



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE DE DESGASTE DE
FLANCO EM FERRAMENTAS DE CORTE COM IMAGEJ**

EDISSON LIBARDO PÉREZ SALAMANCA

Foz do Iguaçu
2026

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE DE DESGASTE DE FLANCO EM
FERRAMENTAS DE CORTE COM IMAGEJ**

EDISSON LIBARDO PÉREZ SALAMANCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu

Foz do Iguaçu
2026

EDISSON LIBARDO PÉREZ SALAMANCA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE ANÁLISE DE DESGASTE DE FLANCO EM
FERRAMENTAS DE CORTE COM IMAGEJ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu
UNILA

Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior
UNILA

Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht
UNILA

Foz do Iguaçu, 10 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, por cuidar de cada pessoa que amo e por nos proteger de todo mal e perigo. À minha família, meu porto seguro. Com especial carinho e gratidão aos meus pais, Jose del Carmen Perez Silva e Leonilde Salamanca. À minha mãe, Leonilde, obrigado por me apoiar sempre, por se dedicar incansavelmente a cuidar de nós, pela educação que nos deu e por todo o amor que nos ofereceu. Ao meu pai, Jose del Carmen, deixo o meu muito obrigado por tudo.

Aos meus irmãos, Deivys Leonel Perez Salamanca e Keily Johana Perez Salamanca, sou imensamente grato por serem meus irmãos e por estarem sempre ao meu lado, me ajudando a seguir em frente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu, agradeço imensamente pela orientação, pela paciência e pela disponibilidade durante todo este trabalho. Sua contribuição técnica e humana foi essencial.

Agradeço também aos membros da banca, que também foram meus professores no curso, Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht e Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior, pelas valiosas contribuições e ensinamentos. Estendo minha profunda gratidão e reconhecimento às professoras Gislaine Bezerra, Priscila Lemes, Liliane Battirola e Márcia Becker. Obrigado pelos ensinamentos, pela inspiração e por terem contribuído significativamente para a minha formação acadêmica e profissional ao longo da graduação.

A todos os técnicos da UNILA, deixo meu reconhecimento. Em especial ao Caio Pereira e ao Alexandre Rodrigues Livera, agradeço pelo apoio fundamental nos ensaios de laboratório e por toda a ajuda durante meu estágio na instituição. A presença e o suporte de vocês ao longo desta caminhada foram indispensáveis para que eu chegasse até aqui.

Um agradecimento muito sincero aos colaboradores que garantem o nosso bem-estar diário: aos motoristas e equipe de transporte do Itaipu Parquetec e às pessoas da equipe de limpeza. Muito obrigado por cuidarem do nosso ambiente e da nossa mobilidade; vocês também fazem parte desta conquista.

Um abraço especial aos grandes amigos que o Brasil me deu. Aos parceiros Elkin Puerta e Brayan Cely, que começaram comigo na Engenharia de Materiais, mas migraram

para a Civil e Energias (uma "traição" acadêmica perdoada!). À Angie Rocio Barrera, minha veterana de Biotecnologia e agora já formada, obrigado por todo o apoio e experiência compartilhada. A vocês três, meu eterno "grupo da casa" e insubstituível "time dos rolês": as risadas e a parceria tornaram essa jornada muito mais leve e inesquecível.

Por fim, sei que ainda faltam nomes nestas linhas, pois foram muitas as mãos estendidas ao longo do caminho. Então, a todos que não citei nominalmente, mas que cruzaram meu caminho e contribuíram de alguma forma, deixo aqui o meu mais sincero e imenso muito obrigado por serem parte deste processo.

RESUMO

O desgaste de ferramentas de corte é um fator determinante na eficiência dos processos de usinagem, influenciando a vida útil da ferramenta, a qualidade da peça e os custos industriais. Métodos tradicionais de avaliação, como medições lineares e inspeção visual, podem apresentar subjetividade e baixa reprodutibilidade. Diante disso, este trabalho propõe uma metodologia objetiva e acessível para a quantificação da área de desgaste em ferramentas de metal duro revestidas, utilizando o software ImageJ e técnicas de processamento digital de imagens. Foram analisadas micrografias de MEV provenientes do estudo de Ávila (2011), referentes a ferramentas K10 revestidas com CrAIN em duas composições: CrAIN-AA (alto teor de alumínio) e CrAIN-BA (baixo teor de alumínio). As imagens, obtidas nos tempos de usinagem de 2, 4, 6 e 8 minutos, foram tratadas por três métodos: medição manual, limiarização automática (threshold) e um método híbrido desenvolvido neste trabalho. Este último combina a seleção manual da região de interesse com a segmentação automática, proporcionando maior precisão e consistência nas leituras. Os resultados indicaram aumento progressivo da área desgastada para ambos os revestimentos, com diferenças relevantes entre os métodos. O método manual apresentou maior variabilidade, enquanto o método semiautomático mostrou boa repetibilidade, porém sensibilidade a irregularidades de brilho. O método híbrido destacou-se como a abordagem mais robusta, permitindo análises mais padronizadas. Observou-se ainda que, diferentemente da métrica linear VB utilizada por Ávila, a quantificação por área revelou comportamento mais estável para o CrAIN-AA em maiores tempos de corte, demonstrando que métricas distintas podem levar a interpretações complementares do desempenho dos revestimentos. Conclui-se que a metodologia proposta é eficaz, reprodutível e aplicável em estudos acadêmicos e industriais, ampliando as possibilidades de análise quantitativa do desgaste de ferramentas.

Palavras-chave: Desgaste de flanco, tratamento de imagens, ImageJ, torneamento.

RESUMEN

El desgaste de las herramientas de corte es un factor determinante en la eficiencia de los procesos de mecanizado, ya que influye en la vida útil de la herramienta, la calidad de la pieza y los costos industriales. Los métodos tradicionales de evaluación, como las mediciones lineales y la inspección visual, pueden presentar subjetividad y baja reproducibilidad. Ante esto, este trabajo propone una metodología objetiva y accesible para cuantificar el área de desgaste en herramientas de metal duro recubiertas, utilizando el software ImageJ y técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se analizaron micrográficas de SEM procedentes del estudio de Ávila (2011), referidas a herramientas K10 recubiertas con CrAIN en dos composiciones: CrAIN-AA (alto contenido de aluminio) y CrAIN-BA (bajo contenido de aluminio). Las imágenes, obtenidas en tiempos de mecanizado de 2, 4, 6 y 8 minutos, se trataron mediante tres métodos: medición manual, umbralización automática (threshold) y un método híbrido desarrollado en este trabajo. Este último combina la selección manual de la región de interés con la segmentación automática, lo que proporciona una mayor precisión y consistencia en las lecturas. Los resultados indicaron un aumento progresivo del área desgastada para ambos recubrimientos, con diferencias relevantes entre los métodos. El método manual presentó una mayor variabilidad, mientras que el método semiautomático mostró una buena repetibilidad, pero sensibilidad a las irregularidades de brillo. El método híbrido se destacó como el enfoque más robusto, permitiendo análisis más estandarizados. También se observó que, a diferencia de la métrica lineal VB utilizada por Ávila, la cuantificación por área reveló un comportamiento más estable para el CrAIN-AA en tiempos de corte más largos, lo que demuestra que métricas diferentes pueden llevar a interpretaciones complementarias del rendimiento de los recubrimientos. Se concluye que la metodología propuesta es eficaz, reproducible y aplicable en estudios académicos e industriales, ampliando las posibilidades de análisis cuantitativo del desgaste de herramientas.

Palabras clave: Desgaste de flanco, tratamiento de imágenes, ImageJ, torneado.

ABSTRACT

The wear of cutting tools is a determining factor in the efficiency of machining processes, influencing tool life, part quality, and industrial costs. Traditional evaluation methods, such as linear measurements and visual inspection, can be subjective and have low reproducibility. Given this, this study proposes an objective and accessible methodology for quantifying the wear area in coated carbide tools, using ImageJ software and digital image processing techniques. SEM micrographs from the study by Ávila (2011) were analyzed, referring to K10 tools coated with CrAlN in two compositions: CrAlN-AA (high aluminum content) and CrAlN-BA (low aluminum content). The images, obtained at machining times of 2, 4, 6, and 8 minutes, were processed using three methods: manual measurement, automatic thresholding, and a hybrid method developed in this study. The latter combines manual selection of the region of interest with automatic segmentation, providing greater accuracy and consistency in readings. The results indicated a progressive increase in the worn area for both coatings, with significant differences between the methods. The manual method showed greater variability, while the semi-automatic method showed good repeatability but sensitivity to gloss irregularities. The hybrid method stood out as the most robust approach, allowing for more standardized analyses. It was also observed that, unlike the linear VB metric used by Ávila, quantification by area revealed more stable behavior for CrAlN-AA at longer cutting times, demonstrating that different metrics can lead to complementary interpretations of coating performance. It is concluded that the proposed methodology is effective, reproducible, and applicable in academic and industrial studies, expanding the possibilities for quantitative analysis of tool wear.

Key words: Flank wear, image processing, ImageJ, turning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1 Mecanismos de desgaste abrasivo.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 Processo de transferência de metal por adesão</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 Diagrama de mecanismos de desgaste versus temperatura de corte.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4 Representação esquemática da forma do desgaste em ferramentas que possuem geometria definida.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5 Esquema da sequência do trabalho</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6 Evolução do desgaste de flanco máximo (VB max) em função do tempo para os revestimentos CrAlN-AA e CrAlN-BA.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 Imagens de Raios X sobrepostas dos principais elementos do par tribológico.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 Micrografias de CrAlN-AA (Alto Alumínio)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9 Micrografias de CrAlN-BA (Baixo Alumínio)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 Abertura da imagem a ser analisada.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11 Calibração manual da imagem no ImageJ</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12 Segmentação manual da área de desgaste usando "Freehand Selection"</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13 Tabela de resultados da medição de área via Freehand</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14 Medição manual da barra de escala para calibração da imagem</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15 Configuração manual da escala de calibração (200 µm).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16 Delimitação manual da região de interesse correspondente ao desgaste de flanco.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17 Criação da máscara binária a partir da seleção poligonal.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18 Máscara binária gerada a partir da seleção da região de desgaste de flanco</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19 Ajuste manual do limiar para segmentação da região de desgaste.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20 Acesso ao módulo Analyze Particles para medição da área segmentada.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 21 Configurações adequadas para análise de partículas no ImageJ.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 22 Resultado da análise de partículas com a área do desgaste (µm²)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 23 Execução e preparação do script.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 24 Entrada do operador (Seleção de ROIs)</i>	<i>33</i>
<i>Figura 25 Ferramenta Polygon Selections</i>	<i>34</i>
<i>Figura 26 Ajuste visual dos controles deslizantes.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 27 Apresentação dos resultados pelo script</i>	<i>36</i>
<i>Figura 28 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAlN AA e CrAlN BA Método Manual</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAlN AA e CrAlN BA.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAlN AA e CrAlN BA Método Híbrido.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 31 Gráfico comparativo entre os métodos de medição para CrAlN AA</i>	<i>41</i>
<i>Figura 32 Divergência entre métodos de medição para o CrAlN BA.....</i>	<i>42</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 Mecanismos de desgaste</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2 Imagens de Raios X sobrepostas dos principais elementos do par tribologico.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3 Valores de área (mm²) obtidos pelos três métodos de medição para o revestimento CrAIN AA.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4 Valores de área (mm²) obtidos pelos três métodos de medição para o revestimento CrAIN BA.....</i>	<i>38</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	1
1.2 IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	1
1.3 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA METODOLÓGICA.....	2
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. FERRAMENTAS DE CORTE E MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS.....	4
3.2 REVESTIMENTOS BINÁRIOS E TERNÁRIOS EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	5
3.3 TIPOS DE DESGASTE.....	6
3.4 MECANISMOS DE FALHA E VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS.....	9
3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DESGASTE.....	11
3.6 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MEV NA ENGENHARIA DE MATERIAIS.....	11
3.6.1 Análise topográfica por Elétrons Secundários (SE).....	12
3.6.2 Análise composicional por Elétrons Retroespalhados (BSE).....	12
3.7 USO DO IMAGEJ NA QUANTIFICAÇÃO DE IMAGENS	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MEV NA ENGENHARIA DE MATERIAIS.....	16
4.2 METODOLOGIA.....	21
4.2.1 Metodologias de análise com ImageJ.....	21
4.2.2 Metodologia 1: Medição Manual-Digital (Contorno Livre “Freehand”).....	21
4.2.3 Metodologia 2: Medição Semiautomática (Limiarização “Treshold”) por Isolamento de Máscara e Análise de Partículas.....	24
4.2.4 Metodologia 3: Medição híbridada, uso dos métodos manual, Treshold e Script/Macro no ImageJ	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37

5.1 QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DESGASTADAS.....	37
5.2 TABELAS E GRÁFICOS COM DADOS DE ÁREA.....	37
5.3 RELAÇÃO COM OS MECANISMOS DE DESGASTE NA LITERATURA	43
6. CONCLUSÃO.....	45
6.1 PRINCIPAIS ACHADOS DO ESTUDO	45
6.2 CONTRIBUIÇÕES PARA O ENTENDIMENTO DO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE.....	46
6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

O processo de torneamento é uma das operações de usinagem por remoção de cavaco mais relevantes e difundidas na indústria, sendo essencial para a produção de componentes de alta qualidade para múltiplos setores industriais (SOUSA et al., 2021). O processo consiste na remoção de material de uma peça em rotação por meio de uma ferramenta de corte, gerando superfícies com alta precisão dimensional e acabamento controlado (SANTOS, 2017). Contudo, a busca por materiais com melhores propriedades mecânicas, como o ferro fundido nodular FE 45012 (perlítico-ferrítico), impõe novos desafios ao processo. Este material, apesar de suas vantagens, possui uma usinabilidade considerada difícil, caracterizada pela geração de elevadas temperaturas na zona de corte e por uma forte tendência ao desgaste da ferramenta, especialmente em usinagem a seco (ÁVILA, 2011). Para superar essas condições severas, o desenvolvimento de ferramentas de corte avançadas é fundamental. A solução moderna reside no uso de ferramentas de metal duro (WC-Co) com revestimentos cerâmicos nanoestruturados, como os sistemas ternários $(Ti_{1-x}Al_x)N$ e $(Cr_{1-x}Al_x)N$, aplicados por técnicas como a Deposição Física de Vapores (PVD) (ÁVILA, 2011; SOUSA et al., 2021a).

1.2 IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

O desgaste da ferramenta é um fenômeno inevitável que limita a produtividade e impacta diretamente os custos e a qualidade na usinagem (ALEXANDRE, 2011). No torneamento do ferro fundido nodular, o controle do desgaste é particularmente crítico, pois sua progressão afeta a integridade superficial da peça e eleva as forças de usinagem (ÁVILA, 2011). O monitoramento do desgaste de flanco (VB), que ocorre na principal superfície de folga da ferramenta, é a prática mais comum para determinar o fim da vida da ferramenta (SANTOS, 2017). Os mecanismos predominantes nesta usinagem são a abrasão, causada pelas fases mais duras da microestrutura (como a perlita), e a adesão, potencializada pelas altas temperaturas (ÁVILA, 2011). Uma análise precisa desses fenômenos é crucial, porém os métodos tradicionais de

medição, baseados em microscopia óptica, são manuais, demorados e altamente dependentes da interpretação do operador, o que introduz subjetividade e inconsistência nos resultados (ALEXANDRE, 2011; ALBERTO, 2014).

1.3 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA METODOLÓGICA

Os métodos tradicionais para quantificação do desgaste, como o uso de microscópios ópticos com paquímetros digitais ou projetores de perfil, apesar de estabelecidos, apresentam limitações significativas. São processos manuais, demorados, que exigem operadores experientes e estão sujeitos a erros de medição e à subjetividade da interpretação humana (ALEXANDRE, 2011; ALBERTO, 2014). Essa falta de repetibilidade e precisão dificulta a comparação rigorosa entre diferentes testes e condições de usinagem.

Diante dessas desvantagens, sistemas baseados em visão computacional e tratamento digital de imagens representam uma alternativa eficiente e já estabelecida (ALEXANDRE, 2011). A análise de imagens permite automatizar a detecção e a medição da área de desgaste, oferecendo resultados mais rápidos, objetivos, precisos e repetitivos (ALBERTO, 2014; LIZARELLI et al., 2007). Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a quantificação do desgaste utilizando o software ImageJ. A escolha desta plataforma se justifica por ser uma ferramenta de domínio público, amplamente validada na comunidade científica e que possui um vasto conjunto de recursos para análise de imagens. O ImageJ permite a criação de rotinas automatizadas (macros) para segmentar a região de interesse e extrair parâmetros geométricos, representando uma solução de custo zero, acessível e de fácil implementação para uma análise de desgaste mais confiável e detalhada (LIZARELLI et al., 2007). Nesse sentido, este trabalho busca estabelecer um procedimento padronizado, capaz de medir com precisão a área de desgaste de flanco (em μm^2), reduzindo a subjetividade inerente aos métodos lineares tradicionais e garantindo a repetibilidade entre medições. Para isso, foram investigadas e comparadas três abordagens metodológicas: manual, semiautomática (Limiarização "Threshold") e híbrida, com graus crescentes de automação, visando definir o método mais eficiente para esta aplicação.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de quantificação da área de desgaste de flanco utilizando o software ImageJ, aplicada à análise de desempenho de ferramentas de metal duro (classe K10) revestidas com CrAlN (com variados teores de Alumínio) no torneamento de Ferro Fundido Nodular FE 45012.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estruturar um procedimento de medição no software ImageJ, por meio da criação de uma macro, capaz de identificar, isolar e medir a área de desgaste de flanco a partir de imagens digitais de ferramentas utilizadas no torneamento de Ferro Fundido Nodular FE 45012, comparando técnicas manuais e semiautomáticas (limiarização) para definir o método mais objetivo e repetível de medição de área;
- Aplicar a metodologia desenvolvida para identificar, isolar e quantificar a evolução da área de desgaste de flanco em micrografias de ferramentas revestidas com CrAlN-AA (Alto Alumínio: CrAlN-AA) e CrAlN-BA (Baixo Alumínio: CrAlN-BA);
- Analisar comparativamente o desempenho dos dois tipos de revestimento (AA vs. BA) na usinagem de ferro fundido nodular, utilizando os resultados de evolução da área de desgaste (mm^2) em função do tempo de corte.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FERRAMENTAS DE CORTE E MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS

A seleção do material da ferramenta de corte é um dos fatores mais críticos para o sucesso de uma operação de usinagem, impactando diretamente a vida útil da ferramenta, a qualidade da peça e a produtividade do processo. Os materiais devem possuir um conjunto de propriedades que inclui alta dureza (especialmente a quente, para resistir à deformação plástica), tenacidade para suportar choques mecânicos e térmicos, resistência ao desgaste e estabilidade química para não reagir com o material da peça (SOARES, 2013).

O metal duro (WC-Co) é o material mais versátil e utilizado na usinagem de aços, oferecendo uma excelente combinação de dureza e tenacidade. Trata-se de um composto metal-cerâmico, formado por partículas duras de Carboneto de Tungstênio (WC) sinterizadas em uma matriz metálica ligante, geralmente Cobalto (Co) (ÁVILA, 2007; SAKETI et al., 2019). A variação no tamanho de grão do WC e na proporção de Cobalto permite uma ampla gama de classes, otimizadas para diferentes aplicações, desde o desbaste pesado até operações de acabamento fino (SAKETI et al., 2019).

As ferramentas de cerâmica, como as de óxido de alumínio (Al_2O_3) pura ou mista (com adição de Carboneto de Titânio - TiC), são conhecidas por sua excepcional dureza a quente, resistência à oxidação e estabilidade química, o que as torna ideais para a usinagem em altas velocidades de materiais como o ferro fundido (LIN et al., 2020; SOARES, 2013). Sua principal limitação é a baixa tenacidade, que as torna suscetíveis a fraturas por impacto ou variações bruscas de temperatura (LIN et al., 2020).

Sendo o segundo material mais duro conhecido, o Nitreto Cúbico de Boro (CBN) é a escolha preferencial para o torneamento de aços endurecidos (com dureza acima de 45 HRC), ferros fundidos e superligas à base de níquel. Sua grande vantagem é a alta inércia química em relação a materiais ferrosos, evitando o desgaste por difusão que ocorre com ferramentas de diamante nessas aplicações (SOUSA et al., 2021a; SOARES, 2013).

3.2 REVESTIMENTOS BINÁRIOS E TERNÁRIOS EM FERRAMENTAS DE CORTE

Para aprimorar o desempenho das ferramentas de metal duro, aplicam-se revestimentos cerâmicos finos (de 2 a 5 μm), comumente por processos de Deposição Física de Vapores (PVD) (ÁVILA, 2007). Esses revestimentos multifuncionais atuam como uma barreira que aumenta a dureza superficial, a resistência ao desgaste, a estabilidade térmica e reduz o atrito entre a ferramenta e o cavaco (SOUSA et al., 2021a; ÁVILA, 2007).

Historicamente, o Nitreto de Titânio (TiN) foi o primeiro revestimento a se popularizar, oferecendo boa proteção contra desgaste abrasivo. No entanto, a necessidade de usinagem em maiores velocidades e temperaturas exigiu a evolução para sistemas ternários (adição de um terceiro elemento), visando principalmente a estabilidade térmica (ÁVILA, 2007; ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR, 2017). Nesse contexto, a adição de Alumínio (Al) aos nitretos de metais de transição provou ser fundamental. Em revestimentos como o $(\text{TiAl})\text{N}$, o alumínio migra para a superfície em altas temperaturas e forma uma camada passiva de óxido de alumínio (Al_2O_3). Essa camada atua como um isolante térmico e uma barreira contra a difusão, protegendo a ferramenta da oxidação severa (MOGHADDAM et al., 2021; HE et al., 2022).

Evoluindo a partir do TiAlN , o sistema Nitreto de Cromo-Alumínio (CrAlN) foco deste trabalho, tem ganhado destaque na usinagem de materiais ferrosos. A substituição do Titânio pelo Cromo confere ao revestimento uma resistência à oxidação superior e uma menor afinidade química com o ferro, o que reduz a tendência ao desgaste por adesão (cratera) (SOUSA et al., 2021a; TOTOLICI et al., 2024).

Um fator crítico no desempenho do CrAlN é a estequiometria, ou seja, a proporção entre Cromo e Alumínio:

- Altos teores de Alumínio tendem a aumentar a dureza a quente e a resistência à oxidação, favorecendo a formação da camada protetora cerâmica.
- Altos teores de Cromo podem favorecer a tenacidade e reduzir as tensões residuais do revestimento (HE et al., 2022; ÁVILA, 2011).

O estudo de referência deste trabalho (ÁVILA, 2011) explora justamente essas variações, analisando o comportamento de revestimentos com diferentes balanceamentos de Alumínio, designados como CrAlN-AA (Alto Alumínio) e CrAlN-BA (Baixo Alumínio), para determinar a configuração mais eficiente no torneamento do ferro fundido nodular.

3.3 TIPOS DE DESGASTE

Por definição da norma ASTM G40 (2015) o desgaste engloba a perda progressiva de material ou modificação de superfície de um objeto devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou outras mais substâncias em contato. Sendo o desgaste uma das formas mais severas de degradação dos materiais (MARTINEZ, 2004). A resistência ao desgaste é a habilidade do material de ter uma vida útil relativamente elevada quando submetido aos vários tipos de mecanismos de desgaste: ataque (contato físico direto), desgaste por fusão, oxidação/difusão e plasticidade (DIAS, 2007).

Existe uma série de fatores que influenciam no desgaste do material, dentre eles suas características, condições de operação, variáveis geométricas e condições ambientais (BHUSHAN, 2013). Os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro principais grupos: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste erosivo e fadiga superficial (BUDINSKI, 1988). A Tabela 1 resume os 4 diferentes mecanismos de desgaste.

Tabela 1 Mecanismos de desgaste

Mecanismo de desgaste	Descrição
Adesivo	Transferência de material de uma superfície a outra. As partículas que são removidas de uma superfície são permanentemente ou temporariamente aderidas à superfície do outro material.
Abrasivo	Ocorre devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas ao longo de uma superfície sólida.
Erosivo	Perda de material da superfície que resulta do impacto

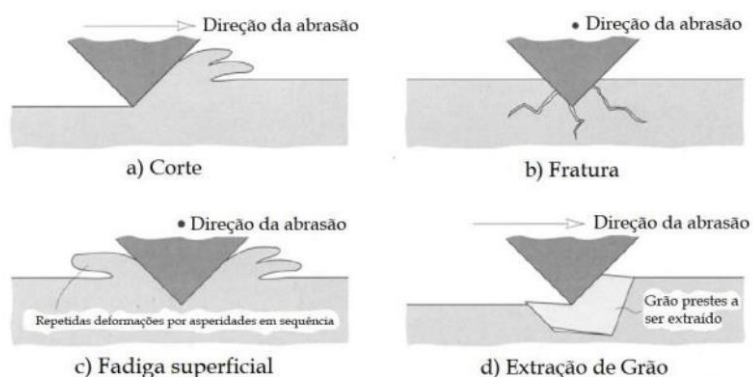
	repetitivo de pequenas partículas sólidas sob uma superfície.
Fadiga superficial	Danos superficiais causados por um contato de rolamento repetido.

Fonte: ASM, 2001; Stachowiak, 2005.

Como mecanismo de desgaste, a adesão é entendida pela formação e quebra de ligações interfaciais, as quais são arrancadas durante o movimento tangencial do processo de corte. A formação da adesão é extremamente dependente da interação atômica entre os materiais que formam o sistema tribológico (GAHR, 1987; TRENT; WRIGHT, 2000).

A abrasão, por sua vez, ocorre quando partículas presentes no material usinado, ou até mesmo um material intermediário (formado pela adesão sobre a face da ferramenta, por exemplo), penetram no material da ferramenta e, com o movimento tangencial do processo, produzem ranhuras no material desgastado (KLOCKE; KÖNIG, 2008; GAHR, 1987). As Figuras 1 e 2 demonstram o esquema do mecanismo de desgaste abrasivo e adesivo respectivamente.

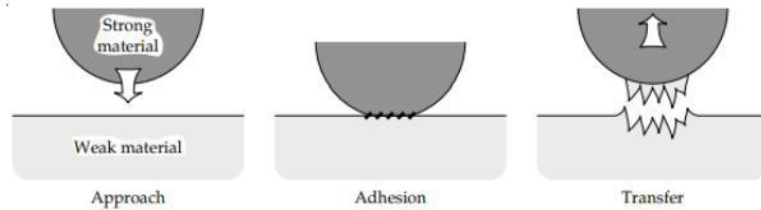
Figura 1 Mecanismos de desgaste abrasivo



a. Por corte, b. Fratura, c. Fadiga, d. Retirada de grão.

Fonte: Stachowiak, 2005.

Figura 2 Processo de transferência de metal por adesão



Fonte: Stachowiak, 2005.

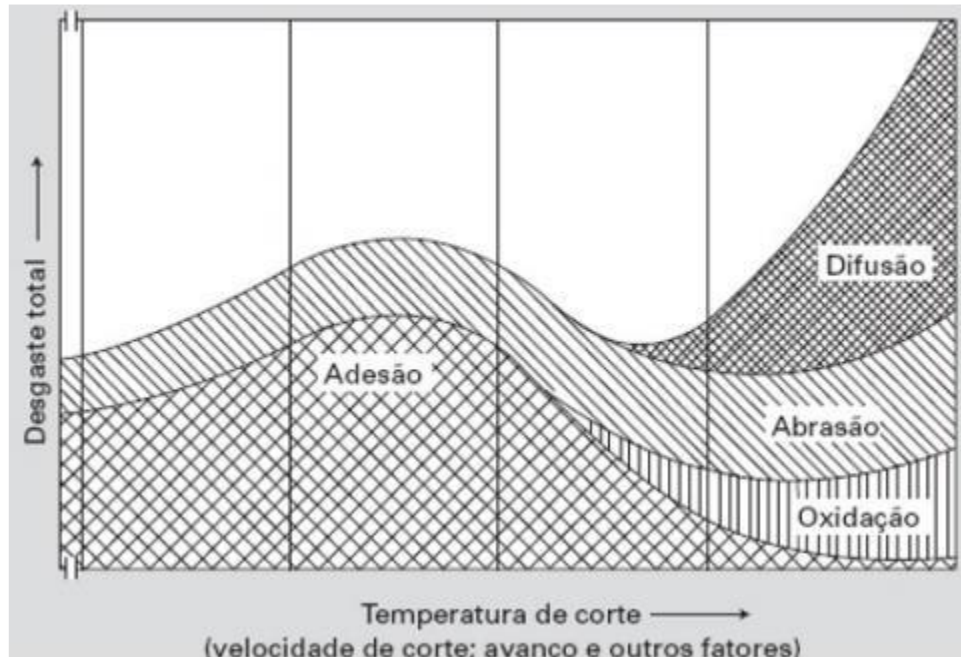
O desgaste por difusão é um mecanismo termicamente ativado, regido pelas leis da termodinâmica, que se torna o modo de desgaste dominante em temperaturas elevadas, tipicamente acima de 700°C, na interface cavaco-ferramenta. O processo é impulsionado pela afinidade química e pelos gradientes de concentração entre os materiais em contato (ferramenta e peça). Átomos de elementos presentes na ferramenta, como o cobalto (Co) que atua como ligante em ferramentas de metal duro, ou o tungstênio (W), podem se difundir para o material do cavaco, que atua como um sumidouro para esses elementos. De forma simultânea, átomos do material usinado, principalmente o ferro (Fe) no caso de aços, difundem-se para a superfície da ferramenta.

Essa migração atômica mútua resulta em uma alteração da composição química da camada superficial da ferramenta. A perda de cobalto, por exemplo, leva ao enfraquecimento da matriz que sustenta os carbeto de tungstênio, reduzindo sua dureza a quente e sua tenacidade. A penetração de ferro pode formar fases intermetálicas frágeis, fragilizando a aresta de corte e acelerando drasticamente a taxa de desgaste global (SAKETI et al., 2019; ÁVILA, 2007).

A oxidação é um mecanismo de desgaste de natureza química, potencializado pelas altas temperaturas na zona de corte e pela interação da ferramenta com o oxigênio presente no ambiente (ar e água). O processo leva à formação de camadas de óxido na superfície da ferramenta, que por serem geralmente frágeis e pouco aderentes, são facilmente removidas pelo fluxo do cavaco, expondo novo material a ser oxidado. Embora os fluidos de corte possuam aditivos antioxidantes, a falta de manutenção e conservação adequada desses fluidos na máquina pode comprometer sua função protetora, contribuindo para a aceleração do desgaste por oxidação (DINIZ;

MARCONDES; COPPINI, 2013). A Figura 3 relaciona a evolução dos mecanismos de desgastes com o aumento da temperatura do processo:

Figura 3 Diagrama de mecanismos de desgaste versus temperatura de corte

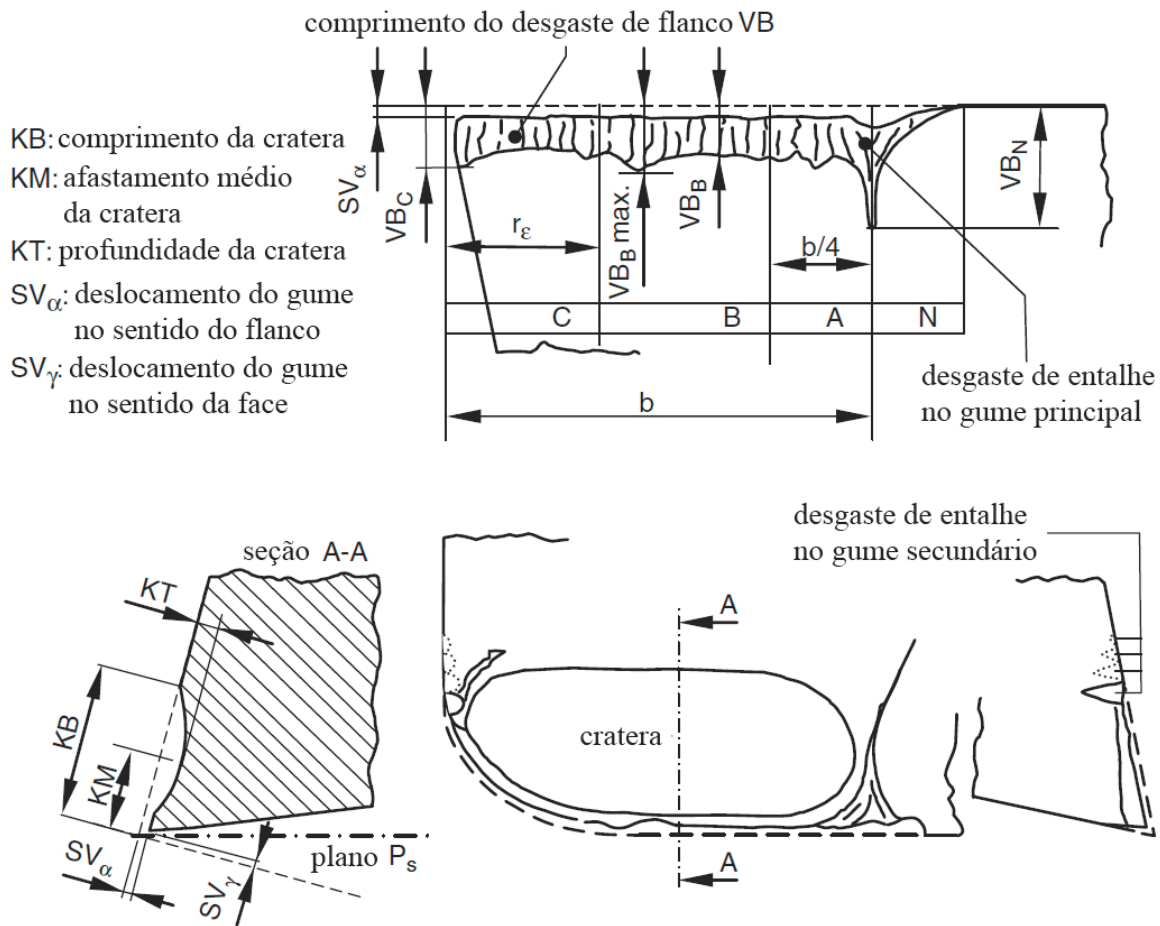


Fonte: Machado et al., 2011.

3.4 MECANISMOS DE FALHA E VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS

A vida útil da ferramenta é definida como o tempo de corte durante o qual ela ópera de forma eficaz e segura, produzindo peças com a qualidade especificada. O fim da vida é determinado quando o desgaste atinge um limite predefinido, conhecido como critério de fim de vida (ÁVILA, 2007). A Figura 4 mostra a representação esquemática da forma do desgaste em ferramentas que possuem geometria definida, conforme a norma DIN ISO 3685:1993(KLOCKE; KÖNIG, 2008; GAHR, 1987).

Figura 4 Representação esquemática da forma do desgaste em ferramentas que possuem geometria definida



Fonte: Klocke; König, 2008.

A Figura 4 fornece informações bidimensionais do desgaste – profundidades e comprimentos. Porém, não há descrição sobre informações como a área afetada, ou o volume de material removido da ferramenta (GAHR, 1987). Os principais parâmetros utilizados para avaliação do desgaste são: desgaste de flanco (VB) e desgaste de flanco médio (VBB); deslocamento do gume no sentido do flanco (SV_α) e da face (SV_γ); profundidade da cratera (KT) e afastamento médio da região mais profunda da cratera (KM), (GAHR, 1987).

Os principais mecanismos de falha são:

- **Desgaste de Flanco:** Desgaste gradual e uniforme na superfície de folga principal, causado majoritariamente por abrasão. É a forma mais desejável de

desgaste por ser progressiva e previsível (ÁVILA, 2007; HRECHUK; BUSHLYA, 2023).

- **Desgaste de Cratera:** Formação de uma cavidade na face de ataque, onde a temperatura e a pressão são máximas, causada principalmente por difusão e desgaste químico (LI et al., 2019).
- **Lascamento (Chipping) e Fratura:** Falhas súbitas e catastróficas da aresta de corte, geralmente causadas por sobrecarga mecânica, instabilidades ou fadiga térmica (PATEL et al., 2020).

3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DESGASTE

- **Microscopia Óptica:** É a técnica mais comum para medições dimensionais do desgaste, como o VBmax. Contudo, é um método manual, sujeito à interpretação do operador e com limitações de resolução e profundidade de foco (ALEXANDRE, 2011; SOARES, 2013).
- **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):** Essencial para a análise morfológica detalhada das superfícies desgastadas. Suas imagens de alta resolução e grande profundidade de campo permitem a identificação clara dos mecanismos de desgaste, como sulcos de abrasão, material aderido e microtrincas (ÁVILA, 2007; SOARES, 2013).
- **Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS):** Acoplada ao MEV, a EDS é uma técnica de microanálise que identifica os elementos químicos presentes em uma área específica da amostra, sendo crucial para confirmar a transferência de material por adesão ou difusão (ÁVILA, 2007; SAKETI et al., 2019).
- **Análise de Imagens Digitais:** Utiliza algoritmos e softwares para processar imagens obtidas por microscopia, permitindo a medição automática, objetiva e repetitiva de parâmetros como área, perímetro e forma do desgaste (LIZARELLI et al., 2007; HRECHUK; BUSHLYA, 2023).

3.6 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MEV NA ENGENHARIA DE MATERIAIS

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua

utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI et al. 1987).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica fundamental na Engenharia de Materiais para o diagnóstico de mecanismos de falha, sendo particularmente poderosa na investigação do desgaste de ferramentas de corte. A sua capacidade de gerar imagens com alta resolução e elevada profundidade de campo permite uma análise detalhada das complexas topografias e alterações composicionais que surgem nas superfícies desgastadas (GOLDSTEIN et al., 2003). A eficácia do MEV para este tipo de análise reside na utilização de diferentes sinais gerados pela interação do feixe de elétrons com a amostra, que produzem imagens com informações distintas e complementares.

3.6.1 Análise Topográfica por Elétrons Secundários (SE)

As imagens formadas por Elétrons Secundários (SE) são extremamente sensíveis à topografia da superfície da amostra. Este modo de operação é, portanto, essencial para a identificação morfológica dos mecanismos de desgaste. Por meio das imagens de SE, é possível visualizar com clareza feições como sulcos e riscos característicos do desgaste abrasivo, o arrancamento de material e a formação de crateras resultantes do desgaste adesivo, e a nucleação de microtrincas associadas à fadiga térmica ou mecânica (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

3.6.2 Análise Composicional por Elétrons Retroespalhados (BSE)

As imagens de Elétrons Retroespalhados (BSE) são geradas a partir de elétrons do feixe primário que são espalhados pela amostra. A intensidade deste sinal é diretamente proporcional ao número atômico (Z) médio da região analisada, o que gera um forte contraste composicional (GOLDSTEIN et al., 2003). Para a análise de ferramentas desgastadas, as imagens de BSE são cruciais para:

- Identificar a transferência de material: É possível distinguir claramente o material da peça (geralmente de baixo Z, como ligas de aço ou alumínio) aderido à

superfície da ferramenta (composta por elementos de alto Z, como tungstênio e titânio), confirmando o mecanismo de adesão.

- Detetar alterações químicas: Fenômenos como a oxidação ou a formação de outras fases na superfície da ferramenta podem ser detectados devido à variação no número atômico médio da região afetada (GOODHEW; HUMPHREYS; BEANLAND, 2001).

A análise combinada das imagens de SE e BSE permite, portanto, uma correlação direta entre a morfologia de uma feição de desgaste e a sua natureza química, fornecendo um diagnóstico preciso e completo dos fenômenos que levaram à degradação da ferramenta (GOLDSTEIN et al., 2003).

3.7 USO DO IMAGEJ NA QUANTIFICAÇÃO DE IMAGENS

O ImageJ é uma plataforma de software de domínio público, desenvolvida pelo National Institutes of Health (NIH) dos Estados Unidos, que se consolidou como uma ferramenta padrão para o processamento e análise de imagens científicas em diversas áreas do conhecimento (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). Desenvolvido na linguagem de programação Java, o software é multiplataforma e possui uma arquitetura aberta, o que permite que sua funcionalidade seja expandida continuamente por uma vasta comunidade de usuários e desenvolvedores através de plugins e macros (COLLINS, 2007).

O funcionamento do ImageJ baseia-se no princípio de tratar a imagem digital não apenas como uma representação visual, mas como uma matriz de dados quantitativos, onde cada pixel possui um valor de intensidade (nível de cinza). Essa abordagem permite que operações matemáticas e estatísticas sejam aplicadas à imagem para extrair informações objetivas que não são acessíveis por meio de uma simples inspeção visual (RUSS, 2011). Uma de suas capacidades centrais é a segmentação de imagem, um processo que visa particionar a imagem em suas partes constituintes, separando as feições de interesse (como partículas, fases microestruturais ou poros) do fundo da imagem. Frequentemente, isso é alcançado através de técnicas de limiarização (thresholding), onde um ou mais valores de intensidade de pixel são definidos como limites para isolar as áreas de interesse (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012).

Uma vez que as feições de interesse são isoladas, o ImageJ oferece um robusto conjunto de ferramentas para medições quantitativas, incluindo:

- I. Análise Morfométrica: Cálculo de parâmetros geométricos como área, perímetro, diâmetro, circularidade e fator de forma de partículas ou regiões.
- II. Medições Dimensionais: Ferramentas calibradas para medir comprimentos, ângulos e distâncias com precisão.
- III. Análise de Intensidade: Medição da densidade óptica, valores médios de cinza e plotagem de perfis de intensidade ao longo de uma linha.

Na engenharia de materiais, o ImageJ se aplica de maneira extremamente eficiente para transformar as micrografias, como as obtidas por MEV, em dados quantitativos. Ele é amplamente utilizado para:

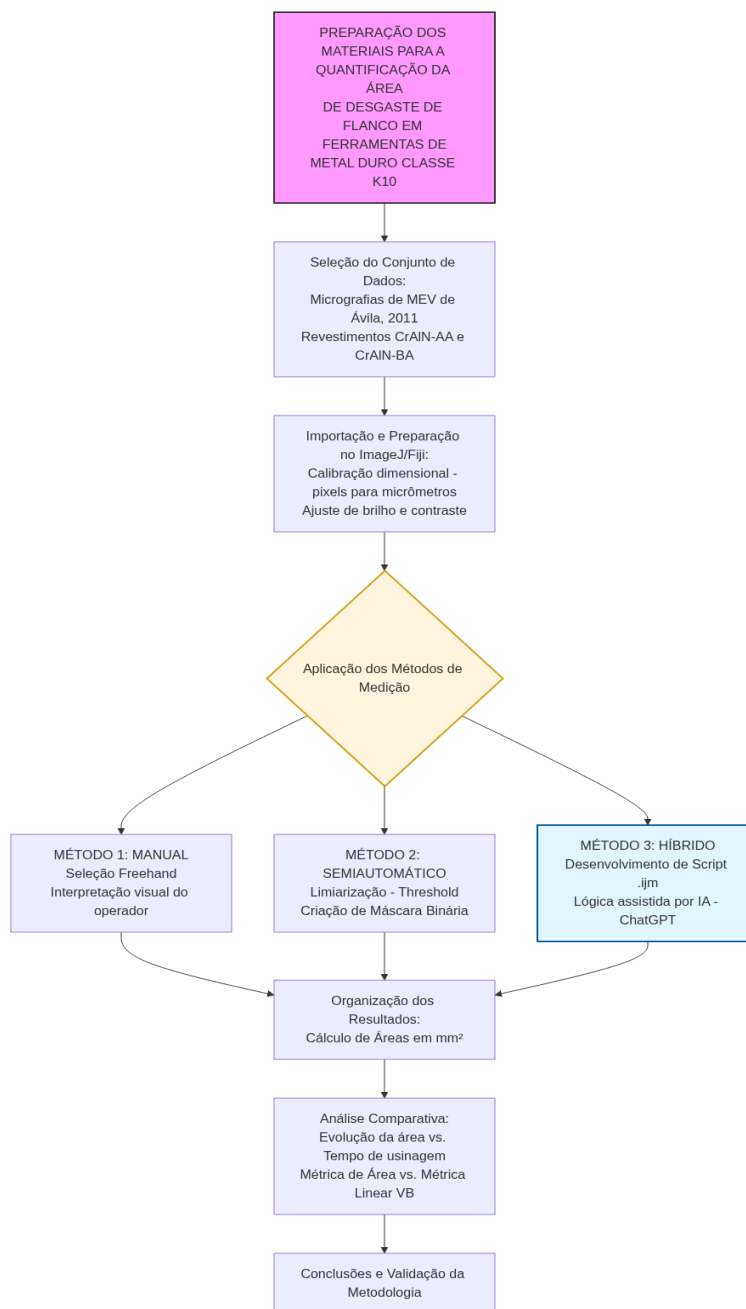
- I. Quantificação de Fases: Determinar a fração volumétrica de diferentes fases em uma microestrutura metálica ou cerâmica.
- II. Análise de Porosidade: Medir o tamanho, a distribuição e a porcentagem de poros em materiais sinterizados, compósitos ou revestimentos.
- III. Caracterização de Partículas: Analisar a distribuição de tamanho de pós ou partículas de reforço em uma matriz.
- IV. Quantificação de Desgaste: Medir a área de regiões que sofreram destacamento de material ou a densidade de microtrincas em uma superfície desgastada.

Em suma, o ImageJ funciona como uma ponte entre a visualização qualitativa fornecida pela microscopia e a análise quantitativa exigida pela ciência dos materiais, permitindo a extração de dados numéricos objetivos a partir de imagens digitais, o que é essencial para a correlação rigorosa entre microestrutura e propriedades (COLLINS, 2007; RUSS, 2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 5 apresenta o fluxograma esquematizado com a sequência de desenvolvimento das etapas experimentais, facilitando a visualização e compreensão da metodologia adotada.

Figura 5 Esquema da sequência do trabalho



4.1 APLICAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MEV NA ENGENHARIA DE MATERIAIS

Este estudo foi desenvolvido como um caso metodológico, utilizando micrografias em formato .tif e dados experimentais provenientes do relatório técnico de pós-doutorado de Ávila (2011). A seguir, detalham-se os materiais e as condições que originaram as imagens analisadas.

Material da Peça (Workpiece): O material usinado nos ensaios foi o Ferro Fundido Nodular, classe ABNT FE 45012. Este material apresenta uma microestrutura mista perlítico-ferrítica, combinando boa usinabilidade com propriedades mecânicas elevadas, características que justificam o estudo do desgaste da ferramenta durante o torneamento.

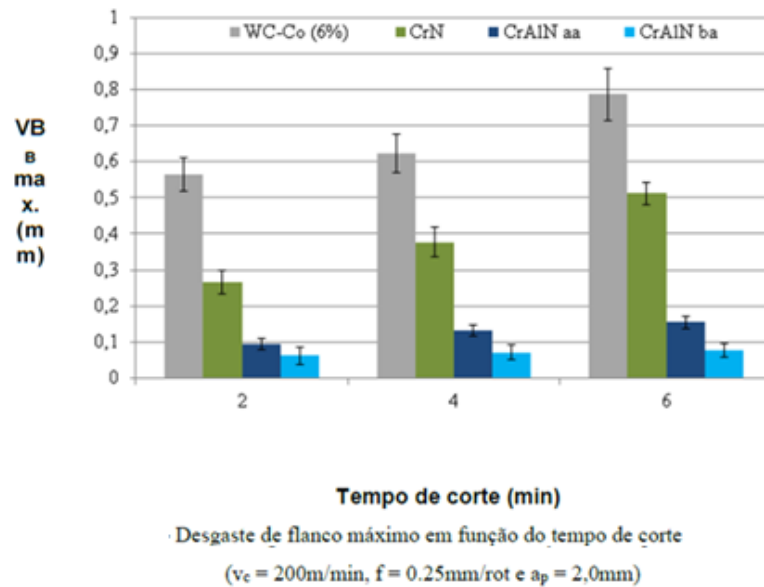
Substrato e Geometria da Ferramenta: As ferramentas utilizadas foram insertas de metal duro (Carboneto de Tungstênio, WC) com ligante de Cobalto.

- Composição: WC com 6% de Co (em peso).
- Classe: ISO K10 (tenaz, indicada para ferros fundidos).
- Geometria: Insertos quadrados sem furo central, especificação ISO SNGN 120408 (aresta de 12,7 mm, espessura de 4,76 mm e raio de ponta de 0,8 mm).

Características dos Revestimentos (CrAlN): O foco da análise recai sobre ferramentas revestidas com Nitreto de Cromo-Alumínio (CrAlN), depositadas via PVD. Foram analisadas duas variantes deste revestimento para verificar a influência do teor de Alumínio na resistência ao desgaste de flanco, conforme demonstrado no comparativo de desempenho da Figura 6.

- **CrAlN-AA (Alto Alumínio):** Estequiometria $(Cr_{0,32}Al_{0,68})N$ com espessura de 1,98 μm .
- **CrAlN-BA (Baixo Alumínio):** Estequiometria $(Cr_{0,75}Al_{0,25})N$ com espessura de 2,5 μm .

Figura 6 Evolução do desgaste de flanco máximo (VB max) em função do tempo para os revestimentos CrAlN-AA e CrAlN-BA.

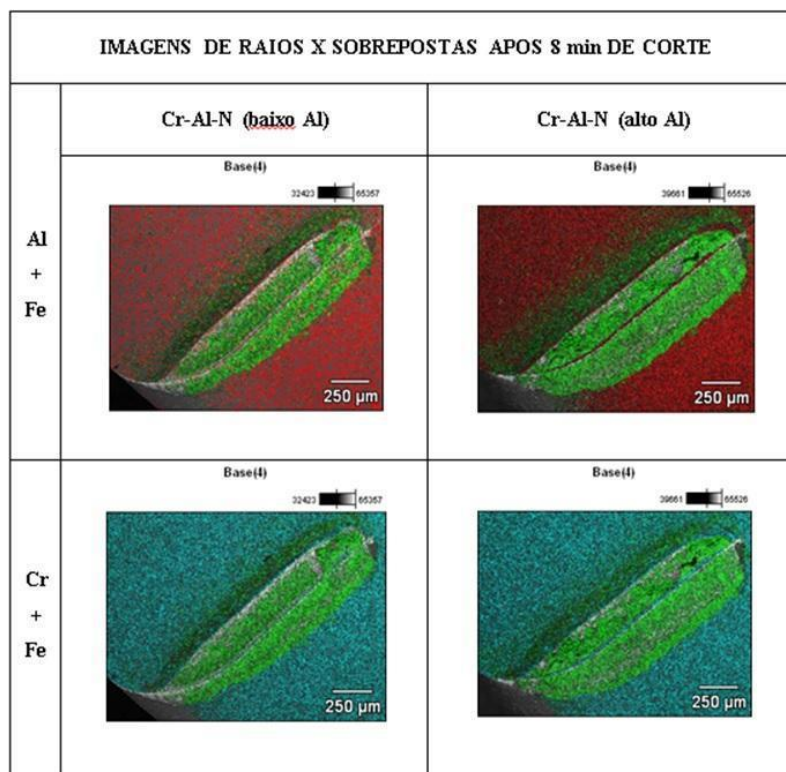


Fonte: Adaptado de Ávila, 2011.

Além da geometria e do revestimento, a caracterização química da superfície desgastada (realizada originalmente via EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva) revela a interação entre o material da peça e a ferramenta.

A Figura 7 ilustra o mapeamento de elementos após 8 minutos de corte, evidenciando as regiões de exposição do substrato e adesão de material.

Figura 7 Imagens de Raios X sobrepostas dos principais elementos do par tribologico



Legenda: vermelho = Al, azul = Ti e verde = Fe

Fonte: Adaptado de Ávila, 2011.

Parâmetros de Ensaio (Condições de Corte): Os ensaios de torneamento cilíndrico externo foram realizados a seco. Os parâmetros mantidos constantes foram:

- Velocidade de Corte (V_c): 200 m/min.
- Avanço (f): 0,25 mm/rot.
- Profundidade de Corte (A_p): 2 mm.

Aquisição de Imagens (Tempos de Parada): O desgaste de flanco foi monitorado interrompendo-se o processo em intervalos pré-determinados. As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizadas neste TCC correspondem aos seguintes tempos de usinagem efetiva:

- Tempos analisados (t): 2, 4, 6 e 8 minutos.
- Configuração: As imagens possuem aumento de 70X e inclinação de 45°, permitindo a visualização clara da face de folga da ferramenta. A Tabela 2

resume as condições experimentais.

Tabela 2 Imagens de Raios X sobrepostas dos principais elementos do par tribológico

Material da peça	Ferro Fundido Nodular, classe ABNT FE 45012 (perlítico-ferrítico)
Processo	Torneamento a seco
Substrato da ferramenta	Metal duro (WC-6%Co) Classe K10
Revestimentos analisados CrAIN com dois teores de alumínio	i) CrAIN-AA: (Cr _{0,32} Al _{0,68})N ii) CrAIN-BA: (Cr _{0,75} Al _{0,25})N
Espessura dos revestimentos	i) CrAIN-AA: 1,98 µm ii) CrAIN-BA: 2,5 µm
Condições de corte	Profundidade de Corte (a _p): 0,2 mm Avanço (f): 0,25 mm/rot Velocidade de Corte (vc): 200 m/min
Tempos de usinagem analisados Foram escolhidos 4 tempos de estudo para coleta das imagens de MEV, com aumentos de 70X, inclinação de 45°.	t1: 2 min t2: 4 min t3: 6 min t4: 8 min

Fonte: Adaptado de Ávila, 2011.

Essa configuração de aquisição a 45° é estratégica para a metodologia de baixo custo, pois permite a visualização simultânea de dois mecanismos críticos de falha na mesma imagem digital.

- **Desgaste de Flanco (VB):** Região de interesse primário deste trabalho, caracterizada visualmente pela perda de material e presença de ranhuras paralelas à direção de corte, típicas do mecanismo de abrasão mecânica descrito por Ávila (2007).
- **Desgaste de Cratera (KT):** Localizada na face de ataque, apresentando uma morfologia côncava resultante de fenômenos termicamente ativados, como a difusão e a adesão, conforme detalhado por Li et al. (2019).

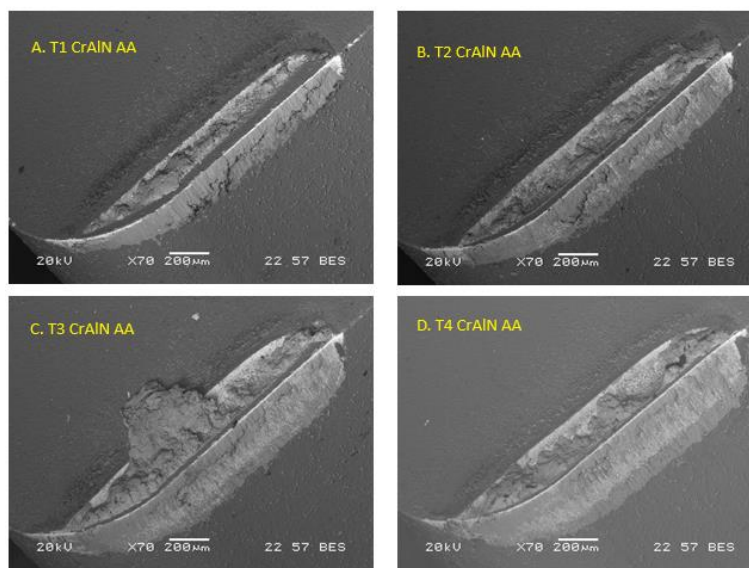
A identificação clara dessas feições nas micrografias confirma a adequação das imagens para o processamento digital no software ImageJ, permitindo a segregação e quantificação das áreas desgastadas conforme as diretrizes de caracterização morfológica de ferramentas (HRECHUK;

BUSHLYA, 2023).

Para a análise experimental, as micrografias foram organizadas cronologicamente para cada revestimento:

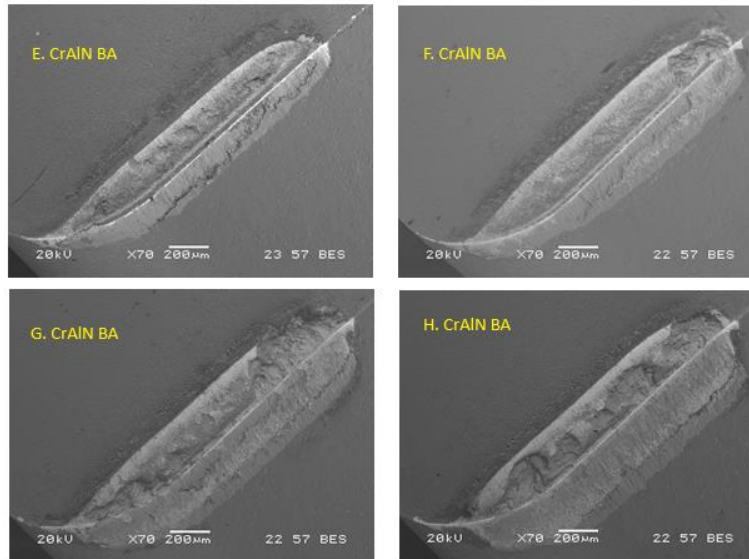
- **CrAIN-AA (Alto Alumínio):** Imagens catalogadas de T1 a T4 (Figuras 8. A a D);
- **CrAIN-BA (Baixo Alumínio):** Imagens catalogadas de T1 a T4 (Figuras 9. E a H).

Figura 8 Micrografias de CrAIN-AA (Alto Alumínio)



Fonte: Ávila, 2011.

Figura 9 Micrografias de CrAlN-BA (Baixo Alumínio)



Fonte: Ávila, 2011.

Com base neste conjunto de dados, procedeu-se ao cálculo das áreas de desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (classe K10) revestidas. A quantificação foi realizada comparativamente através dos três métodos propostos: manual, semiautomático e híbrido.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Metodologias de análise com ImageJ (segmentação, medição de área, perfil de desgaste)

O software ImageJ (versão 1.54t), de domínio público e utilizando a distribuição Fiji (Fiji Is Just ImageJ), foi empregado como plataforma principal para o processamento, segmentação e medição das áreas desgastadas. As três metodologias a seguir foram testadas, comparadas e avaliadas quanto à precisão, reprodutibilidade e praticidade de execução.

Para download do software utilizado e fins de reprodutibilidade dos resultados, o pacote Fiji está disponível em: <https://imagej.net/software/fiji/downloads>.

4.2.2 Metodologia 1: Medição Manual-Digital (Contorno Livre "Freehand")

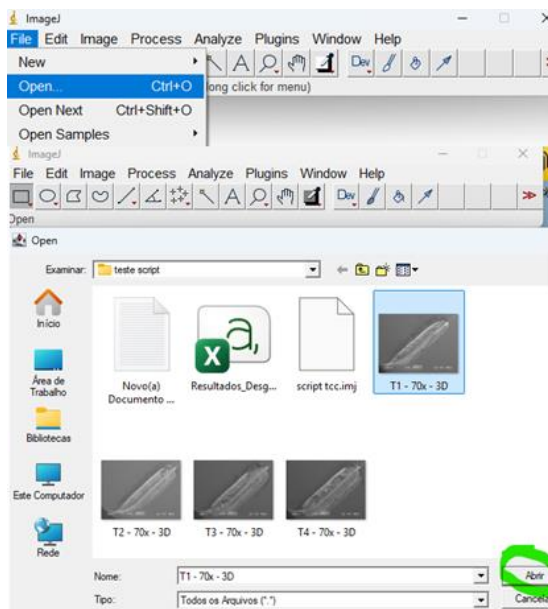
A primeira metodologia utilizou o modo manual-digital, no qual o operador realiza o contorno da área desgastada diretamente na imagem, usando a ferramenta Freehand Selection. Embora simples, o método permite compreender a estrutura básica de calibração e medição do ImageJ.

Procedimento:

- Execute o ImageJ.

Abertura da Imagem: Abrir o arquivo .tif (ex: T1 - 70x - 3D.tif, ver figura 10) no ImageJ (File > Open...). E busque a foto a ser analisada.

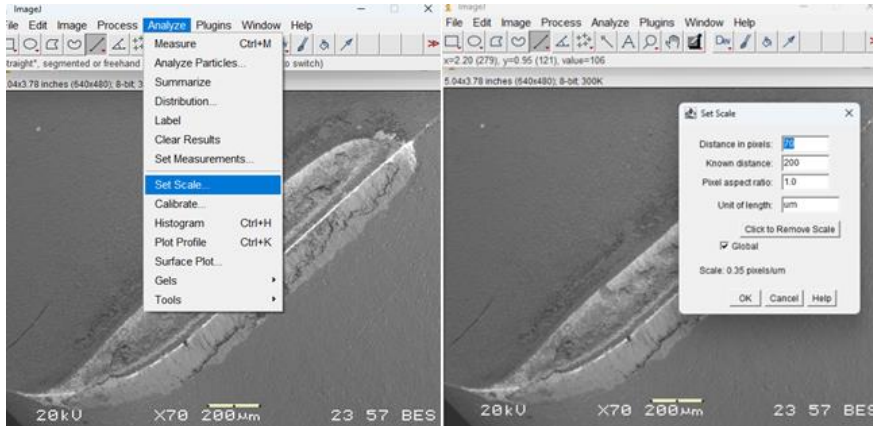
Figura 10 Abertura da imagem a ser analisada



Fonte: Autor (2025)

Calibração Manual: Utilizar a ferramenta "Linha Reta" para medir a barra de escala gráfica (ex: "200 micrômetros") em pixels. Em seguida, usar Analyze > Set Scale... para informar ao software a "distância conhecida" (200) e a "unidade" (μm) (ver figura 11)

Figura 11 Calibração manual da imagem no ImageJ



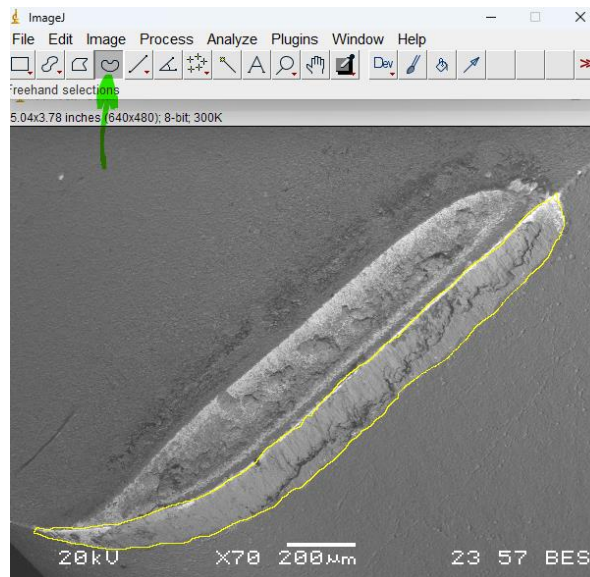
Fonte: Autor (2025)

Seleção Manual: Utilizar a ferramenta "Freehand Selections" (Seleção Livre) para desenhar manualmente o contorno da área de desgaste (Figura 12).

Medição:

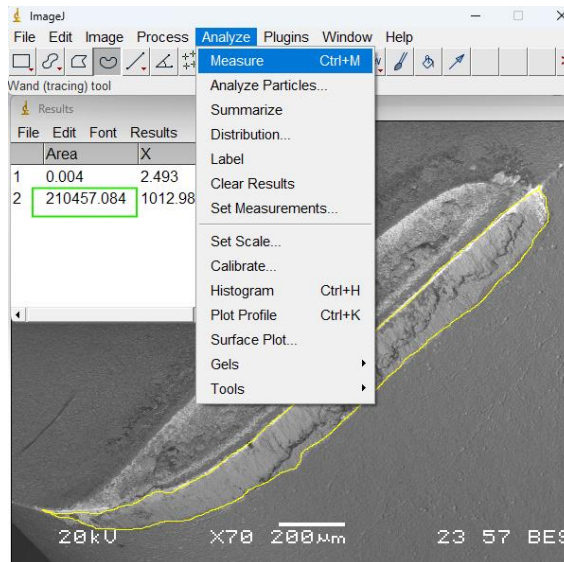
- Executar Analyze > Measure (Atalho: Ctrl + M) para obter a área em μm^2 na janela de "Resultados" (Figura 13).

Figura 12 Segmentação manual da área de desgaste usando "Freehand Selection"



Fonte: Autor (2025)

Figura 13 Tabela de resultados da medição de área via Freehand



Fonte: Autor (2025)

Limitações Identificadas: Embora este método meça a área, ele sofre de alta subjetividade. O traçado com o mouse não é perfeitamente repetível. Duas medições na mesma imagem produzem resultados ligeiramente diferentes, dependendo da firmeza da mão do operador.

4.2.3 Metodologia 2: Medição Semiautomática (Limiarização "Threshold") por Isolamento de Máscara e Análise de Partículas

Utilizado para isolar e quantificar com precisão o desgaste de flanco em ferramentas de corte, garantindo que cada tipo seja medido individualmente.

O processo foi executado separadamente para cada tipo de desgaste em todas as imagens analisadas.

Etapas 1: Abertura e Calibração Manual (Garantindo a Precisão)

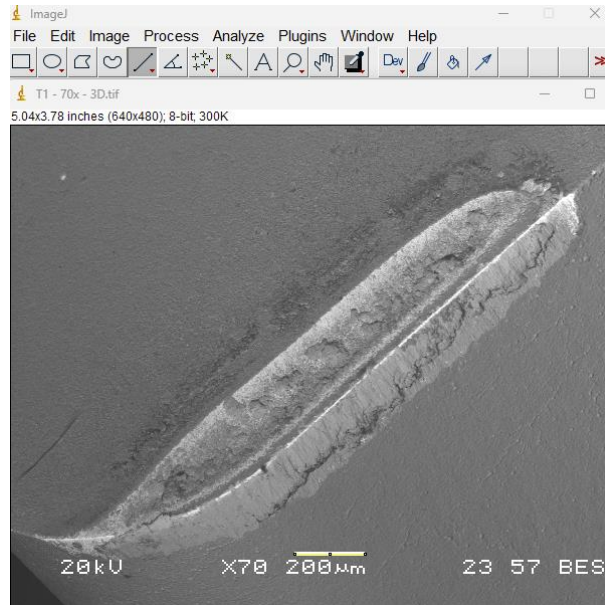
O primeiro passo é abrir a imagem e forçar uma calibração manual precisa, já que a calibração automática pode não ser confiável.

Abrir a Imagem:

- Ir a File > Open...

- Selecione o arquivo da amostra (exemplo: T1 - 70x.tif).
- Selecionar a Ferramenta de Linha:
- Clique na ferramenta “Line” (Linha Reta).
- Medir a Barra de Escala: Localize a barra de escala (exemplo: 200 μm) e meça com a ferramenta de linha. (Figura 14).

Figura 14 Medição manual da barra de escala para calibração da imagem

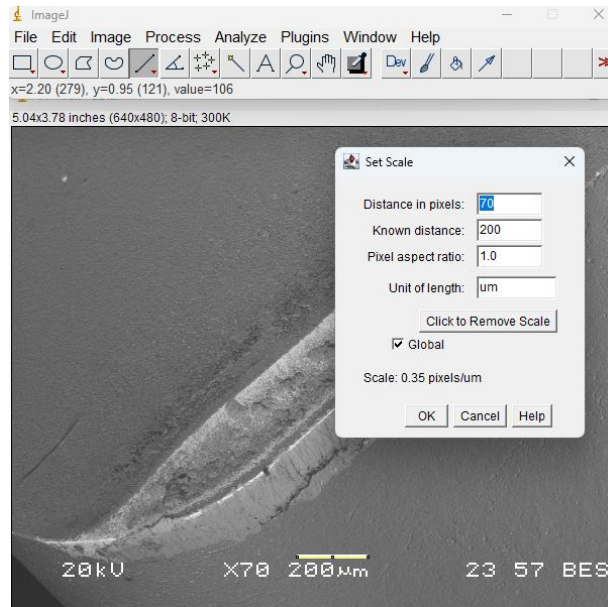


Fonte: Autor (2025)

Definir a Escala (Set Scale): (Figura 15).

- Vá em Analyze > Set Scale...
- Known distance: 200
- Unit of length: μm
- Marque Global e clique em OK.

Figura 15 Configuração manual da escala de calibração (200 μm)



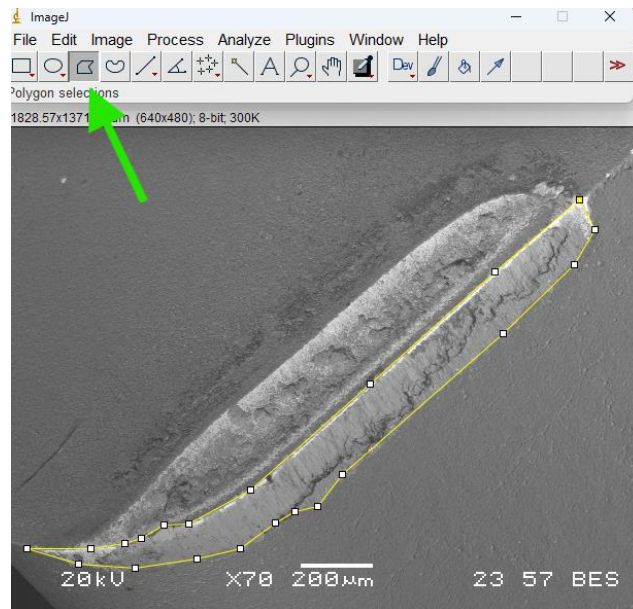
Fonte: Autor (2025)

Etapa 2: Isolamento da Região de Interesse (ROI)

Selecionar a Ferramenta Polígono:

- Clique em “Polygon Selections”. Traçar o Contorno Manual:
- Clique cuidadosamente ao redor da região de desgaste de flanco (Figura 16) e feche o polígono.

Figura 16 Delimitação manual da região de interesse correspondente ao desgaste de flanco



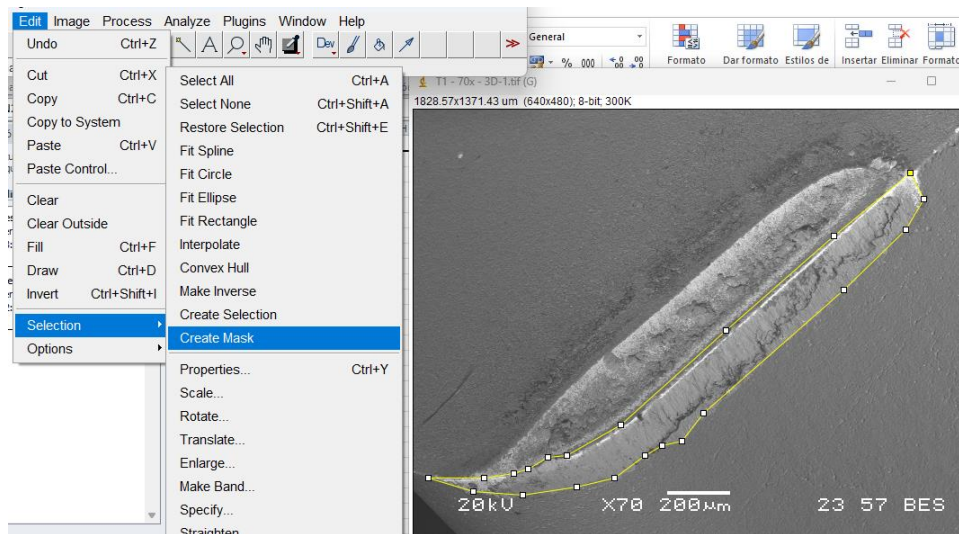
Fonte: Autor (2025)

Etapa 3: Criação da Máscara (Etapa Chave) (Figura 17).

Criar a Máscara:

- Com a seleção ativa, vá em Edit > Selection > Create Mask.

Figura 17 Criação da máscara binária a partir da seleção poligonal

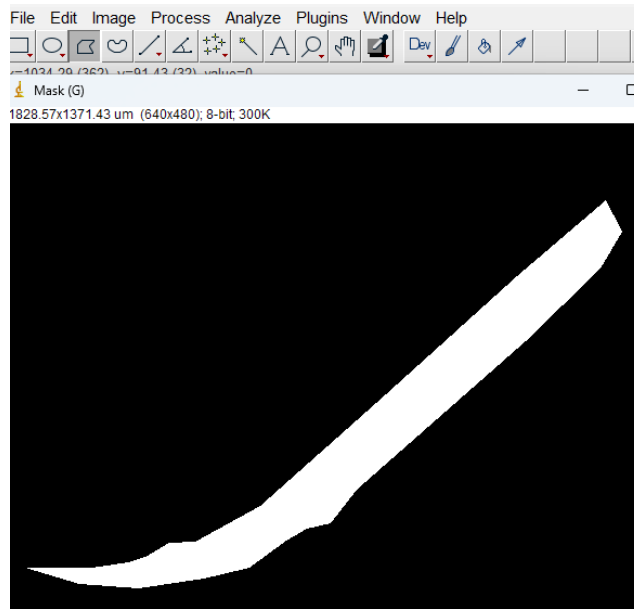


Fonte: Autor (2025)

Analisar a Nova Imagem:

- O ImageJ criará a janela “Mask” em preto e branco (branco = desgaste, preto = fundo). Conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 Máscara binária gerada a partir da seleção da região de desgaste de flanco



Fonte: Autor (2025)

Etapa 4: Segmentação por Limiarização (Threshold)

Ativar o Threshold:

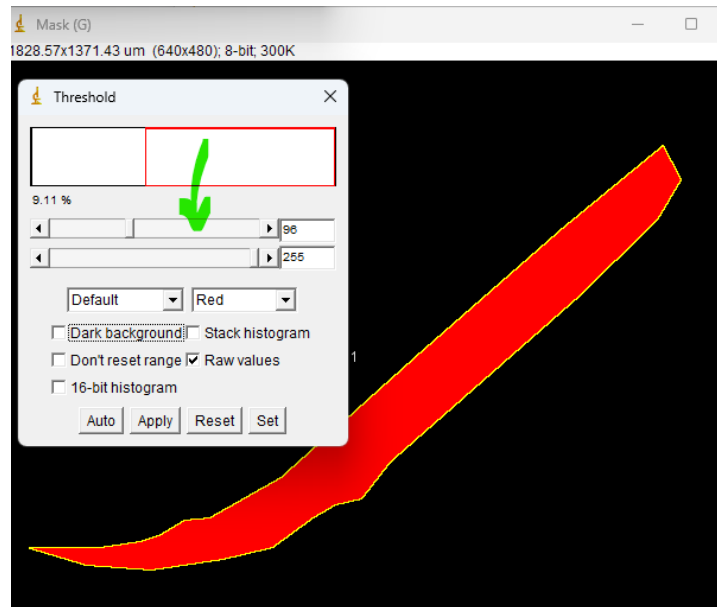
- Na janela “Mask”, vá em Image > Adjust > Threshold... (ou Ctrl+Shift+T).

Ativar o Threshold:

- Ajustar os Limites:

Ajuste os controles até que o desgaste fique em vermelho e o fundo em preto. A Figura 19 demonstra a janela de "Threshold" sendo ajustada para isolar a máscara.

Figura 19 Ajuste manual do limiar para segmentação da região de desgaste



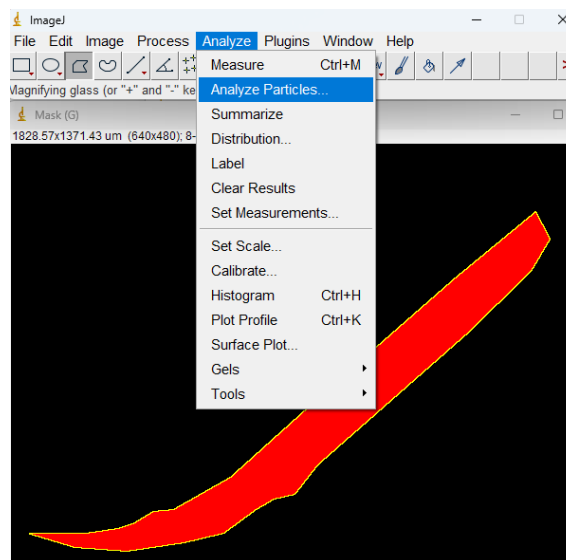
Fonte: Autor (2025)

Etapa 5: Medição por Análise de Partículas

Abrir a Análise de Partículas:

- Vá a *Analyze > Analyze Particles...* Na Figura 20, é possível observar o menu sendo selecionado para acessar o módulo de medição.

Figura 20 Acesso ao módulo *Analyze Particles* para medição da área segmentada



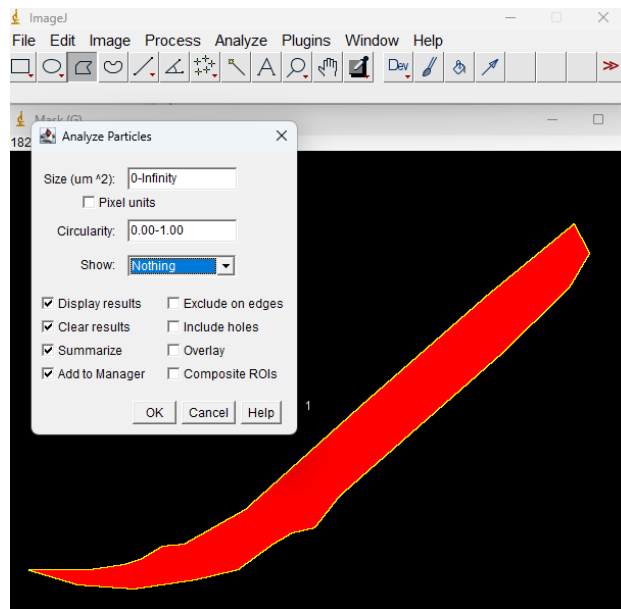
Fonte: Autor (2025)

Configurar a Análise:

Marque as seguintes opções, conforme apresentado na Figura 21:

- Display Results
- Clear Results
- Summarise

Figura 21 Configurações adequadas para análise de partículas no ImageJ

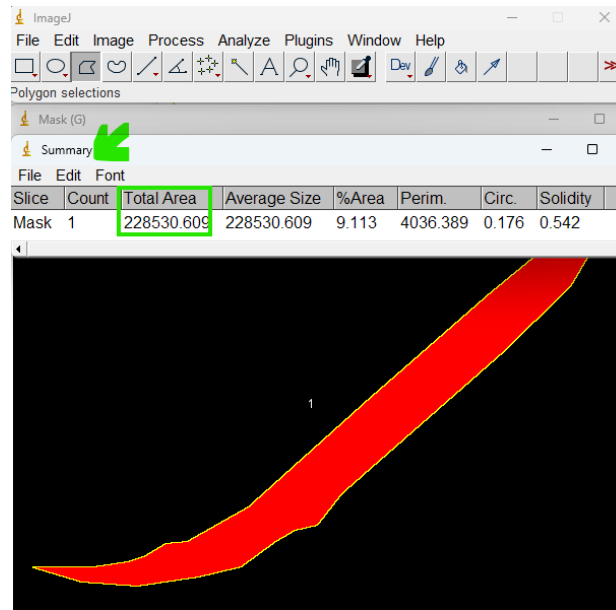


Fonte: Autor (2025)

Obter o Resultado:

- Clique em OK para visualizar as janelas "Results" e "Summary". A Figura 22 apresenta a tabela "Summary" , que exibe o valor final da "Total Area" calculada.

Figura 22 Resultado da análise de partículas com a área do desgaste (μm^2)



Fonte: Autor (2025)

Recomendações Finais

- Salve todas as máscaras geradas (File > Save As...) para manter rastreabilidade.
 - Ajuste brilho e contraste antes do Threshold se o contraste for baixo.
- Mantenha consistência entre as imagens (mesma ampliação e iluminação).
- Registre os valores obtidos em uma planilha (Excel ou CSV) para comparação posterior.
- Vantagens: O método semiautomático reduz a interferência humana e garante resultados precisos e reproduzíveis. Limitação: Ainda requer a seleção inicial manual das regiões (ROI).

4.2.4 Metodologia 3: Medição híbrida, uso dos métodos manual, threshold e Script/Macro no ImageJ

Com base nos resultados anteriores, foi desenvolvido um script (macro) no ImageJ com o objetivo de automatizar as etapas de medição e padronizar o processo. O script (analisardesgaste.ijm) foi desenvolvido através de uma **metodologia híbrida**, combinando o planejamento lógico próprio com ferramentas de geração de código

assistidas por Inteligência Artificial (IA). O processo foi estruturado da seguinte forma:

Definição da Lógica e dos Requisitos: Primeiramente, definiu-se todo o fluxo de trabalho lógico necessário. Para isso, decompôs-se o procedimento manual (Seção 4.2.3) em uma sequência exata de comandos e interações que o operador precisaria realizar, como exibir instruções, pausar para a seleção de ROI, pausar para o ajuste de threshold, etc.

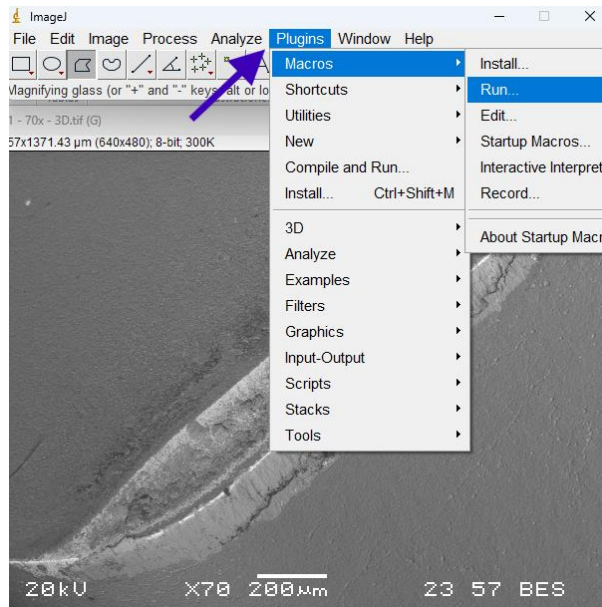
- Geração Assistida de Código: Para cada etapa lógica definida, utilizou-se uma ferramenta de IA (ChatGPT) como assistente de programação. Foram fornecidos os requisitos da etapa (por exemplo: "Preciso de um comando que pause o script e mostre a mensagem 'Desenhe o Flanco'") e a IA auxiliou na elaboração do bloco de código correspondente na linguagem de macro do ImageJ.
- Validação, Depuração e Integração: Esta foi a etapa mais crítica. O código gerado pela IA não foi implementado diretamente. Cada bloco de código foi minuciosamente revisado, testado e "depurado" (corrigido) em um ambiente de testes no ImageJ. Isso foi feito para garantir que o código executava a ação desejada de forma correta e precisa.
- Refinamento Iterativo: Após a validação dos blocos de código individuais, os mesmos foram integrados ao script principal. O script completo passou por múltiplos ciclos de testes e refinamentos (análises iterativas) realizados para assegurar que o fluxo de trabalho era robusto, que as variáveis eram capturadas corretamente e que a interação com o operador era clara.

Esta abordagem permitiu o foco na lógica metodológica e na validação dos resultados, enquanto utilizou-se a IA como uma ferramenta para acelerar a elaboração da sintaxe do código.

Procedimento detalhado (Fluxo do Script analisar desgaste) o qual é executado para cada imagem de micrografia calibrada:

- Execução e Preparação: O script é iniciado (Plugins > Macros > Run...). Conforme ilustrado na Figura 23, primeiro prepara-se o ambiente, limpando quaisquer resultados ou janelas de processos anteriores (Clear Results, Close "Mask", etc.).

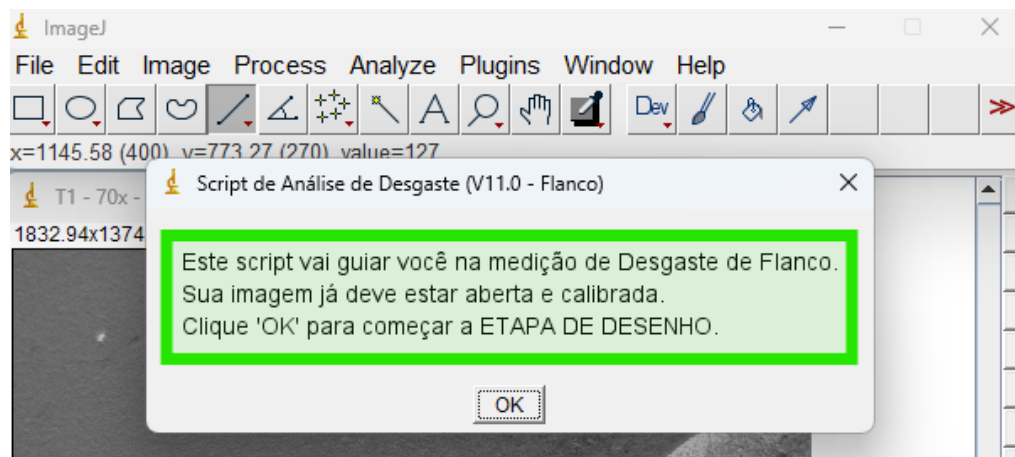
Figura 23 Execução e preparação do script



Fonte: Autor (2025)

Etapa 1: Entrada do Operador (Seleção de ROIs): O script pausa e solicita ativamente a intervenção do operador para a tarefa de interpretação espacial, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 Entrada do operador (Seleção de ROIs)

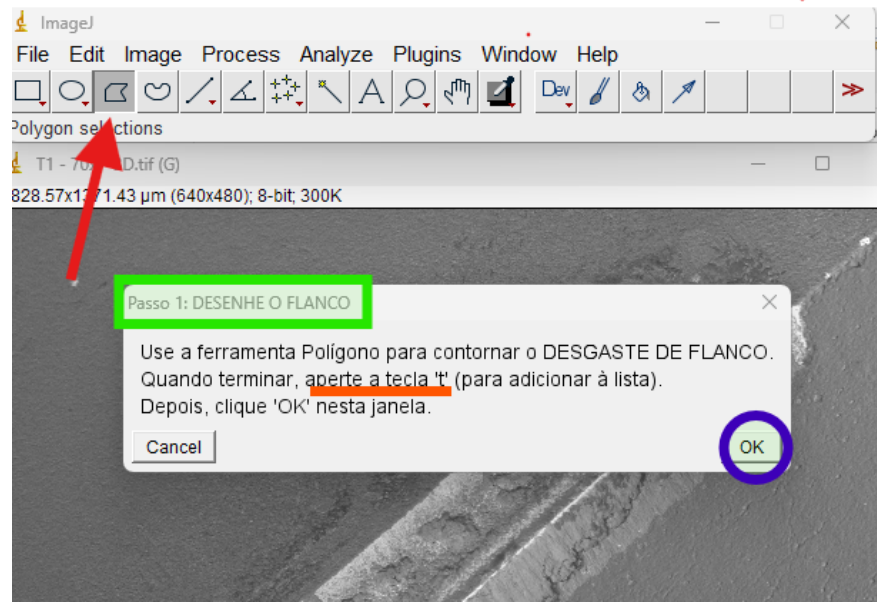


Fonte: Autor (2025)

Passo 1.1 (Flanco): Uma caixa de diálogo (waitForUser) instrui o operador a usar

a ferramenta "Polygon Selections" para contornar a área de **desgaste de flanco** (ver Figura 25). O operador então pressiona a tecla 't' para adicionar esta seleção (ROI) ao "ROI Manager".

Figura 25 Ferramenta Polygon Selections



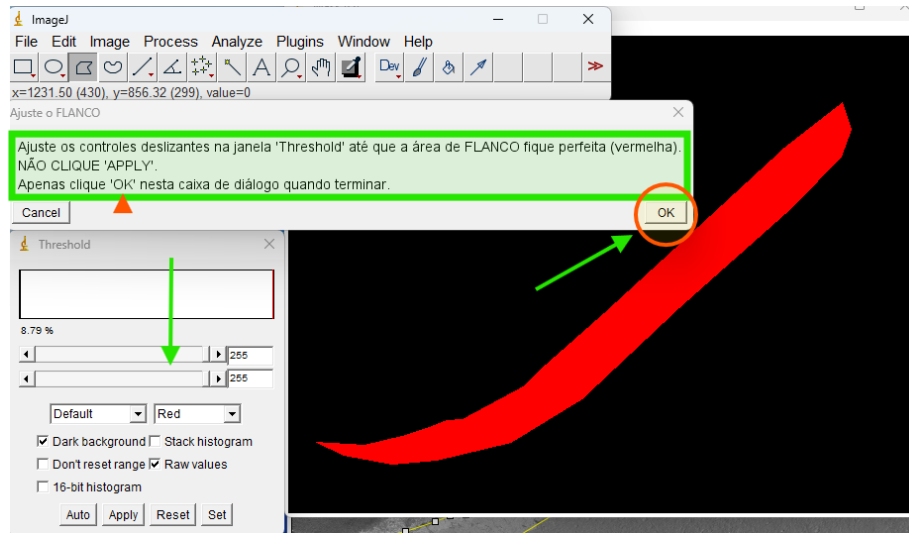
Fonte: Autor (2025)

Etapa 2: Processamento e Medição (Automação do Script): Após o operador confirmar que o ROI foi criado, o script assume o controle total e inicia o processamento automático, executando o seguinte ciclo duas vezes (uma para cada ROI):

Passo 2.1 (Isolamento): O script seleciona o primeiro ROI (Flanco) e executa o comando `run("Create Mask")`. Isso cria uma nova imagem "Mask" contendo apenas a área de flanco, eliminando qualquer interferência da cratera.

Passo 2.2 (Limiarização Visual): O script executa `run ("Threshold...")`, abrindo a janela de Limiarização. A Figura 26 detalha ele como pausa (`waitForUser`) e instrui o operador a **ajustar visualmente os controles deslizantes** até que a máscara vermelha cubra perfeitamente a área de desgaste.

Figura 26 Ajuste visual dos controles deslizantes



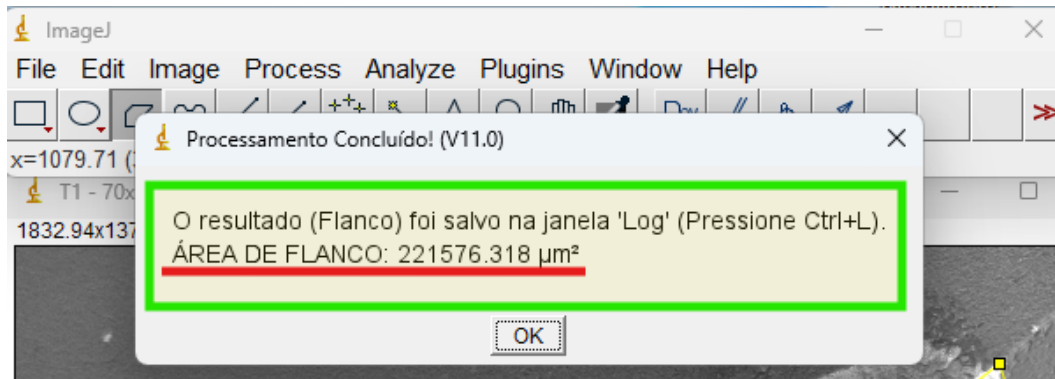
Fonte: Autor (2025)

Passo 2.3 (Cálculo): Após o operador dar "OK", o script captura os valores de threshold (*getThreshold*), converte a máscara (*Convert to Mask*) e executa a análise de partículas (*Analyze Particles...*).

Passo 2.4 (Coleta de Dados): O script lê a tabela de resultados (*nResults*), identifica a coluna de área (ex: "Area") e soma (*getResult*) todos os fragmentos encontrados para calcular a área total daquele desgaste.

Etapa 3: Apresentação dos Resultados: Ao final do processo, o script fecha todas as janelas auxiliares (*ROI Manager*, *Mask*) e apresenta ao operador uma caixa de diálogo final (*showMessage*). A Figura 27 apresenta um exemplo desta janela com o resumo dos dados, contendo as áreas totais calculadas para Flanco e Cratera, que também são salvas na janela "Log" para registro.

Figura 27 Apresentação dos resultados pelo script



Fonte: Autor (2025)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DESGASTADAS

Para avaliar a influência do teor de alumínio na resistência ao desgaste das ferramentas revestidas (CrAlN AA e CrAlN BA), adotou-se uma metodologia sistemática de análise via Processamento Digital de Imagens (PDI). O objetivo desta etapa foi transformar a análise visual qualitativa em dados quantitativos precisos, permitindo uma comparação estatística do desempenho entre os dois materiais.

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizadas como base para esta análise foram extraídas dos ensaios experimentais apresentados no relatório de pós-doutorado de (ÁVILA, 2011). Estas micrografias documentam a face de folga das ferramentas após intervalos de usinagem efetiva de 2, 4, 6 e 8 minutos.

A análise comparativa realizada neste trabalho foi viabilizada pela padronização dos parâmetros de aquisição no MEV: tensão de aceleração de 20 kV, aumento de 70X e escala gráfica de 200 μm . Essa uniformidade assegurou que as dimensões da região de desgaste de flanco fossem diretamente comparáveis entre as diferentes amostras e tempos de usinagem, eliminando a necessidade de ajustes de escala durante o processamento das imagens.

5.2 TABELAS E GRÁFICOS COM DADOS DE ÁREA

Os dados foram compilados após a realização das medições nas micrografias de ambos os revestimentos em todos os tempos de corte. As tabelas 3 e 4 apresentam os valores de área desgastada obtidos (mm^2), discriminando os resultados por tempo de usinagem e pelo método de medição empregado.

Tabela 3 Valores de área (mm²) obtidos pelos três métodos de medição para o revestimento CrAIN AA

Tempo (min)	Revestimento	Teor de Al	Espessura (µm)	Método	Área (mm ²)
2	CrAIN AA	0,68	1,98	Manual	0,2193
4	CrAIN AA	0,68	1,98	Manual	0,2990
6	CrAIN AA	0,68	1,98	Manual	0,3731
8	CrAIN AA	0,68	1,98	Manual	0,4302
2	CrAIN AA	0,68	1,98	Thresholds	0,2157
4	CrAIN AA	0,68	1,98	Thresholds	0,2998
6	CrAIN AA	0,68	1,98	Thresholds	0,3779
8	CrAIN AA	0,68	1,98	Thresholds	0,4360
2	CrAIN AA	0,68	1,98	Híbrido	0,2252
4	CrAIN AA	0,68	1,98	Híbrido	0,3019
6	CrAIN AA	0,68	1,98	Híbrido	0,3754
8	CrAIN AA	0,68	1,98	Híbrido	0,4416

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4 Valores de área (mm²) obtidos pelos três métodos de medição para o revestimento CrAIN BA

Tempo (min)	Revestimento	Teor de Al	Espessura (µm)	Método	Área (mm ²)
2	CrAIN BA	0,25	2,5	Manual	0,2213
4	CrAIN BA	0,25	2,5	Manual	0,2429
6	CrAIN BA	0,25	2,5	Manual	0,3427
8	CrAIN BA	0,25	2,5	Manual	0,4403
2	CrAIN BA	0,25	2,5	Thresholds	0,2114
4	CrAIN BA	0,25	2,5	Thresholds	0,2782
6	CrAIN BA	0,25	2,5	Thresholds	0,4010
8	CrAIN BA	0,25	2,5	Thresholds	0,4841
2	CrAIN BA	0,25	2,5	Híbrido	0,2279
4	CrAIN BA	0,25	2,5	Híbrido	0,2792
6	CrAIN BA	0,25	2,5	Híbrido	0,4029
8	CrAIN BA	0,25	2,5	Híbrido	0,4830

Fonte: Autor (2025)

A partir dos dados tabulados, foram gerados gráficos comparativos para visualizar a cinética do desgaste e validar a confiabilidade da metodologia de medição.

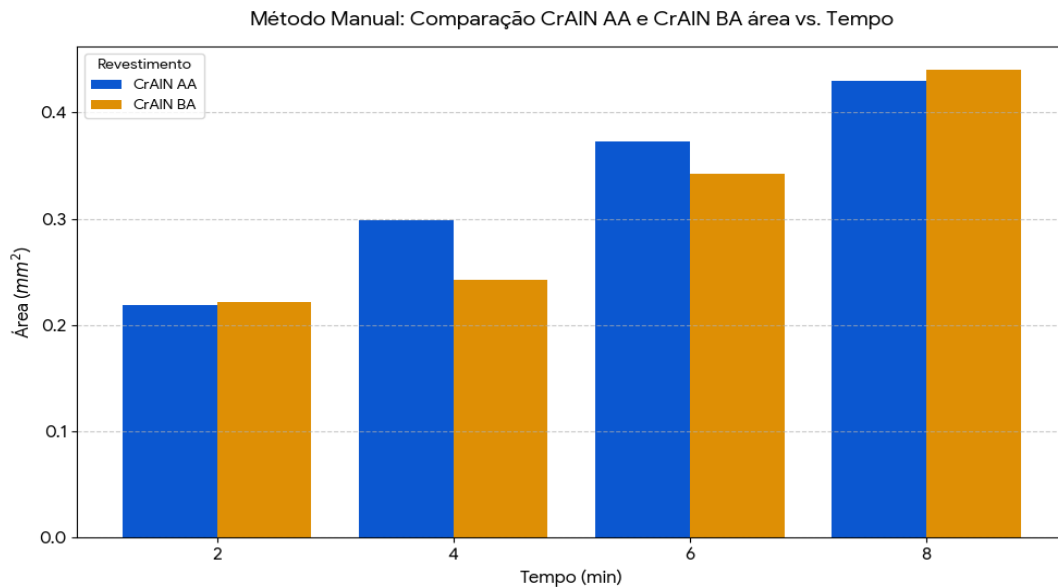
Análise via Método Manual

Inicialmente, a Figura 28 apresenta a comparação da evolução da área de desgaste realizada através da medição manual. Conforme descrito na metodologia, este processo utilizou a ferramenta Freehand Selection (Seleção Livre), onde o

operador desenha o contorno da área desgastada diretamente sobre a imagem calibrada com base em sua percepção visual.

Observa-se que, sob a análise manual, os valores finais de área para ambos os revestimentos são próximos. O CrAIN BA atingiu 0,4403 mm² aos 8 minutos, valor ligeiramente superior ao do CrAIN AA (0,4302 mm²).

Figura 28 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAIN AA e CrAIN BA Método Manual



Fonte: Autor (2025)

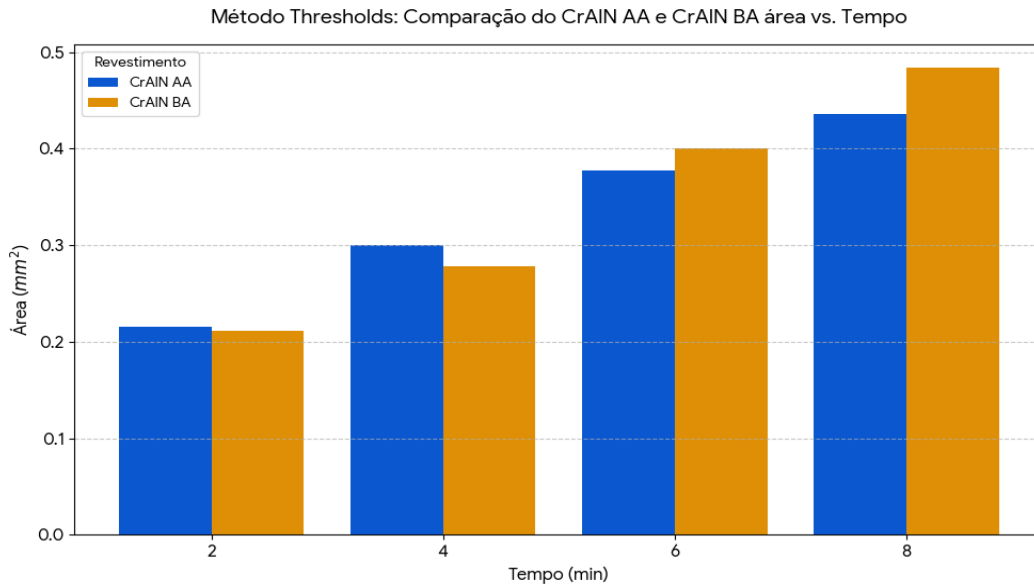
Análise via Método Semiautomático Limiarização (Thresholds) Para confirmar essa tendência de forma semiautomática, a Figura 29 exhibe os dados obtidos exclusivamente pelo algoritmo de Thresholding. Os resultados corroboram a análise anterior.

O método semiautomático também identificou o CrAIN-BA (barra laranja) como o material com maior desgaste acumulado ao final do ensaio. A inversão observada nos intervalos de 6 e 8 minutos, nos quais o CrAIN-BA apresentou maior área, pode ser atribuída ao fenômeno de adesão lateral (smearing).

Ferramentas mais tenazes tendem a permitir maior acúmulo de material da peça (aresta postiça) sem fraturar; conseqüentemente, softwares de análise de imagem podem contabilizar esse acúmulo como área de desgaste na ausência de distinção de

cor, um fenômeno tribológico clássico descrito por Trent e Wright (2000).

Figura 29 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAIN AA e CrAIN BA



Fonte: Autor (2025)

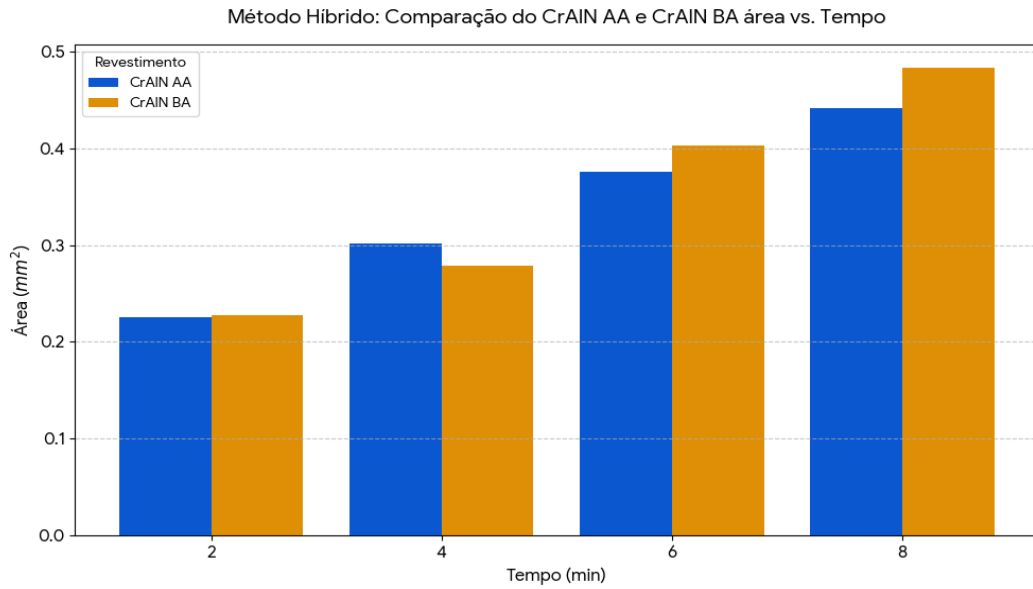
Análise via Método Híbrido

Comparação de Desempenho (AA vs. BA). A Figura 30 ilustra a evolução da área de desgaste ao longo do tempo para ambos os revestimentos, utilizando os dados obtidos pelo Método Híbrido, considerados o mais representativo.

Nota-se que, aos 8 minutos, o CrAIN-AA (barra azul) apresenta uma área de desgaste sensivelmente menor ($0,4416 \text{ mm}^2$) em comparação ao CrAIN-BA ($0,4830 \text{ mm}^2$), indicando maior resistência nos estágios finais de corte onde a temperatura é mais elevada.

Embora a tendência se mantenha, observa-se que a diferença entre as barras no tempo de 8 minutos é ligeiramente menor neste método, sugerindo uma variação na percepção visual das bordas do desgaste, conforme discutido a seguir.

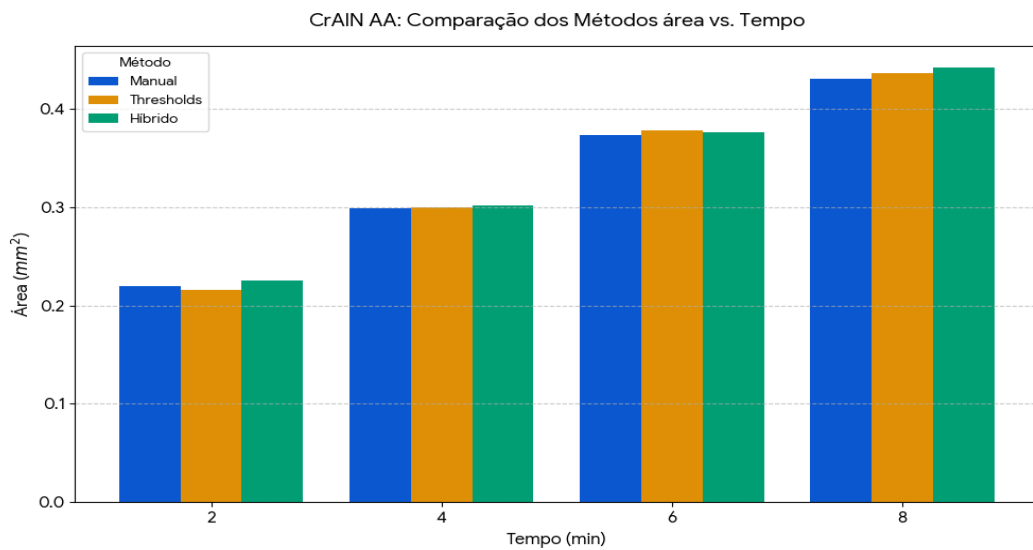
Figura 30 Comparação da evolução da área de desgaste de flanco entre CrAIN AA e CrAIN BA Método Híbrido



Fonte: Autor (2025)

Para validar os dados acima, analisou-se como cada método se comportou para cada material especificamente. Consistência no CrAIN AA. A Figura 31 compara as três técnicas aplicadas ao revestimento CrAIN-AA.

Figura 31 Gráfico comparativo entre os métodos de medição para CrAIN AA



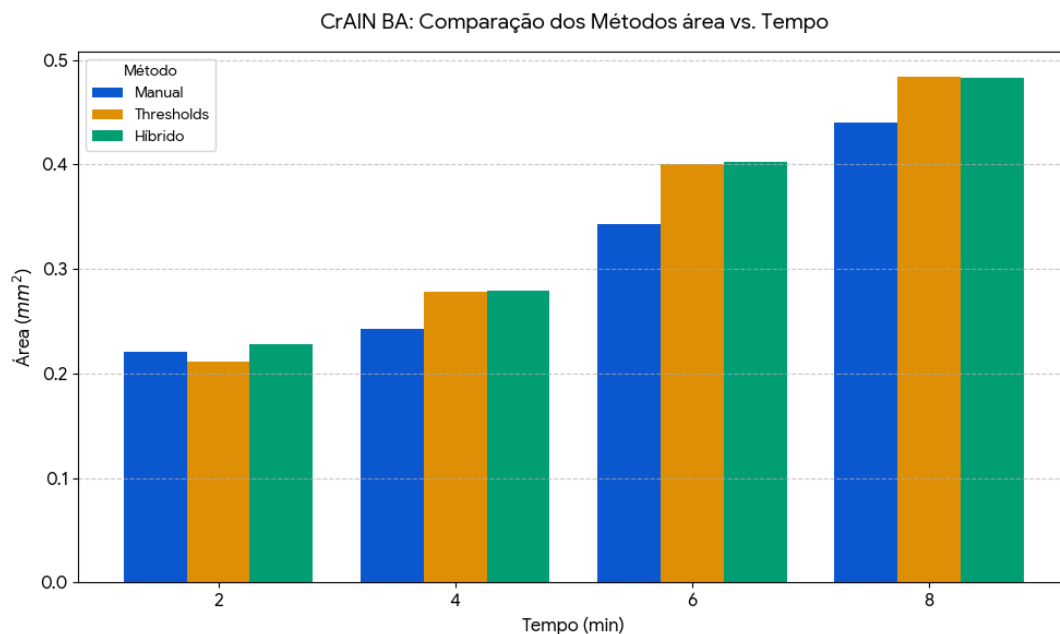
Fonte: Autor (2025)

Observa-se uma alta consistência entre os métodos. As três barras possuem alturas praticamente idênticas em todos os tempos. Isso indica que o desgaste no CrAIN-AA possui contornos bem definidos e limpos, permitindo medições precisas tanto por humanos quanto por software.

Divergência no CrAIN BA. A Figura 32 revela um comportamento distinto para o revestimento CrAIN-BA.

Observa-se uma divergência importante nos tempos de 6 e 8 minutos:

Figura 32 Divergência entre métodos de medição para o CrAIN BA



Fonte: Autor (2025)

O Método Manual (barra azul) apresentou valores inferiores aos obtidos pelos métodos Semiautomático (Threshold) e Híbrido. A princípio, essa diferença poderia sugerir que o operador, ao visualizar a área, define a região de desgaste com maior seletividade do que o software.

Entretanto, deve-se considerar que os métodos computacionais utilizam o contraste matemático dos pixels para a definição da área, o que lhes permitiu detectar regiões de desgaste que passaram despercebidas na seleção manual. Assim, neste caso específico, os métodos automatizados mostraram-se referências robustas. A

explicação física para essa discrepância reside na morfologia do desgaste do revestimento CrAlN-BA.

Conforme observado por Sousa et al. (2021), o desgaste em revestimentos menos estáveis é frequentemente acompanhado por fenômenos de intensa adesão do material da peça sobre a ferramenta. Essa adesão cria bordas irregulares e camufla a fronteira real do desgaste, dificultando a medição visual (manual), mas sendo captada pela sensibilidade dos algoritmos de processamento de imagem.

5.3 RELAÇÃO COM OS MECANISMOS DE DESGASTE NA LITERATURA

Os resultados obtidos mostram coerência com os mecanismos de desgaste descritos na literatura para revestimentos CrAlN submetidos a condições severas de corte. A diferença de desempenho entre CrAlN-AA e CrAlN-BA, especialmente no tempo de 8 minutos, pode estar associada aos fenômenos termoquímicos que ocorrem na interface ferramenta–cavaco.

- Resistência à Oxidação e Formação de Tribocamada

Estudos de Arulkirubakaran e Senthilkumar (2016) demonstram que revestimentos enriquecidos em alumínio tendem a formar óxidos estáveis, como Al_2O_3 , que atuam como barreira térmica e reduzem o atrito. Embora não tenham sido realizadas análises químicas neste trabalho (como EDS ou XPS), o comportamento observado no CrAlN-AA menor área desgastada no maior tempo de corte é consistente com a formação parcial de uma tribocamada protetora rica em alumínio, o que poderia retardar mecanismos abrasivos e difusivos.

Por outro lado, o CrAlN-BA, por possuir menor teor de alumínio, tende a formar óxidos menos estáveis, o que reduz sua proteção tribológica em condições de maior temperatura. Esse efeito ajuda a explicar o aumento mais acentuado da área desgastada para o BA aos 8 minutos.

- Ciclo de Adesão e Desgaste Difusivo

A análise visual das micrografias e a dificuldade de segmentação no método manual para o CrAlN-BA sugerem a ocorrência de um ciclo mais severo de desgaste,

composto por adesão inicial do material da peça, seguida por abrasão e delaminação do revestimento, mecanismo descrito por Sousa et al. (2021).

O maior acúmulo de material aderido ao CrAlN-BA, observado nas micrografias, reforça essa hipótese e explica as bordas irregulares da região desgastada, que dificultaram a seleção manual da ROI.

- Influência da difusão em altas temperaturas

Saketi et al. (2019) relatam que, em condições de elevada temperatura e velocidades moderadas, o desgaste pode ser governado pela difusão de elementos da ferramenta para o cavaco. No presente trabalho, embora não se possa afirmar difusão química direta sem análise composicional, a maior extensão da área degradada no CrAlN-BA sugere maior susceptibilidade a processos triboquímicos, possivelmente devido à ausência de uma tribocamada protetora mais estável. Já o CrAlN-AA, potencialmente protegido por uma camada rica em Al_2O_3 , apresentou comportamento mais estável no maior tempo de usinagem, o que é coerente com a literatura.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu e aplicou um método de quantificação de desgaste baseado em análise digital de imagens no software ImageJ, permitindo mensurar de forma objetiva a área de desgaste no flanco de ferramentas revestidas submetidas ao torneamento do ferro fundido nodular FE45012. A metodologia mostrou-se eficiente, reprodutível e capaz de revelar diferenças importantes entre os revestimentos CrAlN-AA e CrAlN-BA.

A análise comparativa entre os métodos manual, semiautomático e híbrido demonstrou que o método híbrido é o mais confiável, pois combina a precisão da limiarização automática com a sensibilidade visual do operador. As tendências de desgaste obtidas foram coerentes com a evolução esperada para ferramentas revestidas em condições severas de corte.

Os resultados também evidenciaram que a métrica de área total desgastada fornece informações complementares às obtidas pela métrica linear VB, utilizada no estudo de Ávila (2011). Embora esse autor tenha observado melhor desempenho do revestimento CrAlN-BA pela medida linear de desgaste, o presente trabalho mostrou que, quando avaliada a área degradada, o revestimento CrAlN-AA apresentou estabilidade superior no maior tempo de corte. Essa diferença é consequência direta das métricas analisadas e não representa contradição, mas sim ampliação da compreensão do desgaste nos revestimentos CrAlN.

Assim, conclui-se que a quantificação por área é uma ferramenta robusta e capaz de complementar métodos tradicionais de medição, ampliando a capacidade de avaliar a morfologia e a evolução dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte revestidas.

6.1 PRINCIPAIS ACHADOS DO ESTUDO

A metodologia baseada no ImageJ foi eficiente para segmentar e quantificar a área de desgaste de flanco, proporcionando medições objetivas e reprodutíveis. O método híbrido apresentou melhor desempenho entre os três avaliados, oferecendo equilíbrio entre precisão, sensibilidade morfológica e estabilidade dos resultados.

Observou-se crescimento progressivo da área desgastada com o aumento do

tempo de usinagem, comportamento compatível com os mecanismos esperados de desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo. Em diversos tempos de corte, o revestimento CrAlN-BA apresentou áreas desgastadas ligeiramente maiores que o CrAlN-AA, especialmente em tempos mais longos.

Essa diferença pode estar associada à ausência de uma tribocamada rica em alumínio no CrAlN-BA, contribuindo para maior adesão e instabilidade térmica no desgaste prolongado. Os resultados apresentam complementação ao estudo de Ávila (2011): enquanto VB indicou melhor desempenho do CrAlN-BA, a métrica de área deste estudo revelou diferenças morfológicas importantes que não apareciam na métrica linear.

6.2 CONTRIBUIÇÕES PARA O ENTENDIMENTO DO DESGASTE EN FERRAMENTAS DE CORTE

O estudo demonstrou que diferentes métricas de desgaste (área versus VB) podem conduzir a interpretações distintas sobre desempenho dos revestimentos, destacando a importância de análises multidimensionais.

A quantificação por área permitiu identificar aspectos morfológicos do desgaste como adesão, de laminação, microtrincas e irregularidades que não são capturados pela medida VB.

O trabalho contribui para ampliar o entendimento do comportamento termoquímico de revestimentos CrAlN com diferentes teores de alumínio, mostrando como a formação (ou ausência) de tribocamadas protetora influencia a área degradada.

A aplicação de processamento digital de imagens mostrou-se promissora como ferramenta complementar aos métodos tradicionais, podendo ser adotada em estudos futuros de usinagem e tribologia. O conjunto de resultados reforça que revestimentos de alto alumínio podem apresentar maior estabilidade em regimes prolongados devido à possível formação de camadas protetoras de óxidos, alinhando o comportamento observado à literatura recente.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aperfeiçoamento do método: Desenvolver uma interface gráfica (GUI) integrada ao ImageJ, permitindo a execução da macro de forma mais intuitiva, padronizada e acessível para laboratórios de ensino e pesquisa.

Integrar ao método a possibilidade de processamento automático em lote, reduzindo o tempo de análise e aumentando a reprodutibilidade.

Ampliação das análises: Incluir a quantificação da área de desgaste de cratera, possibilitando correlações mais completas entre desgaste frontal e desgaste superior.

Realizar análises químicas (EDS, XPS, micro-Raman) para confirmar a formação de tribocamadas ricas em alumínio ou cromo, correlacionando composição química e morfologia do desgaste.

Correlação com métricas tradicionais: Realizar medições simultâneas de VB e área desgastada em condições idênticas, a fim de construir modelos matemáticos de correlação entre essas métricas.

Comparar o método de área com técnicas volumétricas 3D (interferometria, confocal) para quantificar o volume perdido e evoluir para análises tridimensionais do desgaste.

Aplicações práticas: Avaliar o comportamento de outros revestimentos PVD (TiAlN, AlTiN, AlCrN, multicamadas e nanocompósitos), ampliando o escopo comparativo.

Investigar diferentes condições de corte (velocidade, avanço, profundidade) para mapear o impacto dos parâmetros na evolução da área degradada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, A. N. **Contribuições na otimização de um sistema de visão para medição automática do desgaste de ferramentas de corte**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96057>. Acesso em: 15 set. 2025.

ALEXANDRE, M. **Desenvolvimento de um sistema de visão para medir o desgaste de ferramentas de corte**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32467>. Acesso em: 15 set. 2025.

ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V. Performance of TiN and TiAlN coated micro-grooved tools during machining of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 62, p. 47-57, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.10.014>. Acesso em: 15 set. 2025.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**: Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology. Ohio: ASM International, 2001.

ÁVILA, R. F. de. **Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16478>. Acesso em: 15 set. 2025.

ÁVILA, R. F. **Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro revestidas com CrAlN**. 2011. Relatório de Pesquisa (Pós-Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology**. 2. ed. Columbus: John Wiley & Sons, 2013.

BUDINSKI, Kenneth G. **Surface Engineering for Wear Resistance**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988.

COLLINS, T. J. ImageJ for microscopy. **BioTechniques**, v. 43, n. 1 Suppl, p. 25–30, jul. 2007.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura**: Aplicações e Preparação de Amostras: Materiais Metálicos e Semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIAS, A. M. **Comportamento ao desgaste de ferramentas de metal duro revestidas com (Ti,Al)N e (Ti,Al)N+MoS₂ em fresagem de alta velocidade.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 9. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Elsevier, v. 10, 1987. 560 p.

GOLDSTEIN, J. I. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.** 3. ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

GOODHEW, P. J.; HUMPHREYS, J.; BEANLAND, R. **Electron Microscopy and Analysis.** 3. ed. London: Taylor & Francis, 2001.

HE, Q. et al. Analysis of the performance of PVD AlTiN coating with five different Al/Ti ratios during the high-speed turning of stainless steel 304 under dry and wet cooling conditions. **Wear**, v. 492-493, p. 204213, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204213>. Acesso em: 15 set. 2025.

HRECHUK, A.; BUSHLYA, V. Automated detection of tool wear in machining and characterization of its shape. **Wear**, v. 523, p. 204762, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204762>. Acesso em: 15 set. 2025.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren.** Springer, 2008. 547 p.

LI, Y. et al. Cutting Performance Evaluation of the Coated Tools in High-Speed Milling of AISI 4340 Steel. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 3266, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12193266>. Acesso em: 15 set. 2025.

LIN, Y. et al. Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting. **Wear**, v. 454-455, p. 203319, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203319>. Acesso em: 15 set. 2025.

LIZARELLI, F. L.; MOLINARO, A.; SANCHEZ, L. E. de A. Análise do Desgaste de Ferramentas de Corte Através de Tratamento de Imagens. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife. **Anais...** Recife: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2006.

MACHADO, Álysson R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 2. ed. São

Paulo: Blucher, 2011.

MARTINEZ, J. D. **Estudo do desgaste de ferramentas de corte**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOGHADDAM, P. V. et al. High temperature tribology of TiAlN PVD coating sliding against 316L stainless steel and carbide-free bainitic steel. **Tribology International**, v. 159, p. 106847, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106847>. Acesso em: 15 set. 2025.

NAGATANI, T. et al. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**, v. 11, p. 901-909, 1987.

PATEL, U. S. et al. Influence of secondary carbides on microstructure, wear mechanism, and tool performance for different cermet grades during high-speed dry finish turning of AISI 304 stainless steel. **Wear**, v. 452-453, p. 203285, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203285>. Acesso em: 15 set. 2025.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 829 p.

SAKETI, S. et al. On the diffusion wear of cemented carbides in the turning of AISI 316L stainless steel. **Wear**, v. 430-431, p. 202-213, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.010>. Acesso em: 15 set. 2025.

SANTOS, D. H. dos. **Análises das forças e do desgaste de flanco em ferramentas de corte no torneamento do aço ABNT 4340**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/993175>. Acesso em: 15 set. 2025.

SCHINDELIN, J. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 676–682, 2012. Disponível em: <https://fiji.sc/>. Acesso em: 23 out. 2025.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012.

SILVA, V. M. F. da. **Análise do desgaste de ferramentas de corte utilizando o software ImageJ**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/237583>. Acesso em: 15 set. 2025.

SOARES, L. R. L. **Análise do desgaste de ferramentas cerâmicas no torneamento de ferros fundidos vermiculares**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102927>. Acesso em: 15 set. 2025.

SOUSA, V. F. C. et al. Characteristics and Wear Mechanisms of TiAlN-Based Coatings for Machining Applications: A Comprehensive Review. **Metals**, v. 11, n. 2, p. 260, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met11020260>. Acesso em: 15 set. 2025.

SOUSA, V. F. C. et al. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. **Wear**, v. 476, p. 203695, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695>. Acesso em: 15 set. 2025.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. 3. ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

TOTOLICI, G. et al. Advanced characterization of wear mechanisms in coated cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 476, p. 1-12, 2024.

WRIGHT, Paul Kenneth; TRENT, Edward Moor. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.