

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DAVID PEREIRA SILVA

TÚLIO CASTRO DE SOUZA

**AVANÇOS NOS TESTES TRIBOLÓGICOS PARA MAIOR DURABILIDADE E
EFICIÊNCIA DE COMPONENTES AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

UBERLÂNDIA - MG

2024

LUCAS DAVID PEREIRA SILVA

TÚLIO CASTRO DE SOUZA

**AVANÇOS NOS TESTES TRIBOLÓGICOS PARA MAIOR DURABILIDADE E
EFICIÊNCIA DE COMPONENTES AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
como requisito parcial para obtenção do título
de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

UBERLÂNDIA - MG

2024

LUCAS DAVID PEREIRA SILVA

TÚLIO CASTRO DE SOUZA

**AVANÇOS NOS TESTES TRIBOLÓGICOS PARA MAIOR DURABILIDADE E
EFICIÊNCIA DE COMPONENTES AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
como requisito parcial para obtenção do título
de graduação em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 30 de outubro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - UFU - Orientador

Prof. Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes - UFU

Me. Felipe Chagas Rodrigues de Souza



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	12/11/2024	Hora de início:	16:00	Hora de encerramento:	17:20
Matrícula do Discente:	11911EMC009 e 11911EMC026				
Nome do Discente:	Lucas David Pereira Silva e Túlio Castro de Souza				
Título do Trabalho:	"AVANÇOS NOS TESTES TRIBOLÓGICOS PARA MAIOR DURABILIDADE E EFICIÊNCIA DE COMPONENTES AGRÍCOLAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA"				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se, em ambiente virtual, pelo link: https://teams.microsoft.com/l/meetupjoin/19%3ameeting_MDRhZDVmNzYtZTc1Yy00ZjI5LTlmMmMmQtODI0YzI4N2E2N2Ex%40thre ad.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22cd5e6d23-cb99-4189-88ab1a9021a0c451%22%2c%22Oid%22%3a%22f64c154a-2e30-4e92-8386-9b8a541abd77%22%7d, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em 12/11/2024, assim composta: **Me. Felipe Chagas Rodrigues de Souza - FEMEC/UFU**, **Prof. Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes - FEMEC/UFU** e **Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - FEMEC/UFU**, orientador dos candidatos.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, **Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva - FEMEC/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e os candidatos, agradeceu a presença do público, e concedeu aos discentes a palavra, para a exposição do trabalho. A duração da apresentação dos discentes e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir os candidatos. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando os candidatos:

(x) Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Chagas Rodrigues de Souza, Usuário Externo**, em 12/11/2024, às 17:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/11/2024, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/11/2024, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5826779** e o código CRC **D7854765**.

“Por definição há cor,
Por definição há doce,
Por definição há amargo,
Mas na realidade há átomos e espaço.”
(Demócrito)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos familiares, que sempre nos apoiaram incondicionalmente, oferecendo incentivo e suporte durante esta jornada.

Queremos também agradecer ao nosso orientador, Leonardo, por sua disponibilidade e ensinamentos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores, agradecemos pelos ensinamentos de conceitos base na nossa carreira profissional, pelo companheirismo e pelas discussões construtivas que contribuíram para o nosso crescimento profissional e pessoal.

Por fim, expressamos nossa gratidão a todos colegas e parceiros que adquirimos durante o período de graduação que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, ajudando-nos a chegar até aqui.

RESUMO

No âmbito das máquinas agrícolas, a aplicação de testes tribológicos surgiu para o aprimoramento da durabilidade dos componentes das máquinas. Esta revisão sintetiza os achados dos principais artigos publicados sobre o tema (de 1990 até a data atual), com foco nas metodologias empregadas para avaliar a resistência ao desgaste em componentes de máquinas agrícolas. O estudo examina o impacto de diversos fatores, incluindo propriedades dos materiais, tratamentos superficiais, condições operacionais e métodos de testes tribológicos. Os tipos de testes tribológicos mais comuns, como pino-sobre-disco e roda de borracha em areia seca, são destacados, juntamente com a análise da integridade da superfície e da vida útil das ferramentas. A revisão enfatiza a importância de compreender a interação entre o design do componente e o desempenho tribológico, especialmente no contexto das interações com solos abrasivos. Os achados revelam uma tendência crescente no uso de novos materiais e tratamentos de superfície para mitigar o desgaste. Este estudo serve como um recurso valioso para pesquisadores e profissionais que buscam avançar no campo da tribologia em aplicações agrícolas, orientando investigações futuras e abordando lacunas existentes na literatura.

Palavras-chave: tribologia; desgaste; testes tribológicos; máquinas agrícolas; resistência ao desgaste; interações solo-ferramenta.

ABSTRACT

In the realm of agricultural machinery, the application of tribological tests has emerged to enhance the durability of machine components. This review synthesizes the findings of major articles published on the subject (from 1990 to data), focusing on the methodologies employed to evaluate wear resistance in agricultural machinery components. The study examines the impact of various factors, including material properties, surface treatments, operating conditions, and tribological testing methods. The most common tribological tests, such as pin-on-disc and rubber wheel dry sand, are highlighted, along with the analysis of surface integrity and tool lifespan. The review emphasizes the importance of understanding the interaction between component design and tribological performance, especially in the context of interactions with abrasive soils. The findings reveal a growing trend in the use of new materials and surface treatments to mitigate wear. This study serves as a valuable resource for researchers and professionals seeking to advance the field of tribology in agricultural applications, guiding future investigations and addressing existing gaps in the literature.

Keywords: tribology; wear; tribological tests; agricultural machinery; wear resistance; soil-tool interactions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Máquina de ensaio do tipo Roda de Borracha em Areia Seca. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.....	16
Figura 2 - Máquina de ensaio do tipo Pino-Disco. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.	17
Figura 3 - Esboço de tribômetro autoral de Yu e Bhole.....	18
Figura 4 - Esboço de tribômetro autoral de Liu.....	19
Figura 5 - Imagem e esboço do tribômetro autoral de Zhang e R.L. Kushwaha. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.	20
Figura 6 - Tribômetro autoral de Alsaeed et al. (2023).....	21
Figura 7 - Tribômetro autoral de Adeyemi et al. (2023).	22
Figura 8 - Arado de discos acoplado em trator durante teste.	24
Figura 9 - Disco de arado utilizado em ensaio de desgaste.	25
Figura 10 - Arado de aiveca.	26
Figura 11 - Desgaste unitário em massa das pontas e partes trapezoidais das aivecas examinadas (s-desvio padrão, *-diferenças estatisticamente significativas).....	28
Figura 12 - Escarificador em conjunto com rolo packer.	29
Figura 13 - Implemento subsolador.....	31
Figura 14 - Cultivador acoplado em um trator.	32
Figura 15 - Lâminas de arado do tipo Duckfoot.....	33
Figura 16 - Resultados da pesquisa de Z. Pirowski et al. (2012) (a) perda de massa e (b) análise de perfil de desgaste de lâminas pé de pato.....	33
Figura 17 - Lâminas de cultivadores do tipo pé de pato.....	35
Figura 18 - Lâminas de arado desgastada (esquerda) comparada a uma lâmina nova (direita).	37
Figura 19 - Implemento enxada rotativa.....	38
Figura 20 - Lâminas de corte de base de colhedoras de cana-de-açúcar.....	39

Figura 21 - Desempenho de aços com diferentes tratamentos.	43
Figura 22 - Quantidade de artigos revisados por ano de publicação.	46
Figura 23 - Distribuição de Testes Tribológicos entre os artigos revisados.....	47
Figura 24 - Distribuição de ferramentas avaliadas entre os artigos revisados.....	50
Figura 25 - Distribuição de materiais avaliados entre os artigos revisados.....	53
Figura 26 - Distribuição de parâmetros avaliados entre os artigos revisados.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Discretização dos métodos de testes tribológicos.	47
Tabela 2 - Discretização das classes de ferramentas testadas.	51
Tabela 3 - Discretização das classes de materiais testados.	53
Tabela 4 - Discretização de parâmetros avaliados.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Almen

AISI - American Iron and Steel Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

cm - centímetro

cm/s - centímetro por segundo

CJT - *Chain-joint tribometer* (Tribômetro de junta de corrente)

EWAS - *Electric Wire Arc Spraying* (Pulverização térmica por arco elétrico)

m² – metro quadrado

g - grama

g/hec - grama por hectare

hec - hectare

km/h - quilômetro por hora

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

mm - milímetro

N - Newton

PoD - Pin on Disk (Pino-sobre-Disco)

PVD - *Physical Vapor Deposition* (Deposição física de vapor)

s - segundo

SAE - Society of Automotive Engineers

TRD - *Thermo-reactive deposition* (Deposição termo reativa)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. FUNDAMENTOS DA TRIBOLOGIA NA AGRICULTURA	14
3. MÉTODOS DE TESTES TRIBOLÓGICOS	15
3.1 Roda de borracha e areia seca.....	15
3.2 Pino-sobre-disco	16
3.3 Tribômetros autorais.....	17
3.4 Metodologia para desenvolvimento de um tribômetro autoral.....	22
4. COMPONENTES AGRÍCOLAS EM REVISÃO	23
4.1 Ferramentas de preparo de solo	23
4.1.1 Arado de discos	23
4.1.2 Arado de aiveca	25
4.1.3 Escarificador.....	28
4.1.4 Subsolador	30
4.1.5 Cultivadores.....	32
4.1.6 Enxadas rotativas.....	37
4.2 Componentes de máquinas	38
4.3 Caracterização de materiais	40
5. DESAFIOS DOS TESTES TRIBOLÓGICOS	44
6. METODOLOGIA DA REVISÃO.....	46
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
8. CONCLUSÕES.....	58
9. TRABALHOS FUTUROS	58
10. REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

A tribologia é definida como “a ciência e tecnologia das superfícies em interação com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (Jost, 1990). O termo, que vem do grego Τριβο (Tribo – esfregar, atritar) e Λογος (Logos - estudo), foi oficialmente utilizado pela primeira vez em 1966 em um relatório preparado por H. Peter Jost para o comitê do departamento de educação e ciência da Inglaterra. Diversos temas são abordados pela tribologia, dentre eles, o desgaste.

Conforme definição proposta por Akuwuwke e Ukachi Etoamaihe (2024), o desgaste refere-se à degradação da superfície devido à perda contínua de material quando duas superfícies em contato estão em movimento relativo uma em relação à outra. O desgaste é a principal razão para a perda de desempenho dos componentes das máquinas agrícolas. Juntamente com outros eventos que podem ocorrer na superfície das peças, como concentradores de tensão, tem-se a criação de áreas propensas à nucleação de trincas que, sob cargas estáticas ou dinâmicas, eventualmente resultam na falha da maioria dos componentes e estruturas. Essas falhas, além de redução da produtividade, geram gastos para os produtores.

A indústria agrícola atual depende de máquinas duráveis, mas condições ambientais severas podem causar desgaste prematuro, resultando em perdas financeiras (R.L. Kushwaha; Chi; Roi, 1990). Segundo o Yu e Bhole (1990), estima-se que a economia canadense perdesse anualmente cerca de 3,9 bilhões de dólares devido ao desgaste. Desse total, as perdas estimadas devido exclusivamente à abrasão giravam em torno de 2,5 bilhões de dólares por ano. Assim, a necessidade de pesquisas sobre desgaste abrasivo tornou-se ainda mais crucial.

Os estudos sobre desgaste em ferramentas de preparo de solo, em especial das interações entre o solo e as ferramentas, possuem total relação com as perdas econômicas em relação ao desgaste das ferramentas de trabalho. Nesse sentido, os interesses de estudos do tipo datam do início da década de 1920 (Hoffman, 1922). Segundo o estudo conduzido por Schulze (1969) para examinar as despesas de quebra e reparo em máquinas agrícolas, o fator mais preponderante que causa uma depreciação em máquinas agrícolas é o desgaste. Entre os diferentes tipos de danos identificados em ferramentas e máquinas agrícolas, o desgaste ocupa a primeira posição, representando 42,5% do total (Önal et al., 1994).

As perdas por desgaste em ferramentas resultam não apenas em prejuízos econômicos devido à perda de material, energia e mão de obra, mas também estão ligadas à redução da produtividade das lavouras. As relhas de arado desgastadas, quando continuam a ser utilizadas

sem substituição, são um dos fatores que contribuem para a compactação do solo. Sabe-se que a formação de camadas compactadas, conhecidas como “bandejas de arado” ou “pé de arado”, diminui a eficiência da produção vegetal, pois afeta negativamente o desenvolvimento das raízes, a ventilação do solo, o movimento da água e as atividades microbiológicas no solo (Soane, 1970; Barnes, 1971; Ulusoy, 1981).

Nesse sentido, diversas pesquisas que buscam materiais mais resistentes ao desgaste foram realizadas nos últimos anos. Materiais mais resistentes promovem aumento da vida útil dos componentes, o que diminui a necessidade de manutenção frequente e, dessa forma, reduz os custos operacionais. Além da redução das despesas, obtém-se um impacto ambiental menor, devido a diminuição do consumo de recursos. Alinhando-se, dessa maneira, às práticas agrícolas modernas que visam a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

O objetivo desta revisão é apresentar um panorama geral sobre quais e como os testes tribológicos são aplicados a componentes de máquinas agrícolas e qual o impacto desses testes no desempenho dos equipamentos. A revisão busca identificar e discutir os métodos utilizados para testar a resistência ao desgaste de diferentes componentes de máquinas agrícolas, apresentando um panorama geral sobre os principais testes tribológicos empregados, componentes avaliados e materiais utilizados, visando melhorar a visibilidade sobre o tema.

Esta revisão abrange uma análise detalhada dos componentes de máquinas agrícolas que são frequentemente sujeitos a condições de desgaste severo. Serão revisados diversos métodos de testes tribológicos, por meio da análise de 56 artigos relacionados ao tema, incluindo testes realizados em laboratório e em condições de campo.

2. FUNDAMENTOS DA TRIBOLOGIA NA AGRICULTURA

Os componentes das máquinas agrícolas enfrentam condições extremas devido à constante exposição a ambientes severos, como solo abrasivo, partículas duras, e variações de umidade. Esses fatores aceleram o desgaste dos componentes, diminuem a vida útil dos equipamentos e aumentam os custos de manutenção (A. Yazici, 2011). O desgaste, é um processo complexo influenciado por vários fatores, como dureza do material, geometria das ferramentas e condições operacionais. Por isso, uma base teórica bem consolidada é fundamental para a avaliação do desempenho dos materiais utilizados na agricultura.

Os tipos básicos e mais importantes de desgaste são: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste por fadiga superficial e desgaste corrosivo (Burwell, 1957/58). O desgaste de

materiais sólidos é, geralmente, visto como um processo mecânico. Contudo, existem exceções a essa regra, como a oxidação e a corrosão, que envolvem processos químicos. De acordo com Zmitrowicz (2006), entre os tipos de desgaste, o abrasivo e o desgaste por fadiga de superficial são considerados os mais críticos do ponto de vista tecnológico. Estima-se que entre 80% e 90% do desgaste total de um componente seja atribuível à abrasão, enquanto aproximadamente 8% resultam do desgaste por fadiga. Outros tipos de desgaste têm uma contribuição relativamente menor. Dessa forma, o desgaste abrasivo é provavelmente a principal causa de danos mecânicos em componentes de equipamentos que entram em contato com partículas abrasivas ou erosivas.

O desgaste das ferramentas de preparo do solo, como arados e grades, é principalmente abrasivo, devido à presença de partículas duras no solo, como quartzo, que apresenta durezas que podem chegar até 1130 [HV] (Zhang; R.L. Kushwaha, 1993). Fatores como o teor de água do solo e a distribuição do tamanho das partículas influenciam diretamente as taxas de desgaste. Técnicas como tratamentos térmicos, carbonitretação e outros processos de endurecimento superficial têm sido utilizadas para aumentar a resistência ao desgaste das ferramentas agrícolas (Romek *et al.*, 2020; Drabik *et al.*, 2018).

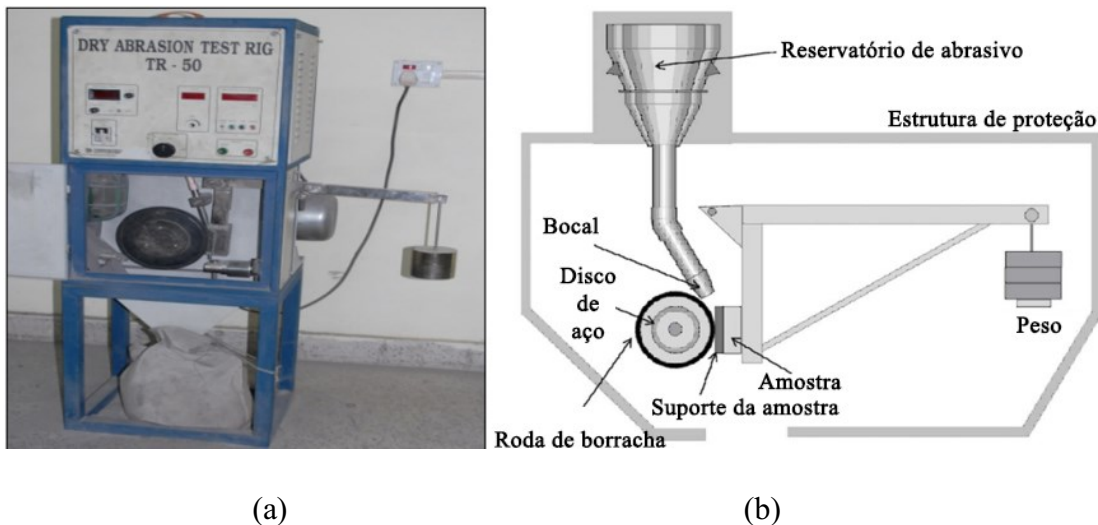
3. MÉTODOS DE TESTES TRIBOLÓGICOS

Muitos testes de desgaste foram desenvolvidos e usados ao longo dos anos. A seguir, serão descritos os testes tribológicos revisados.

3.1 Roda de borracha e areia seca

O teste da roda de borracha e areia seca é padronizado pela norma ASTM G65 (1981). Esse ensaio envolve o desgaste de uma amostra padrão utilizando um abrasivo de tamanho e composição controlados. Esse abrasivo é inserido entre a amostra e uma roda giratória revestida com um pneu ou aro de borracha clorobutil, cuja dureza é previamente determinada. A amostra é pressionada contra a roda por meio de uma força controlada, aplicada por um braço de alavanca. Durante o ensaio, o fluxo do abrasivo provoca o desgaste da superfície da amostra. A rotação da roda é configurada de forma que a área de contato mova-se na mesma direção do fluxo da areia. O braço de alavanca é disposto de modo que seu eixo de rotação fique em um plano quase tangente à superfície da roda e perpendicular ao diâmetro horizontal, local onde a carga é aplicada. A Fig. 1 ilustra um abrasômetro deste tipo.

Figura 1 - Máquina de ensaio do tipo Roda de Borracha em Areia Seca. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.



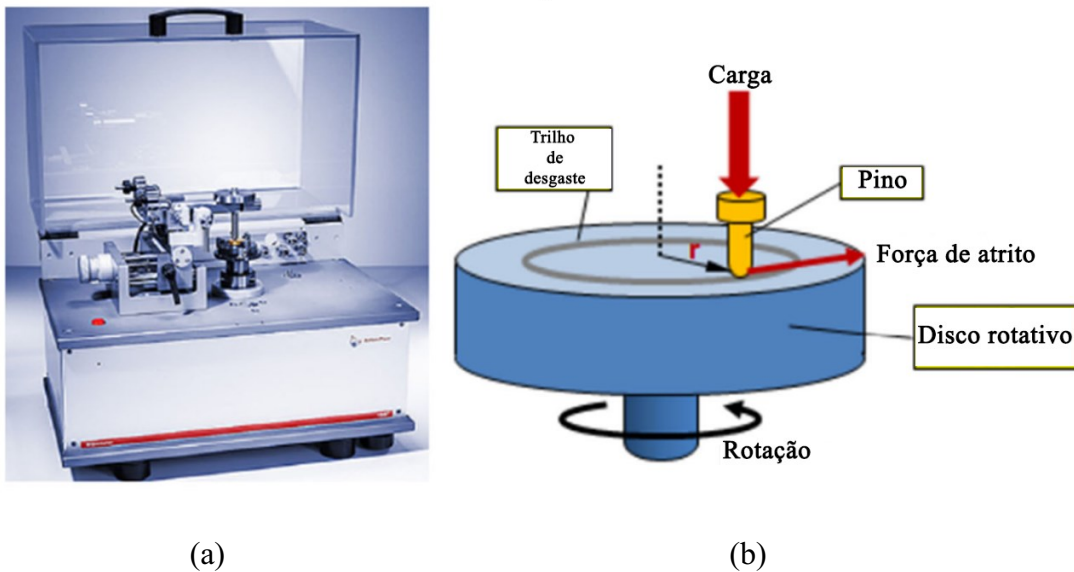
Fonte: adaptado de Singh (2018) e de Subbaya K et al (2012).

O teste de abrasão de roda de borracha em areia seca é um dos testes mais usados (Zhang; R.L. Kushwaha, 1993). A duração do ensaio e a força do braço variam de acordo com os procedimentos descritos em norma. As amostras são pesadas antes e depois do teste, registrando-se a perda de massa. O resultado de abrasão é expresso em termos da perda de massa, conforme o procedimento definido.

3.2 Pino-sobre-disco

O teste do pino-sobre-disco é padronizado pela norma ASTM G99 (2017). No tribômetro do tipo pino-sobre-disco, são utilizadas duas amostras: uma delas é um pino com extremidade arredondada, posicionado perpendicularmente à outra amostra, que geralmente consiste em um disco plano e circular. Com frequência, uma esfera rígida é utilizada como amostra de pino. Durante o ensaio, a máquina realiza a rotação da amostra do disco ou do pino em torno do centro do disco, criando um trajeto de deslizamento circular sobre a superfície do disco. O plano do disco pode ser orientado tanto horizontalmente quanto verticalmente. Um tribômetro desse tipo é mostrado na imagem da Fig. 2.

Figura 2 - Máquina de ensaio do tipo Pino-Disco. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.



Fonte: adaptado de Basiru Aramide et al. (2021)

Durante o teste, a carga aplicada ao pino e a velocidade de deslizamento são ajustadas conforme necessário. O desgaste é medido em termos de perda de volume, que pode ser calculada a partir de medições de dimensões lineares ou pela medição da massa das amostras antes e após o teste.

Além disso, o ambiente do teste, como temperatura e umidade, pode ser controlado para avaliar o impacto dessas variáveis no desgaste. A análise dos dados obtidos pode incluir gráficos que relacionam o volume de desgaste com a distância de deslizamento, proporcionando uma visão detalhada do comportamento de desgaste dos materiais testados.

No entanto, a comparação de resultados de diferentes pesquisas pode ser desafiadora, especialmente quando os parâmetros de teste, como carga, velocidade e condições ambientais, variam significativamente entre os estudos. Essas diferenças podem levar a resultados que não são diretamente comparáveis, dificultando a interpretação e a generalização dos dados sobre o desempenho dos materiais em aplicações práticas.

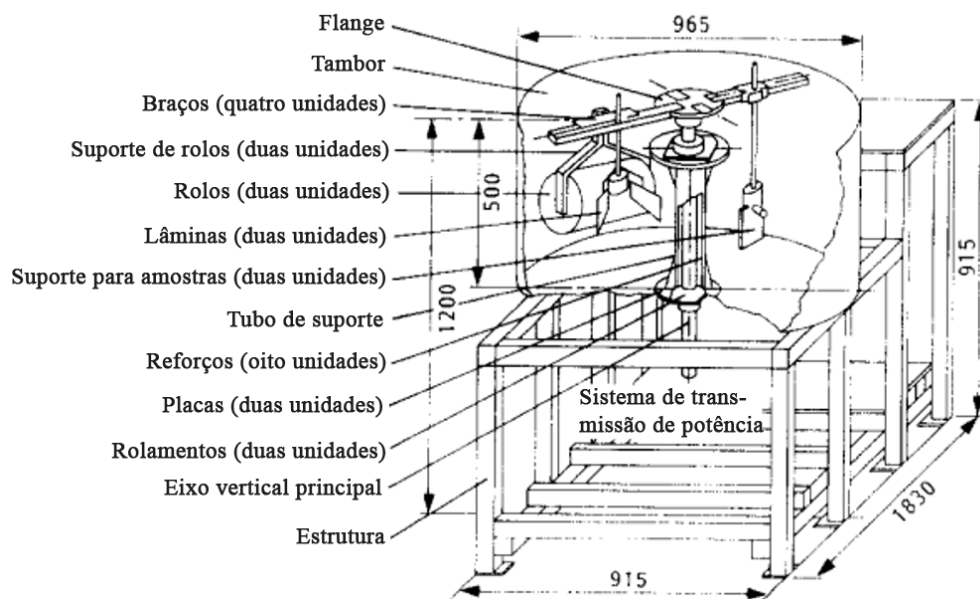
3.3 Tribômetros autorais

Assim, segundo Basiru Aramide *et al.* (2021), apesar dos testes citados nos subitens 3.1 e 3.2 serem amplamente usados no desenvolvimento e otimização de materiais para ferramentas, eles não são totalmente adequados para simular condições reais de campo no uso de ferramentas de cultivo.

Para Ruggiero *et al.* (2019), o teste de Roda de Borracha em Areia Seca não é inteiramente satisfatório para determinar as características de desgaste abrasivo experimentadas pelas ferramentas de preparo do solo, tendo em vista que utiliza uma mistura padronizada de areia seca como meio abrasivo. Na visão dos autores, o teste não retrata as condições características típicas de cada tipo de solo, tais como o tamanho das partículas, a resistência característica, a densidade e a umidade do solo, e o conteúdo de rocha e cascalho, a velocidade relativa e o ângulo de impacto entre o solo e a ferramenta.

Assim, o estudo Yu e Bhole (1990) desenvolveram um protótipo de testador tribológico, mostrado na Fig. 3. Os autores tinham como objetivo simular as condições reais de preparo do solo, permitindo que as amostras de preparo de lavoura continuassem se movendo sob o solo durante o teste, sendo capaz de usar diferentes tipos de solo e permitindo que a velocidade relativa e o ângulo de impacto entre as amostras e o solo fossem controlados.

Figura 3 - Esboço de tribômetro autoral de Yu e Bhole.



Fonte: adaptado de Yu e Bhole (1990)

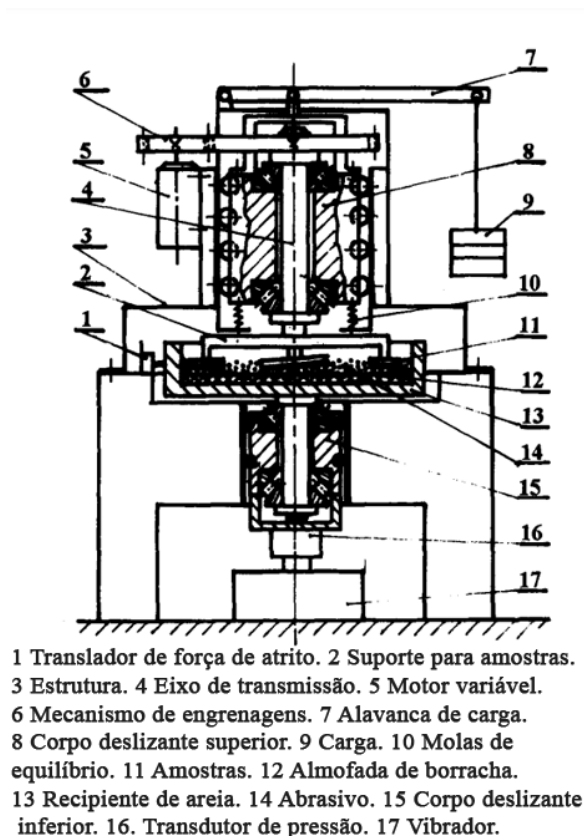
Desse modo, foram realizados testes em materiais à época comumente utilizados na fabricação de peças de preparo de solo, sendo eles: aço AISI 1070, ferro fundido *Ni-Hard* e ferro fundido *High-Cr*. Todos os materiais tiveram a perda de massa datada em relação a perda de massa do material de referência, o aço AISI 1018. Os resultados mostraram que os materiais possuem determinadas tendências de taxa de desgaste em função da umidade e do ângulo de impacto das amostras em relação ao solo, o que demonstrou ser uma grande vantagem do

protótipo desenvolvido, permitindo avaliar e otimizar as aplicações de cada material em função da particularidade de cada tipo de solo.

Dessa forma, por ter sido um estudo datado no ano de 1990, se demonstrou inovador, trazendo discussões a respeito da capacidade dos testadores tribológicos, existentes até então, representarem condições reais de desgaste. Uma limitação do protótipo e do estudo, no entanto, foi demonstrado pela não realização da variação, de forma automatizada, de cargas de aplicação de impacto da peça em relação ao solo, em variações cíclicas, o que poderia representar melhor a realidade do desgaste, sendo esse, portanto, um ponto de desenvolvimento.

A limitação mostrada no tribômetro desenvolvido por Yu e Bhole (1990), relacionada a não aplicação de cargas cíclicas sobre a amostra foi superada no protótipo desenvolvido por Liu (1994). Um esboço desse tribômetro é mostrado na Fig. 4. Nele, o sistema de desgaste foi provido de um sistema mecânico vibratório. No entanto, o estudo avaliou somente oscilações verticais de carga, devido as suas limitações construtivas. Os resultados neste estudo também foram providos das relações de taxa de desgaste do material avaliado em relação a de um material de referência.

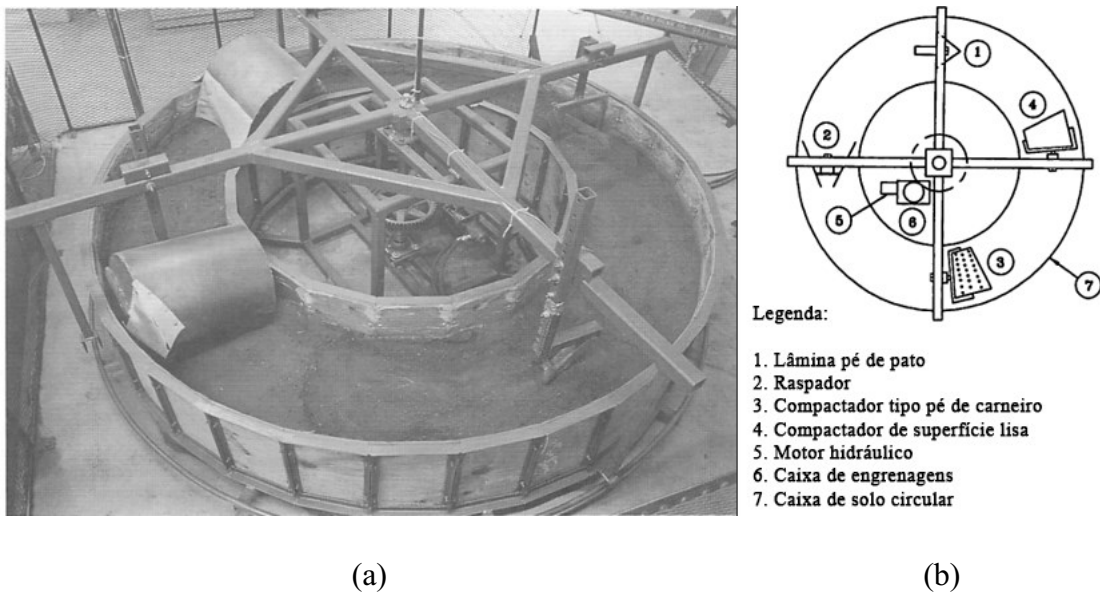
Figura 4 - Esboço de tribômetro autoral de Liu.



Fonte: adaptado de Liu (1994)

Zhang e R.L. Kushwaha (1993). também desenvolveram seu próprio tribômetro. Uma imagem e um esboço desse tribômetro é mostrado na Fig. 5 com o objetivo de representar melhor as características de uso das ferramentas em campo. O testador de desgaste abrasivo consistia em um recipiente anelar contendo solo em que a ferramenta de interesse realizava movimento rotativo em relação ao solo por meio de um sistema mecânico com um motor hidráulico como fonte motriz.

Figura 5 - Imagem e esboço do tribômetro autoral de Zhang e R.L. Kushwaha. (a) Testador tribológico (b) Diagrama esquemático.

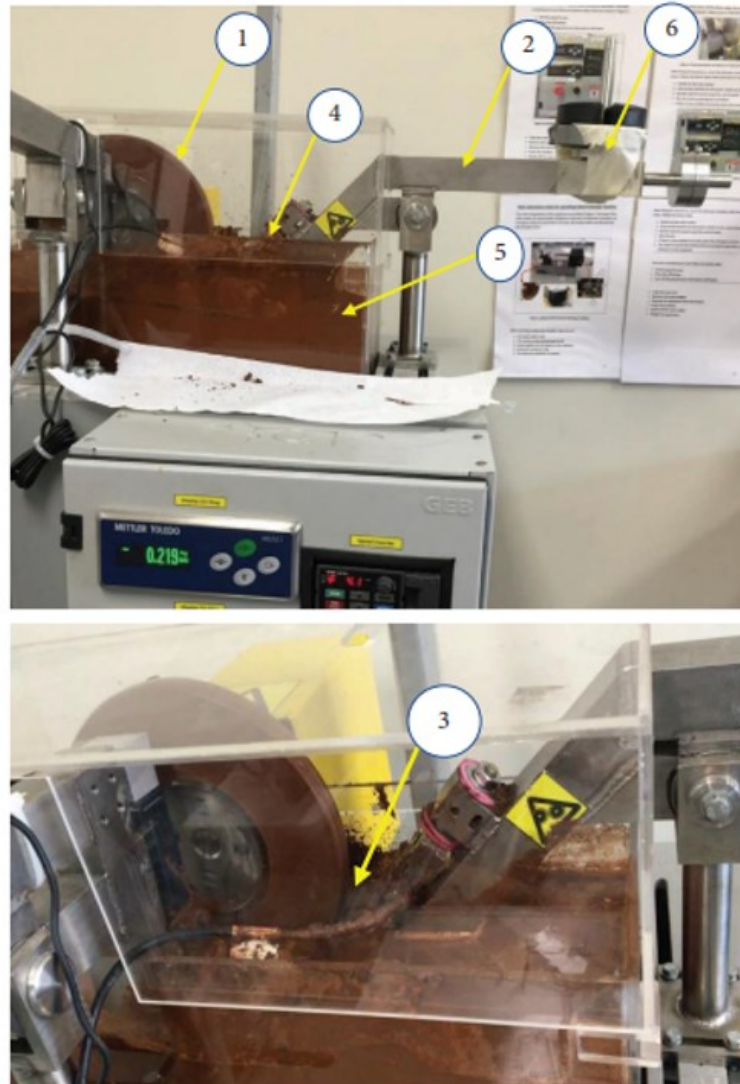


Fonte: adaptado de Zhang e R.L. Kushwaha (1993).

Zhang e R.L. Kushwaha comentaram que o tribômetro desenvolvido foi conveniente para avaliar a resistência ao desgaste das ferramentas de lavoura em um curto período, em escala laboratorial. No entanto, os autores ressaltaram que, ainda assim, as condições de teste eram controladas. Nesse sentido, não representaram, em toda sua totalidade, a imprevisibilidade da condição de campo.

A pesquisa por Alsaeed *et al.* (2023), também desenvolveu um novo projeto de um tribômetro, porém baseado no teste de Roda de borracha de areia úmida (ASTM G105). Esse tribômetro pode ser visualizado na Fig. 6. Ele foi desenvolvido para realizar testes de desgaste e atrito, com foco na simulação de condições úmidas. Nesse contexto, a inclusão de um meio líquido como água, óleo ou lama no sistema, segundo os autores, permite uma simulação mais realista de condições do mundo real, aumentando assim a versatilidade e a exatidão dos experimentos tribológicos.

Figura 6 - Tribômetro autoral de Alsaeed *et al.* (2023)

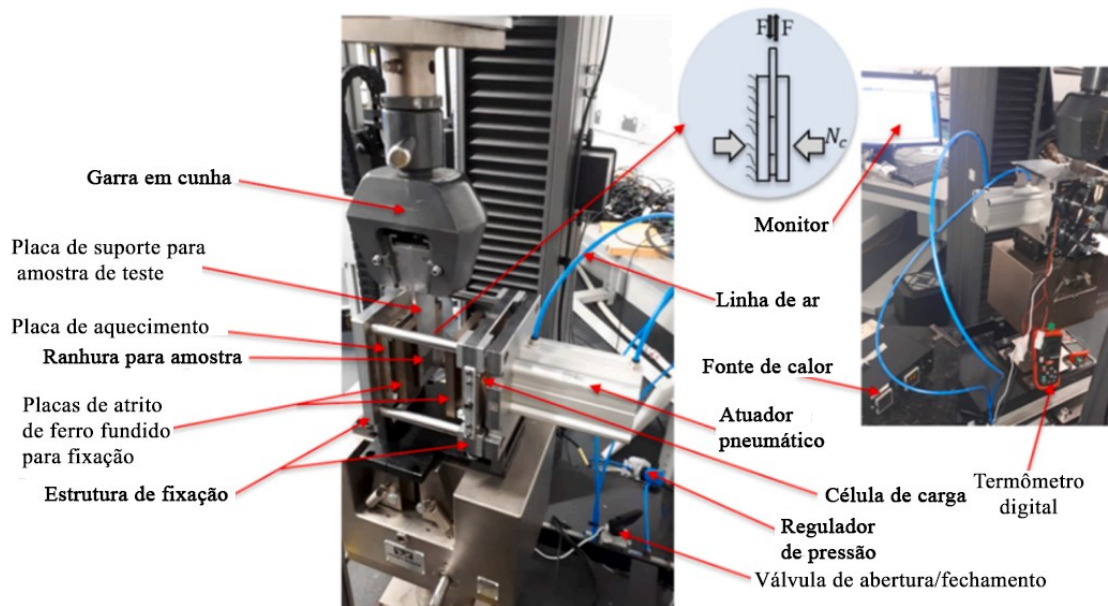


1 Contrapeça. 2 Alavanca de carga BOR. 3 Amostra BOR.
4 Célula de carga. 5 Recipiente de lubrificante.
6 Pesos mortos.

Fonte: adaptado de Alsaeed *et al.* (2023).

Adeyemi *et al.* (2023), desenvolveu o tribômetro mostrado na Fig. 7. Ele surgiu como uma alternativa para a sua pesquisa, justificando ser uma solução simples e de baixo custo em relação as versões convencionais, como de tribômetros pino sobre disco, por exemplo.

Figura 7 - Tribômetro autoral de Adeyemi et al. (2023).



Fonte: adaptado de Adeyemi et al. (2023).

O tribômetro desenvolvido por Adeyemi *et al.* (2023), foi testado com um material comercial, e os resultados obtidos foram comparados com os dados fornecidos pelo fabricante, mostrando uma diferença de 4,88% no coeficiente de atrito encontrado, mostrando uma boa correlação.

3.4 Metodologia para desenvolvimento de um tribômetro autoral

Nesse contexto, dado a justificativa para desenvolvimento de tribômetros autorais, apresentado no subtópico 3.3, é importante que os mesmos se atentem a uma série de aspectos funcionais associado ao objetivo do teste. Desse modo, para definição do conceito do tribômetro é importante, à princípio, identificar o foco quanto ao tipo de desgaste a ser avaliado, sendo ele abrasivo, adesivo, corrosivo ou por fadiga superficial. Além do mais, é importante se atentar as especificações das partículas ou meio de desgaste, tais como especificação de granulometria, dureza, forma e condições ambientais, tais como temperatura e umidade.

Nesse viés, o desenvolvimento de um tribômetro autoral também deve ser capaz de caracterizar as forças atuantes no sistema, bem como se dará o contato entre a superfície desgastada e o meio. Além disso, o tribômetro deve permitir a aquisição de dados como força, velocidade e deslocamento. Ademais, a sentido de validação do tribômetro, o mesmo deve ser capaz de garantir reprodutibilidade dos resultados, podendo a princípio ter seus resultados

comparados aos de tribômetros normatizados, descrevendo suas limitações quanto a sua capacidade de análise.

4. COMPONENTES AGRÍCOLAS EM REVISÃO

4.1 Ferramentas de preparo de solo

O preparo do solo é a estimulação mecânica do solo para prepará-lo para o plantio (Rani *et al.*, 2022). Esse processo, envolve a quebra de torrões e crostas superficiais, melhorando a granulação do solo e destruindo ervas daninhas. Essas operações frequentemente resultam em altas taxas de atrito e desgaste, levando à perda de energia, eficiência mecânica e redução da vida útil operacional da ferramenta de preparo do solo (Akuwueke; Ukachi Etoamaihe, 2024). Para a realização dessas tarefas de preparo de solo, utilizam-se equipamentos específicos, que são classificados em implementos de preparo de solo primários e secundários, segundo *Terminology and Definitions for Soil Tillage and Soil-Tool Relationships* (ASABE, 2024).

Os implementos de preparo de solo primários deslocam e fragmentam o solo para reduzir sua resistência e para enterrar ou misturar materiais vegetais, pesticidas e fertilizantes na camada de preparo. O preparo primário é mais agressivo, mais profundo e deixa uma superfície de solo mais irregular em relação ao preparo secundário. Nessa classe, estão o arado de aiveca, arado de disco, escarificador, subsolador, entre outros. Por outro lado, os implementos de preparo de solo secundários trabalham o solo em uma profundidade mais rasa do que os implementos de preparo primário, proporcionando pulverização adicional, misturando pesticidas e fertilizantes no solo, nivelando e compactando o solo, fechando bolsões de ar e erradicando ervas daninhas. A preparação da cama de sementes é a etapa final do preparo secundário. Nesse grupo, estão os cultivadores, compactadores, niveladores, entre outros.

Esses implementos agrícolas, tanto primários quanto secundários, estão sujeitos a condições adversas que resultam em altos níveis de desgaste, afetando diretamente sua durabilidade. A seguir, será apresentado alguns implementos utilizados no preparo de solo e as pesquisas revisadas que envolvem o implemento em questão.

4.1.1 Arado de discos

O disco de arado realiza a operação de preparo do solo por meio de um conjunto ou vários conjuntos de discos rotativos, cada conjunto montado em um eixo comum. O disco é a principal parte de um arado de discos, responsável por cortar e pulverizar o solo (Akuwueke;

Ukachi Etoamaihe, 2024). A Fig. 8 mostra um arado de discos, utilizado nos testes realizados por Rani *et al.* (2022).

Figura 8 - Arado de discos acoplado em trator durante teste.



Fonte: Rani *et al.* (2022).

A questão mais significativa a ser considerada ao determinar a durabilidade dos discos agrícolas é o desgaste abrasivo. Discos agrícolas desgastados são menos eficazes no controle de ervas daninhas, na gradagem e na eficiência de semeadura, resultando em maior consumo de combustível (Rani *et al.*, 2022).

O estudo realizado por Rani *et al.* (2022) investigou o comportamento de desgaste abrasivo de discos de arado fabricados com o aço EN42 em condições de campo. Os discos foram testados em um campo de arroz e foram avaliados a perda de peso e a redução nas dimensões do disco após 100 horas de operação. Os resultados mostraram que diferentes marcas de discos apresentaram variações significativas em seu desempenho. Rani *et al.*, propuseram um modelo matemático, utilizando regressão multivariável, que fornece a taxa de desgaste, a redução no raio do disco e a redução na espessura do disco com base na dureza do material e no tempo de operação. Nesse sentido, a análise dos dados sugeriu que a composição do material e as condições de operação influenciam diretamente a durabilidade dos discos, ressaltando a necessidade de melhorias no design para aumentar sua vida útil e eficiência no trabalho agrícola.

Zadorozhnaya, Levanov e Kandeva (2018) realizaram ensaios de desgaste utilizando o método de teste tribológico pino-sobre-disco, sobre contato seco em amostras de discos de arado fabricados em aço ao Boro. A Fig. 9 mostra o disco de arado utilizado no ensaio de

desgaste. O estudo ressaltou a importância no gerenciamento das cargas e velocidades de deslizamento aplicadas no discos de arado.

Figura 9 - Disco de arado utilizado em ensaio de desgaste.



Fonte: Akuwueke; Ukachi Etoamaihe (2024).

Akuwueke e Ukachi Etoamaihe observaram os efeitos da carga aplicada, da velocidade de deslizamento e do tempo de deslizamento nas propriedades tribológicas da amostra de disco de arado. O estudo concluiu que o atrito aumentou com a carga normal a 5 cm/s e 360 s, mas diminuiu quando a carga aumentou a 10 cm/s e 540 s. A 15 cm/s e 720 s, o atrito aumentou até 4 N e depois diminuiu, enquanto a 20 cm/s e 900 s, o atrito caiu com o aumento da carga. A 2 N, o atrito exibiu um padrão sinusoidal com o aumento da velocidade de deslizamento, mas a 4, 6, 8 e 10 N, o atrito aumentou com a velocidade. A taxa de desgaste aumentou com a carga normal, atingindo o máximo em 8 N e caindo ligeiramente a 10 N. Padrões semelhantes de variação da taxa de desgaste em relação à carga foram observados a 10 e 15 cm/s, com máximos a 8 N. A 20 cm/s e 900 s, a taxa de desgaste aumentou com a carga normal, mas caiu a 8 N, subindo novamente a 10 N. A variação da taxa de desgaste com a velocidade de deslizamento mostrou uma relação inversa a 2 N e padrões semelhantes a 4, 6, 8 e 10 N.

4.1.2 Arado de aiveca

De acordo com ASABE (2024), o arado de aiveca é um implemento de preparo primário que corta, inverte parcialmente ou completamente uma camada de solo para enterrar materiais da superfície e pulverizar o solo. A parte do arado que corta o solo é chamada de fundo ou base. O arado de aiveca é a placa curva acima do fundo que recebe a fatia de solo e a inverte. Os

arados de aiveca são equipados com um ou mais fundos de várias larguras de corte. Uma imagem de um arado de aiveca é mostrada na Fig. 10.

Figura 10 - Arado de aiveca.



Fonte: adaptado de Kubota (2024).

A pesquisa realizada por A. Yazici (2011) estudou o comportamento de desgaste das lâminas do fundo do arado de aiveca, produzidas a partir do aço 30MnB5 e tratadas com carbonitreto. O estudo envolveu a análise da composição química do material e a realização de tratamentos de carbonitreto em condições industriais, visando melhorar a resistência ao desgaste das peças. Os testes tribológicos foram realizados utilizando uma máquina de desgaste tipo pino-sobre-disco. As propriedades avaliadas incluíram dureza, que foi medida com um durômetro Micro-Vickers, e microestrutura, analisada por meio de microscopia óptica após a preparação das amostras. Os resultados mostraram que o tratamento de carbonitretação resultou em uma redução de 48,50% na perda de peso por desgaste em comparação com amostras tratadas termicamente de forma convencional, evidenciando a eficácia do tratamento na melhoria da resistência ao desgaste. Além disso, o estudo destacou que as lâminas tratadas mantiveram melhor a forma inicial após o uso em campo, o que é crucial para a eficiência das operações agrícolas. No entanto, a amostra com maior dureza não apresentou o melhor desempenho no ensaio de desgaste, possivelmente devido a uma combinação de fatores, como a fragilidade do material endurecido, que pode ter levado a microfissuras e falhas sob condições de desgaste, resultando em um desempenho inferior em comparação com amostras menos duras, mas mais tenazes.

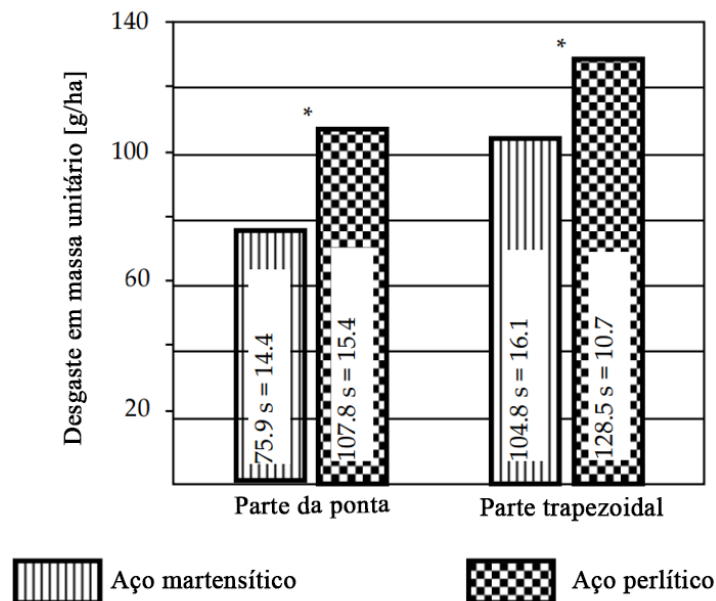
O trabalho desenvolvido por Kostencki, Stawicki e Królicka (2021), analisou o desgaste das lâminas do arado de aiveca. Os autores realizaram testes tribológicos em lâminas feitas de

diferentes materiais, incluindo aço e placas de carbetto cimentado, para avaliar suas propriedades de desgaste sob condições de cultivo do solo. O tratamento do material incluiu a aplicação de soldagem de reforço em algumas variantes das lâminas, o que influenciou diretamente a resistência ao desgaste. Os testes foram realizados em condições de campo típicas e os resultados mostraram que a intensidade de desgaste das lâminas sem reforço foi aproximadamente 3,5 vezes maior, em solos secos e arenosos, em comparação com lâminas reforçadas.

Além disso, as placas de carbetto cimentado apresentaram a menor intensidade de desgaste, destacando sua alta resistência ao desgaste abrasivo, embora sua fragilidade possa levar a lascas ao entrar em contato com pedras no solo. As propriedades avaliadas incluíram dureza, microestrutura e taxa de desgaste, com a análise microestrutural sendo realizada por meio de espectroscopia de raios X e microscopia eletrônica de varredura, permitindo uma compreensão detalhada da composição química e das características dos materiais utilizados. Os resultados indicaram que a escolha do material e o tratamento superficial são cruciais para a durabilidade das peças de trabalho em condições de cultivo, influenciando diretamente a quantidade de elementos químicos introduzidos no solo durante o uso.

O trabalho desenvolvido por Stawicki, Białobrzaska e Kostencki (2017) analisou as propriedades tribológicas de lâminas do arado de aiveca feitas de aço perlítico e martensítico. Os autores realizaram testes de campo em solos variados, como argilas arenosas e argilosas, com umidade em torno de 13%. A pesquisa avaliou a dureza, microestrutura e taxa de desgaste das lâminas. A microestrutura foi analisada por meio de microscopia metalográfica, revelando que o aço perlítico apresentava uma estrutura não homogênea com inclusões, enquanto o aço martensítico mostrava uma estrutura de martensita temperada. Os resultados indicaram que as lâminas do arado de aiveca de aço perlítico apresentaram uma maior intensidade de redução de espessura e desgaste em massa, sugerindo uma menor resistência ao desgaste em comparação com as de aço martensítico, conforme Fig. 11. Além disso, observou-se que as lâminas de aço perlítico sofreram deformações durante o uso, o que levou à necessidade de substituição mais frequente, evidenciando a importância da escolha do material para a durabilidade das ferramentas agrícolas.

Figura 11 - Desgaste unitário em massa das pontas e partes trapezoidais das aivecas examinadas (s-desvio padrão, *-diferenças estatisticamente significativas).



Fonte: adaptado de Stawicki, Białobrzaska e Kostencki (2017).

4.1.3 Escarificador

O escarificador é um equipamento que atua até a profundidade de 0,30 metros, usado para o preparo periódico, em que a função é promover um mínimo de mobilização, desagregando menos o solo, no sentido de baixo para cima (Gadanha Junior; Molin; Coelho, 1991). Como a operação não promove a inversão das camadas do solo, ela resulta em uma menor desagregação, mantendo os resíduos vegetais na superfície. Isso facilita o controle da erosão e pode melhorar a infiltração e a retenção de água, além de beneficiar a estrutura e a porosidade do solo em comparação com os métodos tradicionais de preparo (Machado, *et al.* 2005). Múltiplas fileiras de hastes curvas alternadas são montadas de forma rígida, com amortecedores de mola ou com reinicialização por mola. Ferramentas intercambiáveis como lâminas *sweep*, hastes, picos ou enxadas estão acopladas a cada haste (ASABE, 2024). São nessas ferramentas que se encontram as maiores taxas de desgaste nos escarificadores.

Figura 12 - Escarificador em conjunto com rolo *packer*.



Fonte: adaptado de Ahmad Sharifi Malvajerdi (2023).

Diversos são os trabalhos que tiveram como foco a lâmina de um escarificador. A pesquisa conduzida por Z. Pirowski e M. Goscianski (2013) teve como tema o desgaste e as características de desempenho de lâminas de escarificador operando em solos arenosos. Considerou-se diferentes condições de umidade do solo e dureza do material da lâmina. A pesquisa utilizou tanto modelagem teórica quanto experimentação para analisar o processo de desgaste, utilizando um tribômetro de autoria própria. Foi identificando que o desgaste das facas segue o tipo Archard e que a taxa de desgaste é significativamente maior em areia úmida em comparação com areia seca. O estudo concluiu que a dureza da superfície da lâmina é uma característica material essencial para sua durabilidade, e propôs um índice de plasticidade deslizante para otimizar as condições de trabalho, destacando a importância da manutenção adequada para garantir a operação eficaz e prolongada das máquinas agrícolas.

O experimento realizado por Y. Bayhan (2006) buscou avaliar a resistência ao desgaste de lâminas de um escarificador. Para comparação, utilizou-se três eletrodos de *hardfacing* diferentes: EH-600, EH-350 e EH-14Mn. A pesquisa foi conduzida por meio de testes comparativos em laboratório, utilizando um tribômetro próprio, e em campo. Observou-se que as taxas de desgaste variaram significativamente entre as lâminas regulares e as tratadas com *hardfacing*. O estudo concluiu que os eletrodos EH-600 e EH-350 apresentaram os melhores resultados em termos de resistência ao desgaste, além de serem mais econômicos, o que pode beneficiar os agricultores ao reduzir os custos de operação e aumentar a durabilidade das ferramentas agrícolas.

A investigação realizada por Vrublevskyi *et al.* (2022) estudou as características volumétricas do desgaste de lâminas em interação tribológica com solos abrasivos. Foi utilizado tecnologia de escaneamento 3D para analisar o desgaste em micro escala. Os materiais analisados nos testes incluíram aço martensítico 38GSA, solda de revestimento EL HARD70 e carboneto de tungstênio G10, aplicados sobre o aço 38GSA. O teste foi realizado em várias etapas, começando com a digitalização 3D da geometria nominal dos elementos, seguida por testes tribológicos em condições operacionais específicas, onde o tipo de solo e a quantidade de trabalho realizado foram parâmetros decisivos. Após os testes, a microestrutura das superfícies desgastadas foi avaliada, e as partes foram novamente escaneadas em 3D. A comparação entre as superfícies desgastadas e as nominais permitiu determinar o volume total de material utilizado, além de volumes elementares após a discretização do modelo. Concluiu-se que a abordagem volumétrica oferece uma avaliação mais precisa das mudanças geométricas nas peças de trabalho, permitindo identificar fatores que influenciam o desgaste local e propondo um novo método de previsão de desgaste que supera as limitações dos métodos tradicionais baseados em massa.

4.1.4 Subsolador

A ASABE (2024) define o subsolador como um implemento de preparo primário para cultivo intermitente em profundidades suficientes para romper camadas compactadas do subsolo. Os subsoladores são equipados com hastes amplamente espaçadas, dispostas em linha ou alternadas em um quadro em forma de V. O subsolamento é comumente realizado com os caminhos das hastes correspondendo às fileiras das culturas subsequentes. Um quadro e hastes robustos são necessários para operações em profundidade.

O subsolador difere-se do escarificador pela profundidade de atuação. Na literatura, não há consenso sobre qual profundidade divide um escarificador e um subsolador. Segundo Martucci (1985), a escarificação pode ser dividida em leve, para profundidades de 5 a 15 cm; pesada, para profundidades de 15 a 30 cm; e subsolagem, para profundidades superiores a 30 cm. Por outro lado, para a ASABE (2024), atividades realizadas até 40 cm de profundidade são classificadas como escarificação, enquanto aquelas que atingem profundidades superiores a 40 cm são consideradas subsolagem. A Fig. 13 mostra um subsolado.

Figura 13 - Implemento subsolador.



Fonte: MEC-RUL (2024).

O trabalho desenvolvido por Kostencki, Stawicki e Białobrzaska (2016) investigou a durabilidade e a geometria de desgaste de lâminas de subsoladores fabricadas em aço e revestidas com carboneto sinterizado. Os três tipos de lâminas analisados foram: a lâmina A, que não possui reforço; a lâmina B, que é reforçada com uma única fila de placas de carboneto sinterizado; e a lâmina C, que apresenta um design diferente e é reforçada com quatro filas de placas de carboneto sinterizado. A lâmina C apresentou uma durabilidade superior, com desgaste reduzido em mais de quatro vezes em comparação aos demais. Os materiais utilizados nas lâminas foram submetidos a tratamentos de superfície, como soldagem a arco, para melhorar suas propriedades mecânicas. Os testes tribológicos foram realizados em condições de campo, onde foram avaliadas a taxa de desgaste, a dureza e a microestrutura dos materiais, além de se observar fenômenos de desgaste como micro-corte e micro-arado. A análise das superfícies desgastadas revelou a presença de deformações plásticas e a formação de cavidades, indicando a complexidade dos mecanismos de desgaste envolvidos.

O trabalho desenvolvido por Z. Pirowski *et al.* (2012) também avaliou a performance de lâminas de subsoladores. Os autores compararam uma nova geometria, fabricada em ferro fundido dúctil austemperado, com um modelo comercial de ferro forjado. Os testes tribológicos foram realizados em condições de campo, em que a taxa de desgaste foi expressa em relação a uma unidade de área trabalhada (hectare). Os resultados mostraram que a perda média de massa por hectare do modelo proposto foi de 0,40%, enquanto do modelo comercial foi de 0,87%, evidenciando uma maior durabilidade em relação aos componentes tradicionais, sugerindo essa opção ser uma solução mais eficaz para aumentar a vida útil de lâminas de subsoladores. Desse modo, o artigo destaca que tanto a geometria do material quanto o material e o processo de

austêmpera foram essenciais para os resultados encontrados, sugerindo ser uma boa alternativa para diminuição da taxa de desgaste em lâminas de subsoladores.

4.1.5 Cultivadores

De acordo com a ASABE (2024), os cultivadores são implementos de preparo de solo secundários, utilizados para a preparação da cama de sementes, erradicação de ervas daninhas ou cultivo em pousio após alguma forma de preparo primário. Os cultivadores de campo são equipados com hastes de aço com molas ou dentes que possuem uma ponta forjada integrada ou furos de montagem para ferramentas substituíveis, como enxadas ou lâminas *sweep*. Os dentes geralmente são espaçados entre 15–23 cm (6–9 polegadas) em um padrão alternado. Um cultivador é mostrado na Fig. 14.

Figura 14 - Cultivador acoplado em um trator.



Fonte: CASE IH (2024).

Geralmente, as lâminas dos cultivadores (ou lâminas *sweep*) são em forma de ‘V’, projetadas para operar em profundidades rasas, destruir o crescimento de ervas daninhas e soltar a superfície do solo sem cobrir os restos de cultura — Largura de corte do ‘V’ superior a 600 mm (24 polegadas) (ASABE, 2024). Em algumas pesquisas, são chamadas de lâminas pé de pato (do inglês, *duckfoot*). Dado que elas trabalham em contato direto com o solo, uma série de pesquisas relacionadas com o seu desgaste são encontradas na literatura.

Um exemplo de estudo com as lâminas pé de pato foi o realizado por Z. Pirowski *et al.* (2012). A pesquisa avaliou a perda de massa, em escala real, de 8 amostras após o trabalho em um hectare de área de solo, o equivalente a 10000 m². Uma imagem das amostras é mostrada na Fig. 15.

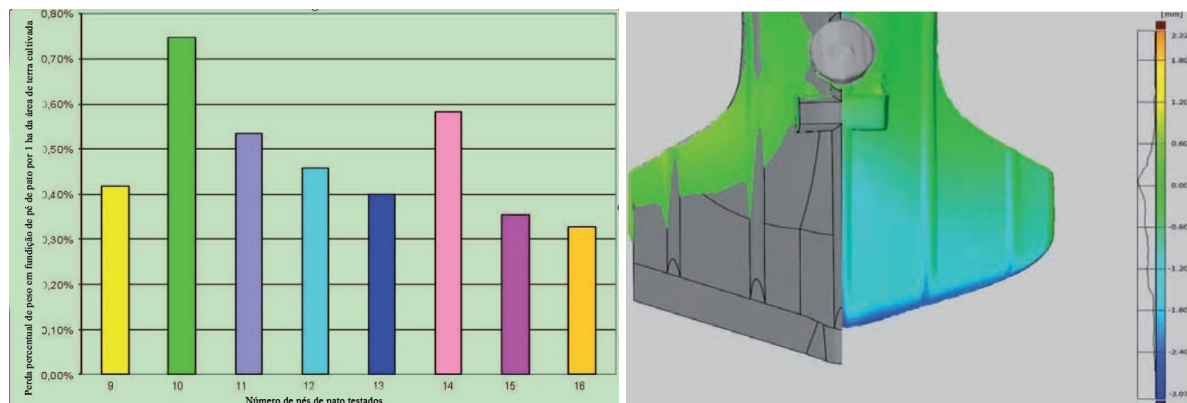
Figura 15 - Lâminas de arado do tipo *Duckfoot*.



Fonte: adaptado de Z. Pirowski *et al.* (2012).

O estudo detalha as características do solo preparado, tais como umidade e classificação do solo, de acordo com uma escala local, além de condições de velocidade de trabalho, temperatura e umidade relativa. Os resultados da taxa de desgaste foram expressos em porcentagem de perda de massa por hectare, conforme mostrado na Fig. 16 (a). Além do mais, a pesquisa também avaliou o perfil de desgaste das ferramentas trabalhadas, por meio de scanners 3D, conforme Fig. 16 (b). Nesse contexto, foi ressaltada as áreas de maior desgaste, influenciadas também pela geometria da peça.

Figura 16 - Resultados da pesquisa de Z. Pirowski *et al.* (2012) (a) perda de massa e (b) análise de perfil de desgaste de lâminas pé de pato.



(a)

(b)

Fonte: adaptado de Z. Pirowski *et al.* (2012).

O trabalho desenvolvido por Zhang e R.L. Kushwalha (1993), intitulado "*Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges*", apresentou resultados significativos sobre o desgaste de lâminas de cultivadores em aço carbono AISI 1070 com bordas endurecidas. Para aumentar a dureza das bordas das lâminas, foram utilizados três métodos de revestimento em diferentes amostras. Assim, parte das amostras foi revestida por "*laser coated*" com um

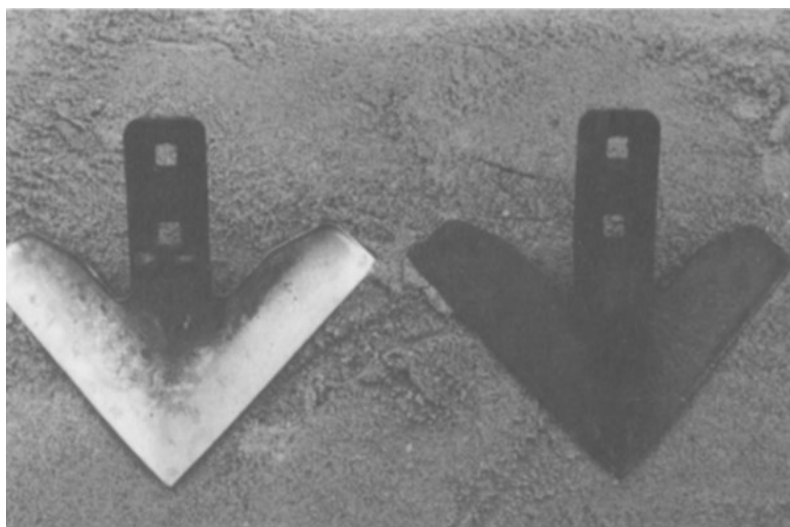
material comercial, especificamente o pó Al-1236. Além do mais, outras amostras foram revestidas com grãos de carboneto de tungstênio fundido com uma liga de níquel. Este último foi aplicado utilizando um maçarico oxiacetilênico, concentrando o calor na borda dos socos, o que permitiu uma fusão controlada e a formação de uma camada dura na superfície, que foi atribuído à transformação controlada da fase martensítica, um fenômeno que ocorre durante a têmpera, onde a estrutura do material se torna mais resistente ao desgaste. Ademais, o terceiro grupo de amostras foi endurecido superficialmente nas bordas para transformação de fase martensítica por uma empresa privada, sem detalhes do processo.

Assim, os resultados de Zhang e R.L. Kushwalha (1993) mostraram que as lâminas com bordas duras apresentaram uma resistência ao desgaste superior em comparação as lâminas regulares, evidenciada por uma taxa de desgaste reduzida, em todos os 3 tratamentos aplicados. Após percorrer 74 km, durante o cultivo, os revestimentos que permitiram menor perda de massa das amostras foram, respectivamente, por “*laser coated*” com pó Al-1236, o processo realizado pela empresa privada e o revestimento utilizando maçarico oxiacetilênico com grãos de carboneto de tungstênio fundido com uma liga de níquel. Esses resultados demonstram a importância do tratamento de endurecimento e das características dos materiais na performance das lâminas de cultivadores.

Além disso, a análise de imagem revelou que a mudança de perfil das lâminas era um indicador eficaz do desgaste, em que as lâminas endurecidas mantiveram melhor a sua forma original em comparação as regulares. A pesquisa também destacou a diminuição do esforço de tração necessário para movimentar a lâmina com o tempo de uso, atribuída a alterações na área projetada e ao efeito de “autoafiamento” das lâminas. Assim, uma hipótese para ter ocorrido esse fenômeno, apesar de não ser citado pelos autores, é o encruamento do material, por meio de sua deformação plástica em meio ao desgaste abrasivo, aumentando sua dureza e causando um efeito positivo durante a operação da ferramenta.

A pesquisa elaborada por R.L. Kushwaha, Chi e Roy (1990) investigou o desempenho de ferramentas agrícolas com revestimentos aplicados por plasma, focando na análise de materiais como ligas metálicas amorfas e cerâmicas substitutas. O estudo abordou a importância do tratamento de superfície para aumentar a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas, mantendo a tenacidade do núcleo para absorver impactos. A Fig. 17 mostra as amostras utilizadas.

Figura 17 - Lâminas de cultivadores do tipo pé de pato.



Fonte: R.L. Kushwaha, Chi e Roy (1990).

Os testes tribológicos foram realizados tanto por meio de um modelo de elementos finitos, que simulou a interação solo-ferramenta, quanto em um teste físico em um tribômetro próprio, em que as forças atuantes nas ferramentas foram medidas em condições controladas. Os resultados mostraram que as bordas cortantes revestidas com cerâmica apresentaram uma durabilidade três vezes maior em comparação ao aço convencional. Além disso, os resultados de mostraram uma redução nas forças atuantes sobre a ferramenta durante o cultivo, com decréscimos de 15% na força de arrasto, 75% na força vertical e 60% no coeficiente de atrito.

O trabalho desenvolvido por Rani *et al.* (2022) analisou a resistência ao desgaste abrasivo em lâminas de cultivadores feitas de aço 27MnCrB5, um material conhecido por sua alta resistência ao desgaste. Assim, o estudo incluiu o tratamento de superfície por meio de soldagem de revestimento, utilizando eletrodos de diferentes composições químicas, e testou três formas de solda (perpendicular, em tiras paralelas e em forma de ‘V’) para avaliar seu impacto na resistência ao desgaste. Os testes tribológicos foram realizados utilizando um tribômetro próprio.

Dessa forma, Rani *et al.* (2022) expressou a perda de massa dos componentes mediante a exposição em areia quartzosa como abrasivo, sob condições controladas de umidade. Os resultados mostraram que a solda aplicada perpendicularmente à direção do fluxo de abrasivo resultou em menor perda de massa em comparação com as outras formas de solda. Além disso, a solda feita com um eletrodo projetado para aplicações que não exigem alta resistência ao desgaste, mas que possui dureza variando de 280 a 590 HV, apresentou a maior resistência ao

desgaste abrasivo. O estudo concluiu que a soldagem de revestimento significativamente melhora a resistência ao desgaste das lâminas em relação ao material base.

Dasgupta *et al.* (1997) já havia destacado que as técnicas de soldagem, revestimento duro (*hardfacing*) e aspersão térmica (*thermal spraying*) eram as mais apropriadas para uso nos setores de mineração e agrícola, visando melhorar a resistência ao desgaste e a vida útil dos implementos e componentes.

Assim, tendo em vista que muitos estudos comparam o efeito do desgaste em relação a soldagem e a aspersão térmica, é importante conhecer as vantagens e limitações de cada processo. Desse modo, o processo de soldagem permite uma união metalúrgica, por meio da fusão do material, porém causa uma zona termicamente afetada que pode ser prejudicial do ponto de vista de resistência mecânica. Assim, segundo Dasgupta *et al.* (1997), uma aplicação típica do processo de soldagem é para a união de placas de desgaste de peças que precisam de substituição frequente devido ao desgaste, como caçambas de escavadeiras, trituradores e pulverizadores.

Já a união por aspersão térmica consiste em partículas expelidas em grande velocidade sobre o material base, em temperaturas inferiores à de fusão, permitindo a adesão pelo princípio de deformação plástica dos materiais, porém sem a mesma resistência mecânica de uma união metalúrgica. Segundo Dasgupta *et al.* (1997), as peças que são mais frequentemente aspergidas termicamente incluem anéis de pistão, mancais, transportadores, garfos de câmbio, matrizes de extrusão, caixas de transformadores e pontes suspensas.

Sukumaran *et al.* (2019) foi outro que avaliou desgaste de lâminas de cultivadores do tipo pé de pato, utilizadas em cultivadores. Fabricadas em aço ao boro 27MnB5, as lâminas foram avaliadas em testes de campo, evidenciando uma perda de 539 gramas após 145 km de solo preparado em velocidade do trator mantida entre 8 a 12 km/h. Ficou evidente após realização do teste em escala real a alteração da geometria da ferramenta, conforme mostrado na Fig. 18.

Figura 18 - Lâminas de arado desgastada (esquerda) comparada a uma lâmina nova (direita).



Fonte: adaptado de Sukumaran *et al.* (2019).

Nesse estudo, percebe-se que o desgaste ocorre em um ângulo específico, o que favorece o ângulo da cunha a permanecer constante. Além do mais, assim como observado no estudo realizado por Zhang e R.L. Kushwalha (1993), em Sukumaran *et al.* (2019) o efeito do encruamento também é uma hipótese para o efeito de “autoafiamento”, em que se tem, por meio do desgaste abrasivo, a deformação plástica do material, aumentando sua dureza e sendo um efeito positivo durante a operação, no sentido de manter os ângulos de cunha mesmo com a perda de massa do material.

4.1.6 Enxadas rotativas

Segundo a ASABE (2024), a enxada rotativa é um implemento utilizado tanto para preparo primário quanto secundário do solo. Esse implemento pode ser aplicado em cultivos totais ou em faixas. Além disso, também é empregado na incorporação de produtos químicos antes do plantio e para a cultura em linhas. O equipamento possui um eixo que é posicionado transversalmente à direção de movimentação, com lâminas curvas que cortam o solo, trituram os resíduos na superfície e misturam os materiais na camada trabalhada. Uma imagem desse implemento é mostrada na Fig. 19.

Figura 19 - Implemento enxada rotativa.



Fonte: SR Implementos (2024).

A pesquisa realizada por Kang, Grewal e Cheema (2017) verificou a influência de revestimentos térmicos na resistência ao desgaste de lâminas de enxadas rotativas. Foi utilizado o aço de alta resistência EN-14B como material de base. Os revestimentos analisados foram Stellite-21, WC-Co-Cr e Cr₃C₂-NiCr, aplicados por meio da técnica de spray de detonação pulsada. Antes da aplicação dos revestimentos, as amostras de aço passaram por um tratamento de jateamento de Al₂O₃ para criar uma superfície rugosa que favorecesse a adesão dos revestimentos. O comportamento tribológico foi avaliado utilizando um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, conforme a norma ASTM G-99. Nesse teste, as amostras revestidas foram colocadas contra um disco de aço endurecido sob condições secas e a uma carga constante de 49 N, com uma distância de deslizamento de 5400 m.

Os resultados de Kang, Grewal e Cheema (2017) mostraram que o revestimento WC-Co-Cr apresentou a maior resistência ao desgaste em comparação aos outros revestimentos, evidenciando uma taxa de desgaste significativamente menor. A análise microestrutural foi realizada por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (SEM) e difração de raios X (XRD), permitindo a avaliação das propriedades dos materiais, como dureza e microestrutura, que foram fundamentais para entender o desempenho dos revestimentos sob condições de desgaste abrasivo.

4.2 Componentes de máquinas

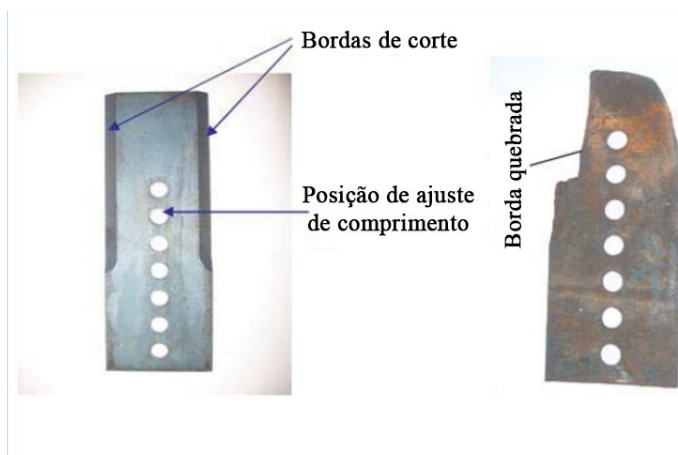
Além dos componentes de máquinas agrícolas utilizados diretamente em implementos agrícolas, muitos estudos avaliaram também outros tipos de componentes de máquinas.

Bobzin *et al.* (2023), realizou uma pesquisa sobre a aplicação de revestimento de triboativos (Cr, Al, X) N, com X = Mo, via deposição PVD (*Physical Vapor Deposition*) em pinos de correntes de transmissão com o objetivo de reduzir o desgaste. Especialmente para condições lubrificadas, em que é possível a formação de tribofilmes, o revestimento triboativo (Cr, Al, MoH) N mostrou uma redução no atrito de até 35%, variando 4 tipos de graxa, em relação as amostras não revestidas, além de velocidades de contato mais altas causando uma redução nos coeficientes de atrito sobre os testes tribológicos utilizando CJT (*chain-joint tribometer*), mostrando que o revestimento triboativo tem grande potencial para aumentar a eficiência na junta da corrente.

Além disso, o estudo ressaltou, no entanto, que o volume total de desgaste (considerando também as buchas não revestidas das juntas de correntes) foi variável em relação ao revestimento e as combinações com os diferentes tipos de graxa. Ainda assim, todas as combinações de triboativos e graxa apresentaram resultados de menor desgaste em relação a condição não revestida. O estudo também mostrou o potencial do tribômetro pino-sobre-disco para pré-selecionar revestimentos promissores para o CJT.

Um outro estudo, conduzido por (Cooke, 2019), avaliou o desempenho tribológico do revestimento de carboneto de Tungstênio WC – FeCrCoNiTi (97MXC), depositados por pulverização térmica por arco elétrico (*Electric Wire Arc Spraying - EWAS*). Esse revestimento foi aplicado em lâminas de corte de base de colhedoras de cana de açúcar, conforme mostrado na Fig. 21. O teste foi realizado em condições de laboratório e em campo, em condições reais de trabalho por sete dias, após os quais as lâminas foram removidas e a perda de volume e massa registrada.

Figura 20 - Lâminas de corte de base de colhedoras de cana-de-açúcar.



Fonte: adaptado de Cooke (2019).

Baseado na equação de desgaste de Archard, que descreve uma relação inversamente proporcional entre a taxa de desgaste e a dureza da superfície, Cooke (2019) esperavam que como resultado da aplicação do revestimento, fosse obtido uma dureza superficial mais elevada e consequentes taxas de desgaste mais baixas. De fato, conforme indicado pelos testes realizados em um tribômetro do tipo bloco-sobre-anel (ASTM G77), em condições de laboratório controladas, os testes de campo confirmaram que o revestimento WC – FeCrCoNiTi (97MXC), depositado por pulverização térmica por arco elétrico, mediante condições otimizadas dos parâmetros de aplicação, foi capaz de duplicar a vida útil de corte das lâminas de corte de base utilizadas nas colhedoras de cana-de-açúcar, o que pode levar a uma economia de aproximadamente 50% no custo de substituição das lâminas de corte de base e no tempo de inatividade associado durante a colheita da cana-de-açúcar. A pesquisa, no entanto, não deixou claro se o custo de aplicação do revestimento avaliado é economicamente viável perante o ganho de vida das lâminas de corte.

4.3 Caracterização de materiais

Além do mais, muitas pesquisas realizaram somente a caracterização mecânica ou análises comparativas entre materiais comumente empregados em componentes de cultivo agrícola, sem foco direto na ferramenta.

Um trabalho conduzido por Triani *et al.* (2020), por exemplo, avaliou o aço AISI 15B30 comparando o aço tratado com borificação e deposição termo-reativa (TRD) com o material não tratado. Os resultados indicaram que os tratamentos aumentaram significativamente a dureza do material. Em um teste de desgaste microabrasivo, foi encontrado uma taxa de desgaste de 75 mg/10⁶ ciclos para amostras com dureza de 320 HV e 65 mg/10⁶ ciclos para amostras com dureza de 370 HV. Assim, os tratamentos térmicos aplicados proporcionaram uma performance tribológica entre 10 e 14 vezes maior que o material não tratado, demonstrando uma melhoria na resistência ao desgaste mediante a aplicação subsequente desses dois tratamentos.

Além do mais, a técnica de jateamento por *shot peening* é avaliada em muitos estudos sobre o desgaste em componentes de máquinas agrícolas. Esse tratamento consiste em impulsionar em alta velocidade pequenas esferas de aço, ferro fundido, vidro ou fio cortado contra a peça a ser tratada. O tamanho das esferas pode variar de 0,1 a 1,3 ou até 2 mm. Nesse contexto, a granalha é jateada sob condições totalmente controladas, normalmente em peças

mecânicas sujeitas a tensões dinâmicas, em que as superfícies tratadas tendem a ganhar um aumento da vida útil em fadiga (A. NIKU-LARI, 1987).

Desse modo, o tratamento por *shot peening* permite que haja um ganho em tensão residual compressiva na região superficial da peça tratada, de modo que permite uma elevação de tempo de vida em peças submetidas a esforços dinâmicos, ou seja, à fadiga, tendo em vista a melhoria na resistência a propagações de trincas a partir da superfície da peça tratada.

Singh e Modal (2012), avaliou o aço ao boro 50B50 em diferentes condições. Os testes foram conduzidos com o material sem tratamento, recozido, com recozimento intercrítico e temperado e revenido, realizados após o processo de jateamento *shot peening*. Nos ensaios, foi empregado o teste de roda de borracha, em condições de areia seca e de lama e análises em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Assim, o estudo notou efeitos distintos do tratamento térmico sobre a resistência ao desgaste em condições seca e de lama. Desse modo, em condições secas, a dureza e a tenacidade foram fatores determinantes que resultaram em uma resistência relativa ao desgaste melhorada em relação ao material bruto para as amostras temperada e revenida (aumento de 1,55 vezes) e com recozimento intercrítico (aumento de 2,37 vezes). Além do mais, o jateamento por *shot peening* também melhorou a resistência ao desgaste em condições secas, com um aumento na resistência ao desgaste relativa de 20,65% e 75,58% para intensidades do processo de 0,17 A e 0,27 A, respectivamente. Ademais, na condição de recozimento não se obteve nenhum ganho expressivo na resistência ao desgaste em relação ao material bruto.

No entanto, Singh e Mondal (2012) notaram que em condições de lama o material possui comportamento diferente. A resistência ao desgaste relativa diminuiu para 0,87 e 0,59 vezes em relação ao material bruto, para as mesmas intensidades de jateamento por *shot peening*, aplicadas na condição de areia seca. Isso ocorreu, segundo os autores, devido a contribuição do fenômeno de corrosão, que se tornou mais significativa nessas condições. Além do mais, os materiais recozido e temperado e revenido geraram, respectivamente, resistências ao desgaste de 0,51 e 0,87 vezes menor, em condições de lama em comparação com o material bruto, devido a uma maior taxa de corrosão associada a tensões residuais mais elevadas. Assim, o único tratamento que obteve um ganho de resistência relativa ao desgaste na condição de lama foi o recozimento intercrítico, na ordem de 1,09 vezes.

Singh e Saxena (2008) realizaram outro trabalho que avaliou o aço ao boro 50B50. Com foco em diferentes condições de jateamento *shot peening*, mas realizando os mesmos

tratamentos térmicos avaliados por Singh e Mondal (2012). O tribômetro utilizado foi o de roda de borracha. Nesse âmbito, para a condição de jateamento *shot peening* leve (0,17 A) as taxas de desgaste dos materiais não tratados, recozidos, recozidos intercriticamente e temperados e revenidos resultaram em reduções da taxa de desgaste de 30,3%, 21,6%, 6,5% e 13,3%, respectivamente. Considerando a intensidade crítica de jateamento *shot peening* (0,37 A), a taxa de desgaste aumentou drasticamente em 44,2%, 37%, 63 % e 118 % para os mesmos respectivos tratamentos. Assim sendo, o estudo conclui que o processo de jateamento *shot peening* é muito eficaz para melhorar a resistência ao desgaste do aço ao boro 50B50. No entanto, há limitações, pois intensidades excessivas podem causar aumento na taxa de desgaste devido a fissuras superficiais e subsuperficiais. Portanto, é crucial encontrar a intensidade de jateamento por *shot peening* ideal para maximizar os benefícios sem comprometer a integridade do material.

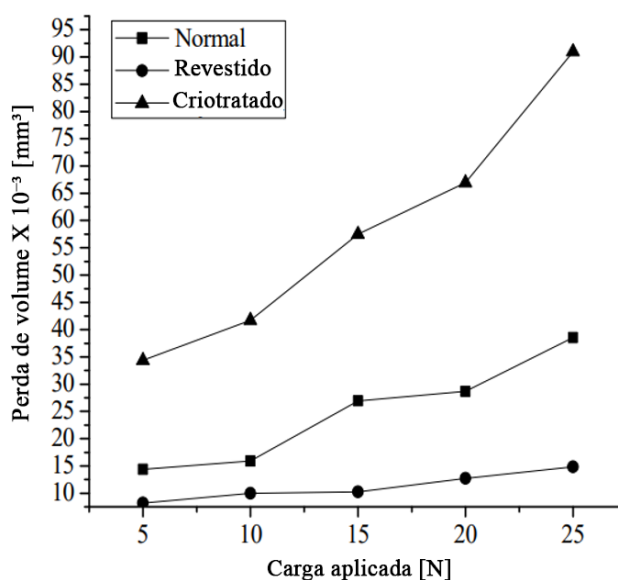
Outro tratamento comumente empregado em componentes de máquinas agrícolas é o tratamento criogênico. Ele normalmente é complementar a outros tratamentos térmicos convencionais e tem como finalidade melhorar uma ou mais propriedades quando submetido o material a temperaturas muito baixas, podendo variar de -60 °C a -196 °C. O fenômeno responsável por essas mudanças nas propriedades dos aços é a diminuição da austenita retida e, conseqüentemente, o aumento da martensita (BARRON, 1982; VALES, 2010).

Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit (2021) avaliaram um aço ao boro (30MnB5), comparando a condição de material bruto com os tratamentos térmicos de têmpera e têmpera e revenimento precedidos de tratamento criogênico. Nesse contexto, por meio do ensaio bloco-sobre-anel, a perda de massa relativa ao material bruto correspondeu a 3,49% em relação ao peso inicial, enquanto do material temperado foi de 0,82% e do material com têmpera, tratamento criogênico e revenimento foi de 1,2%. Dessa forma, o autor conclui que o processo de têmpera contribui para a vida sobre desgaste do aço ao boro 30MnB5, mas ressalta que apesar de as amostras que sofreram somente o tratamento térmico de têmpera terem apresentado melhor comportamento do ponto de vista de resistência ao desgaste, em relação ao segundo grupo de amostras, é essencial que esses dados sejam validados em campo, dada a possibilidade de forças de impacto na ferramenta, que não estavam previstos nos testes laboratoriais, poderem ser determinantes na vida das peças dada o aumento da fragilidade do material mediante a têmpera, o que é remediado pelos processos de tratamento criogênico e revenimento.

Annappa e Basavarajappa (2016) focaram na análise do aço de baixo carbono AISI 1013, utilizado em ferramentas de lâminas de arado, em condições de revestimento duro e de tratamento criogênico por meio do teste de roda de borracha (ASTM G65). Assim, o estudo

conclui que o desempenho do material com tratamento criogênico superou o desgaste em relação ao material bruto e com revestimento duro, ressaltando que o tratamento criogênico não é vantajoso, do ponto de vista de vida em desgaste, quando empregado sem um outro tratamento térmico prévio, como a têmpera, por exemplo. Os resultados são mostrados na Figura 21.

Figura 21 - Desempenho de aços com diferentes tratamentos.



Fonte: adaptado de Annappa e Basavarajappa (2016).

Além desse, Singh (2018) realizou uma análise comparativa entre três tipos de aço utilizados em aplicações agrícolas: um aço de baixo carbono (material bruto e cementado), um aço de médio carbono e um aço de médio carbono e baixa liga (ambos em material bruto e austenitizados). A análise foi realizada por meio do teste de roda de borracha (ASTM G65). Além disso, os aços também passaram por processos de têmpera e revenimento. Dessa maneira, os resultados mostraram que, sob condições não tratadas termicamente, a taxa de desgaste do aço de médio carbono e do aço de médio carbono e baixa liga foram, respectivamente, de 13,10% e 32,33% menores do que a do aço de baixo carbono. Enquanto isso, sob tratamento térmico, a taxa de desgaste foi reduzida em 18,83 %, 36,94 % e 48,13 % em aço de baixo carbono, aço de médio e aço de médio carbono e baixa liga, respectivamente, em relação as condições dos materiais brutos. Assim, o aumento na vida útil dos aços selecionados e tratados termicamente foi constatado como 64,83% maior no caso do aço de médio carbono e baixa liga seguido por 45,15% no caso do aço de médio carbono, ambos em relação ao aço de baixo carbono também tratado.

5. DESAFIOS DOS TESTES TRIBOLÓGICOS

O desgaste não é o resultado de um único processo mecânico. Em vez disso, existem vários mecanismos que resultam em desgaste, cada um sendo dependente de uma ampla variedade de parâmetros. Além disso, os mecanismos podem combinar, interagir e mudar durante o curso do desgaste. Conseqüentemente, em qualquer avaliação de desgaste, é necessário selecionar um teste de desgaste que simule as características essenciais da aplicação. (Zhang e R.L. Kushwaha, 1993).

Zhang e R.L. Kushwaha (1993) defendem que o fenômeno de desgaste de ferramentas agrícolas movendo-se através do solo é diferente do desgaste obtido do equipamento de laboratório padrão. Assim, o processo de desgaste sob condições de campo varia onde o solo desliza e rola na superfície da ferramenta. A força real aplicada na superfície da ferramenta varia devido à não uniformidade do tamanho das partículas e da resistência do solo. Kushwaha e Shi (1991) também defendem que os dispositivos de teste de laboratório padrão usados para estudar o desgaste abrasivo são considerados inadequados para a simulação de condições de campo encontradas por ferramentas de cultivo.

A. Yazici (2011) avaliou ferramentas tanto no teste pino-sobre-disco, quanto em condições de campo. O autor observou que, apesar das condições de laboratório serem controladas e potencialmente mais severas em termos de desgaste, as condições reais do campo, que incluem fatores como a abrasividade do solo e a interação com o ambiente, resultaram em um desgaste mais significativo do que o observado em laboratório.

Sydow *et al.* (2021) revisaram o aspecto tribológico aplicado a elementos agrícolas. Segundo os autores, para determinar o desgaste nesses tipos de componentes os testes em campo são imprescindíveis devido às dificuldades na simulação de variações nas condições do ambiente de laboratório, tais quais a variação nas cargas que ocorrem durante o trabalho no solo.

No entanto, uma perspectiva um pouco distinta dessas foi apresentada no estudo de Sukumaran *et al.* (2019). Nesse trabalho, avaliou-se as propriedades do aço 27MnB5 de dentes agrícolas por meio de três testes: um teste em campo em escala real, no qual as ferramentas foram submetidas a distâncias de até 145 km de uso prático; um teste de múltiplas asperezas em laboratório, utilizando o padrão ASTM G132 para simular o contato com partículas abrasivas; e um teste de asperidade única, realizado com um riscador, seguindo a norma ASTM G171, para analisar os mecanismos de desgaste em nível microscópico. De acordo com os

autores, os três testes foram realizados de forma integrada para correlacionar os resultados laboratoriais com as condições reais de operação. Os resultados indicaram que o microcorte foi o principal mecanismo de remoção de material em todas as escalas, e as taxas de desgaste obtidas em laboratório e no campo foram consistentes, confirmando a aplicabilidade dos testes controlados para prever o desempenho em campo.

Dessa forma, Sukumaran *et al.* (2019) destacam que os testes laboratoriais, como o de múltiplas asperezas e asperidade única, permitiram um controle rigoroso das variáveis, como o tamanho das partículas abrasivas e a força aplicada. Em contraste, os testes em campo refletiram as condições reais e variáveis encontradas no uso prático de ferramentas agrícolas. Essa combinação de testes garantiu que os mecanismos de desgaste observados em laboratório, como o microcorte, permanecessem consistentes nas condições reais de operação, proporcionando validação dos resultados e maior confiabilidade na previsão do desempenho dos materiais em campo. O estudo concluiu que a utilização de múltiplas escalas é eficaz para simular o desgaste real e pode ser empregada para otimizar o design e a seleção de materiais em aplicações agrícolas.

Desse modo, observa-se que o principal desafio dos testes tribológicos, no âmbito de estudos sobre desgaste em componentes agrícolas, está justamente em correlacionar resultados de campo com os observados em testes de laboratório, em condições controladas. Nesse sentido, dadas as diversas abordagens sobre os testes em laboratório e em campo, percebe-se que, embora os testes de laboratório forneçam dados controlados, a validação em campo é ainda crucial para avaliar o desempenho geométrico ou funcional da ferramenta em condições reais de desgaste, pois permite considerar variações de cargas, tipos de solo e fatores ambientais que não podem ser completamente reproduzidos em ambiente controlado. Os testes de campo, portanto, são complementares, mas fundamentais para validação dos resultados.

Ademais, outro ponto, avaliado por Aysel Yazici (2021), está relacionado a dificuldade na transferência das descobertas de pesquisas realizadas ao desgaste em ferramentas agrícolas ao longo de diversos anos para a aplicação na indústria. O estudo, com um viés de avaliação da eficiência na transferência das descobertas de pesquisas para o meio industrial, apontou que as estruturas financeiras precárias de fabricantes de máquinas de pequeno e médio porte e a falta de políticas regulatórias associadas ao incentivo a transferência de tecnologias e informações para o setor agrícola são os principais obstáculos significativos.

Dessa forma, associado a essa problemática, é imprescindível ressaltar que, além do desenvolvimento de novas pesquisas, em si, é necessário demonstrar nos resultados dos estudos científicos os ganhos financeiros que se tem com a otimização de um material ou tratamento, por exemplo, correlacionado ao aumento da vida em desgaste da ferramenta a fim de gerar maior impacto do meio no setor industrial.

6. METODOLOGIA DA REVISÃO

A metodologia para seleção dos 56 artigos revisados nesse trabalho consistiu na pesquisa por artigos com as palavras-chave “tribology”, “wear”, “agricultural equipment”, “tribological tests”, “steel”, “soil-tool interactions”, “abrasive wear”, “tribological behavior”, “agricultural materials” e “wear resistance” nos buscadores *Elsevier*, *Science Direct*, *Google Scholar* e *Web of Science*. Os critérios de filtros utilizados para seleção dos artigos foram o período de publicação considerado de 1990 a 2024, a disponibilidade de dados sobre materiais e métodos de teste tribológico, estudos que abordassem diretamente o desgaste ou propriedades tribológicas de materiais e a relevância para o contexto de equipamentos agrícolas, tais como escarificadores, subsoladores, discos de arado, arado de aiveca, além de peças de motores a diesel.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse viés, na Fig. 22 evidenciam-se os anos de publicação dos artigos avaliados.

Figura 22 - Quantidade de artigos revisados por ano de publicação.



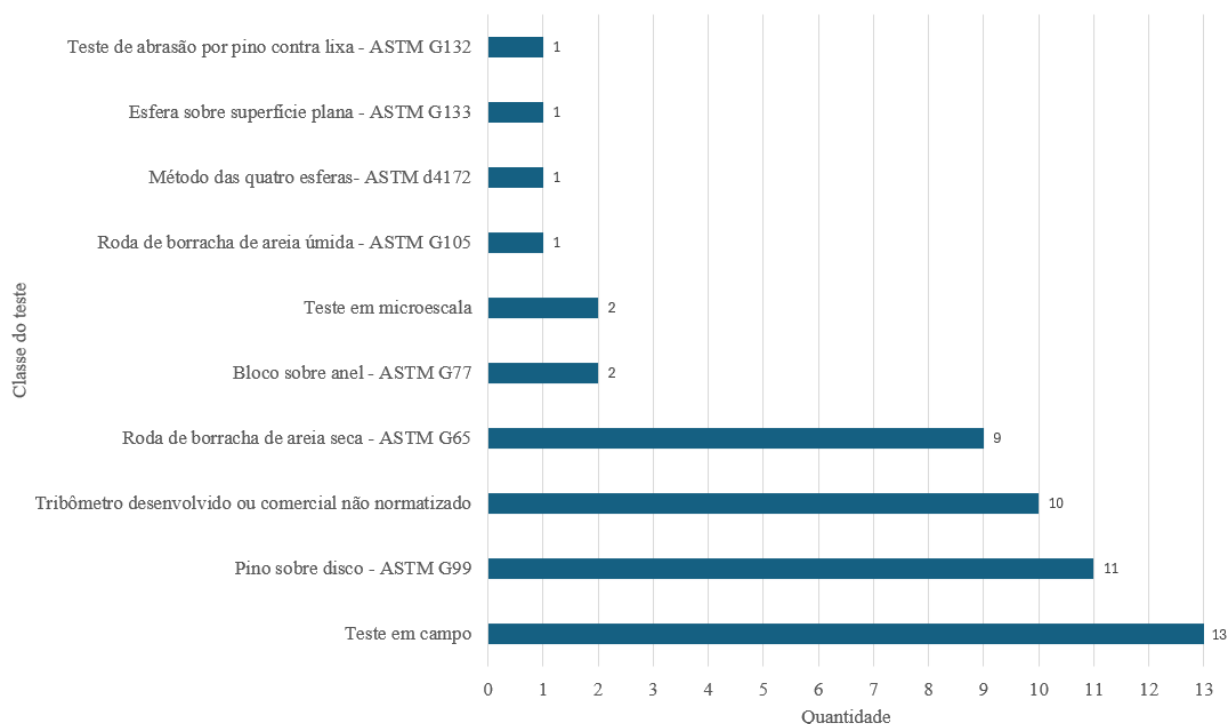
Fonte: autoria própria.

Dessa forma, essa revisão contemplou estudos de diversos períodos, permitindo uma análise da evolução temporal sobre o tema de desgaste em componentes de máquinas agrícolas

ao longo dos anos, constatando também uma crescente em estudos sobre essa pauta nos últimos anos.

A Fig. 23 mostra a distribuição dos principais testes tribológicos empregados nos artigos revisados com a correspondência dos estudos na Tabela 1.

Figura 23 - Distribuição de Testes Tribológicos entre os artigos revisados.



Fonte: autoria própria.

Tabela 1 - Discretização dos métodos de testes tribológicos.

Tipo de teste	Artigos relacionados
Teste em campo	(Zhang e R.L. Kushwaha, 1993); (Y. Bayhan, 2006); (A. Yazici, 2011); (Z. Pirowski et al., 2012); (Al-sandooq, Yousif e Jensen, 2012); (Kostencki, Stawicki e Białobrzaska, 2016); (Cooke, 2019); (Sukumaran et al., 2019); (Stawicki, Białobrzaska e Kostencki, 2017); (Kostencki, Stawicki e Królicka, 2021);

	(Rani et al., 2022); (Vrublevskiy et al., 2022); (P.M. Bazhin et al., 2022).
Pino sobre disco - ASTM G99	(Bhakat et al., 2004); (Canale, Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (A. Yazici, 2011); (Ibrahim, 2015); (Kučera, Ján Pršan, Pavol Kostoláni, 2014); (H. Muhandes, A. Kalacska, G. Kalacska, 2020); (Kang, Grewal, Cheema, 2017); (Kumar, Saha, 2022); (Chen et al., 2022); (Bobzin et al., 2023); (Akuwueke, Ukachi Etoamaihe, 2024).
Roda de borracha de areia seca - ASTM G65	(Yu e Bhole, 1990); (Bhakat et al., 2004); (Canale, Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (Singh, Saxena, 2008); (Singh, Mondal, 2012); (Singh D., Saha K., Pada Mondal D., 2014); (Annappa, Basavarajappa, 2016); (Katsich e Polak, 2016); (Al-sandoog, Yousif, Jensen, 2012); (Singh, 2018).
Tribômetro desenvolvido ou comercial não normatizado	(Yu e Bhole, 1990); (Liu, 1994); (Y. Bayhan, 2006); (Dobra, Farbas e Pascu, 2014); (Radoslav Majdan et al., 2016); (Romek et al., 2020); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Adeyemi et al., 2023); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023); (Su et al., 2023).
Bloco sobre anel - ASTM G77	(Cooke, 2019); (Bozkurt, Fatih, Çakir, Fatih, Er, Umit, 2021).
Teste em microescala	(Sukumaran et al., 2019); (Triani et al., 2020).

Roda de borracha de areia úmida - ASTM G105	(Alsaeed et al., 2023).
Método das quatro esferas- ASTM d4172	(Zadorozhnaya, Levanov e Kandeva, 2018).
Esfera sobre superfície plana - ASTM G133	(Yu e Bhole, 1990).
Teste de abrasão por pino contra lixa - ASTM G132	(Sukumaran et al., 2019).

Fonte: autoria própria.

Conforme mostrado na Fig. 23, em alguns artigos não ficou evidente qual o método tribológico utilizado, sendo outros artigos somente de revisão. Nesse sentido, no âmbito avaliado, percebeu-se que de fato os principais testes tribológicos normatizados empregados em pesquisas para avaliação de desgaste em ferramentas agrícolas, no contexto desse estudo, são o pino-sobre-disco (ASTM G99) e o roda de borracha de areia seca (ASTM G65).

Ademais, percebeu-se uma tendência contemporânea dos estudos a utilizar os testes de pino sobre disco (ASTM G99) e o roda de borracha de areia seca (ASTM G65) para avaliação tribológica de componentes agrícolas. Assim, todos os 9 estudos que utilizaram como base o teste roda de borracha se concentraram a partir dos anos 2000, sendo que 6 se acumularam entre os anos de 2010 e 2018. No entanto, dentre os artigos revisados sobre o teste de roda de borracha de areia seca nenhum foi publicado nos últimos seis anos (entre 2019 e 2024). Assim, uma das hipóteses possíveis pela queda de artigos utilizando essa metodologia nesse período é a grande quantidade de estudos já existentes, indicando uma consolidação da metodologia.

Por conseguinte, 9 dos 11 estudos que utilizaram a metodologia de pino sobre disco se concentraram da década de 2010 em diante, sendo 5 desses a partir da década de 2020, indicando ser uma metodologia com tendência de novas pesquisas nos próximos anos.

Além do mais, 11 dos 13 artigos que realizaram testes em condições de campo se concentraram a partir da década de 2010. Desses 13 artigos, apenas 5 compararam os resultados de testes de campo com testes em escala laboratorial, com condições controladas, sendo eles: Y. Bayhan (2006), A. Yazici (2011), (Cooke, 2019), Sukumaran et al. (2019) e P.M. Bazhin et al. (2022).

Outrossim, apenas 2 artigos, dentre os revisados, avaliaram testes em microescala, demonstrando ser uma oportunidade para pesquisas futuras. Sukumaran et al., (2019) avaliou o

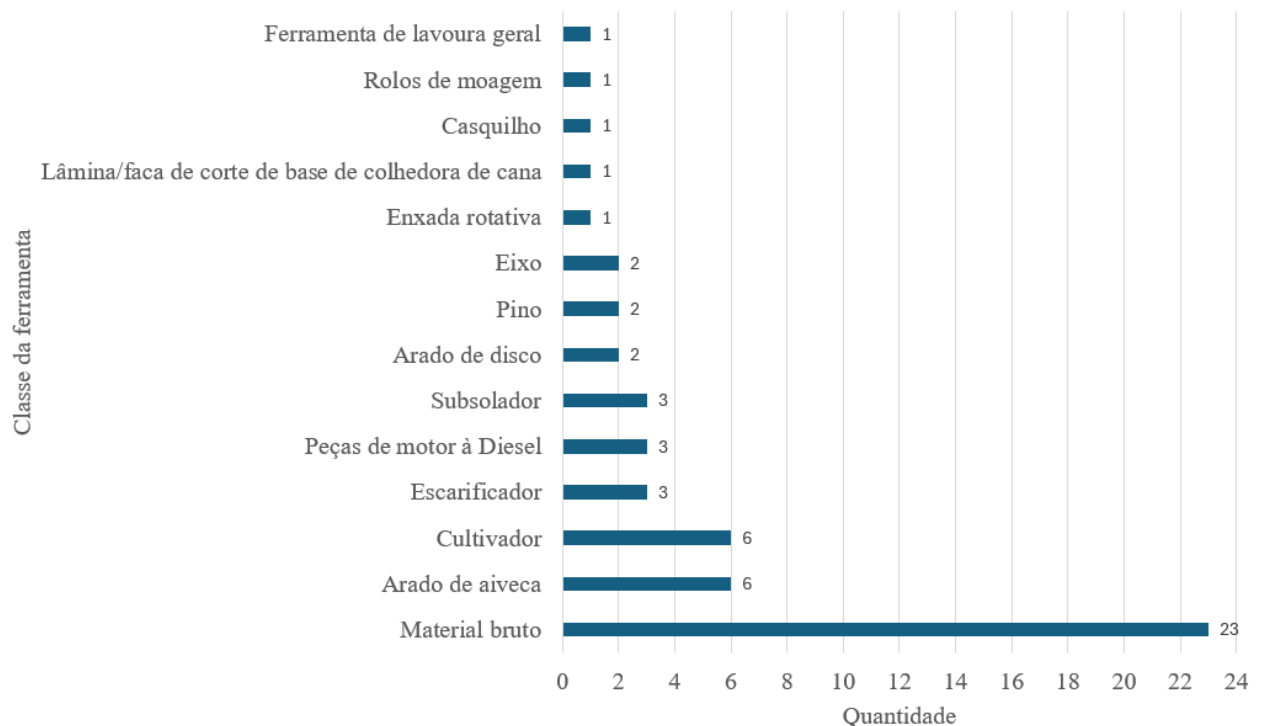
aço 27MnB5 em um teste de aspereza única (microescala) e comparou os resultados com teste um de campo e com um tribômetro de abrasão por pino (ASTM G132), encontrando resultados coerentes nas 3 escalas avaliadas em termos de mecanismo de desgaste, taxa de desgaste e grau de penetração. Triani et al. (2020) por sua vez avaliou o desgaste microadesivo no aço AISI 15B30 nas condições de tratamento com boretação e deposição termo-reativa (TRD).

Acrescenta-se ainda a pouca quantidade de estudos utilizando os testes bloco sobre anel (ASTM G77), roda de borracha de areia úmida (ASTM G105), método das quatro esferas (ASTM d4172), esfera sobre superfície plana (ASTM G133) e teste de abrasão por pino contra lixa (ASTM G132) no âmbito de componentes de máquinas agrícolas, identificando oportunidades de novos estudos.

Além disso, percebeu-se uma grande vertente em pesquisas utilizando tribômetros desenvolvidos em conceito de protótipos, especialmente com o objetivo ou de diminuir o custo do estudo ou de representar melhores condições de uso real em campo.

A Fig. 24 mostra as aplicações das ferramentas agrícolas avaliadas dentre os artigos revisados, bem como a Tabela 2 com a discretização dos dados.

Figura 24 - Distribuição de ferramentas avaliadas entre os artigos revisados.



Fonte: autoria própria.

Tabela 2 - Discretização das classes de ferramentas testadas.

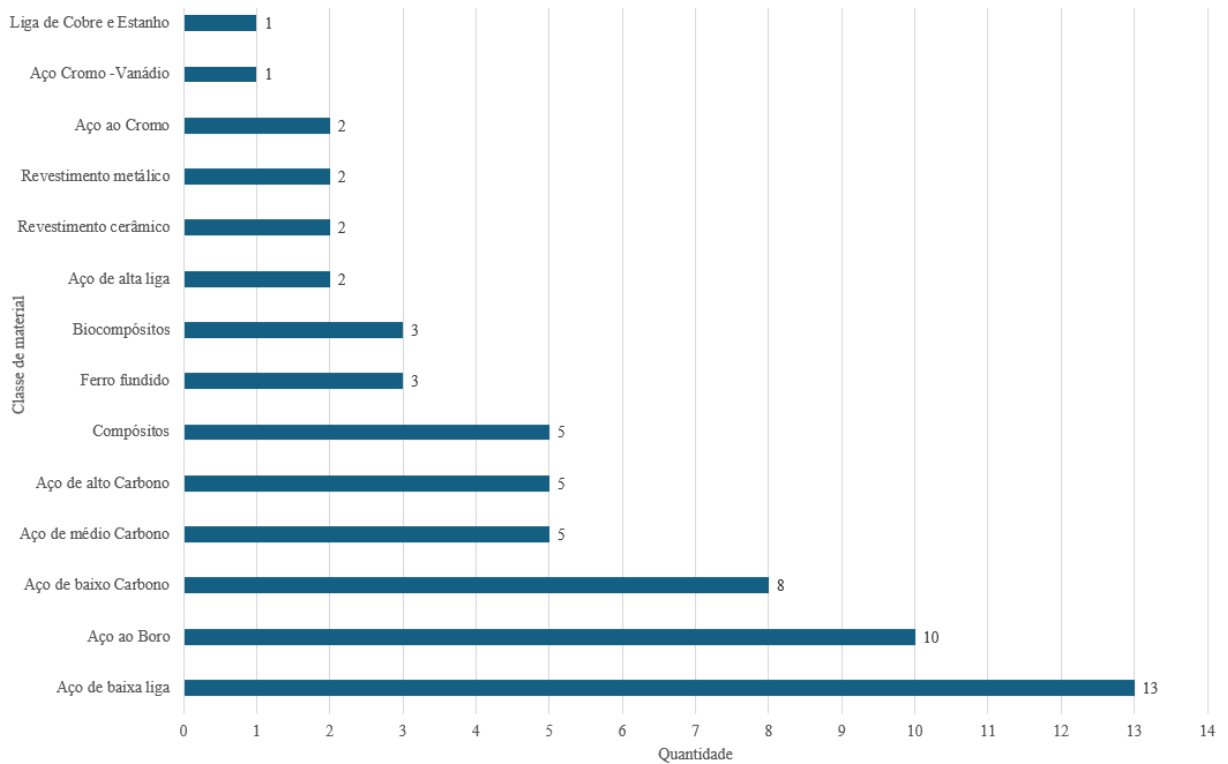
Uso da ferramenta	Artigos relacionados
Material Bruto	(Yu e Bhole, 1990); (Liu, 1994); (Canale e Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (Bhakat et al., 2004); (Singh e Saxena, 2008); (Singh D., Saha K. e Pada Mondal D., 2014); (Annappa e Basavarajappa, 2016); (Ibrahim, 2015); (Katsich e Polak, 2016); (Zadorozhnaya, Levanov e Kandeve, 2018); (Singh, 2018); (Triani et al., 2020); (H. Muhandes, A. Kalacska e G. Kalacska, 2020); (Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit., 2021); (Kumar e Saha, 2022); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Alsaeed et al., 2023); (Su et al., 2023).
Arado de aiveca	(A. Yazici, 2011); (Z. Pirowski; M. Goscianski, 2013); (Stawicki, Białobrzaska e Kostencki, 2017); (Sukumaran et al., 2019); (Kostencki, Stawicki e Królicka, 2021); (P.M. Bazhin et al., 2022).
Cultivador	(R.L. Kushwaha; Chi; Roy, 1990); (Zhang e R.L. Kushwaha, 1993); (Z. Pirowski et al., 2012); (Z. PIROWSKI; M. GOSCIANSKI, 2013); (Romek et al., 2020); (Kostencki, Stawicki e Królicka, 2021).
Escarificador	(Y. Bayhan, 2006); (Vrublevskiy et al., 2022) e (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023).
Peças de motor à Diesel	(Gh. Nasiri-Khuzani et al., 2012); (Suthisripok; Semsamran, 2018); (Somporn Katekaew et al., 2018).
Subsolador	(Z. Pirowski et al., 2012); (Kostencki, Stawicki e Białobrzaska, 2016); (Novikov et al., 2018).

Pino	(Kučera, Ján Pršan e Pavol Kostoláni, 2014); (Bobzin et al., 2023).
Eixo	(Kučera, Ján Pršan e Pavol Kostoláni, 2014); (Radoslav Majdan et al., 2016).
Enxada rotativa	(Kang, Grewal e Cheema, 2017)
Lâmina/faca de corte de base de colhedora de cana	(Cooke, 2019)
Ferramenta de lavoura geral	(Basiru Aramide et al., 2021)
Casquilho	(Radoslav Majdan et al., 2016)
Rolos de moagem	(Al-sandoq, Yousif e Jensen, 2012)

Assim, conforme demonstrado peça Fig. 24, percebe-se que a maior parte dos estudos se concentra na caracterização e comparação entre materiais brutos aplicados a componentes agrícolas. Além do mais, as principais ferramentas avaliadas em termos de desgaste, dentre os artigos revisados, são as de preparo do solo, tais como ferramentas de arado, de cultivadores, escarificadores e subsoladores. Assim, identifica-se, especialmente no cenário da economia brasileira, a carência por estudos relacionados a desgaste em ferramentas de plantadeiras, colhedoras de cereais e de cana-de-açúcar, ainda que não tenha sido o foco dessa revisão, o que demonstra uma oportunidade de novos estudos.

Além do mais, avaliou-se os principais materiais pesquisados dentre os artigos revisados, conforme Fig. 25 e Tabela 3. Considerou-se a classificação dos aços segundo suas composições químicas de acordo com as normas ABNT/SAE.

Figura 25 - Distribuição de materiais avaliados entre os artigos revisados.



Fonte: autoria própria.

Tabela 3 - Discretização das classes de materiais testados.

Tipo de material avaliado	Artigos relacionados
Aço de baixa liga	(Y. Bayhan, 2006); (Kučera, Ján Pršan e Pavol Kostoláni, 2014); (Radoslav Majdan et al., 2016); (Kang, Grewal e Cheema, 2017); (Novikov et al., 2018); (Singh, 2018); (Kostencki, Stawicki e Królicka, 2021); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Rani et al., 2022); (Vrublevskyi et al., 2022); (Chen et al., 2022); (Su et al., 2023); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023).
Aço ao Boro	(Bhakat et al., 2004); (Singh e Saxena, 2008); (A. Yazici, 2011); (Singh e Mondal, 2012); (Sukumaran et al., 2019); (Triani et al., 2020); (Romek et al., 2020); (Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit.,

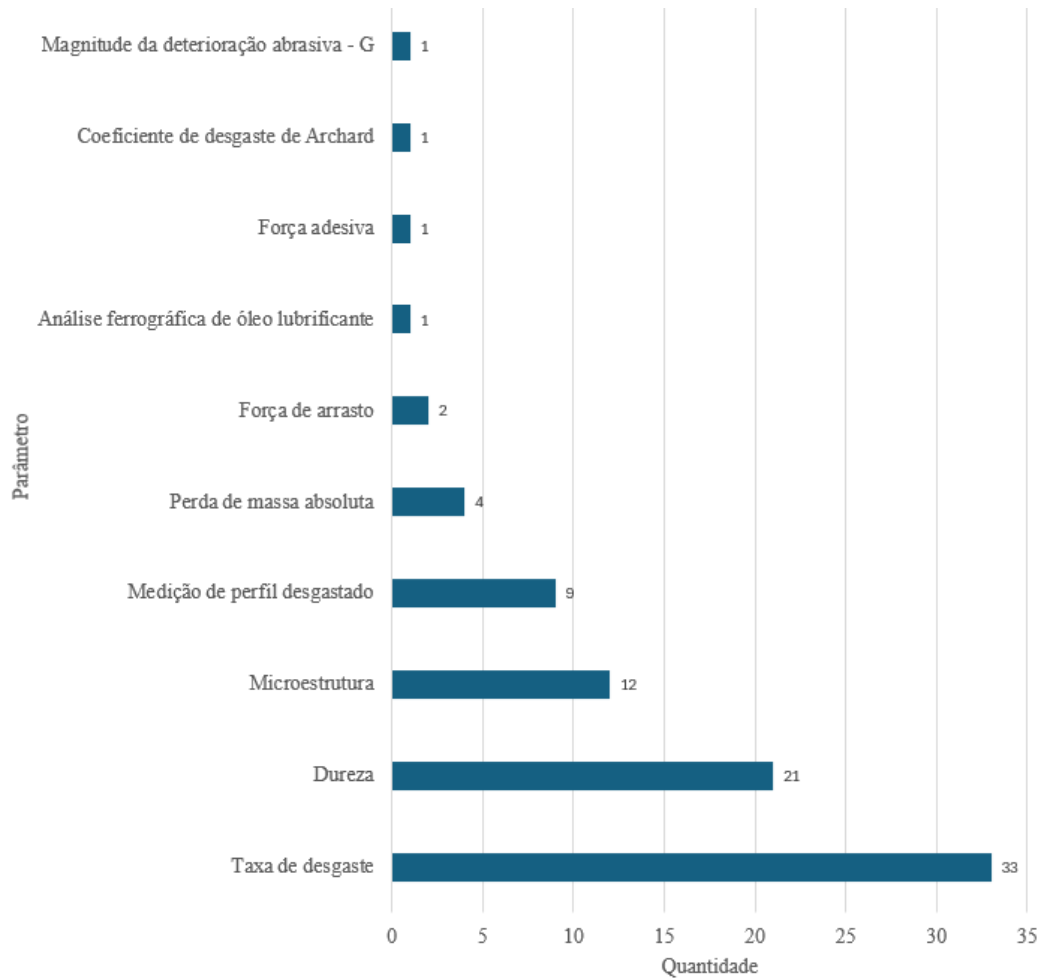
	2021); (Vrublevskiy et al., 2022); (Akuwueke; Ukachi Etoamaihe, 2024).
Aço de baixo carbono	(Yu e Bhole, 1990); (Liu, 1994); (Canale e Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (Annappa e Basavarajappa, 2016); (Dobra, Farbas e Pascu, 2014); (Novikov et al., 2018); (Singh, 2018); (Alsaeed et al., 2023).
Aço de médio carbono	(Kučera, Ján Pršan e Pavol Kostoláni, 2014); (Kostencki, Stawicki e Białobrzaska, 2016); (Stawicki, Białobrzaska e Kostencki, 2017); (Singh, 2018); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023).
Aço de alto carbono	(Yu e Bhole, 1990); (Zhang e R.L. Kushwaha, 1993); (Bhakat et al., 2004); (Stawicki, Białobrzaska e Kostencki, 2017); (Novikov et al., 2018).
Compósitos	(Yu e Bhole, 1990); (Ibrahim, 2015); (R. Prithivirajan et al., 2015); (Kumar e Saha, 2022); (Adeyemi et al., 2023).
Ferro fundido	(Yu e Bhole, 1990); (Z. Pirowski et al., 2012); (Z. PIROWSKI; M. GOSCIANSKI, 2013).
Aço de alta liga	(Katsich e Polak, 2016); (Kumar e Saha, 2022).
Revestimento cerâmico	(Chen et al., 2022); (Bobzin et al., 2023).
Revestimento metálico	(R.L. Kushwaha; Chi; Roy, 1990); (Cooke, 2019).
Aço ao Cromo	(Canale e Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (Bhakat et al., 2004).
Aço Cromo -Vanádio	(Singh D., Saha K. e Pada Mondal D., 2014)
Liga de Cobre e Estanho	(Radoslav Majdan et al., 2016)

Pela Fig. 25 percebe-se que a maior parte dos estudos revisados se concentrou em ferramentas fabricadas em aços de baixa liga e aços ao boro, os mais comumente empregados

nos componentes de máquinas agrícolas revisados. Identifica-se, no entanto, oportunidades de estudo principalmente em aços de médio e alto Carbono, Ferros Fundidos e materiais compósitos.

Por fim, avaliou-se as propriedades tribológicas ponderadas nos artigos revisados, conforme Figura 26, com o detalhamento disposto na Tabela 4.

Figura 26 - Distribuição de parâmetros avaliados entre os artigos revisados.



Fonte: autoria própria.

Tabela 4 - Discretização de parâmetros avaliados.

Parâmetro avaliado	Artigos relacionados
Taxa de desgaste	(Yu e Bhole, 1990); (Yu e Bhole, 1990); (Liu, 1994); (Bhakat et al., 2004); (Y. Bayhan, 2006); (Singh e Saxena, 2008); (A. Yazici, 2011); (Al-sandoq, Yousif e Jensen,

2012); (Singh e Mondal, 2012); (Z. Pirowski et al., 2012); (Z. PIROWSKI; M. GOSCIANSKI, 2013); (Singh D., Saha K. e Pada Mondal D., 2014); (Dobra, Farbas e Pascu, 2014); (Kučera, Ján Pršan e Pavol Kostoláni, 2014); (R. Prithivirajan et al., 2015); (Ibrahim, 2015); (Annappa e Basavarajappa, 2016); (Kostencki, Stawicki e Białołbrzeska, 2016); (Kang, Grewal e Cheema, 2017); (Singh, 2018); (Stawicki, Białołbrzeska e Kostencki, 2017); (Cooke, 2019); (Sukumaran et al., 2019); (Triani et al., 2020); (H. Muhandes, A. Kalacska e G. Kalacska, 2020); (Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit., 2021); (Kostencki, Stawicki e Królicka, 2021); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Vrublevskiy et al., 2022); (Kumar e Saha, 2022); (Adeyemi et al., 2023); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023); (Akuwueke; Ukachi Etoamaihe, 2024).

Dureza

(Yu e Bhole, 1990); (Canale e Lauralice de Campos Franceschini et al., 2002); (Y. Bayhan, 2006); (Singh e Saxena, 2008); (Z. Pirowski et al., 2012); (Singh e Mondal, 2012); (Dobra, Farbas e Pascu, 2014); (Katsich e Polak, 2016); (Novikov et al., 2018); (Cooke, 2019); (Sukumaran et al., 2019); (Romek et al., 2020); (Triani et al., 2020); (Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit., 2021); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Rani et al., 2022); (Chen et al., 2022); (Vrublevskiy et al., 2022); (Bobzin et al., 2023); (Su et al., 2023); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023).

Microestrutură

(Singh e Saxena, 2008); (Singh e Mondal, 2012); (Al-sandoog, Yousif e Jensen, 2012); (Dobra, Farbas e Pascu, 2014); (Katsich e Polak, 2016); (Kang, Grewal e Cheema, 2017); (Stawicki, Białołbrzeska e Kostencki, 2017); (H. Muhandes, A. Kalacska e G. Kalacska, 2020); (Bozkurt, Fatih & Çakir, Fatih & Er e Umit., 2021); (P.M. Bazhin et al., 2022); (Vrublevskiy et al., 2022); (Su et al., 2023).

Medição de perfil desgastado	(Zhang e R.L. Kushwaha, 1993); (Z. Pirowski et al., 2012); (Stawicki, Białobrzaska e Kostencki, 2017); (Suthisripok; Semsamran, 2018); (Somporn Katekaew et al., 2018); (DRABIK et al., 2018); (Sukumaran et al., 2019); (Rani et al., 2022); (Vrublevskiyi et al., 2022).
Perda de massa absoluta	(Kostencki, Stawicki e Białobrzaska, 2016); (Radoslav Majdan et al., 2016); (Romek et al., 2020); (Rani et al., 2022).
Força de arrasto	(R.L. Kushwaha; Chi; Roy, 1990); (Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023).
Análise ferrográfica de óleo lubrificante	(Radoslav Majdan et al., 2016)
Força adesiva	(Liu, 1994)
Coefficiente de desgaste de Archard	(Laurențiu Constantin Vlăduțoiu et al., 2023)
Magnitude da deterioração abrasiva - G	(Novikov et al., 2018)

Assim, em termos de parâmetros de análise, percebeu-se que a taxa de desgaste foi o de maior ponderação nos artigos revisados, o que era esperado. Constata-se também que muitas são as formas de avaliar a taxa de desgaste, tais como em g/hec, utilizada nos testes de campo em Stawicki, Białobrzaska e Kostencki (2017) e Kostencki, Stawicki e Królicka (2021), por exemplo, e taxa de desgaste específica em $\text{mm}^3/\text{N.m}$ nos casos de Kang, Grewal e Cheema (2017) e R. Prithivirajan et al. (2015), além de mg/N como no caso de Al-sandoog, Yousif e Jensen (2012).

Nesse viés, muitos trabalhos avaliaram também a microestrutura do material após realização dos testes, especialmente quando o interesse maior estava na análise do material em si, como foram os casos de Al-sandoog, Yousif e Jensen (2012), Katsich e Polak (2016), Kang, Grewal e Cheema (2017), Vrublevskiyi et al. (2022) e Bobzin et al. (2023), por exemplo. A medição do perfil desgastado também foi bem evidente, sendo em muitos artigos avaliada somente como a topografia de desgaste, como no caso de Katsich e Polak (2016), medição da

geometria da ferramenta e até mesmo utilizado Scanner 3D para geração das superfícies volumétricas pré e pós desgaste da ferramenta, como foi o caso de Vrubevskyi et al. (2022).

8. CONCLUSÕES

Desse modo, conclui-se que a maior parte dos estudos sobre desgaste de componente de máquinas agrícolas se concentra na análise do material bruto, e não nas características geométricas das ferramentas. Além do mais, os principais métodos padronizados de análise tribológica são por testes de pino sobre disco (ASTM G99) e roda de borracha em areia seca (ASTM G65), tendo esse último apresentado uma estagnação de estudos nos últimos 6 anos. Além disso, os testes de campo têm se tornado mais comuns ao longo da última década, especialmente quando há interesse em validar aspectos geométricos e funcionais das ferramentas em termos de resistência ao desgaste. Ademais, os principais materiais estudados são os aços de baixa liga e aços ao Boro.

Portanto, constatou-se que em análises comparativas entre materiais e de caracterização mecânica os testes padronizados de laboratório tendem a oferecer resultados satisfatórios. Quando o objetivo é avaliar, no entanto, o desempenho geométrico ou funcional da ferramenta associado ao desgaste, considerando variações de cargas reais, tipo de solo e condições ambientais variadas, a validação em campo é essencial, já que considera as variáveis ambientais e operacionais que não podem ser totalmente replicadas em laboratório.

9. TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros na área de tribologia aplicada a componentes agrícolas devem incluir o desenvolvimento de novos materiais que apresentem maior resistência ao desgaste e melhor desempenho em condições severas. A pesquisa pode focar em ligas metálicas e compósitos que podem ser utilizados em ferramentas agrícolas. A inovação na composição e nas propriedades dos materiais pode resultar em soluções que atendam às demandas cada vez mais específicas do setor agrícola, contribuindo para a sustentabilidade e a redução de custos a longo prazo.

Outro ponto importante para futuras investigações é o desenvolvimento de novos revestimentos que possam ser aplicados às ferramentas agrícolas. Esses revestimentos devem ser projetados para melhorar a resistência ao desgaste, à corrosão e ao impacto, prolongando a vida útil dos componentes. A implementação de revestimentos inovadores pode resultar em uma significativa redução nos custos de manutenção e substituição de ferramentas.

Além disso, a análise de custo deve ser aprofundada, comparando diferentes materiais em termos de seu tempo de vida útil e o tempo necessário para a manutenção e troca de componentes nas máquinas. Das pesquisas avaliadas, nenhuma teve esse foco. Nesse sentido, recomenda-se considerar os custos iniciais de aquisição, mas também os custos operacionais associados à manutenção e à substituição de ferramentas desgastadas. A avaliação econômica abrangente tende a permitir que os engenheiros tomem decisões mais assertivas sobre quais materiais e tecnologias adotar, maximizando a eficiência e a rentabilidade no setor industrial.

Em conclusão, a continuidade da pesquisa em tribologia aplicada a componentes agrícolas é essencial para enfrentar os desafios do setor. O desenvolvimento de novos materiais e revestimentos, juntamente com uma análise de custo detalhada, pode levar a inovações significativas que não apenas aumentem a durabilidade e a eficiência das ferramentas, mas também contribuam para a sustentabilidade e a competitividade da agricultura moderna. Esses esforços são fundamentais para garantir que as práticas agrícolas evoluam em resposta às crescentes demandas por produtividade e eficiência.

10. REFERÊNCIAS

- A. NIKU-LARI. OVERVIEW ON THE SHOT PEENING PROCESS. Elsevier eBooks, p. 155–170, 1 jan. 1987. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-034923-7.50023-1>
- ADEYEMI, OLABISI I., KIRWAN, KERRY, TUERSLEY, IAN AND COLES, STUART R. (2024) Comparative assessment of the performance of friction materials based on different agricultural wastes. *Tribology International*, 191. 109130. DOI:10.1016/j.triboint.2023.109130 ISSN 0301-679X.
- AHMAD SHARIFI MALVAJERDI. Wear and coating of tillage tools: A review. *Heliyon*, v. 9, n. 6, p. e16669–e16669, 1 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16669>.
- AKUWUEKE, L.; UKACHI ETOAMAIHE. EXPERIMENTAL EVALUATION OF TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF BORON STEEL PLOUGHSHARE UNDER DRY SLIDING CONTACT. *Journal of Manufacturing Engineering*, v. 19, n. 1, p. 001–009, 1 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.37255/jme.v19i1pp001-009>.
- ALSAEED, T. et al. Investigation on Three-Body Abrasion Resistance of Mild Steel Soil Slurry Condition-Simulating Agricultural Condition. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2023, n. 10.1155/2023/5616909, p. e5616909, 14 ago. 2023. DOI: 10.1155/2023/5616909.
- AL-SANDOOQ, J. M.; YOUSIF, B. F.; JENSEN, T. A. TRIBOLOGICAL CONSIDERATION IN ROLLER MILL MACHINES FOR AGRICULTURE APPLICATIONS. *Surface Review and Letters*, v. 19, n. 06, p. 1250065–1250065, 25 nov. 2012. DOI: 10.1142/S0218625X12500655.
- ANNAPPA, A. R.; BASAVARAJAPPA, S. Some studies on three-body abrasive wear behaviour of hardfaced steel alloy for agricultural plough tool application. *International Journal of Abrasive Technology*, v. 7, n. 3, p. 200, 2016. DOI: 10.1504/IJAT.2016.078287
- ASABE. ASAE S414.1 FEB04. Terminology and Definitions for Agricultural Tillage Implements. Disponível em: https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/ME/tillage_implements.pdf. Acesso em: ago. 15. 2024.
- ASTM G99-17 (2017) Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- AYSEL YAZICI. Review of Wear on Tillage Tools: Constraints in Transferring of the Research Findings to the Agricultural Sector and Solution Proposals. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, v. 17, n. 2, p. 74–85, 31 ago. 2021.
- BARNES, K. K. 1971. Compacting of agricultural soils, ASAE.
- BARRON, R.F. Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance. *Cryogenics*, v. 22, n. 8, p. 409-13, ago. 1982. DOI: 10.1016/0011-2275(82)90085-6.
- BASIRU ARAMIDE et al. Improving the durability of tillage tools through surface modification—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 116, n. 1-2, p. 83–98, 24 jun. 2021. DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4

BHAKAT, A. K. et al. Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel. *Wear*, v. 257, n. 3-4, p. 338–346, ago. 2004. DOI: 10.1016/j.wear.2004.01.003.

BOBZIN, K. et al. Triboactive coatings for wear and friction reduction in chain drives. *Tribology International*, v. 185, n. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108562>, p. 108562–108562, 1 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108562>

BOZKURT, FATI H & ÇAKIR, FATI H & ER, UMIT. (2021). Investigation of the Tribological and Mechanical Properties of Boron Steels in Terms of Potential Usage in Agricultural Applications. *Journal of Polytechnic*, v. 24, n. 2, p. 431-438. 10.2339/politeknik.706532, abril 2021. DOI: 10.2339/politeknik.706532

BURWELL JT (1957/58). Survey of possible wear mechanisms, *Wear*, 1, 119–141. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(57\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(57)90005-4).

CANALE, Loralice de Campos Franceschini et al. Abrasive wear resistance of a 'FE' based hard coating containing 'CR' and 'NB'. 2002, Anais. Warrendale: SAE International, 2002. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/5923e0de-0aef-4464-8e31-bff8950afc50/PROD_001408_SYSNO_1237231.pdf. Acesso em: 29 set. 2024.

CASE IH. Field Cultivators. Disponível em: <https://www.caseih.com/en-us/unitedstates/products/tillage/field-cultivators>. Acesso em: 01 set. 2024.

CHEN, L. et al. Effect of nano-La₂O₃ doping on the tribological behavior of laser cladded WC-12Co coating on 65Mn steel under water lubrication condition. *Tribology International*, v. 169, n., p. 107428, maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107428>.

COOKE, K. Tribological Performance of Hardfaced/Thermally Sprayed Coatings for Increased Wear Resistance of Cutting Blades Used in Harvesting. *Annals of Agricultural & Crop Sciences*, v. 4, n. 1, 2 maio 2019.

DASGUPTA, R. et al. SURFACE ENGINEERING FOR IMPROVING PERFORMANCE OF MINING AND AGRICULTURAL IMPLEMENTS. *Surface Engineering*, v. 13, n. 2, p. 123–127, 1 jan. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.2.123>

DHIMAN, P. et al. Abrasive Wear in Ground Engaging Tools and Its Remedial Measures. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, v. 10, n. 8, p. 1832–1834, 31 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46524>.

DOBRA, R. M.; FARBAS, N.; PASCU, D. R. Evaluation of Abrasive Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys Deposited on Active Components of the Agricultural Components. *Advanced Materials Research*, v. 1029, n. 1, p. 188–193, set. 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1029.188.

DRABIK, J. et al. ANALYSIS OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF VEGETABLE GREASES FOR APPLICATIONS IN AGRI-FOOD INDUSTRIES. *Tribologia*, v. 282, n. 6, p. 17–22, 31 dez. 2018. DOI: 10.5604/01.3001.0012.8413.

GADANHA JUNIOR, C.D.; MOLIN, J.P.; COELHO, J. L. D. Máquinas e implementos agrícolas do Brasil. São Paulo: Núcleo Setorial de Informações em Máquinas Agrícola, Fundação de Ciências e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 449p.

GH. NASIRI-KHUZANI; H. SHARIFNASAB. Evaluation of Engine Parts Wear Using Nano Lubrication Oil in Agricultural Tractors. *Global Journal of Science Frontier Research*, [S. l.], v. 12, n. D8, p. 43–47, 2012. Disponível em: <https://journalofscience.org/index.php/GJSFR/article/view/533>. Acesso em: 20 oct. 2024.

H MUHANDES; A KALACSKA; G KALACSKA. Analyses of abrasive wear behaviour in Pin-on-Plate Tribo-System for several materials. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, v. 749, n. 1, p. 012020–012020, 1 jan. 2020. DOI: 10.3390/ICEM18-05333.

IBRAHIM, R. A. Tribological performance of polyester composites reinforced by agricultural wastes. *Tribology International*, v. 90, n. 1, p. 463–466, out. 2015. DOI: 10.3390/ma14081863.

JOST, H. P. Tribology - origin and future. *Wear*, v. 136, 1990.

KANG, A. S.; GREWAL, J. S.; CHEEMA, G. S. Effect of thermal spray coatings on wear behavior of high tensile steel applicable for tiller blades. *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 2, p. 95–103, 2017. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.001.

KATSICH, C.; POLAK, R. Effect of Substrate Heat Treatment on Wear Behavior of Fe- and Ni-Based Hardfacings. *Key Engineering Materials*, v. 674, p. 319–324, jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.674.319>

KOSTENCKI, P.; STAWICKI, T.; BIAŁOBRZESKA, B. Durability and wear geometry of subsoiler shanks provided with sintered carbide plates. *Tribology International*, v. 104, n. 104, p. 19–35, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.020>.

KOSTENCKI, P.; STAWICKI, T.; KRÓLICKA, A. Wear of the working parts of agricultural tools in the context of the mass of chemical elements introduced into soil during its cultivation. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 9, n. 2, p. 229–240, jun. 2021. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.11.001.

KUBOTA. MOULDBOARD PLOUGH MP10-MP20. Disponível em: <https://kubota.com.au/product/mouldboard-plough-mp10-mp20>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KUČERA, M.; JÁN PRŠAN; PAVOL KOSTOLÁNI. A systemic approach to testing the tribological properties of selected materials of agricultural machines. *Journal of Central European Agriculture*, v. 15, n. 1, p. 146–159, 1 jan. 2014. DOI: 10.5513/JCEA01/15.1.1426.

KUMAR, SANTOSH; SAHA, ABIR. *The Journal of Material Cycles and Waste Management*; Dordrecht, v. 24, n. 6, p. 2527-2544. 17 set. 2022. DOI:10.1007/s10163-022-01499-2.

LAURENȚIU CONSTANTIN VLĂDUȚOIU et al. Tribological Study of Chisel Knives in Sandy Soil. *Agriculture*, v. 13, n. 6, p. 1235–1235, 12 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13061235>

LIU, Z. Abrasive wear control design of a metal thermal spray coating and its application. *Tribology International*, v. 27, n. 4, p. 219–225, ago. 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0301-679X(94)90001-9).

MACHADO, A.L.T.; REIS, A.V.; FERREIRA, M.F.P.; MACHADO, R.L.T.; MACHADO, A.L.C.; BAUER, G.B. Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.11, n.2, p. 481-486, 2005.

MEC-RUL. Subsolador 140. Disponível em: <https://mec-rul.com.br/produtos/subsoiler/subsoiler-140>. Acesso em: 01 out. 2024.

NOVIKOV, A. E. et al. Composition and Tribological Properties of Hardened Cutting Blades of Tillage Machines under Abrasive Deterioration. *Journal of Friction and Wear*, v. 39, n. 2, p. 158–163, 1 mar. 2018. DOI: 10.3103/S1068366618020137.

P.M. BAZHIN et al. Features of the carbo-vibroarc surfacing in the development of multicomponent cermet wear-resistant coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 429, n. 1, p. 127952–127952, 1 jan. 2022. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127952.

R. PRITHIVIRAJAN et al. Hybrid biocomposites from agricultural residues: mechanical, water absorption and tribological behaviors. *Journal of Polymer Engineering*, v. 36, n. 7, p. 663–671, 19 dez. 2015. DOI: 10.1515/polyeng-2015-0113.

R.L. KUSHWAHA; CHI, L.; ROY, C. Investigation of agricultural tools with plasma-sprayed coatings. *Tribology International*, v. 23, n. 5, p. 297–300, 1 out. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16669>.

RADOSLAV MAJDAN et al. Analysis of the Effect of Loading Process on Tribological System Properties. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, v. 64, n. 3, p. 825–833, 1 jul. 2016. DOI: 10.11118/actaun201664030825.

RANI, A. et al. Abrasive wear behavior of EN42 steel used in agricultural discs in field conditions. *Engineering Failure Analysis*, v. 142, n. 1, p. 106789–106789, 1 dez. 2022. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106789.

ROMEK, D. et al. The Impact of Padding Weld Shape of Agricultural Machinery Tools on Their Abrasive Wear. *Tribologia*, v. 290, n. 2, p. 55–62, 30 jun. 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3740

RUGGIERO, A. et al. Tribological investigation of epoxy/seed particle composite obtained from residues of processing *Jatropha Curcas* L. fruits. *Composites Part B: Engineering*, v. 167, n. Part B 167, p. 654–667, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.041>.

SINGH D, SAHA K, PADA MONDAL D. (2014) Effect of heat-treatment under changeable applied load on wear response of agricultural grade medium carbon steel: a multiple range analysis. *Institute of Agricultural Engineerin Scientific Journal* 4:1–10.

SINGH, D. Effect of Heat Treatment on Wear Rate of Different Agricultural Grade Steels and Associated Cost Economics. *ECONOMIC AFFAIRS*, v. 63, n. 1, 25 mar. 2018. DOI: 10.30954/0424-2513.2018.00150.25.

SINGH, D.; MONDAL, D. P. Heat-treatment process and peening intensity on abrasive wear response of agricultural grade boron steel in dry sand and slurry. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, v. 82, n. 2, p. 152–7, 7 fev. 2012. DOI: 10.56093/ijas.v82i2.15291.

SINGH, D.; SAXENA, A. C. Effect of Heat-Treatment and Shot Peening on Low Stress Abrasion Wear Behaviour of Medium Carbon Steel. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, v. 45, n. 2, p. 48–53, 30 jun. 2008. DOI: 10.52151/jae2008452.1326.

SINGH, PARVINKAL & BRAR, NAVJEET. TRIBOLOGICAL ASPECTS OF AGRICULTURAL EQUIPMENTS: A REVIEW. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 2; n. 3; p. 2395-0056. Jun. 2015

SOANE, B. D. 1970. The effects of traffic and implements on soil compaction. *The Agricultural Engineering*, 25 (3):115-126

SOMPORN KATEKAEW et al. Study Wear of the Agricultural Engine by Using Yang-Na Oil. 1 nov. 2018. DOI: 10.1109/ICETAS.2018.8629224.

SR IMPLEMENTOS. Enxada Rotativa. Disponível em: <https://www.srimplementos.com/produtos/ver/5/enxada-rotativa>. Acesso em: 01 set. 2024.

STANDARD PRACTICE FOR CONDUCTING DRY SAND, RUBBER WHEEL ABRASION TESTS. American Society for Testing and Materials, ASTM G65, Philadelphia, USA, (1981).

STAWICKI, T.; BIAŁOBRZESKA, B.; KOSTENCKI, P. Tribological Properties of Plough Shares Made of Pearlitic and Martensitic Steels. *Metals*, v. 7, n. 4, p. 139, 14 abr. 2017. Doi: 10.3390/met7040139.

SU, ZIPENG; LI, JINGBIN; SHI, YAMENG; REN, SIXUE; ZHANG, ZHIYUAN; WANG, XIANFEI. Effect of process parameters on microstructure and tribological properties of Ni60A/Cr3C2 laser cladding on 60Si2Mn steel. *Surface And Coatings Technology*, [S.L.], v. 473, p. 130005, nov. 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130005>.

SUBBAYA K ET AL. Multiple response optimization of threebody abrasive wear behaviour of graphite filled carbon-epoxy composites using grey-based Taguchi approach. *J Miner Mater Charact Eng* 11(09):876–884. 2012. DOI: 0.4236/jmmce.2012.119082.

SUKUMARAN, J. et al. From single asperity to real scale in the wear of agricultural tine. *Wear*, v. 426-427, n. 1, p. 14–26, abr. 2019. DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.014.

SUTHISRIPOK, T.; SEMSAMRAN, P. The impact of biodiesel B100 on a small agricultural diesel engine. *Tribology International*, v. 128, n. 128, p. 397–409, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.042>.

SYDOW, Z. et al. Tribological Performance of Composites Reinforced with the Agricultural, Industrial and Post-Consumer Wastes: A Review. *Materials*, v. 14, n. 8, p. 1863, 9 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081863>.

TRIANI, R. M. et al. Production and Characterization of Boride and Carbide Layers on AISI 15B30 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 6, p. 3534–3541, 2 mar. 2020. DOI: 10.1007/s11665-020-04698-w.

ULUSOY, E. 1981. Bazı Toprak İşleme Alet Ve Makinelerinde İş Organının Aşınması Üzerinde Araştırmalar. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, No: 391, İzmir

VALES, S. S. Estudo da Influência do Tratamento Criogênico no Aço AISI H13. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Integridades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

VRUBLEVSKYI, O. et al. Volumetric wear characteristics as a result of the tribological interaction between the soil with working parts cultivator's and plough's. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, v. 24, n. 4, p. 707–718, 30 set. 2022. DOI: 10.17531/ein.2022.4.11.

YAZICI, A. Wear behavior of carbonitride-treated ploughshares produced from 30MnB5 steel for soil tillage applications. *Met Sci Heat Treat* 53, 248–253 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11041-011-9377-z>

Y. BAYHAN. Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology International*, v. 39, n. 6, p. 570–574, 1 jun. 2006. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.06.005.

YU, H.-J. .; BHOLE, S. D. Development of a prototype abrasive wear tester for tillage tool materials. *Tribology International*, v. 23, n. 5, p. 309–316, out. 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(90\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0301-679X(90)90004-9).

Z. PIROWSKI et al. Performance testing of cast agricultural tools operating in soil. *COMMISSION OF MOTORIZATION AND ENERGETICS IN AGRICULTURE*, v. 12, n. 2, p. 183–188, 1 jan. 2012.

Z. PIROWSKI; M. GOSCIANSKI. Casting alloys for agricultural tools operating under the harsh conditions of abrasive wear. *COMMISSION OF MOTORIZATION AND ENERGETICS IN AGRICULTURE*, v. 13, n. 1, p. 119–126, 1 jan. 2013.

ZADOROZHNYAYA, E.; LEVANOV, I.; KANDEVA, M.. Tribological Research of Biodegradable Lubricants for Friction Units of Machines and Mechanisms: current state of research. *Lecture Notes In Mechanical Engineering*, [S.L.], p. 939-947, 7 dez. 2018. Springer International Publishing. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_98.

ZHANG, J.; R.L. KUSHWAHA. Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges. *Canadian Agricultural Engineering*, v. 37, n. https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/37/37_1_41_ocr.pdf, 1 jan. 1993.

ZMITROWICZ, ALFRED. Wear patterns and laws of wear-a review. *JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS*, v. 44, n. 2, p. 219-253, 2006.