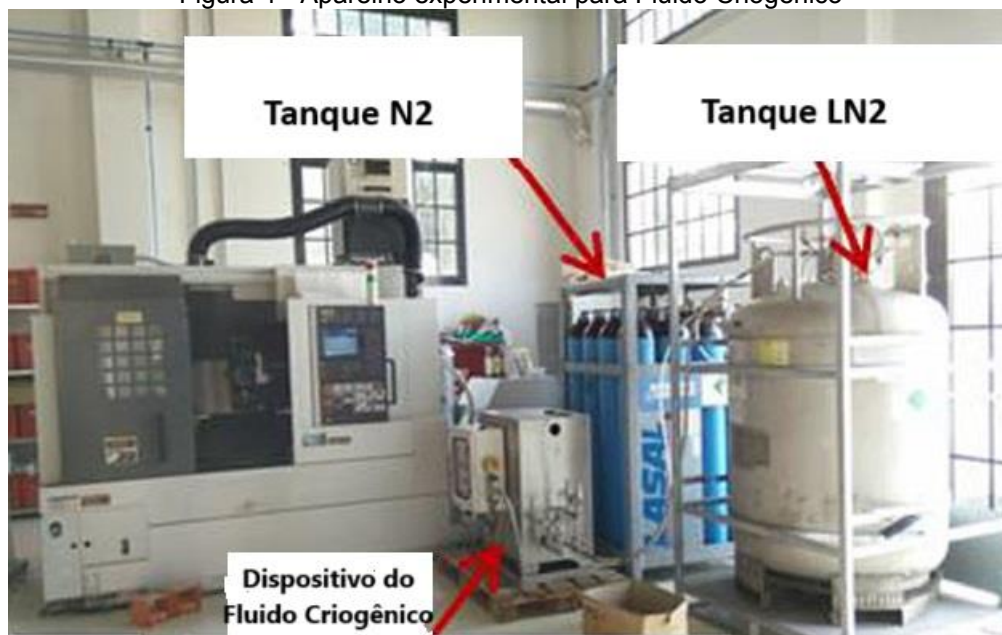
No estudo de (LI et al., 2021), os efeitos do tratamento térmico tradicional (têmpera seguida de revenimento) e do tratamento criogênico profundo sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de um aço martensítico para rolamentos, de baixo carbono e alta liga, foram investigados utilizando o teste de dureza Rockwell, difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura e transmissão. Os resultados demonstraram que o tratamento criogênico profundo facilita a transformação da austenita retida em martensita durante o resfriamento, o que resulta em uma dureza superior da amostra tratada criogenicamente em comparação ao estado apenas temperado. Além disso, foi calculado o teor de carbono na matriz martensítica após diferentes tratamentos, indicando que o tratamento criogênico profundo promove a segregação de átomos de carbono nas discordâncias da martensita. Esses átomos de carbono segregados servem como núcleos para a formação de partículas finas de carboneto durante o revenimento subsequente, o que explica o aumento da dureza do aço experimental temperado após o tratamento criogênico profundo em comparação com o aço que não passou pelo tratamento criogênico.

No artigo de (PODGORNIK et al., 2016), os autores discutem o efeito do tratamento criogênico profundo na tenacidade à fratura, resistência ao desgaste e capacidade de carga do aço para ferramentas de trabalho a frio, além da eficácia do tratamento conforme o tipo de aço para ferramentas e a composição química. O tipo e a composição química do aço para ferramentas influenciam significativamente a

forma como o tratamento criogênico profundo altera suas capacidades mecânicas, tribológicas e de suporte de carga. Para aços com baixo teor de carbono e maior conteúdo de W e Co, as propriedades podem ser melhoradas em até 70%, mas essas melhorias são limitadas no caso de aços rápidos. Nos aços com altos teores de carbono e vanádio, as propriedades dos aços para ferramentas de trabalho a frio podem até ser prejudicadas após o tratamento criogênico profundo. Em termos de resistência ao desgaste abrasivo e capacidade de carga, o aumento da dureza é o fator mais determinante.

Em seu trabalho, Sartori et al. (2018) abordam o desafio de otimizar a vida útil das ferramentas de corte para aumentar a produtividade e a qualidade da superfície do produto em operações de usinagem. Várias estratégias inovadoras foram desenvolvidas para melhorar o desempenho em materiais difíceis de cortar, sendo uma das mais interessantes o uso de fluidos de corte a baixa temperatura, capazes de inibir os mecanismos de desgaste termicamente ativados que alteram a geometria da aresta de corte. O objetivo do artigo é investigar o efeito das tecnologias de resfriamento criogênico, usando nitrogênio líquido (LN2) e nitrogênio gasoso (N2) resfriado a -100 °C, figura 4, no desgaste da ferramenta com insertos de metal duro, tanto não revestidos quanto revestidos, durante o torneamento de semiacabamento da liga de titânio Ti6Al4V. Foram testadas quatro classes de insertos comumente usadas na usinagem de ligas difíceis de cortar, utilizando os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante. A investigação usou microscopia eletrônica de varredura e análises de perfilador óptico para definir e quantificar os principais mecanismos de desgaste da ferramenta. O estudo demonstrou que a tecnologia baseada em N2 resfriado gerou os melhores resultados em termos de vida útil da ferramenta, inibindo simultaneamente o fenômeno de craterização na face de ataque da ferramenta e produzindo o menor desgaste de flanco em comparação com os casos de corte a seco, estratégia úmida e resfriamento com LN2. Os melhores resultados foram obtidos para o inserto não revestido ao usar N2 resfriado.

Figura 4 - Aparelho experimental para Fluido Criogênico



Fonte: Adaptação (SARTORI et al., 2018).

Nos estudos de Saini et. al (2020) relatam que o tratamento criogênico é um complemento ao tratamento térmico, capaz de melhorar o desempenho das peças sem causar instabilidade ou imprecisões dimensionais. Um dos seus principais usos é no aumento da vida útil de ferramentas de corte. O tratamento criogênico dessas ferramentas melhora sua estabilidade microestrutural, reduzindo o desgaste e, conseqüentemente, prolongando sua vida útil. Este estudo experimental analisou o tratamento criogênico em ferramentas de carboneto de tungstênio (WC) utilizadas no fresamento da liga Ti-6Al-4V. Foram comparados desgaste, acabamento superficial, vibrações e forças de corte entre ferramentas tratadas e não tratadas. As ferramentas tratadas mostraram menor desgaste, melhor acabamento, menos vibração e menores forças de corte, o que é atribuído à microestrutura aprimorada dos inserts de WC, que apresentaram carbonetos estáveis de fase η distribuídos uniformemente, densificação do ligante de cobalto e refinamento da fase de carboneto duro, características ausentes nas ferramentas não tratadas.

Em seus trabalhos Seah, Rahman e Yong (2003) apresentam uma visão geral dos efeitos de vários tratamentos térmicos abaixo de zero na vida útil da ferramenta e nas características de desgaste de inserts de ferramentas de corte de carboneto de tungstênio ligado a cobalto. Os inserts foram submetidos a seis condições diferentes de tratamento, tratamento de têmpera, tratamento criogênico, tratamento criogênico

seguido de revenimento, tratamento a frio e tratamento a frio seguido de revenimento. Foi descoberto que os insertos que passaram pelas últimas quatro condições de tratamento exibiram vida útil da ferramenta e resistência ao desgaste significativamente maiores em velocidades de corte mais altas, bem como uma resistência geral aumentada ao lascamento. A análise microestrutural foi usada para explicar os fenômenos observados.

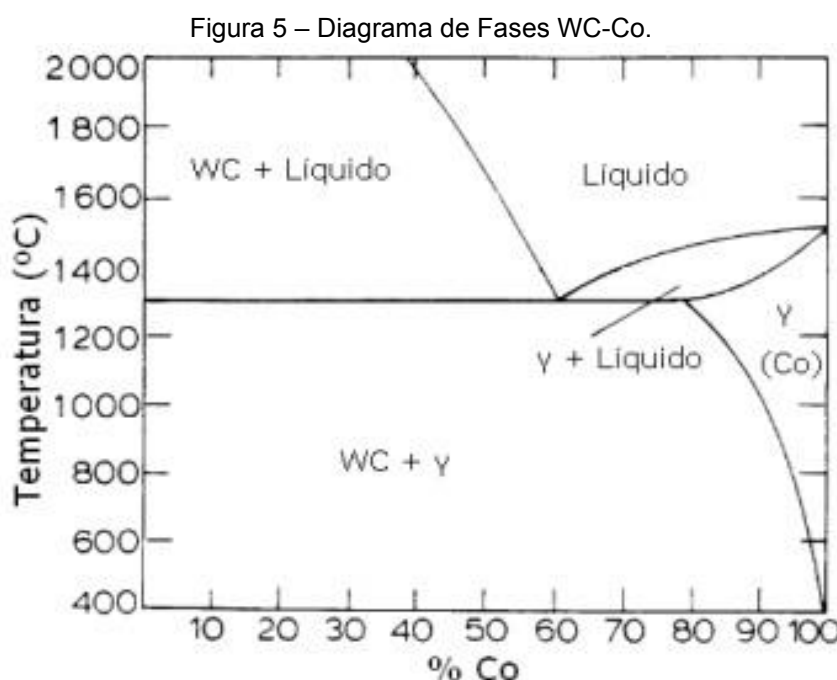
Conforme indicado por Sivalingam et al. (2018) em seus estudos, o qual tinha o objetivo de estudar a usinabilidade da liga Ti-6Al-4V com inserto de carboneto de tungstênio revestido com PVD TiAlN/NbN, sob condições criogênicas tratadas (24 h e 48 h) e não tratadas, em que as respostas são avaliadas com base no desgaste da ferramenta, rugosidade da superfície, morfologia do cavaco, força de corte e aceleração da vibração. Os resultados experimentais mostraram que o inserto tratado criogenicamente apresentou melhor usinabilidade e maior vida útil da ferramenta em comparação com o inserto não tratado nas mesmas condições. Além disso, houve uma redução significativa nas forças de corte após 48 horas do tratamento criogênico.

2.3 DESGASTE DE FERRAMENTA DE METAL DURO

Conforme indicado por Wang, Ji e Guo (2020) dependendo da aplicação específica, a ferramenta de metal duro pode ser revestida ou não, uma vez que, dependendo do tipo de revestimento aplicado ao inserto ou das propriedades do material usinado, podem ocorrer reações químicas devido ao atrito gerado em altas temperaturas durante o processo, o que influencia tanto o desempenho da ferramenta quanto a qualidade do material usinado. A decisão de revestir ou não a ferramenta deve considerar as condições de operação e as características dos materiais, buscando otimizar resultados e evitar problemas no processo. Em cortes interrompidos, como na usinagem da liga Ti-6Al-4V, ferramentas de carboneto revestidas passam por estágios de desgaste como delaminação do revestimento, difusão de cobalto, desgaste por atrito e formação de rachaduras e escamação. A delaminação começa na aresta de corte, avançando para outras faces, seguida pela difusão do cobalto, que acelera a remoção de partículas de WC (carboneto de tungstênio) do substrato. Os vazios formados por essa difusão favorecem

microfissuras que, ao se propagarem sob cargas cíclicas, resultam em fraturas frágeis, principais modos de falha em altas velocidades de corte.

Atualmente, o carboneto de tungstênio (WC) é amplamente reconhecido como o material mais utilizado na indústria para a fabricação de ferramentas de corte. Isso ocorre devido à sua alta versatilidade, que permite uma ampla gama de aplicações, combinado com a economia de usinagem que proporciona. Além disso, esse material possui uma alta resistência ao desgaste, mesmo quando exposto a elevadas temperaturas e grandes forças de corte, o que o torna extremamente competente e eficaz na usinagem de metais duros. Essa combinação de características, que pode ser analisada no diagrama de fases, figura 5, torna o carboneto de tungstênio uma escolha ideal para diversas operações de usinagem, contribuindo para a eficiência e a qualidade dos processos industriais. Dessa forma, sua utilização se justifica não apenas pela sua performance, mas também pelos benefícios econômicos (SAINI; PABLA; DHAMI, 2020).



Fonte: (SANDS, 1966)

Os aços endurecidos que apresentam uma faixa de dureza que varia entre 50 a 60 HRC podem acarretar problemas significativos, como o desgaste da ferramenta ou até mesmo a quebra da mesma. Isso pode ocorrer caso não sejam observados os parâmetros de corte adequados, como, por exemplo, a profundidade de corte, que é um fator crítico nesse processo. A falta de atenção a esses detalhes pode resultar em

falhas no desempenho da ferramenta, comprometendo a eficácia e a qualidade do trabalho realizado. Por isso, é fundamental seguir rigorosamente as diretrizes e especificações necessárias para garantir que a usinagem ocorra de maneira eficiente e segura. Ademais, há algumas complexidades e desafios significativos na fabricação de aços endurecidos, seja por meio de tratamento térmico ou pela adição de elementos de liga. Essas complexidades incluem a geração demasiada de calor, a força de atrito que se desenvolve durante o processo e a necessidade de cuidado com a qualidade superficial da peça, que é um aspecto crucial para garantir o bom desempenho do produto final (SHIXIONG et al., 2018).

Somado a isso, é preciso atentar-se cuidadosamente às tensões residuais de tração que podem ser ocasionadas pelo gradiente de temperatura existente entre a superfície da peça e a sub-superfície, que geralmente é mais fria. Essas tensões residuais podem impactar a integridade da peça e, por isso, requerem atenção especial durante todo o processo de fabricação. Em contrapartida, o aço endurecido oferece uma boa resistência à fadiga, que é um fator importante em diversas aplicações industriais. Além disso, ele possui um bom comportamento mecânico em altas temperaturas, o que o torna um material adequado para situações em que é necessário suportar condições de calor extremo. Essa combinação de características positivas faz do aço endurecido uma escolha preferencial para muitas aplicações que exigem durabilidade e desempenho confiável (GUPTA et al., 2020).

Na usinagem de aços endurecidos, provoca-se a ocorrência de altos coeficientes de atrito entre o cavaco e a face de saída da ferramenta, que é conhecida como zona de cisalhamento secundária, conforme ilustrado na figura 5. Além disso, também se observa a geração de altos coeficientes de atrito entre a peça e a face de folga da ferramenta, o que é referido como zona de cisalhamento terciário. Esses altos níveis de atrito nas diferentes zonas de cisalhamento podem impactar significativamente o desempenho da usinagem, influenciando tanto a qualidade do acabamento superficial da peça quanto a vida útil da ferramenta utilizada (SALES et al., 2020).

Em seus estudos Kuntoglu e Saglam (2019), investigaram as operações de torneamento do material AISI 1050 com três variáveis: velocidade de corte, taxa de avanço e ponta da ferramenta. Foram feitas medições da força de corte tangencial e da emissão acústica (AE). Os resultados revelaram que a velocidade de corte teve o

maior efeito sobre o desgaste da ferramenta (45%), enquanto a ponta da ferramenta foi a segunda mais significativa (35%). A taxa de avanço teve um impacto considerável na força de corte tangencial (88%), e a velocidade de corte influenciou o AE (80%). Os parâmetros ótimos para reduzir o desgaste foram estabelecidos como $v_1 = 135$ m/min, $f_2 = 0,214$ mm/rev e $T_2 = P25$. O sistema de sensores conseguiu identificar a quebra da ferramenta, garantindo produção de alta qualidade a baixo custo. Ademais, também notou que o desgaste da ferramenta é um fenômeno natural resultante de cargas mecânicas, químicas e térmicas durante a usinagem. Mecanismos de desgaste, como o desgaste do flanco, figura 6, e o desgaste da cratera, surgem na zona de corte e servem como critérios confiáveis para avaliar a vida útil da ferramenta. O desgaste do flanco, em particular, pode ser utilizado para determinar a durabilidade da ferramenta inicial.

Figura 6 - Desgaste de flanco em ferramenta de corte de metal duro.



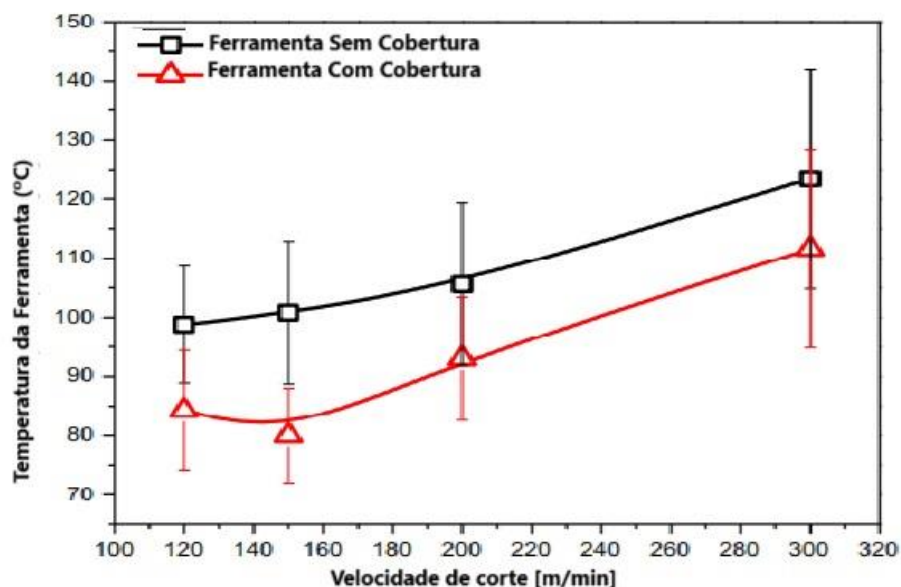
Fonte: Adaptação (SAINI; PABLA; DHAMI, 2020).

Kazlauskas, Jankauskas e Tučkūtė (2020) em seu artigo apresentam uma pesquisa sobre os impactos das características mecânicas e tribológicas na eficiência de ferramentas de corte de metal duro WC-Co. Foram testadas ferramentas sem revestimento e com revestimentos de deposição física de vapor (PVD), como CrN e TiAlN. A espessura dos revestimentos foi medida, e foram realizados testes de rugosidade, microdureza e adesão. O coeficiente de atrito foi determinado por diferentes métodos, e o desgaste das fresas durante a fresagem de madeira de carvalho foi analisado, observando seu impacto na rugosidade da superfície. Os resultados mostraram que as fresas WC-Co sem revestimento são as menos

resistentes ao desgaste, enquanto as com revestimento de nitreto de cromo são as mais duráveis. Ambos os revestimentos PVD apresentaram danos após 9050 m de uso da aresta de corte.

Em sua pesquisa, Sahoo e Datta (2020) examinam o desempenho da usinagem a seco da liga AA7075 T6 usando insertos de carboneto não revestidos e revestidos com MT-CVD TiCN–Al₂O₃. O estudo avalia a força de corte tangencial, a temperatura na ponta da ferramenta e a profundidade do desgaste do flanco. O desempenho das ferramentas revestidas é comparado ao das ferramentas não revestidas, figura 7. Além disso, são estudados em detalhes os diferentes modos de desgaste da ferramenta e a morfologia do cavaco. Observou-se que as ferramentas revestidas apresentaram menor temperatura na ponta e menor desgaste do flanco em comparação com as não revestidas. No caso das ferramentas não revestidas, além da abrasão, adesão e formação de camada acumulada, o desgaste por atrito foi notavelmente presente. Já as ferramentas revestidas, além dos desgastes comuns, também sofreram desgaste por difusão.

Figura 7 - Efeito da velocidade de corte na temperatura da ponta da ferramenta



Fonte: Adaptação (SAHOO; DATTA, 2020).

Na análise de Luo et al. (2005) estudos teóricos e experimentais são realizados para investigar a relação intrínseca entre o desgaste do flanco da ferramenta e as condições operacionais em processos de corte de metal usando pastilhas de corte de

carboneto. Um novo modelo de taxa de desgaste do flanco, que combina simulação de mecânica de corte e um modelo empírico, é desenvolvido para prever a largura da área de desgaste do flanco da ferramenta. Um conjunto de testes de corte de desgaste da ferramenta usando pastilhas de corte de carboneto revestidas de metal duro são realizados sob diferentes condições operacionais. Os resultados dos estudos experimentais indicam que a velocidade de corte tem um efeito mais dramático na vida útil da ferramenta do que a taxa de avanço. As constantes de desgaste no modelo de taxa de desgaste proposto são determinadas com base nos dados de usinagem e resultados de simulação. Uma boa concordância entre a largura da área de desgaste do flanco da ferramenta prevista e medida mostra que o modelo de desgaste da ferramenta desenvolvido pode prever com precisão o desgaste do flanco da ferramenta até certo ponto. Ademais, eles citam que o desgaste de flanco é um dos principais tipos de desgaste que afetam as ferramentas de corte, prejudicando o acabamento superficial da peça. Esse desgaste pode causar tensões residuais indesejadas e alterações na camada endurecida do material, devido ao contato contínuo entre a ferramenta e a peça durante a usinagem. Essa interação compromete a qualidade do acabamento e reduz a eficiência da ferramenta ao longo do tempo, ressaltando a importância de monitorar e controlar o desgaste de flanco para garantir bons resultados no processo de usinagem.

2.4 AÇO AISI/SAE 8640

A classificação SAE dos aços é baseada principalmente na composição química. No caso do aço SAE 8640, os dois primeiros números indicam que é uma liga de aço com elementos de liga, destacando-se o níquel, cromo e molibdênio, que conferem ao aço propriedades superiores como maior resistência e dureza. Os últimos dois números representam o percentual de carbono presente no aço, que, nesse caso, é de 0,40%. Esses elementos de liga são fundamentais para o aprimoramento das características mecânicas do aço, tornando-o adequado para aplicações que exigem alta performance e durabilidade, como na construção mecânica e em componentes sujeitos a grandes esforços e desgaste. A combinação específica de níquel, cromo e molibdênio permite ao SAE 8640 manter uma excelente temperabilidade, além de uma resistência ao desgaste e uma capacidade de suportar cargas pesadas, que são essenciais para muitas aplicações industriais (ÇENTIL; DEMIREL, 2018).

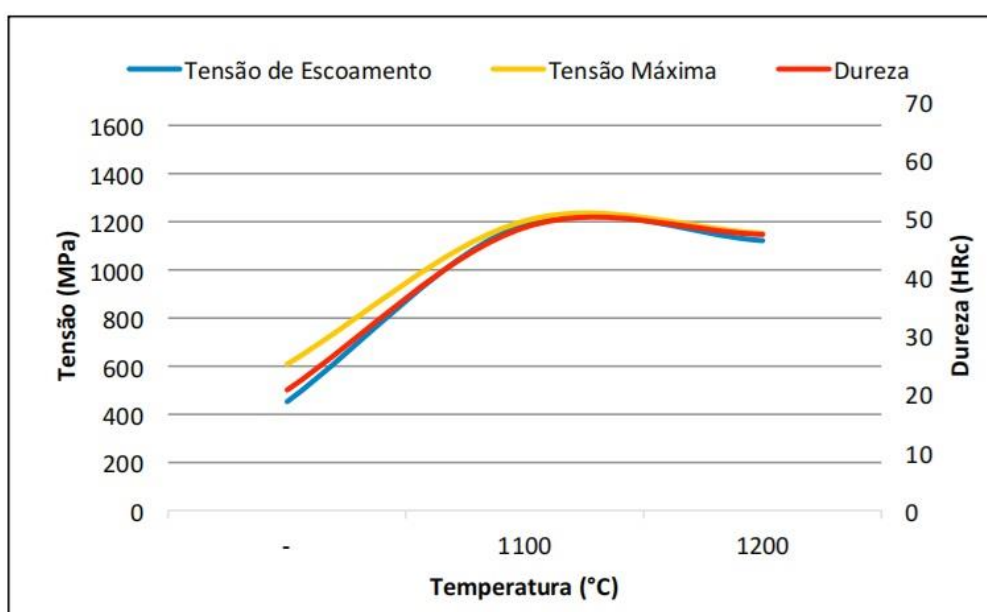
O aço SAE 8640 é um aço-níquel-cromo-molibdênio de médio carbono e baixa liga, amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos devido à sua alta resistência mecânica, boa usinabilidade, elevada temperabilidade e baixa soldabilidade. Com média temperabilidade, ele pode alcançar durezas superiores a 50 HRC, figura 8, após o tratamento térmico de têmpera na faixa de 850 a 900°C, sendo indicado para a produção de rolamentos, buchas, cilindros, engrenagens, eixos hidráulicos e eixos furados, podendo substituir o aço SAE 1045. O tratamento térmico do SAE 8640 altera significativamente suas propriedades, como resistência à fadiga e à fratura, destacando-se pela capacidade de suportar seções transversais mais exigentes. A combinação da sua composição química, tabela 1, e a estrutura interna resultante dos processos térmicos influenciam diretamente o comportamento mecânico desse material, otimizando seu desempenho em aplicações de alta demanda (SILVEIRA et al., 2018).

Tabela 1 – Composição Química do SAE 8640.

Elemento	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
%	0,38	0,75	0,15	0,40	0,4	0,15
	0,43	1	0,3	0,7	0,6	0,25

Fonte: Adaptação (LEANDRO, 2020).

Figura 8 – Comportamento do aço SAE 8640 em variadas temperaturas



Fonte: Adaptação (SILVEIRA et al., 2018).

Conforme Nora et al. (2023), o aço SAE 8640 é um aço de baixa liga que é tratado termicamente por meio de esferoidização, um processo destinado a reduzir a dureza e aumentar a usinabilidade e ductilidade, tornando-o mais adequado para processos de fabricação. No estudo, observou-se uma redução significativa na dureza após os ciclos de tratamento térmico, especialmente no ciclo isotérmico, onde a dureza diminuiu para aproximadamente 98 HV em comparação com amostras não tratadas termicamente. Além disso, a microestrutura do SAE 8640 pode variar dependendo do ciclo térmico aplicado. A formação de esferoiditos, partículas esféricas de cementita, foi analisada, mostrando uma taxa de esferoidização de 79,93%, que empregou um comportamento de temperatura pendular. Essas características conferem ao SAE 8640 uma versatilidade notável, tornando-o um material amplamente utilizado em aplicações que exigem um equilíbrio entre resistência e usinabilidade, ideal para componentes que requerem tanto dureza quanto capacidade de usinagem.

Segundo Çentil e Demirel (2018), o aço AISI 8640 se destaca por sua excelente combinação de resistência e tenacidade, tornando-o ideal para aplicações que exigem alta resistência mecânica, como componentes de máquinas e motores. Em termos de propriedades mecânicas, o AISI 8640 é reconhecido por sua durabilidade, apresentando uma dureza média em seu estado recozido de aproximadamente 265 HV. Após tratamentos térmicos adequados, como a têmpera em óleo a 850 °C, suas propriedades mecânicas podem ser significativamente aprimoradas, com limites de resistência à tração que podem alcançar até 1382 MPa, o que é um indicativo de sua capacidade para suportar cargas elevadas. A microestrutura do aço, quando analisada, revela que ele é composto por cerca de 50% de ferrita e 50% de perlita em seu estado recozido, apresentando uma estrutura homogênea e bem distribuída ao longo do material. Essas características fazem do AISI 8640 um material amplamente utilizado na fabricação de componentes que exigem alta resistência e durabilidade, como eixos, engrenagens, eixos de transmissão e outros elementos críticos em máquinas e equipamentos. Sua popularidade em diversas aplicações industriais é um reflexo de sua versatilidade e desempenho confiável em condições de alta carga e esforço.

Em investigação conduzida por Freitas et. al (2016), foi analisado o aço ABNT/SAE 8640, um aço ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) amplamente utilizado

na construção mecânica devido à sua boa temperabilidade, elevada resistência mecânica, usinabilidade e forjabilidade. O estudo focou em comparar as microestruturas e a microdureza do aço após diferentes tratamentos térmicos, como recozimento, normalização, têmpera e revenimento. O recozimento resultou em grãos de cementita grandes e dispersos, com pouca diferença em microdureza em relação à amostra base. A normalização apresentou uma estrutura mais uniforme, com grãos de ferrita e contornos de cementita mais visíveis, resultando em uma microdureza mais distinta. As amostras temperadas e temperadas e revenidas mostraram um aumento significativo na microdureza. A análise das microestruturas, realizada com microscópio óptico em ampliações de 100x e 400x, revelou diferenças marcantes: o recozido teve grãos grandes e dispersos de cementita, a normalização mostrou uma estrutura uniforme com ferrita e cementita visíveis, enquanto as amostras temperadas apresentaram uma estrutura compacta com distinções visíveis entre martensita e austenita, semelhantes às observadas na amostra revenida.

Em sua pesquisa Deveras (2017) realiza um estudo comparativo entre ferramentas de corte convencional (standard) e ferramentas alisadoras (wiper) no torneamento do aço AISI 8640, com o objetivo de analisar como diferentes parâmetros de usinagem influenciam os valores de rugosidade obtidos. O aço AISI 8640, conhecido por sua alta resistência e tenacidade, apresenta desafios específicos no torneamento devido à sua dureza e propriedades mecânicas. Para o experimento, foram mantidos uma velocidade de corte constante de 148,44 m/min, com duas profundidades de corte (0,4 mm e 0,8 mm) e dois avanços (0,104 mm/rot e 0,229 mm/rot), sem o uso de fluido de corte. Os resultados experimentais mostraram uma clara superioridade da ferramenta wiper em comparação com a ferramenta standard, proporcionando acabamentos superficiais de alta qualidade e evidenciando uma redução significativa nos valores de rugosidade em todas as condições de usinagem testadas. A ferramenta alisadora demonstrou uma capacidade superior para lidar com altas taxas de avanço sem comprometer a qualidade da superfície, aumentando significativamente a produtividade. Assim, a utilização de ferramentas wiper oferece vantagens notáveis na usinagem do aço AISI 8640, permitindo a obtenção de superfícies mais lisas e melhorando a eficiência dos processos de torneamento em aplicações industriais.

Na análise de Triani et al. (2019), a produção de camadas de carbonetos de vanádio (VC) e nióbio (NbC) em aços AISI 8620, 8640 e 52100 demonstrou um aumento significativo na dureza e na resistência ao desgaste dos substratos. Focando especificamente no aço AISI 8640, os tratamentos termoquímicos foram realizados a 1000 °C, com durações de 2 e 4 horas. A caracterização das amostras tratadas incluiu ensaios de microdureza Knoop, teste de desgaste microadesivo tipo “calotest”, ensaio de adesão de camadas segundo a norma VDI 3198, e difração de raios X. Os resultados mostraram que em todos os tratamentos foram obtidas camadas compactas e uniformes de VC e NbC no aço 8640, com dureza alcançando até 2500 HK e uma resistência ao desgaste microadesivo muito superior à dos substratos. Esses resultados comprovam a alta eficiência desses tratamentos para aplicações tribológicas, evidenciando a melhoria significativa nas propriedades mecânicas e na durabilidade do aço AISI 8640 em condições de desgaste intenso.

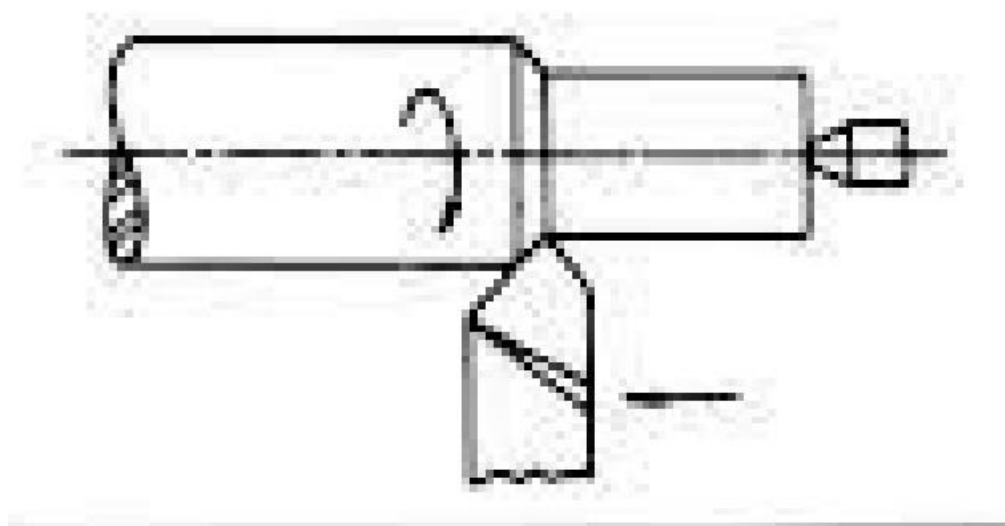
De acordo com as conclusões de Machado et. al (1997), o estudo comparativo sobre a aplicação de óleo solúvel sintético e semissintético (em concentrações de 3% e 10%), bem como o corte a seco, no torneamento de barras de aço AISI 8640 com ferramentas de metal duro de revestimento triplo (TiC, Al₂O₃, TiN) grau P35, revelou importantes resultados. Considerando a vida útil da ferramenta, forças de corte, temperaturas de corte e rugosidade da superfície, o fluido semissintético proporcionou maior vida útil da ferramenta com base no desgaste de flanco (VB). A rugosidade da superfície do aço AISI 8640 não foi significativamente afetada pela qualidade da lubrificação, desde que os efeitos do desgaste fossem desconsiderados. Em termos de temperatura na interface ferramenta-cavaco, o fluido sintético demonstrou a menor temperatura média, seguido pelos óleos semissintéticos, solúveis em minerais e, por último, o corte a seco. A tendência oposta foi observada nas forças de corte, onde o corte a seco apresentou os maiores valores.

2.5 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Segundo Ferraresi (1969), o torneamento, figura 9, é um dos processos de usinagem em que a peça, ao ser fixada em torno de um eixo principal, gira enquanto uma ou mais ferramentas se deslocam simultaneamente ao longo de uma trajetória coplanar ao eixo de rotação, resultando na produção de superfícies de revolução,

típicas desse processo. Dentre as várias formas que o torneamento pode assumir, destaca-se o torneamento cilíndrico externo, no qual a ferramenta se desloca ao longo de uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina, permitindo a obtenção de superfícies cilíndricas ao longo da peça.

Figura 9 – Torneamento Cilíndrico Externo



Fonte: (FERRARESI, 1969).

O acabamento da superfície no torneamento é influenciado por diversos fatores que, em graus variados, afetam o resultado final da peça usinada. Entre esses fatores, destacam-se a velocidade de corte, que determina a rapidez com que a ferramenta remove o material, e a velocidade de avanço, que define a taxa de deslocamento da ferramenta em relação à peça. A profundidade de corte também desempenha um papel importante, assim como as características do material a ser usinado, que podem variar em termos de dureza e resistência. Além disso, a geometria da ferramenta, a deflexão da peça durante o processo, a estabilidade e rigidez do sistema composto pela máquina-ferramenta, ferramenta de corte e peça, influenciam significativamente o acabamento obtido. Outros elementos que podem interferir nesse processo incluem a presença de aresta montada na ferramenta e o uso adequado de fluidos de corte, que ajudam a minimizar o atrito e a dissipar o calor gerado durante a operação. Todos esses aspectos, quando combinados, afetam de maneira direta a qualidade (QEHAJA et al., 2015).

Tendo em vista a influência dos parâmetros de corte no torneamento, Dagostin et. al (2021) realizaram experimento em que uma liga especial, conforme norma ASTM A518 GR.3, cujo objetivo é analisar a influência dos parâmetros de corte durante a operação de torneamento externo. Ensaio preliminares determinaram o uso do inserto de corte DNMG 150604 RK4315 para a realização dos testes. As variáveis investigadas foram a velocidade de corte (V_c) e o avanço de corte (f_n), enquanto a profundidade de corte (a_p) foi mantida constante em todos os experimentos. Para avaliar a vida útil do inserto nas seis configurações de corte testadas, foi adotado o limite de desgaste de flanco máximo de 0,3 mm, conforme a norma ISO 3685. Assim, foi possível comparar não apenas os tempos de usinagem, mas também a taxa de remoção de material (Q) e a rugosidade média (R_a) associada a cada configuração de corte. Com base nos resultados obtidos, foi possível identificar a melhor condição de corte para o material ASTM A518 GR.3 utilizando o inserto DNMG 150604 RK4315, considerando a vida útil da ferramenta, a rugosidade média e o volume de material removido (cm^3). A configuração de parâmetros de corte que se destacou apresentou a maior vida útil, o maior volume de material removido e a terceira menor rugosidade média entre as seis opções testadas.

Diante disso, a robustez do processo de torneamento contínuo é fundamental para a produção em grande escala e para os sistemas de manufatura automatizados. No entanto, um dos principais desafios nesse tipo de operação são os cavacos longos, que representam um obstáculo relevante. A formação desses cavacos durante o processo de usinagem pode comprometer a segurança tanto do operador quanto da ferramenta, além de impactar negativamente a qualidade da peça produzida, reduzir a vida útil da ferramenta e aumentar o consumo de energia. Esses fatores, em conjunto, diminuem a eficiência do processo. Conforme já discutido pela literatura, a quebra de cavacos ocorre com mais facilidade quando há aumento nas taxas de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. Entretanto, o crescimento dessas variáveis tende a ter efeitos adversos, especialmente na qualidade superficial da peça, na durabilidade da ferramenta e nas forças de corte envolvidas (YILMAZ; KARABULUT; GÜLLÜ, 2020).

Conforme Machado (2015) os parâmetros de corte influenciam diretamente na formação do cavaco. Um aumento na velocidade de corte, uma diminuição no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a fazer com que o cavaco passe de formas

mais fragmentadas para formas contínuas. Entre esses parâmetros, o avanço é o mais impactante, seguido pela profundidade de usinagem, quando se trata da forma do cavaco. Cavacos longos são problemáticos, especialmente em termos de segurança e produtividade, exigindo maior controle. Embora a escolha adequada dos parâmetros de corte possa, na maioria das vezes, evitar a formação de cavacos contínuos, o uso de quebra-cavacos é o método mais eficaz para garantir cavacos curtos. Nas operações contínuas de usinagem de materiais dúcteis, como o torneamento de aços de baixo carbono, o controle do cavaco é essencial para o desempenho da produção.

Segundo Pradhan et al. (2023), no torneamento os parâmetros de usinagem têm impacto direto sobre o desgaste da ferramenta e a qualidade da peça. A velocidade de corte é um dos fatores mais influentes, afetando significativamente o torque, a força de usinagem, a rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta. Por exemplo, no estudo da usinagem a seco de liga de titânio grau 5 (Ti6Al4V), foi observado que aumentar a velocidade de corte de 73 m/min para 160 m/min melhorou a qualidade da superfície dos cavacos e a visibilidade do perfil serrilhado, além de aumentar a taxa de desgaste em quase 300%. Um aumento na velocidade de corte e na taxa de avanço gera maiores pressões tangenciais, o que diminui o comprimento de contato do cavaco e, por consequência, reduz a rugosidade da superfície e a taxa de desgaste no flanco da ferramenta. O desgaste da ferramenta é diretamente influenciado por esses parâmetros, sendo mais acentuado com o aumento da velocidade de corte. Contudo, o uso de menores velocidades de corte e taxas de avanço pode minimizar o desgaste da superfície de ataque, resultando em menor desgaste abrasivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os procedimentos experimentais descritos neste trabalho e representados na figura 9 foram conduzidos nas instalações da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). As atividades ocorreram em laboratórios especializados, equipados com os recursos necessários para a execução das etapas planejadas, garantindo condições adequadas para os testes e análises. A infraestrutura disponível na FURG foi fundamental para o desenvolvimento e sucesso das técnicas aplicadas ao longo do estudo.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Aço SAE 8640

O aço SAE 8640 foi o material utilizado nos ensaios de torneamento. As amostras apresentam diâmetro de 50 mm e comprimento total de 200 mm, sendo que o comprimento usinado foi de 100 mm do metal, figura 10.

Figura 10 – Exemplo do material usinado.



Fonte: Autor.

3.1.2 Ferramenta

O inserto de torneamento negativo de dupla face SNMG 120408E-M fabricado pela Dormer Pramet, figura 11, possui formato quadrado com diâmetro de círculo inscrito de 12,7 mm, espessura de 4,76 mm e raio de ponta de 0,8 mm. Classificado como T9325, é composto principalmente por carboneto de tungstênio e titânio (WTiC) e cobalto (Co). É um inserto de torneamento negativo de dupla face classificado dentro da faixa ISO P15 – P35, para usinagem fina a pesada de aços.

Figura 11– Inserto de torneamento negativo de dupla face



Fonte: Fabricante.

3.1.3 Equipamentos

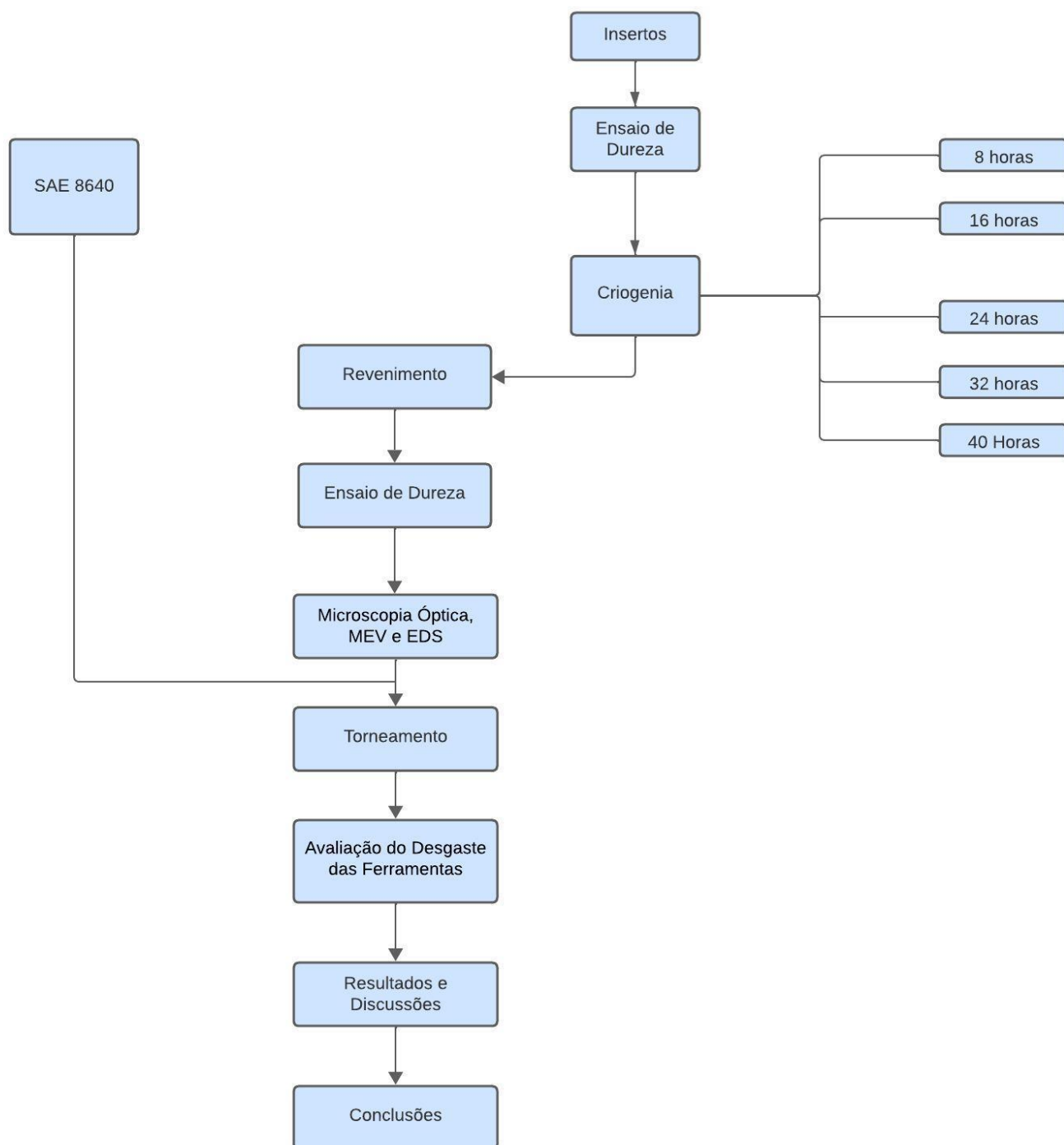
A seguir serão listados todos os equipamentos utilizados nas análises e experimentos realizados neste trabalho:

- Tanque de imersão criogênica, localizado no Centro Integrado de Análises (CIA-FURG);
- Cortadeira metalográfica modelo Buehler, 220v;
- Torno mecânico da marca Nardini Mascote MS 205 AS;
- Microscópio óptico da marca Olympus GX51;
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Jeol JSM-6610LV, microsonda de EDS;
- Durômetro multi escala ZWICK/ROELL, modelo 8187 5LKV;
- Embutidora Simplimet 2 da marca Buehler.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi elaborada para avaliar os efeitos do tratamento criogênico na resistência ao desgaste de ferramentas de metal duro durante a usinagem do aço SAE 8640. O processo experimental foi estruturado em várias etapas, conforme é possível observar no fluxograma apresentado na figura 12.

Figura 12 – Fluxograma do processo



Fonte: Autor.

3.2.1 Tratamento Criogênico

O Tratamento criogênico foi realizado nas dependências do Centro Integrado de Análises (CIA-FURG).

As ferramentas de metal duro foram submetidas ao tratamento criogênico por imersão em um tanque com nitrogênio líquido. Os tempos de imersão foram definidos como 8, 16, 24, 32 e 40 horas, sendo que a amostra comparativa não sofre nenhum tipo de tratamento térmico. Durante o tratamento, os insertos foram inseridos em um tanque com nitrogênio líquido com temperaturas aproximada de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K). Posteriormente, os insertos foram submetidos ao processo de revenimento a 200°C , por duas horas, com o objetivo de aliviar tensões provenientes da têmpera criogênica e, também, para acomodar de forma mais uniforme possível as mudanças microestruturais sofridas, como surgimento de novas fases, aumento de densidade de carbonetos e até refinamento de grãos.

3.2.2 Ensaio de Usinagem

Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de usinagem da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Após a têmpera criogênica, foram realizados ensaios de torneamento do aço 8640 com todas as ferramentas tratadas. As amostras, com geometria cilíndrica possuíam diâmetro de 50 mm e comprimento total de 200 mm, sendo que o comprimento usinado foi de 100 mm e foram dados 20 passes com cada ferramenta. Os parâmetros de usinagem foram definidos buscando desgastar ao máximo possível os insertos (devido à pouca quantidade de amostra de aço 8640) dentro das especificações do fabricante. Diante disso, foi definida velocidade de corte de 250 m/min, profundidade de corte de 1 mm e avanço de 0,05 mm/volta. O processo de torneamento foi realizado sem a aplicação de fluidos de corte.

3.2.3 Avaliação do Desgaste da Ferramenta

A avaliação do desgaste das ferramentas foi realizada após o vigésimo passe de torneamento. Utilizou-se um microscópio óptico Olympus GX51 para observar a largura máxima do desgaste de flanco ($V_{BB\text{máx}}$) das ferramentas com o objetivo de comparar o efeito do tratamento criogênico em diversos tempos de imersão em relação ao inserto que não sofreu a têmpera sub-zero.

Cabe ressaltar que não foi avaliado o desgaste de cratera nas ferramentas, primeiramente devido a sua baixa ocorrência neste estudo e a limitação de visualização deste tipo de desgaste por microscopia óptica, devido a geometria da superfície de saída da ferramenta.

3.2.4 Análise Microestrutural

As análises de microestrutura foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL- FURG) e no laboratório de Metalografia da FURG

As análises microestruturas dos insertos de metal duro foram realizadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com auxílio da espectroscopia de dispersão de energia (EDS). As amostras foram analisadas em diferentes tempos de tratamento para investigar as alterações nas fases presentes e conjuntamente com os demais ensaios realizados avaliar sua influência nas propriedades mecânicas, principalmente a resistência ao desgaste e dureza.

3.2.5 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados no laboratório de engenharia de superfícies (Labsurf-FURG).

A macrodureza Vickers dos insertos foi medida com carga de 100 kgf, em diferentes pontos das superfícies buscando garantir representatividade dos resultados. Em cada amostra foram realizadas 5 medições de dureza e posteriormente foi feita sua média.

Os valores de dureza foram comparados entre as ferramentas tratadas em diferentes tempos de imersão e a não tratada, servindo como base adicional para discussão sobre as melhorias nas propriedades mecânicas ocorridas após a realização do tratamento criogênico.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

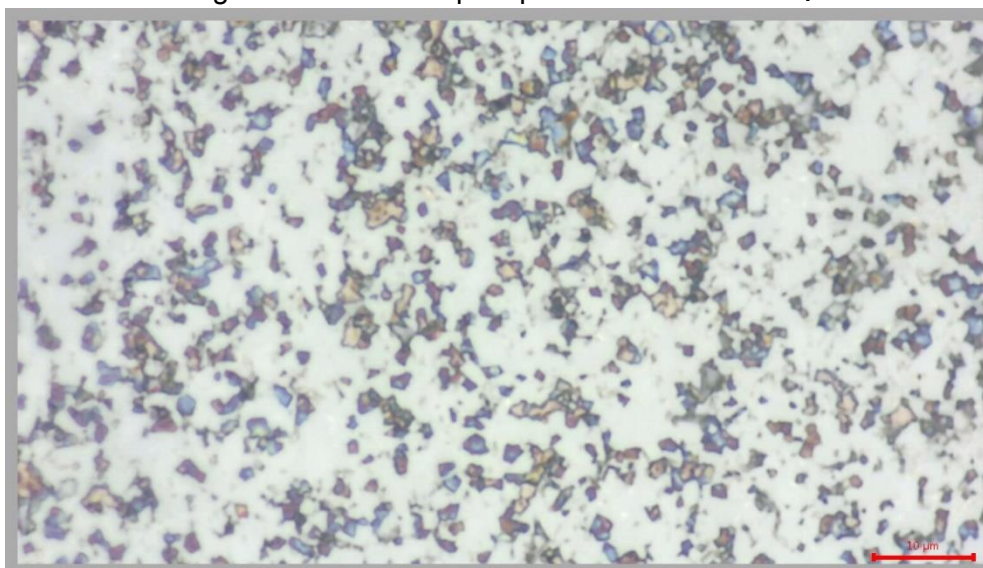
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados e a sua discussão com as referências usadas para o presente trabalho.

4.1 Análise Microestrutural por microscopia óptica e MEV

A figura 13 apresenta a imagem de microscopia óptica, da amostra da ferramenta de metal duro, sem tratamento criogênico, em que podemos observar que sua microestrutura apresenta três fases distintas: uma fase escura, uma acinzentada e outra clara. De acordo com Gill et. al (2012), a fase cinza é nomeada como fase η , parcela escura como fase β e a clara como fase α . Através do software ImageJ, foi possível fazer a análise de densidade das fases, utilizando o ROI Manager. As amostras foram comparadas em termos de área e média de cinza, o que permite fazer uma relação refletem as alterações microestruturais e as propriedades das fases presentes.

Utilizando o ImageJ a amostra da Figura 13, sem tratamento, serviu como referência, apresentando uma área significativa e uma média de cinza relativamente alta, indicando uma maior proporção de cobalto em relação ao carboneto de tungstênio.

Figura 13 - Microscopia óptica da amostra STC.

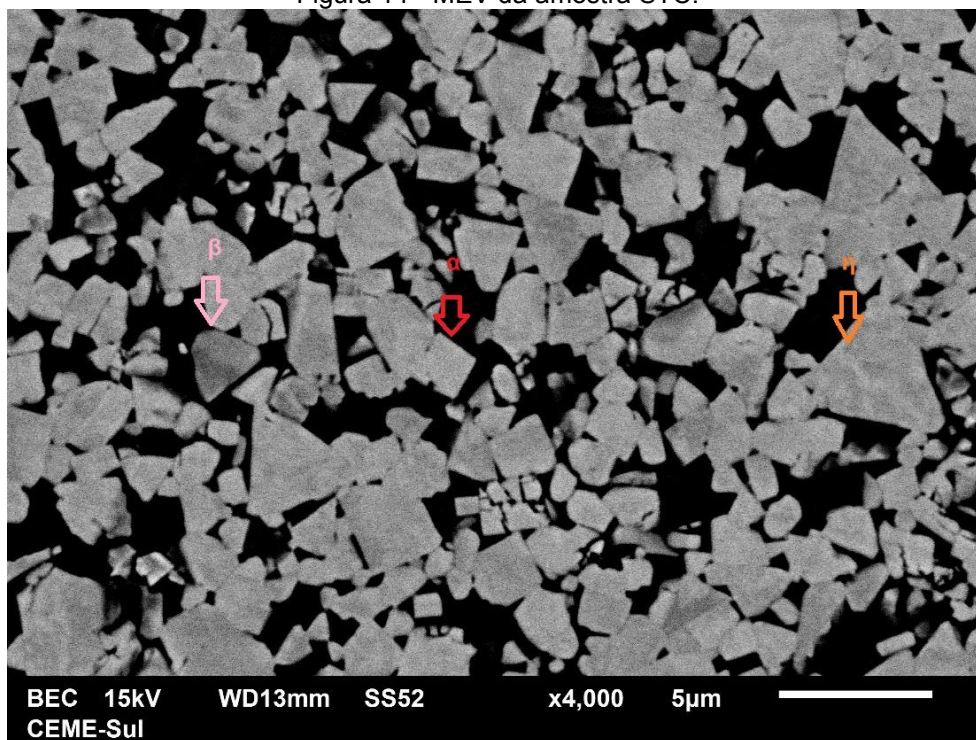


Fonte: Autor.

A foto de MEV apresentada na figura 14 ilustra de forma mais evidente as 3 fases distintas, podemos ver que a fase acinzentada aparece em menor quantidade,

se comparada com as outras duas fases presentes na imagem. Posteriormente, na análise de EDS, serão apresentados os elementos constituintes dessas fases, com as respectivas porcentagens, visto que na presente seção buscou-se avaliar a influência do tratamento criogênico na variação da densidade das diferentes fases.

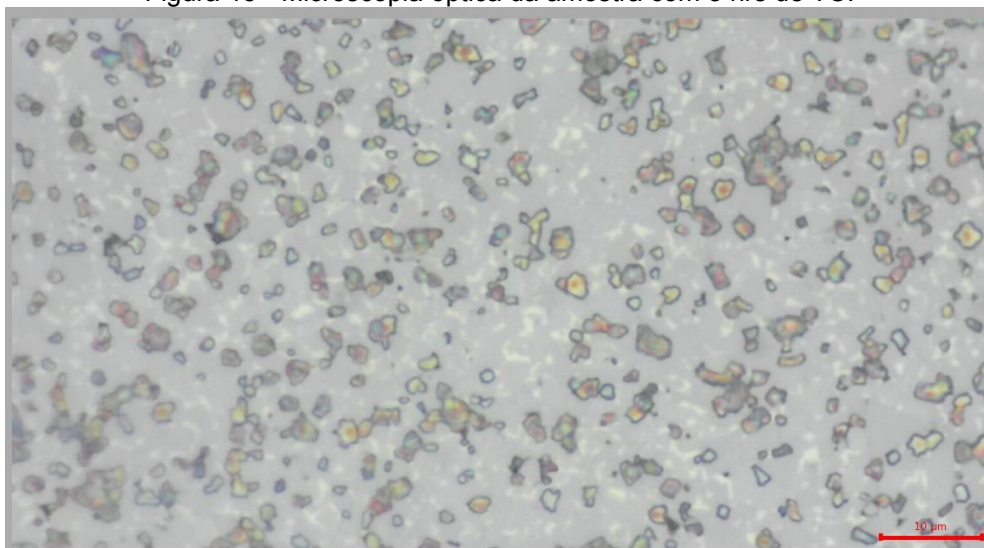
Figura 14 - MEV da amostra STC.



Fonte: Autor.

Na figura 15 já é possível observar em maior quantidade a presença da fase clara ao fundo. Essas mudanças visuais podem refletir redução da densidade da fase intermetálica η , de cor cinza. O tratamento criogênico de 8 horas parece estar promovendo uma alteração nas características das fases presentes, o que pode influenciar diretamente a resistência mecânica e a dureza do material, o que posteriormente foi comprovado pela medição de dureza Vickers.

Figura 15 - Microscopia óptica da amostra com 8 hrs de TC.

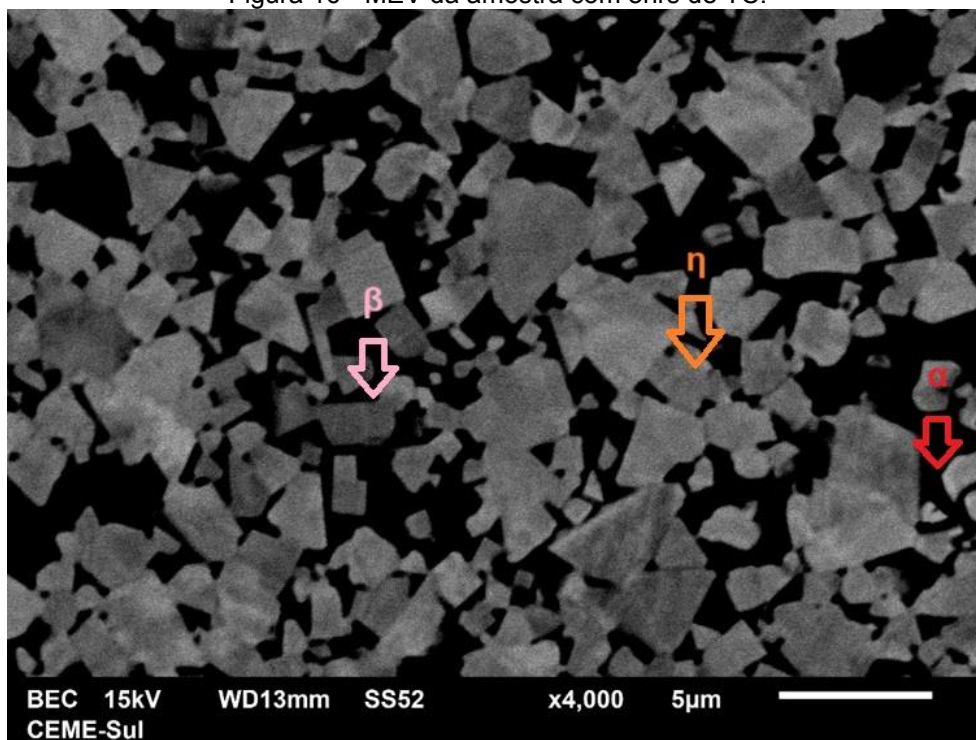


Fonte: Autor.

Ao comparar a amostra sem tratamento térmico com a amostra após 8 horas de criogênia utilizando o software ImageJ, nota-se uma redução 15% da fase η , sendo que é visível o aumento da fase α o que pode gerar elevação na concentração de carboneto de Tungstênio (WC) e ao aumento relativo da fase intermetálica β (WTiC), que é mais escura. Segundo Gao et. al (2024) o aumento da concentração dessas duas fases contribui para a elevação da dureza do inserto.

O tratamento térmico criogênico de 8 horas resultou em uma diminuição da fase η (cinza), conforme observado na figura 16, que é rica em elementos como tungstênio e cobalto, e de acordo com Gill et. al (2013) está associada à maior dureza e resistência ao desgaste. Essas alterações indicam um novo equilíbrio entre as fases, o que pode favorecer melhorias nas propriedades mecânicas da ferramenta, como maior dureza e resistência ao desgaste.

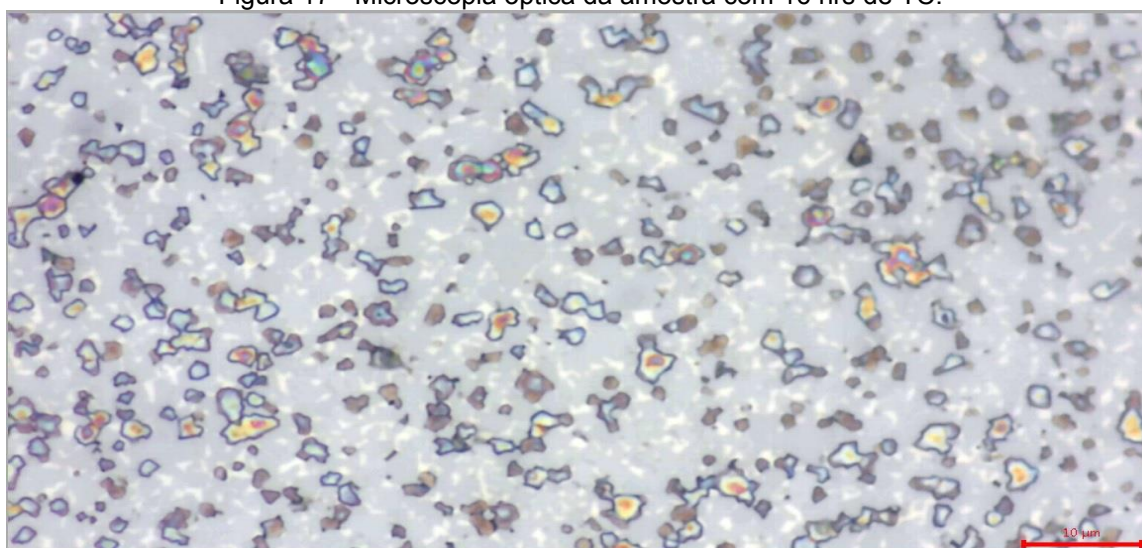
Figura 16 - MEV da amostra com 8hrs de TC.



Fonte: Autor.

Após 16 horas, conforme observa-se na figura 17 há uma redução de 25% a média de cinza. A drástica redução da área sugere uma transformação significativa na microestrutura, com a fase de cobalto diminuindo e os carbonetos, de tungstênio e titânio, se tornando mais proeminentes, o que permite estimar um aumento de dureza.

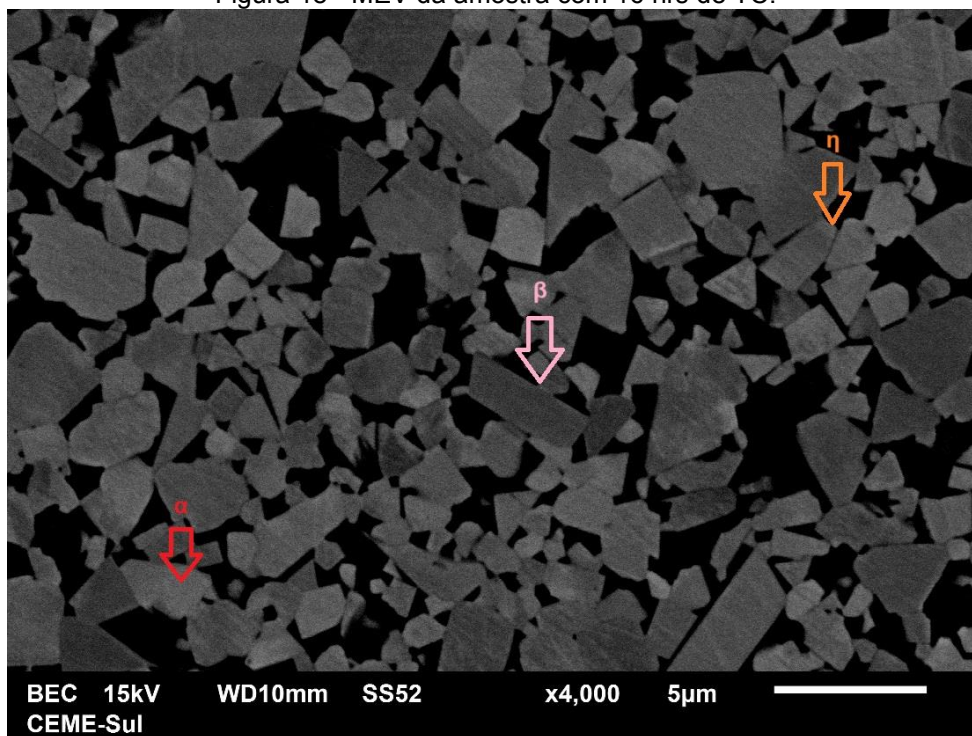
Figura 17 - Microscopia óptica da amostra com 16 hrs de TC.



Fonte: Autor.

Ao analisar a amostra tratada por 16 horas de imersão em comparação à de 8 horas, a diminuição da fase η continua (Figura 18), sugere que o tratamento ainda está promovendo mudanças significativas nas características do material.

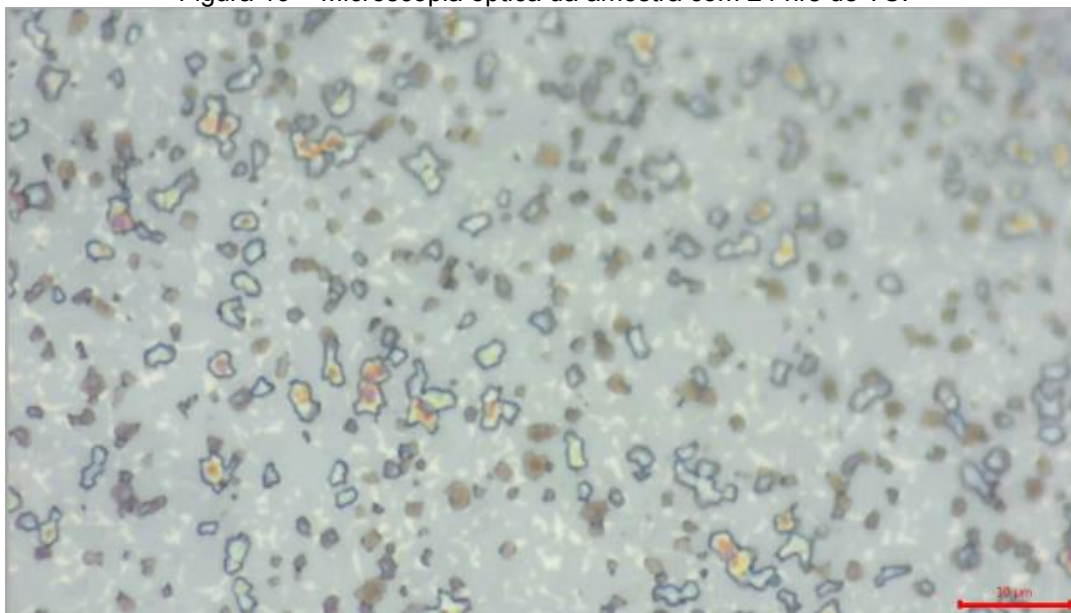
Figura 18 - MEV da amostra com 16 hrs de TC.



Fonte: Autor.

Nos insertos tratados com 24 horas de imersão continuamos observando uma redução na área cinza, agora de 15%, e também um aumento na densidade da fase escura, acompanhado de um pequeno refinamento de grão, conforme observa-se na figura 19. Essas mudanças sugerem que a concentração de carboneto de tungstênio está mais proeminente, pois é o principal componente da fase β , e a redução do tamanho de grão têm a tendência de continuar a elevar a dureza do material.

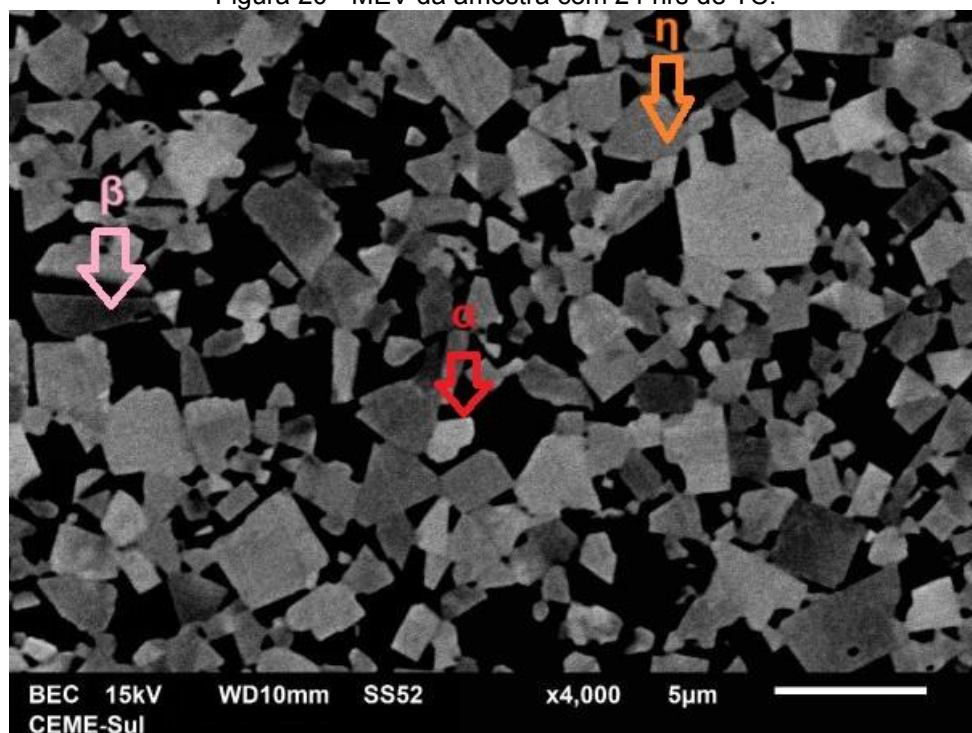
Figura 19 – Microscopia óptica da amostra com 24 hrs de TC.



Fonte: Autor.

A amostra tratada por 24 horas de imersão apresenta significativas alterações microestruturais, conforme figura 20, com uma contínua diminuição da fase η , indicando também um refinamento da matriz de carboneto de tungstênio (fase escura).

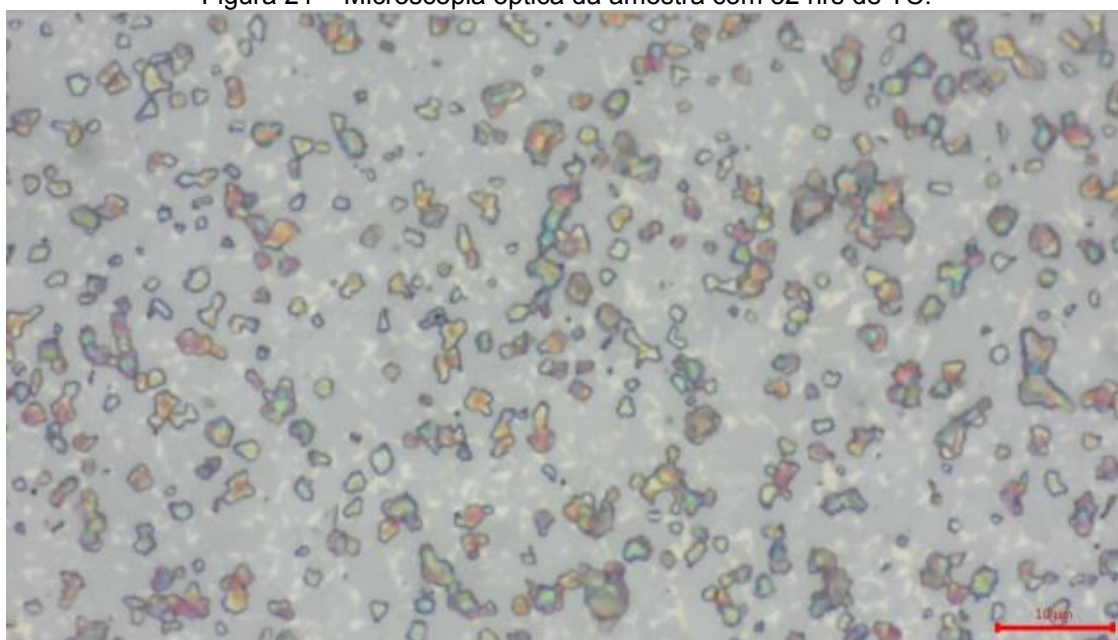
Figura 20 - MEV da amostra com 24 hrs de TC.



Fonte: Autor.

Na comparação entre as amostras de 24 horas e 32 horas de TC, amostra com maior tempo de imersão apresenta uma diminuição de 3% na fase η , mostrando uma tendência de começo de estabilização desta fase, conforme apresentado pela figura 21, com auxílio do software ImageJ. A estabilização da área de cinza pode refletir um leve equilíbrio na proporção de carboneto de tungstênio em relação ao cobalto, o que pode ainda gerar algum aumento de dureza do material, mas principalmente começa a definir a tenacidade da ferramenta, conforme indicado nos estudos realizados por Padmakumar et al. (2015).

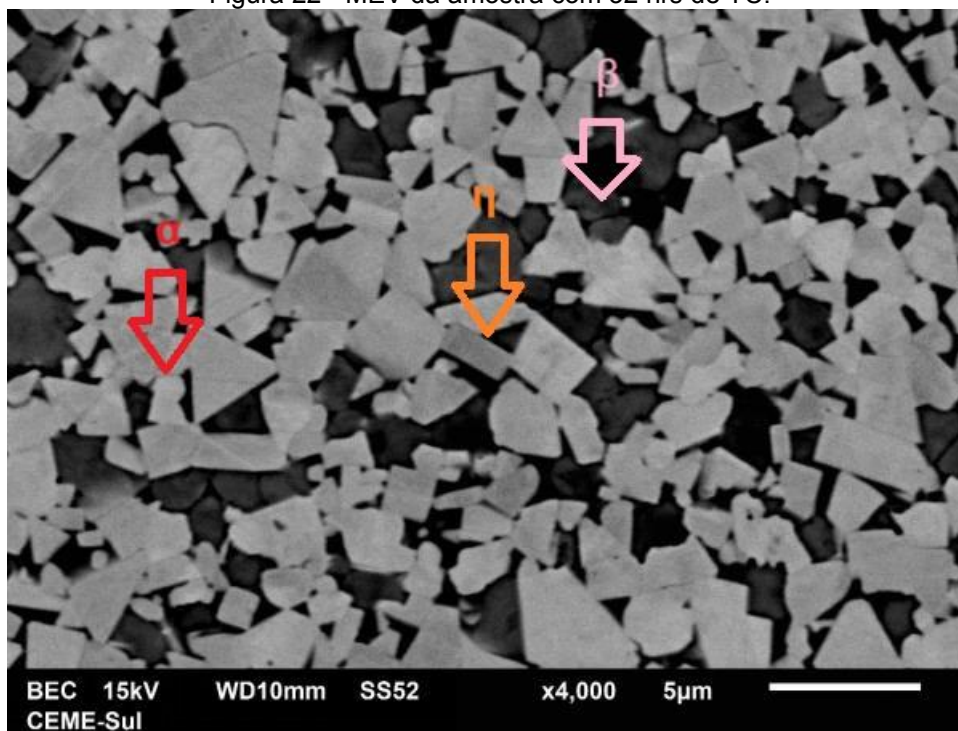
Figura 21 – Microscopia óptica da amostra com 32 hrs de TC.



Fonte: Autor.

A amostra de 32 horas, como é possível observar na figura 22, mostra uma estabilização entre as fases, com alguma possibilidade de aumento de dureza, mesmo em pequena percentagem, devido ao aumento da concentração de algum carboneto duro.

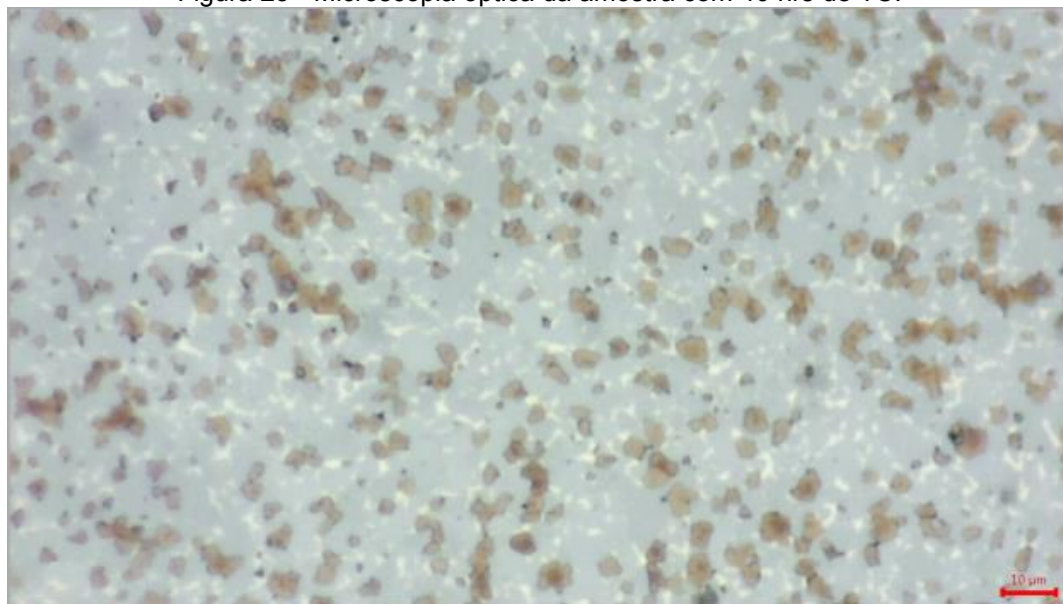
Figura 22 - MEV da amostra com 32 hrs de TC.



Fonte: Autor.

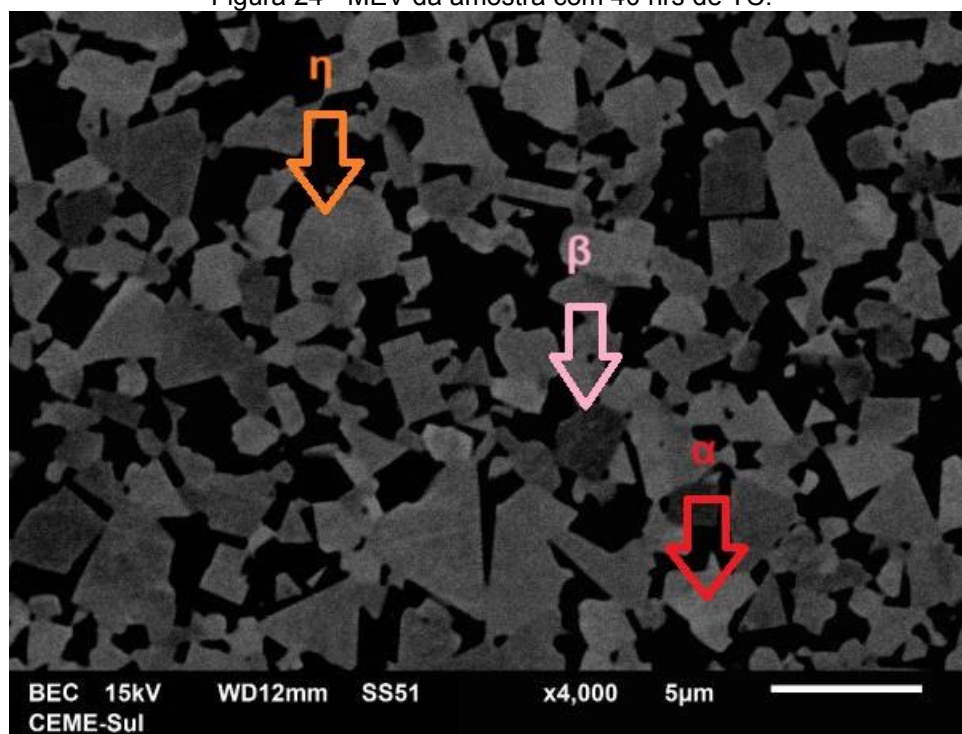
As figuras 23 e 24 apresentam na MO e no MEV das amostras com 40 horas de TC, respectivamente, uma tendência de estabilidade da microestrutura após o tratamento prolongado. A média de cinza constante, segundo a contabilização do software ImageJ sugere que a redistribuição das fases atingiu um equilíbrio, com a fase de carboneto de tungstênio mantendo sua proporção em relação ao cobalto. Esses resultados aparentam indicar, devido a estabilidade na microestrutura em relação ao tempo de imersão de 32 horas, que o prolongamento do tratamento térmico não resultaria em melhorias nas propriedades mecânicas do material. Segundo Molinari et. al (2001) períodos de tempo prolongados nos tratamentos criogênicos não obtém nenhum efeito significativo nas propriedades mecânicas e o tempo máximo de imersão não deve exceder 35 horas.

Figura 23 - Microscopia óptica da amostra com 40 hrs de TC.



Fonte: Autor.

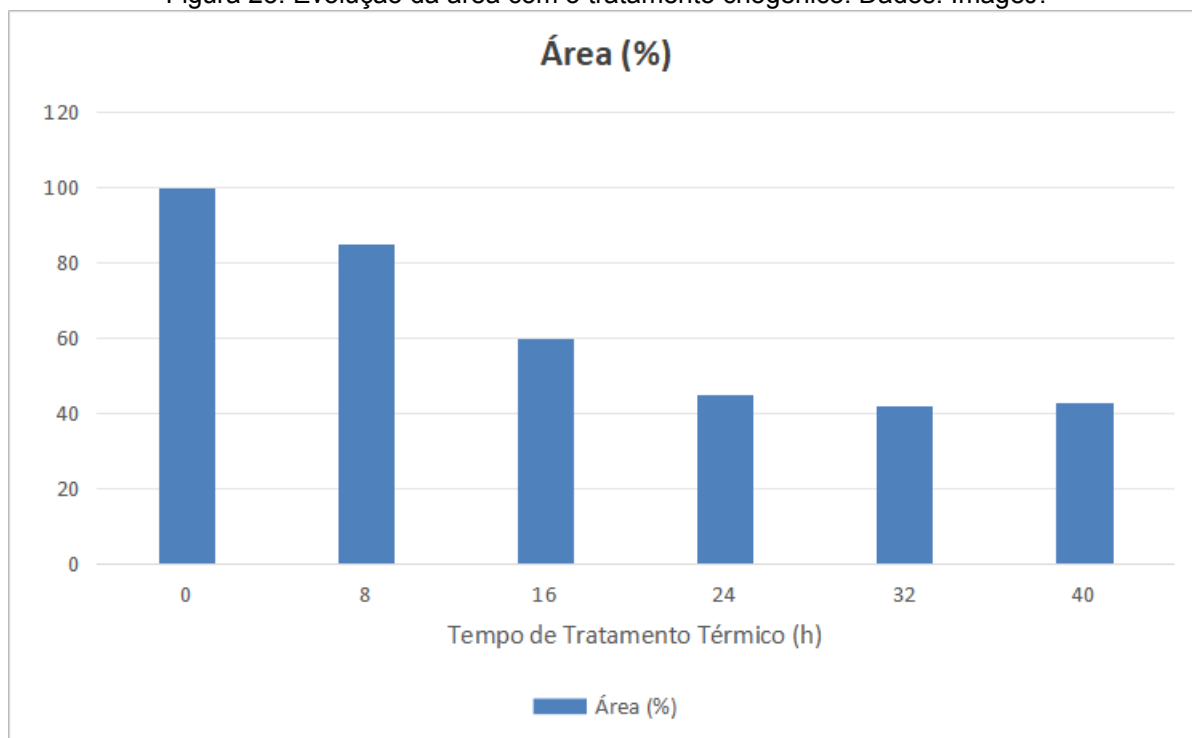
Figura 24 - MEV da amostra com 40 hrs de TC.



Fonte: Autor.

A área representada na figura 25 indica a quantidade de cada fase cinza em cada tempo de imersão diferente de TC. A redução da fase cinza sugere uma diminuição na concentração de cobalto, representado pelo aumento da proporção de fase escura e clara, majoritariamente composta de carbonetos.

Figura 25: Evolução da área com o tratamento criogênico. Dados: ImageJ.

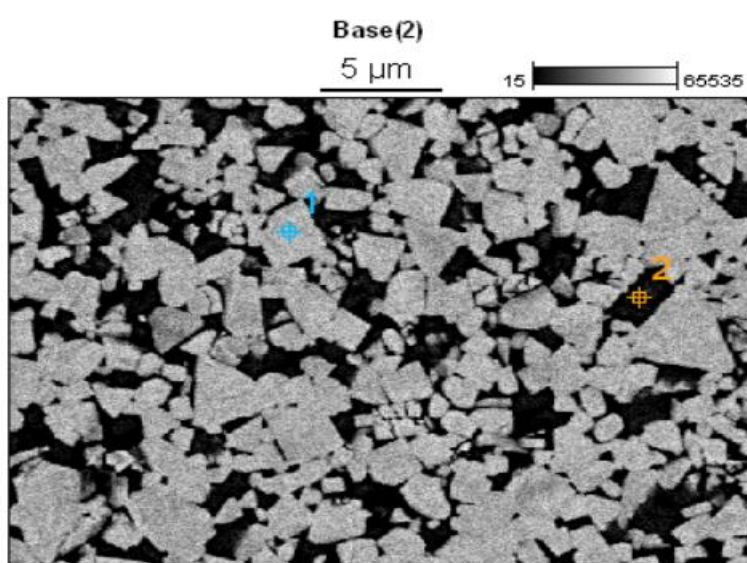


Fonte: Autor.

4.2 Análise das Fases Por EDS.

A análise de EDS, na amostra sem tratamento criogênico, conforme figura 26, revela a presença predominante de cobalto e carboneto de tungstênio, com uma média de cinza relativamente alta, indicando uma fase mais clara.

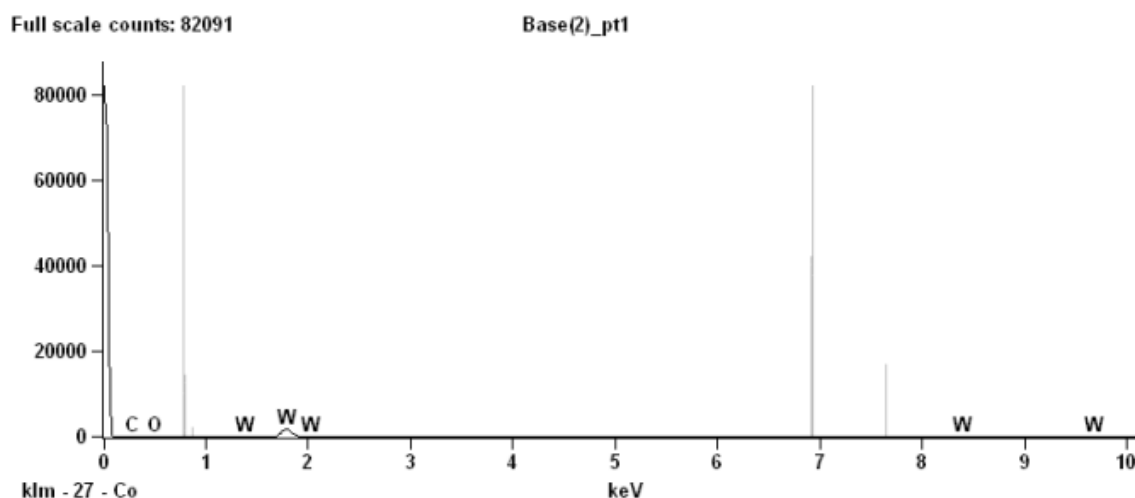
Figura 26 - EDS da amostra STC.



Fonte: Autor.

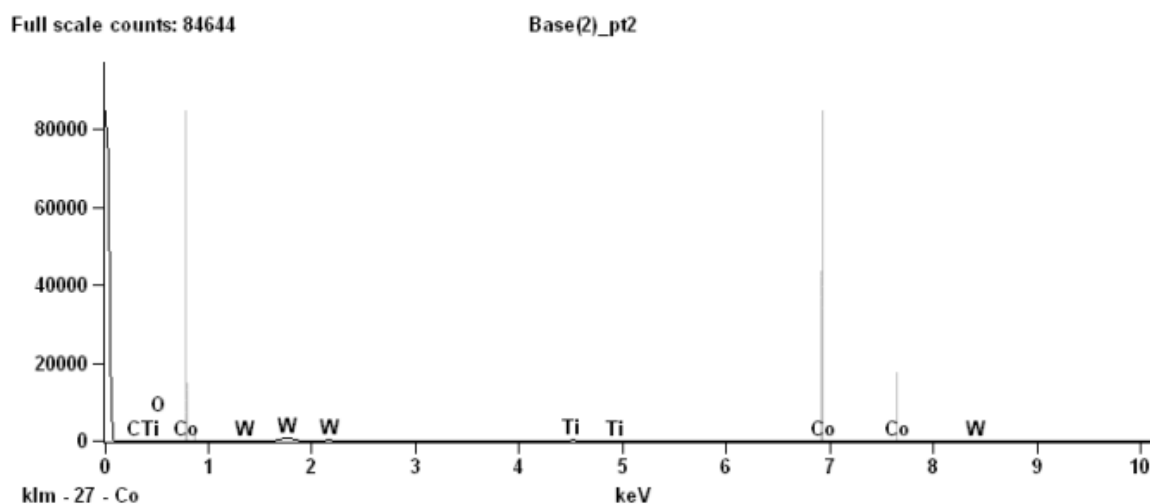
O espectro mostra picos de cobalto (Co), carboneto de tungstênio (WC) e Titânio (TiC), sendo os dois últimos predominantes e o Cobalto o agente ligante do inserto. No espectro de EDS do ponto 1 da amostra STC, figura 27, observa-se alta concentração de cobalto (Co) e tungstênio (W), com significativa presença de carbono (C), indicando uma estrutura rica em carboneto de tungstênio (WC). No ponto 2, figura 28, há um aumento na proporção de carbono e leve diminuição de cobalto, além da presença de titânio (Ti).

Figura 27 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra STC.



Fonte: Autor.

Figura 28 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra STC.



Fonte: Autor.

A tabela 2 apresenta a composição percentual dos elementos na amostra STC, destacando a predominância de cobalto e tungstênio no ponto 1, enquanto o ponto 2 revela um aumento de carbono e a presença de titânio.

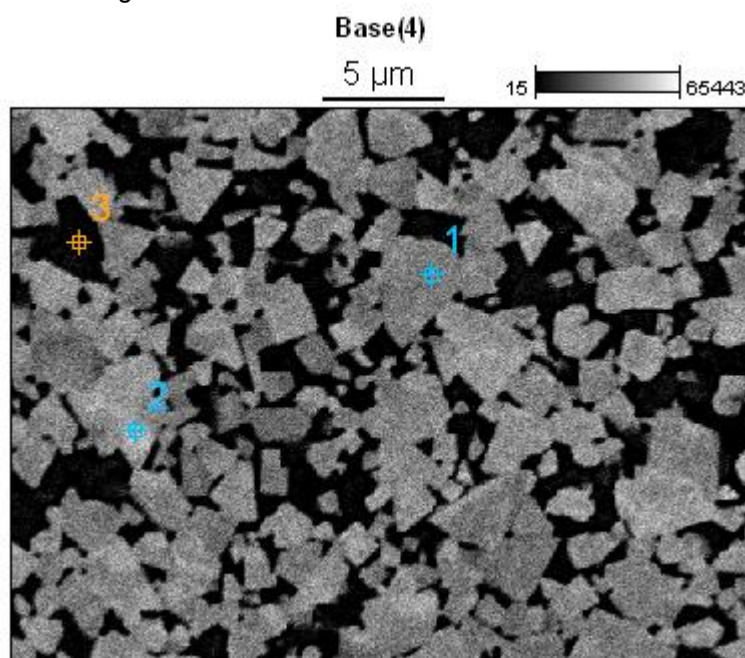
Tabela 2 – Composição das diferentes fases da amostra STC por peso.

	C-K	O-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(2)_pt1	4.55	0.72			94.74
Base(2)_pt2	5.15	5.32	19.56	0.99	68.98

Fonte: Autor.

Na figura 29, após 8 horas de imersão criogênica, a análise de EDS mostra uma significativa redistribuição das fases. A média de cinza apresenta uma redução, refletindo um escurecimento da amostra, o que indica um aumento na proporção de carboneto de tungstênio (ponto escuro do EDS) e o surgimento de uma terceira fase com percentual de carbonetos superior a 90%. Essa mudança sugere que o tratamento criogênico começa a promover uma variação na densidade dos carbonetos, potencialmente aumentando a dureza do material.

Figura 29 - EDS da amostra com 8 horas de TC.

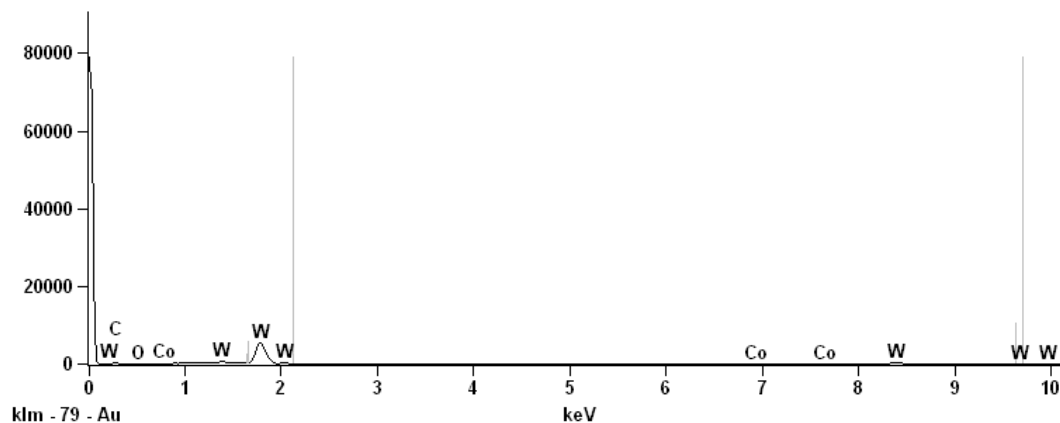


Fonte: Autor.

As figuras 30, 31 e 32 apresentam os espectros de EDS da amostra de 8 horas de TC para cada ponto. No ponto 1 há predominância de cobalto e tungstênio,

enquanto o ponto 2 mostra uma leve variação na proporção de carbono e cobalto. O ponto 3, por sua vez, apresenta aumento na presença de tungstênio.

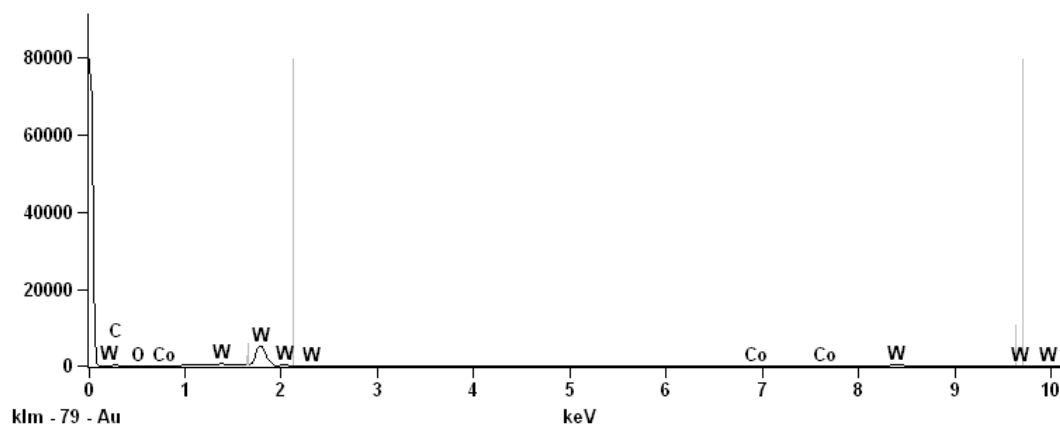
Figura 30 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 8 horas de TC.
Full scale counts: 78912 Base(4)_pt1



klm - 79 - Au
Fonte: Autor.

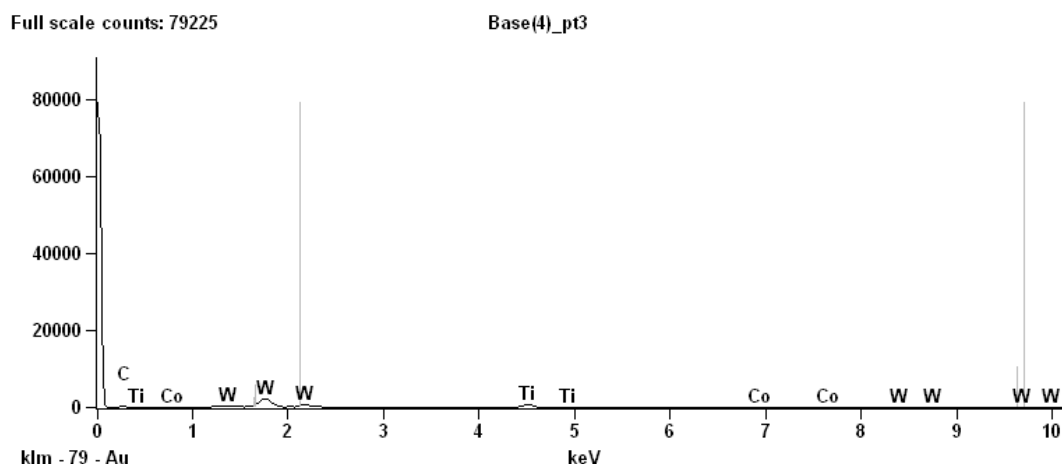
Figura 31 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 8 horas de TC.

Full scale counts: 79611 Base(4)_pt2



klm - 79 - Au
Fonte: Autor.

Figura 32 - Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 8 horas de TC.



Fonte: Autor.

Na composição da amostra com 8 horas de tratamento térmico (TC) mostram variações na composição, tabela 3. No Ponto 1, há predominância de cobalto e carboneto de tungstênio. No Ponto 2, observa-se um aumento de carbono, sugerindo maior concentração de carboneto de tungstênio. O Ponto 3 apresenta uma composição com carbonetos de tungstênio e titânio, o que colabora para o aumento da dureza do inserto.

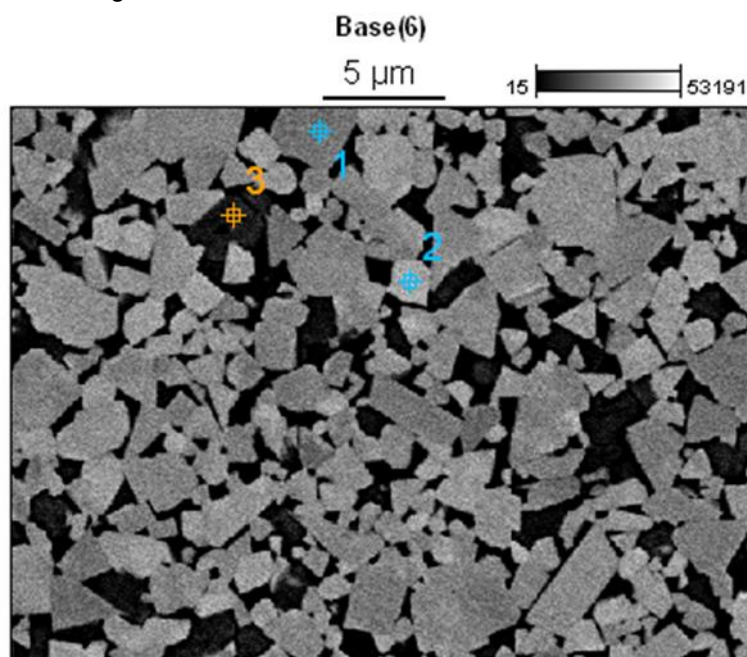
Tabela 3 – Composição das diferentes fases da amostra com 8 horas de TC por peso.

	C-K	O-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(4)_pt1	3.51	0.72		0.49	95.28
Base(4)_pt2	3.82	0.67		0.27	95.25
Base(4)_pt3	5.24		19.85	0.59	74.32

Fonte: Autor.

Após 16 horas de TC, figura 33, observa-se um leve aumento na proporção de carboneto de tungstênio, que aparece na imagem como a fase clara. A fase η continua a diminuir. Essas condições refletem um aumento da dureza sem comprometer significativamente a resistência, como também sugere Saini et al. (2020).

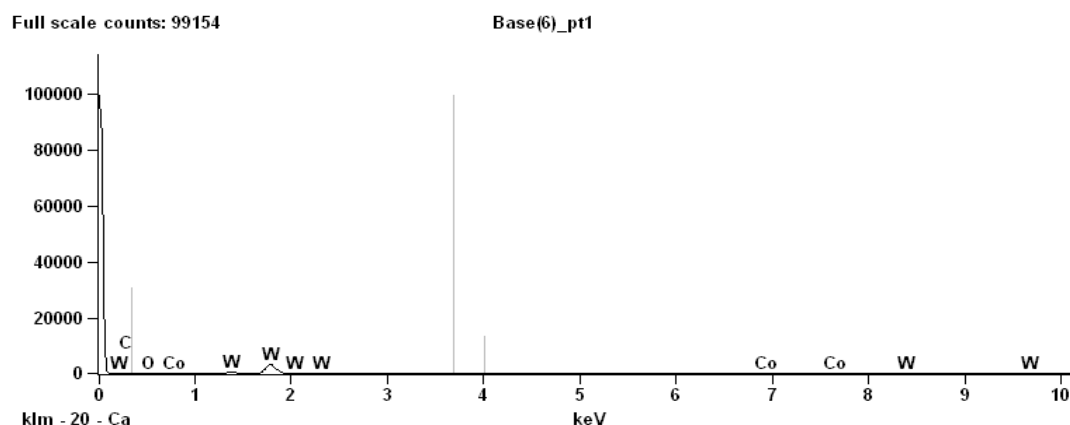
Figura 33 - EDS da amostra com 16 horas de TC.



Fonte: Autor.

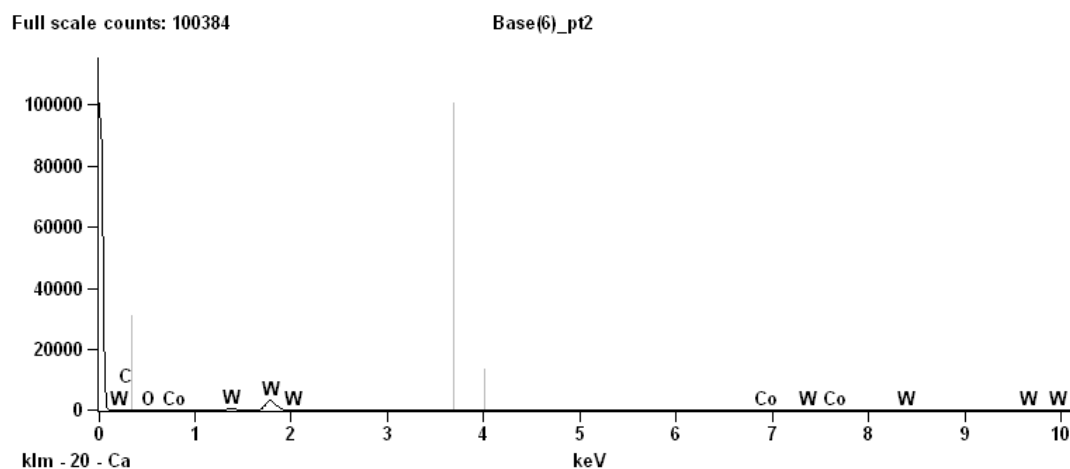
As figuras 34, 35, 36 e a tabela 4 apresentam os resultados do espectro de EDS e da tabela de composição por peso nas amostras de 16 horas de tratamento, em que no ponto 1 observa-se uma alta concentração de tungstênio (W) e carbono (C), indicando a presença do carboneto de tungstênio (WC). Também é possível visualizar alguns picos pequenos da fase ligante do inserto, o cobalto (Co). No ponto 2, há um leve aumento de cobalto e redução do carboneto de tungstênio, em relação a amostra que sofreu TC de 8 horas, enquanto no ponto 3 há um leve aumento de Carbono, titânio e uma pequena redução da % em peso do cobalto.

Figura 34 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 16 horas de TC.



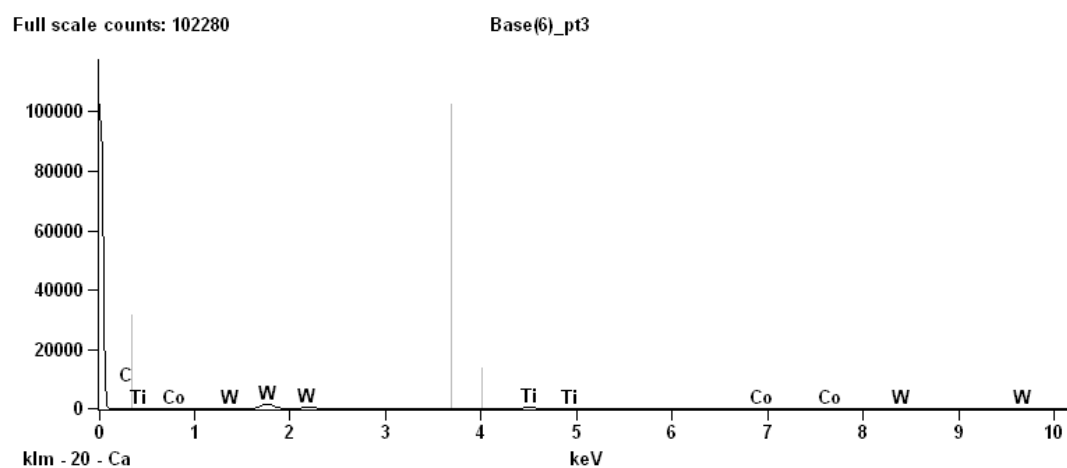
Fonte: Autor.

Figura 35 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 16 horas de TC.



Fonte: Autor.

Figura 36 - Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 16 horas de TC.



Fonte: Autor.

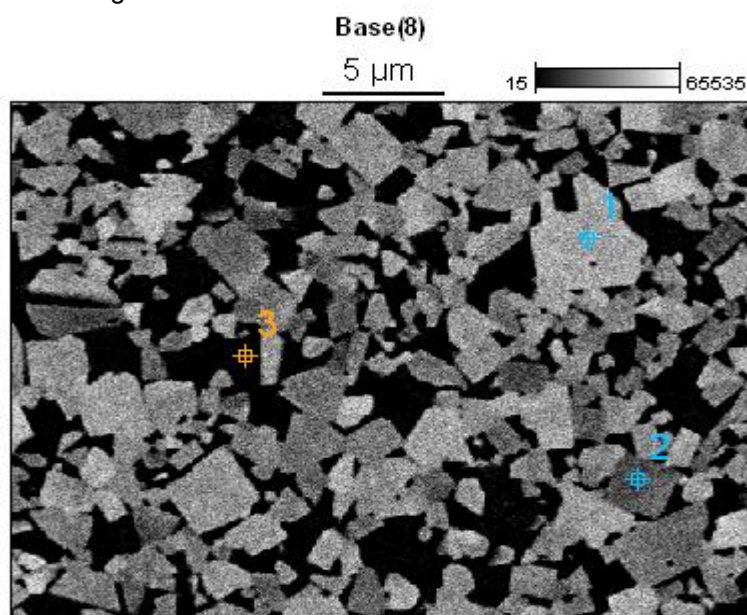
Tabela 4 – Composição das diferentes fases da amostra com 16 horas de TC por peso.

	C-K	O-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(6)_pt1	3.58	0.90		0.61	94.92
Base(6)_pt2	4.15	0.67		0.87	94.31
Base(6)_pt3	6.15		19.31	0.41	74.13

Fonte: Autor.

Na figura 37 é possível visualizar que, na amostra tratada por 24 horas ocorre um aumento de concentração de grãos da fase α (clara), rica em carboneto de tungstênio, que promove maior dureza e resistência ao desgaste.

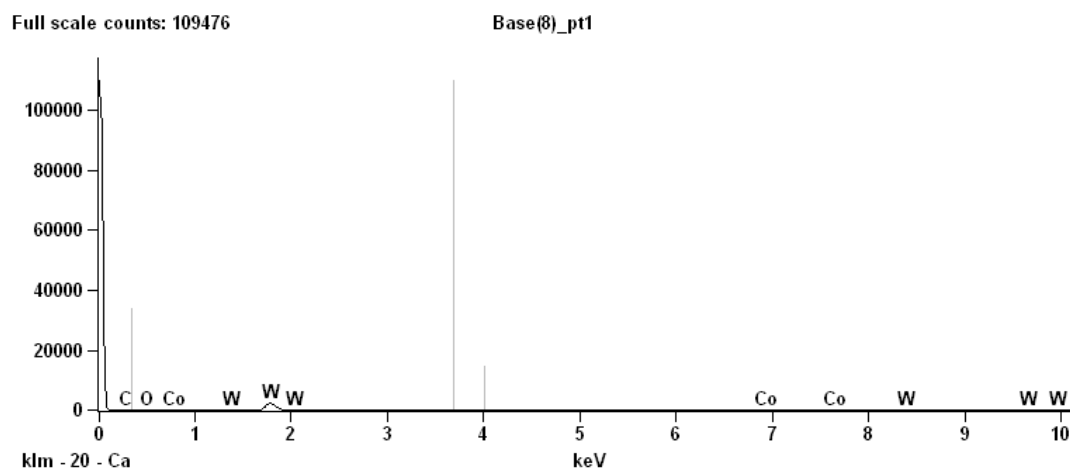
Figura 37 - EDS da amostra com 24 horas de TC.



Fonte: Autor.

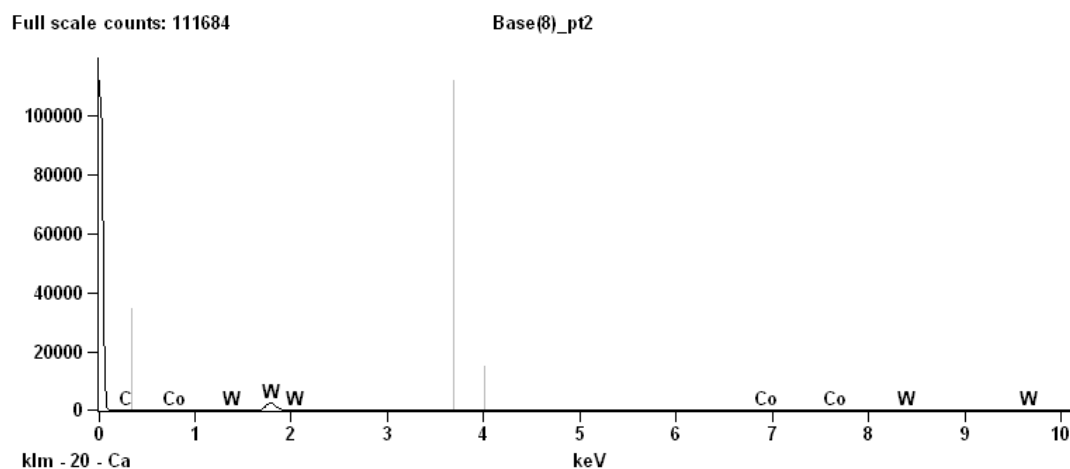
Comparando a amostra de 24 horas de TC com a de 16 horas, pode-se visualizar, segundo as figuras 38, 39, 40 e a tabela 5, que a presença de carboneto de tungstênio aumentou em todos os pontos analisados, enquanto no ponto 3 houve uma redução no percentual de cobalto e titânio.

Figura 38 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 24 horas de TC.



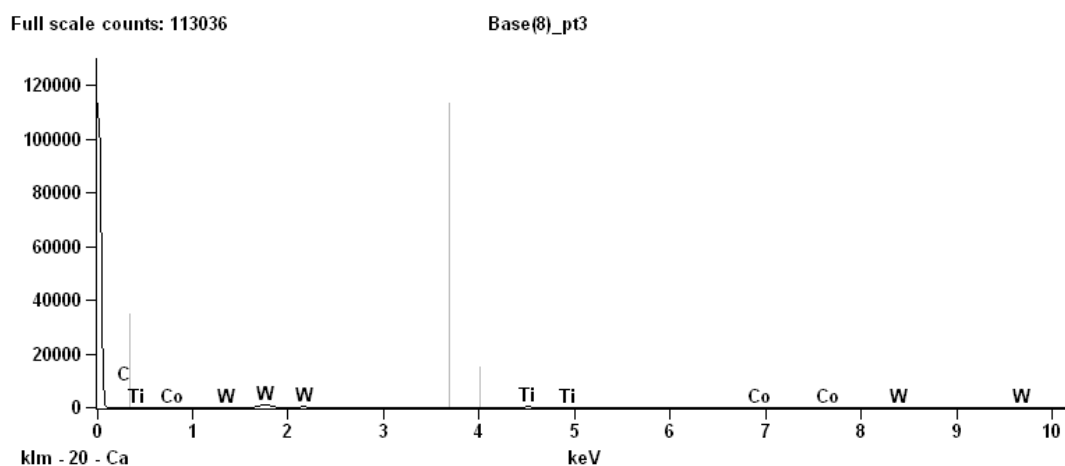
Fonte: Autor.

Figura 39 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 24 horas de TC.



Fonte: Autor.

Figura 40 - Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 24 horas de TC.



Fonte: Autor.

Tabela 5 – Composição das diferentes fases da amostra com 24 horas de TC por peso.

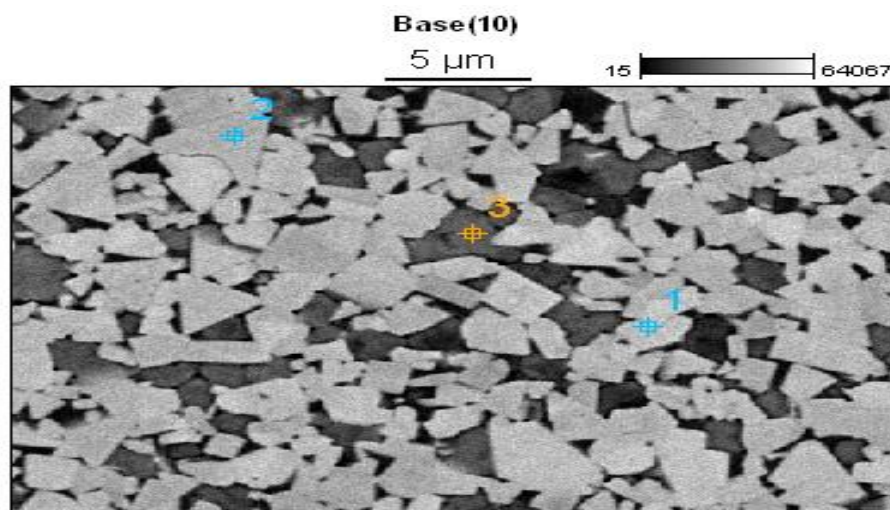
	C-K	O-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(8)_pt1	3.18	0.49		0.33	95.99
Base(8)_pt2	3.35			0.60	96.05
Base(8)_pt3	4.27		18.92	0.91	75.90

Fonte: Autor.

Analisando a figura 41, do EDS da amostra com 32 horas de TC percebe-se que a fase α aparentemente superou a concentração da fase η , conferindo um

pequeno aumento de dureza, que pode ainda refletir em algum ganho na resistência ao desgaste. Como a fase α é primariamente composta por grãos de WC a elevação da dureza e da resistência ao desgaste é maximizada quanto maior a presença desta fase dura.

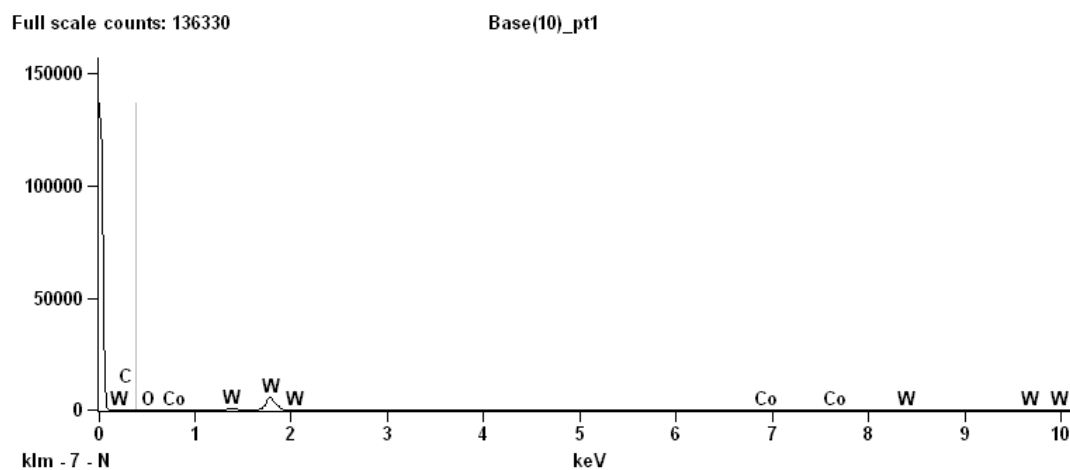
Figura 41 - EDS da amostra com 32 horas de TC.



Fonte: Autor.

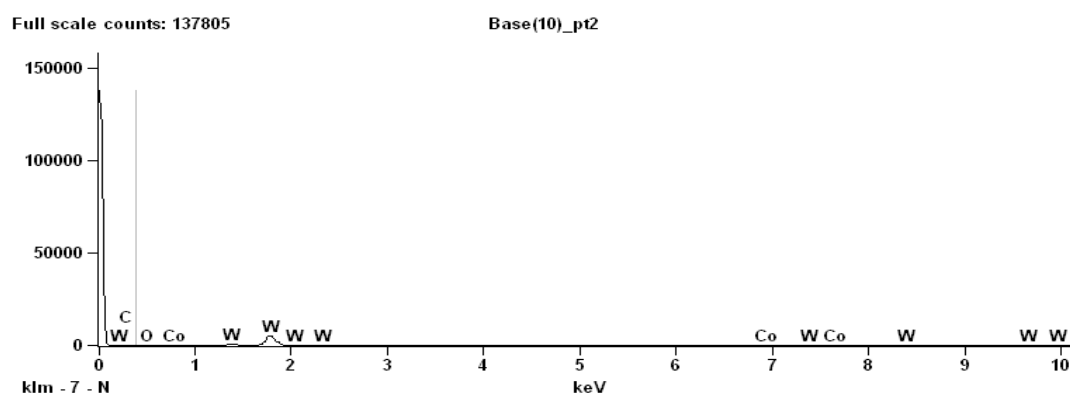
Comparando o ponto 1 da tabela 6 das amostras de 24 e 32 horas (espectro do EDS da figura 42), ambas apresentam alta concentração de tungstênio (W), mas a amostra de 32 horas mostra uma menor quantidade de cobalto (Co), o que pode indicar uma maior dureza que a amostra anterior. No ponto 2 da mesma tabela (espectro do EDS da figura 43) a presença de cobalto é inexistente e a proporção de carbonetos de tungstênio se mantém equilibrada, novamente sugerindo uma possibilidade de aumento de dureza. No ponto 3 (espectro do EDS da figura 44) há um aumento no percentual em peso de todos os elementos, indicando um comportamento similar dessa fase com a da amostra de 24 horas de TC. Segundo Molinari et al. (2001) o tempo de 32 horas de criogênia representa a etapa final de transformações possíveis de se obter, nas propriedades mecânicas, com esse tipo de tratamento.

Figura 42 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 32 horas de TC.



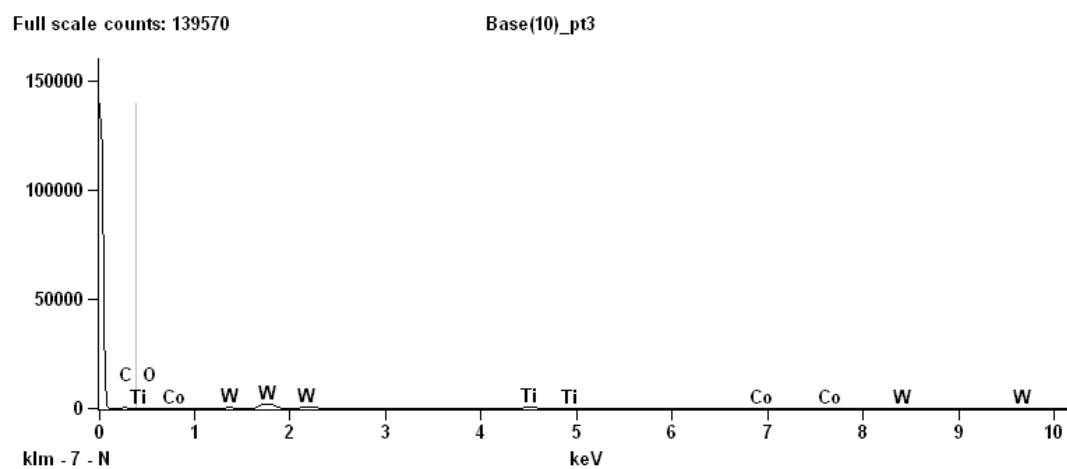
Fonte: Autor.

Figura 43 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 32 horas de TC.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 32 horas de TC.



Fonte: Autor.

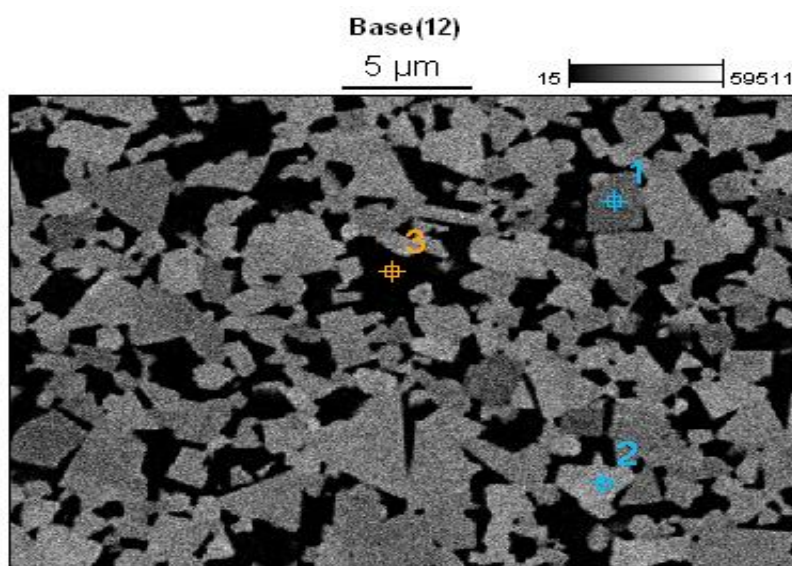
Tabela 6 – Composição das diferentes fases da amostra com 32 horas de TC por peso.

	C-K	O-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(10)_pt1	3.67	0.75		0.24	95.35
Base(10)_pt2	3.86	0.77		0.01	95.36
Base(10)_pt3	5.73	1.17	19.67	0.60	72.82

Fonte: Autor.

Após 40 horas, como é possível analisar na figura 45, há estabilização das fases, o que pode indicar que os efeitos dos tratamentos criogênicos já não são mais efetivos. Isso pode ser explicado devido ao fato de que o tempo de imersão é o segundo fator principal de significância para maximização da resistência ao desgaste (Paulin, 1993), e é possível supor que nesse tempo analisado o efeito do TC não seja mais sentido pelas amostras.

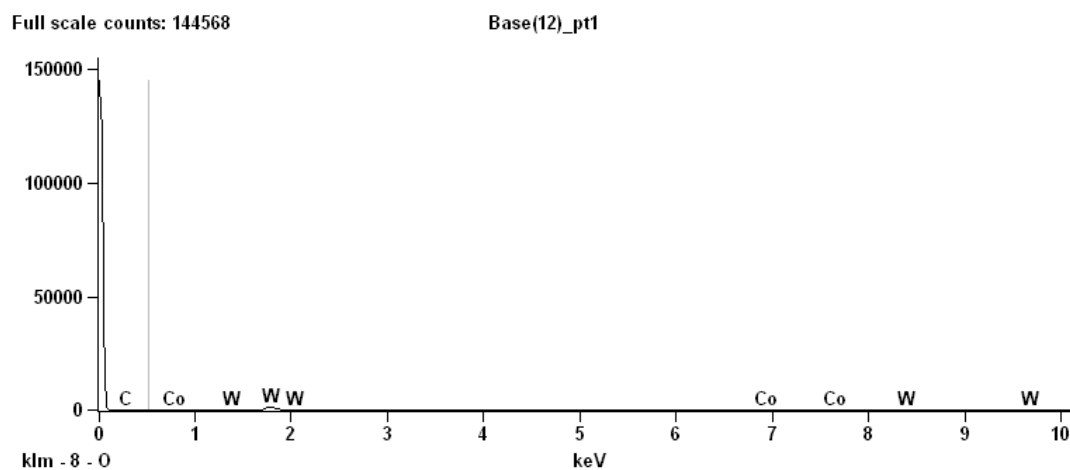
Figura 45 - EDS da amostra com 40 horas de TC.



Fonte: Autor.

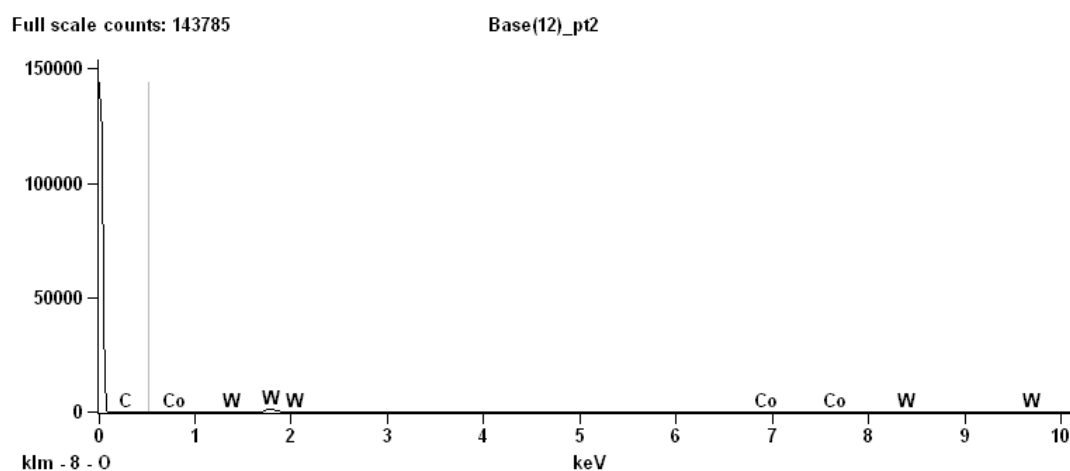
Na amostra de 40 horas, o ponto 1 mostra alta concentração de tungstênio (W), enquanto o cobalto (Co) é inexistente, assim como ocorre no ponto 2. No ponto 3, há aumento excessivo de carbono, cobalto e titânio, enquanto o tungstênio não foi contabilizado, conforme é possível observar nas figuras 46 a 48, e pode indicar um aumento da tenacidade e consequente perda de dureza.

Figura 46 - Espectro do EDS no ponto 1 da amostra com 40 horas de TC.



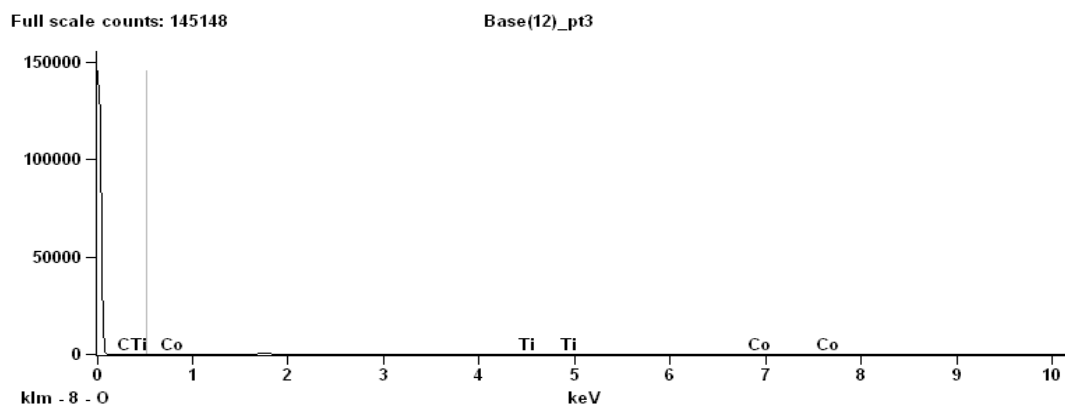
Fonte: Autor.

Figura 47 - Espectro do EDS no ponto 2 da amostra com 40 horas de TC.



Fonte: Autor.

Figura 48 – Espectro do EDS no ponto 3 da amostra com 40 horas de TC.



Fonte: Autor.

Na tabela 7 da amostra com 40 horas de TC, o ponto 1 continua a evidenciar a predominância do carboneto de tungstênio, enquanto no ponto 2 nota-se a ausência de cobalto, ao passo que no ponto 3 indica que há o local selecionado há uma grande quantidade de carboneto de titânio.

Tabela 7 – Composição das diferentes fases da amostra com 40 horas de TC por peso.

	C-K	Ti-K	Co-K	W-M
Base(12)_pt1	2.60		0.00	97.40
Base(12)_pt2	4.03		0.00	95.97
Base(12)_pt3	15.50	79.01	5.49	

Fonte: Autor.

4.3 Medição da dureza Vickers (Macro)

A média de dureza Vickers dos insertos de metal duro, conforme apresentado na tabela 8, em que foram realizadas 5 medições para cada amostra, demonstra um aumento significativo com o tempo de tratamento térmico criogênico. Inicialmente, a dureza é moderada na amostra sem tratamento, mas após 8 horas de imersão, observa-se um aumento, refletindo a redistribuição das fases microestruturais, onde a fase de cobalto diminui e a de carboneto de tungstênio (WC) se torna mais proeminente. Com 16 horas de tratamento, a dureza continua a aumentar, indicando melhorias nas propriedades mecânicas, e o ponto culminante é alcançado após 32 horas, onde a média de dureza Vickers atinge seu pico, atribuído à otimização da microestrutura que favorece a resistência ao desgaste e a dureza do material. Após 32 horas, a dureza se estabiliza, sugerindo que o tratamento térmico atinge o equilíbrio, resultado próximo ao encontrado nos estudos de Akgun et. al (2021).

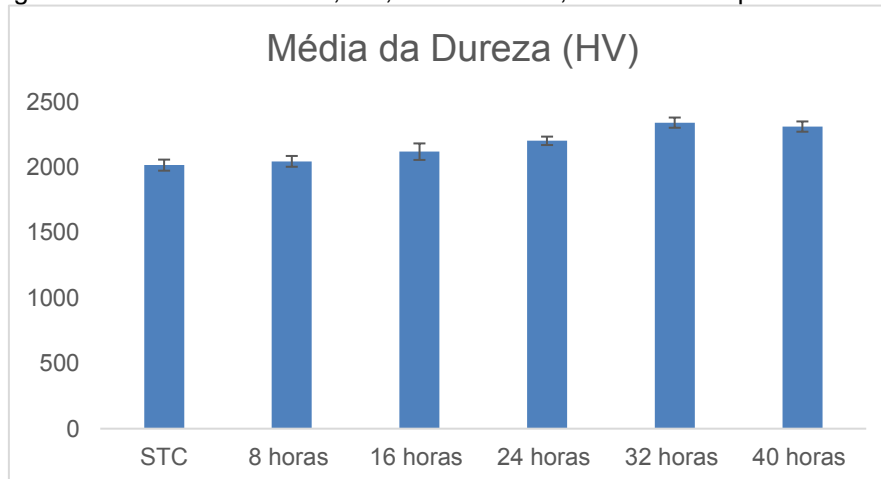
Tabela 8 - Valores de dureza Vickers dos insertos com diferentes tempos de TC.

Dureza (HV) Tempo de TC	1	2	3	4	5	Média da dureza
STC	2070	2040	1968	1980	2026	2016
8h TC	2075	2102	2009	2030	2011	2045
16h TC	2107	2079	2182	2186	2043	2119
24h TC	2241	2186	2201	2159	2225	2202
32h TC	2379	2288	2349	2316	2375	2341
40h TC	2320	2374	2286	2301	2274	2311

Fonte: Autor.

As análises realizadas nos insertos revelaram uma clara relação entre o aumento da fase de carboneto de tungstênio e titânio ao longo do TC e o aumento da dureza dos insertos, de 15% no tempo de imersão de 32 horas, em relação a amostra STC, conforme ilustra a figura 49.

Figura 49 – Média de dureza, HV, das amostras, conforme tempo de imersão.



Fonte: Autor.

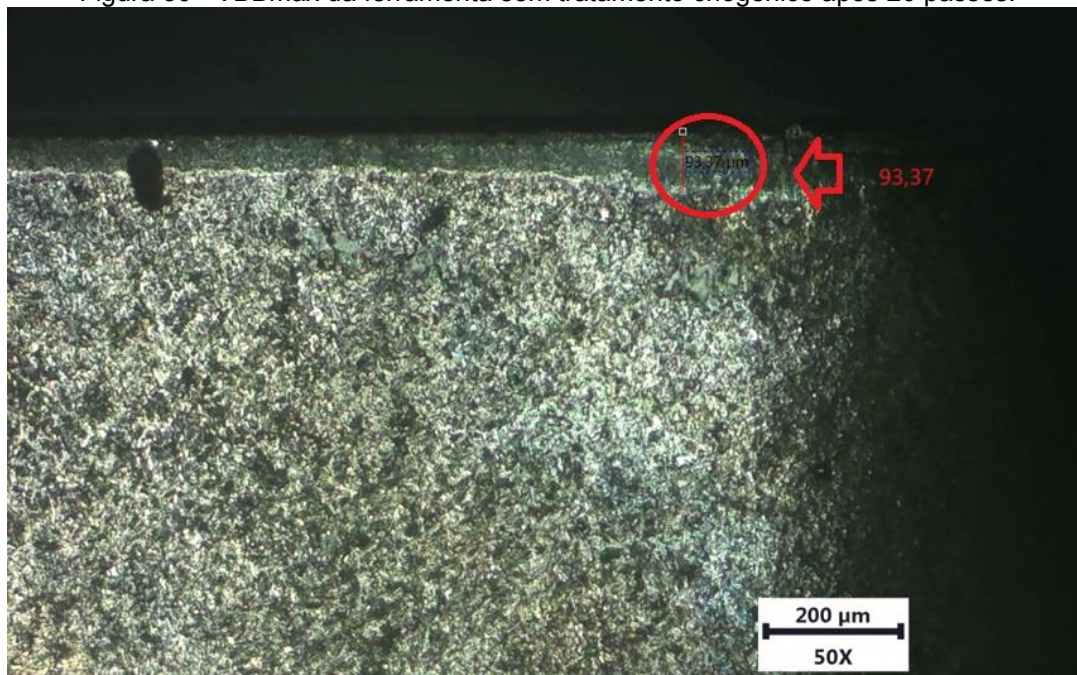
4.4 Avaliação do desgaste de flanco da ferramenta

Os insertos, tratados criogenicamente, passaram pelo processo de torneamento do aço 8640 com velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,05 mm/volta, profundidade de corte de 1 mm e após 20 passes de 100 mm de

comprimento foi analisado a largura máxima do desgaste de flanco (VBBmáx) por microscopia óptica.

Na figura 50 observa-se que, na amostra STC a dimensão do VBBmáx foi de 93,37 μm . Essa condição inicial serve como referência para avaliar a eficácia dos tratamentos subsequentes.

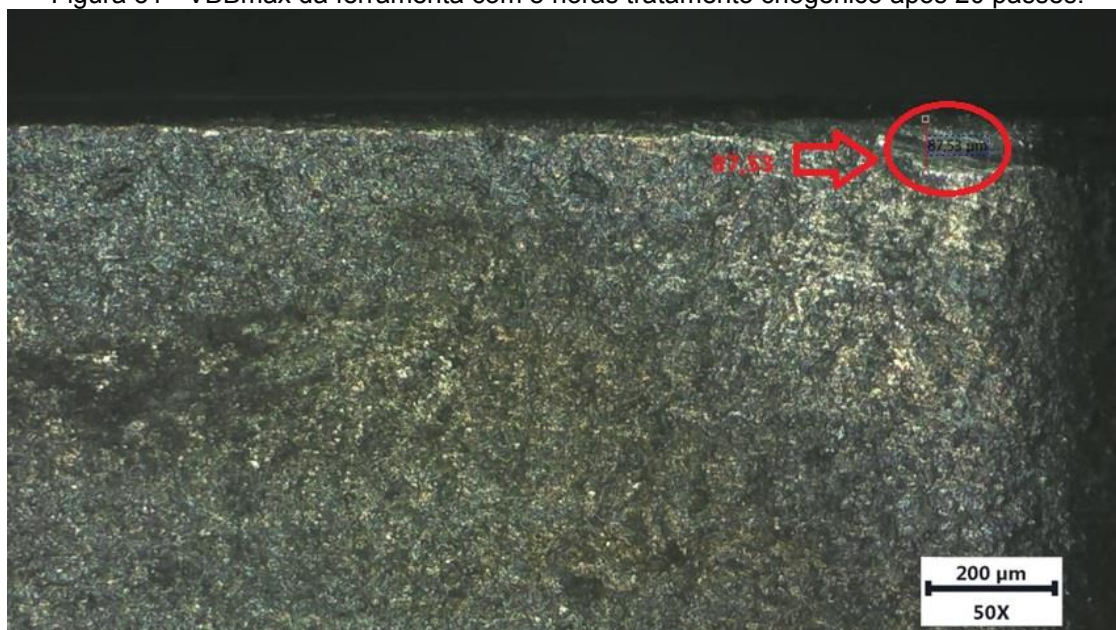
Figura 50 - VBBmáx da ferramenta sem tratamento criogênico após 20 passes.



Fonte: Autor.

Após 8 horas de tratamento criogênico, a figura 51 mostra uma redução no desgaste de flanco, tendo esta amostra VBBmáx de 87,53 μm . O menor desgaste apresentado provavelmente deve-se ao começo do aumento da dureza devido ao tratamento sub-zero, indicando uma melhoria nas propriedades de resistência ao desgaste. Os dados do EDS revelam uma redistribuição das fases, com um aumento relativo do carboneto de tungstênio, o que pode ter contribuído para essa melhoria. Essa alteração microestrutural sugere que o tratamento criogênico começa a ter um impacto positivo na durabilidade da ferramenta.

Figura 51 - VBBmáx da ferramenta com 8 horas tratamento criogênico após 20 passes.



Fonte: Autor.

Com 16 horas de TC, a figura 52 demonstra uma continuidade na diminuição do VBBmáx, chegando a 72,94 µm. Segundo Dhokey et al. (2014), o tratamento criogênico leva a formação de duas ou mais fases tais como $\text{CO}_3\text{W}_3\text{C}$ e $\text{CO}_6\text{W}_6\text{C}$, que são responsáveis pela melhoria das propriedades mecânicas, principalmente a resistência ao desgaste. A presença de titânio na composição do inserto é um elemento que pode favorecer o aumento da dureza no decorrer do TC.

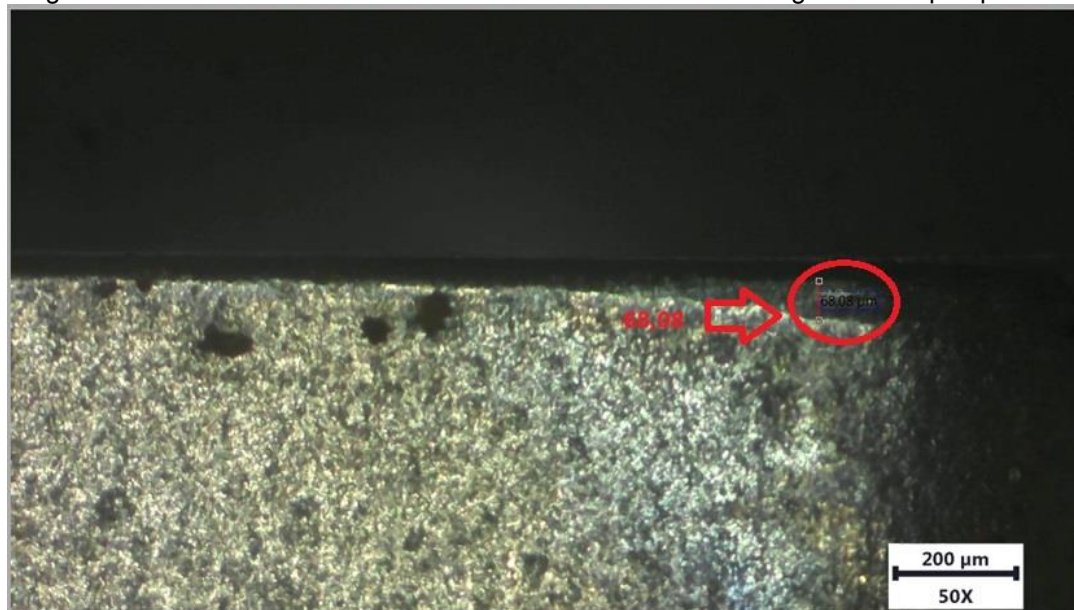
Figura 52 - VBBmáx da ferramenta com 16 horas tratamento criogênico após 20 passes.



Fonte: Autor.

Após 24 horas de TC, a figura 53 mostra uma continua diminuição no desgaste de flanco, menos acentuada do que na transição anterior, haja visto que o desgaste observado foi de 68,08 μ m. Segundo os dados do EDS, neste ponto começou um aumento da densidade da fase α , rica em carboneto de tungstênio, e mantém a tendência de aumento da resistência ao desgaste.

Figura 53 - VBBmáx da ferramenta com 24 horas tratamento criogênico 20 após passes.



Fonte: Autor.

Na figura 54, correspondente a 32 horas de TC, observa-se ainda uma leve redução no desgaste de flanco, ficando com um valor de 60,30 μ m. Assim como os resultados encontrados por Gill et al. (2011), em um tempo próximo a este de tratamento criogênico, estima-se que neste ponto ainda é possível sentir o efeito do aumento da densidade de carbonetos, embora seja possivelmente o final do intervalo de transformações nas propriedades mecânicas obtidas com esse tipo de processo.

Figura 54 - VBBmáx da ferramenta com 32 horas tratamento criogênico após 20 passes.



Fonte: Autor.

A figura 55, com 40 horas de TC, mostra um resultado similar ao do resultado anterior, sem nenhuma variação significativa, o que indica que o efeito do tempo de imersão no aumento da resistência ao desgaste acabou. Esta informação é relevante, pois indica que há um limite para os benefícios do tratamento térmico, e prolongar o tempo de tratamento pode não resultar em melhorias contínuas nas propriedades mecânicas. Um resultado equivalente foi obtido por Ramji et. al (2010) em seus estudos sobre desempenho de tratamentos criogênicos para processo de furação.

Figura 55 - VBBmáx da ferramenta com 40 horas tratamento criogênico 20 passes



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Com base nos experimentos realizados nesse trabalho, foi possível concluir que:

- As análises realizadas demonstraram que o tratamento criogênico resultou em uma redistribuição microestrutural benéfica que, junto com a formação de fases secundárias intermetálicas favoreceu o aumento da resistência ao desgaste e a dureza do material até atingir 32 horas de tratamento, tempo que indicou final do efeito do tratamento nas propriedades mecânicas;
- Em relação a dureza, pode-se afirmar que os TC's aumentaram a dureza dos insertos em até 15% em relação as amostras sem tratamento, principalmente devido ao aumento da densidade dos carbonetos e refinamento de grãos;
- O contínuo aumento no tempo de imersão a temperatura sub-zero além de formar fases secundárias duras também serviu para aumentar a densidade dos carbonetos contribuindo consideravelmente para melhoria das propriedades mecânicas das ferramentas ensaiadas, comprovando o fato deste parâmetro ser um dos mais importantes neste tipo de processo;
- Os ensaios de torneamento corroboraram os resultados obtidos pela análise microestrutural e pelas medições de dureza mostrando que o tempo de 32 horas de tratamento criogênico apresentou os melhores resultados no que diz respeito a resistência ao desgaste, obtendo o menor valor largura máxima do desgaste de flanco (VBBmáx);
- O tratamento criogênico pode ser uma alternativa viável para aumentar a vida útil das ferramentas de corte, reduzindo custos operacionais, otimizando o consumo de energia e sendo uma alternativa sustentável com potencial de redução de poluição neste setor industrial.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar comparação entre o tratamento criogênico por imersão em tanques com nitrogênio líquido com o mesmo tratamento sendo realizado em super refrigeradores;
- Avaliar o efeito do tratamento sub-zero em processos de usinagem, realizando uma variação dos parâmetros de corte utilizados, buscando confirmar os efeitos em condições diversas;
- Otimizar o sistema de criogênia, inserindo rampas de resfriamento e aquecimento das amostras procurando aprimorar as propriedades mecânicas;
- Tentar avaliar mais alguns tempos de imersão para confirmar o ponto de corte onde esse fator não influencia mais na melhoria das propriedades dos materiais;
- Avaliar o efeito do tratamento criogênico de ferramentas de metal duro no acabamento superficial de diferentes ligas metálicas e em diferentes processos de usinagem.

7 REFERÊNCIAS

a. REFERÊNCIAS NOMINAIS

AKGÜN, M.; DEMIR, H. **Optimization of Cutting Parameters Affecting Surface Roughness in Turning of Inconel 625 Superalloy by Cryogenically Treated Tungsten Carbide Inserts**. SN Applied Sciences, Percentil Scopus N/A, v. 3, n. 2, p. 277, fev. 2021.

BAGHERZADEH, A.; BUDAK, E. **Investigation of machinability in turning of difficult-to-cut materials using a new cryogenic cooling approach**. Tribology International, Percentil Scopus 93%, v. 119, p. 510–520, mar. 2018.

BLINN, B. et al. **Analyzing the influence of a deep cryogenic treatment on the mechanical properties of blanking tools by using the short-time method PhyBaLCHT**. Materials Science and Engineering: A, Percentil Scopus 95%, v. 824, p. 141846, set. 2021.

B.R. Ramji, H. N. Narasimha Murthy, M. Krishna,) **“Performance analysis of cryogenically treated carbide drills in drilling white cast iron”** International Journal Of Applied Engineering Research, Percentil Scopus N/A, vol.1 (2010)

ÇETIN, M.; DEMIREL, Ç. **A Study on Abrasive Wear and Corrosion Behaviour of Boronized AISI 8640 Cast Steel**. v. 7, n. 9, 2018.

CHETAN; GHOSH, S.; VENKATESWARA RAO, P. **Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review**. Journal of Cleaner Production, Percentil Scopus 98%, v. 100, p. 17–34, ago. 2015.

CHINNASAMY, M. et al. **Effectiveness of cryogenic treatment on cutting tool inserts: A review**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Percentil Scopus 83%, v. 108, p. 105946, nov. 2022.

DAGOSTIN, G. F.; DALEFFE, A.; CAVALER, L. C. D. C. **Influência dos parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido ASTM A518 GR.3**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, Percentil Scopus N/A, v. 18, p. e2270, 2021.

DEVERAS, A. M. **ESTUDO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 8640 COM FERRAMENTAS ALISADORA E CONVENCIONAL.**, [s.d.].

DHANDE, S. T. et al. **Influence of Soaking Periods in Cryogenic Treatment of Tungsten Carbide**. Procedia Manufacturing, Percentil Scopus N/A, v. 20, p. 318–328, 2018.

DHOKEY, N. B. et al. **Influence of Cryoprocessing on Mechanism of Carbide Development in Cobalt-Bearing High-Speed Steel (M35)**. Metallurgical and Materials Transactions A, Percentil Scopus 78%, v. 45, n. 3, p. 1508–1516, mar. 2014.

DOLINŠEK, S.; ŠUŠTARŠIČ, B.; KOPAČ, J. **Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes**. Wear, Percentil Scopus 88%, v. 250, n. 1–12, p. 349–356, out. 2001.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Edgar Blücher, 1969.

FREITAS, B. M. D.; VASCONCELOS, S. M. D.; MACEDO, J. C. D. **BENEFICIAMENTO DO AÇO SAE 8640 SOB TRATAMENTOS TÉRMICOS**. [s.d.].

GILL, S. S. et al. **Flank Wear and Machining Performance of Cryogenically Treated Tungsten Carbide Inserts**. Materials and Manufacturing Processes, Percentil Scopus 90%, v. 26, n. 11, p. 1430–1441, nov. 2011.

GILL, S. S. et al. **Metallurgical and mechanical characteristics of cryogenically treated tungsten carbide (WC–Co)**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Percentil Scopus 77%, v. 58, n. 1–4, p. 119–131, jan. 2012.

GILL, S. S.; SINGH, H. **Cryogenic Treatment of Materials: Cutting Tools and Polymers**. Em: KALIA, S.; FU, S.-Y. (Eds.). Polymers at Cryogenic Temperatures. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Percentil Scopus N/A, 2013. p. 245–273.

GUPTA, M. K. et al. **Machinability investigations of hardened steel with biodegradable oil-based MQL spray system**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Percentil Scopus 77%, v. 108, n. 3, p. 735–748, maio 2020.

JAIN, A. et al. **Replacement of Hazard Lubricants by Green Coolant in Machining of Ti6Al4V: A 3D FEM Approach**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Percentil Scopus 63%, v. 20, n. 6, p. 1027–1035, jun. 2019.

JAWAHIR, I. S. et al. **Cryogenic manufacturing processes**. CIRP Annals, Percentil Scopus 85%, v. 65, n. 2, p. 713–736, 2016.

KARA, F. et al. **Effect of cryogenic treatment on wear behavior of Sleipner cold work tool steel**. Tribology International, Percentil Scopus 93%, v. 180, p. 108301, fev. 2023.

KAZLAUSKAS, D.; JANKAUSKAS, V.; TUČKUTĖ, S. **Research on Tribological Characteristics of Hard Metal WC-Co Tools with TiAlN and CrN PVD Coatings for Processing Solid Oak Wood**. Coatings, Percentil Scopus 64%, v. 10, n. 7, p. 632, 30 jun. 2020.

KROLCZYK, G. M. et al. **Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production**. Journal of Cleaner Production, Percentil Scopus 98%, v. 142, p. 3343–3354, jan. 2017.

KROLCZYK, G. M. et al. **Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review**. Journal of Cleaner Production, Percentil Scopus 98%, v. 218, p. 601–615, maio 2019.

KUNTOĞLU, M.; SAĞLAM, H. **Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning**. Measurement, Percentil Scopus 93%, v. 140, p. 427–436, jul. 2019.

LEANDRO, Gustavo Henrique Correia Rosa et al. **Avaliação do comportamento no torneamento do aço SAE 8640 em diferentes condições de lubri-refrigeração**. 2020

LI, D. et al. **Effects of traditional heat treatment and a novel deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon high-alloy martensitic bearing steel**. Journal of Iron and Steel Research International, Percentil Scopus 73%, v. 28, n. 3, p. 370–382, mar. 2021.

LIU, M. et al. **Cryogenic minimum quantity lubrication machining: from mechanism to application**. Frontiers of Mechanical Engineering, Percentil Scopus 84%, v. 16, n. 4, p. 649–697, dez. 2021.

LUO, X. et al. **Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting**. Wear, Percentil Scopus 88%, v. 259, n. 7–12, p. 1235–1240, jul. 2005.

MACHADO, A. R.; MOTTA, M. F.; DA SILVA, M. B. **Performance of Synthetic and Mineral Soluble Oil When Turning AISI 8640 Steel**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Percentil Scopus 82%, v. 119, n. 4A, p. 580–586, 1 nov. 1997.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.

MIA, M. et al. **Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N₂ assisted turning of Ti-6Al-4V**. Journal of Cleaner Production, Percentil Scopus 98%, v. 210, p. 121–133, fev. 2019.

MOLINARI, A. et al. **Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels**. Journal of Materials Processing Technology, Percentil Scopus 94%, v. 118, n. 1–3, p. 350–355, dez. 2001.

NORA, J. V. P. D. et al. **The Influence of Thermal Cycles on the Performance and Spheroidization Process of SAE 8640 Steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, Percentil Scopus 63%, v. 32, n. 11, p. 4932–4940, jun. 2023.

PADMAKUMAR, M. et al. **Performance Evaluation of Cryogenically Treated Tungsten Carbide Insert on Face Milling of Grey Cast Iron**. Applied Mechanics and Materials, Percentil Scopus N/A, v. 813–814, p. 569–574, 27 nov. 2015.

PATIL, P. I. **Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review**. 2012.

PODGORNIK, B. et al. **Deep cryogenic treatment of tool steels**. Journal of Materials Processing Technology, Percentil Scopus 94%, v. 229, p. 398–406, mar. 2016.

PRADHAN, S. et al. **Performance investigation of cryogenic treated-double tempered cutting inserts in dry turning of Ti-6Al-4V alloy**. Journal of Materials Research and Technology, Percentil Scopus 89%, v. 25, p. 2989–3006, jul. 2023.

QEHAJA, N. et al. **Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process**. Procedia Engineering, Percentil Scopus N/A, v. 100, p. 135–140, 2015.

SAHOO, S. P.; DATTA, S. **Dry Machining Performance of AA7075-T6 Alloy Using Uncoated Carbide and MT-CVD TiCN-Al₂O₃-Coated Carbide Inserts**. Arabian Journal for Science and Engineering, Percentil Scopus 88%, v. 45, n. 11, p. 9777–9791, nov. 2020.

SAINI, A.; PABLA, B. S.; DHAMI, S. S. **Improvement in performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in face milling of Ti-6Al-4V alloy**. Materials and Manufacturing Processes, Percentil Scopus 90%, v. 35, n. 5, p. 598–607, 3 abr. 2020.

SALES, W. F. et al. **A review of surface integrity in machining of hardened steels**. Journal of Manufacturing Processes, Percentil Scopus 91%, v. 58, p. 136–162, out. 2020.

SANDS, R.L. E Shakespeare, C.R., Powder Metallurgy: Practice and Applications. CRC Press, Cleveland, 1966.

SARTORI, S. et al. **Wear mechanisms of uncoated and coated carbide tools when machining Ti6Al4V using LN2 and cooled N2**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Percentil Scopus 77%, v. 95, n. 1–4, p. 1255–1264, mar. 2018.

SEAH, K. H. W.; RAHMAN, M.; YONG, K. H. **Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Percentil Scopus 73, v. 217, n. 1, p. 29–43, 1 jan. 2003.

SHARMA, R.; JHA, B. K.; PAHUJA, V. **ROLE OF SUSTAINABLE TECHNIQUES IN MANUFACTURING PROCESS: A REVIEW**. International Journal of Engineering Technologies and Management Research, Percentil Scopus N/A, v. 8, n. 2, p. 41–45, 17 fev. 2021.

SHIXIONG, W. et al. **Tool wear of corner continuous milling in deep machining of hardened steel pocket**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Percentil Scopus 77%, v. 97, n. 1–4, p. 1315–1333, jul. 2018.

SILVEIRA, F. D. et al. **Tratamento Térmico de Têmpera em Aço ABNT 8640: análise das Propriedades Mecânicas**. HOLOS, Percentil Scopus N/A, v. 2, p. 49–59, 11 jun. 2018.

SIVALINGAM, V. et al. **Machining performance and tool wear analysis on cryogenic treated insert during end milling of Ti-6Al-4V alloy**. Journal of Manufacturing Processes, Percentil Scopus 91%, v. 36, p. 188–196, dez. 2018.

SLATTER, T.; THORNTON, R. 2.15 **Cryogenic Treatment of Engineering Materials**. Em: Comprehensive Materials Finishing. [s.l.] Elsevier, Percentil Scopus N/A, 2017. p. 421–454.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. **Dry machining: Machining of the future**. Journal of Materials Processing Technology, Percentil Scopus N/A, v. 101, n. 1–3, p. 287–291, abr. 2000.

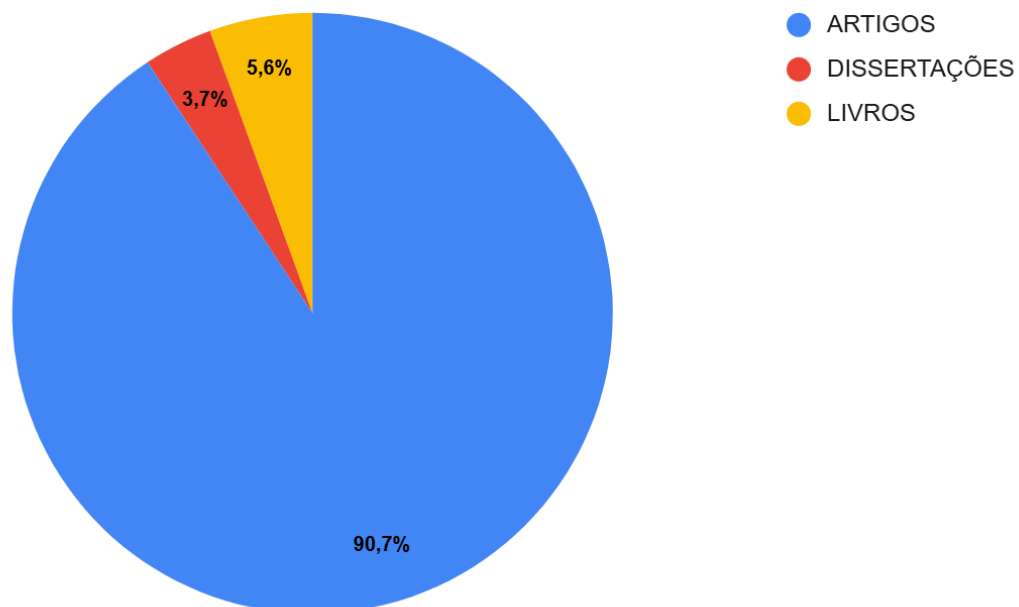
TRIANI, R. M. et al. **Improvement of the Tribological Characteristics of AISI 8620, 8640 and 52100 Steels through Thermo-Reactive Treatments.** Lubricants, Percentil Scopus 58%, v. 7, n. 8, p. 63, 26 jul. 2019.

WANG, F.; JI, K.; GUO, Z. **Microstructural analysis of failure progression for coated carbide tools during high-speed milling of Ti-6Al-4V.** Wear, Percentil Scopus 88%, v. 456–457, p. 203356, set. 2020.

YILMAZ, B.; KARABULUT, Ş.; GÜLLÜ, A. **A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning.** Journal of Manufacturing Processes, Percentil Scopus 91%, v. 49, p. 50–69, jan. 2020.

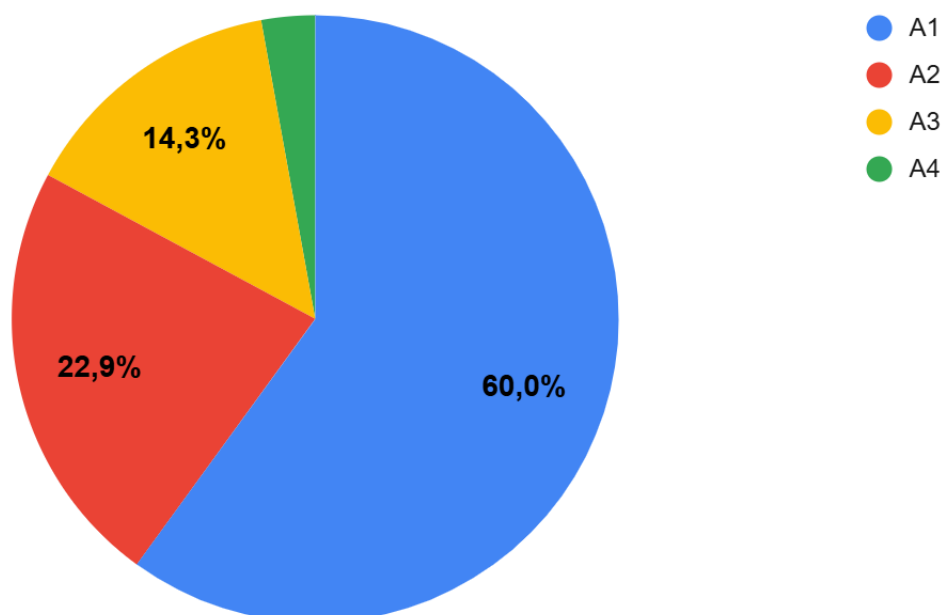
b. REFERÊNCIAS POR ESTRATO

Distribuição de Referências por Estrato



c. REFERÊNCIAS POR QUALIS

Distribuição de Artigos por Qualis



d. REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS

