

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,**  
**METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M**

**Renan Adrian Pereira Lorenzi**

**TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES APLICADOS EM PONTEIRA DE HASTES  
SUBSOLADORAS PARA AUMENTAR DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE:  
AVALIAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CAMPO EM SOLO ARENOSO E  
COMPACTADO NO SUL DO BRASIL**

Porto Alegre

2023

**RENAN ADRIAN PEREIRA LORENZI**

**TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES APLICADOS EM PONTEIRA DE HASTES  
SUBSOLADORAS PARA AUMENTAR DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE:  
AVALIAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CAMPO EM SOLO ARENOSO E  
COMPACTADO NO SUL DO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Mariot

Porto Alegre

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Pereira Lorenzi, Renan Adrian  
TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES APLICADOS EM PONTEIRA DE  
HASTES SUBSOLADORAS PARA AUMENTAR DA RESISTÊNCIA AO  
DESGASTE: AVALIAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CAMPO EM SOLO  
ARENOSO E COMPACTADO NO SUL DO BRASIL / Renan Adrian  
Pereira Lorenzi. -- 2023.

132 f.

Orientadora: Dra. Célia de Fraga Malfatti.

Coorientador: Dr. Paulo Mariot.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Solo. 2. Desgaste. 3. Resistência. 4.  
Revestimento. I. de Fraga Malfatti, Dra. Célia,  
orient. II. Mariot, Dr. Paulo, coorient. III. Título.

Aos meus avós que cultivaram em mim a  
necessidade e a importância do saber e do conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

O sucesso deste trabalho foi o resultado da ajuda, participação e compreensão de várias pessoas que estiveram ao meu lado no decorrer de todo o período de estudo. A todas essas pessoas, quero expressar os meus profundos agradecimentos, e em especial: Ao meu namorado e companheiro Cristian Anderson Puhl pela compreensão de minhas ausências e faltas, pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos. À Professora Dr. Célia de Fraga Malfatti pela orientação, dedicação e oportunidade de compartilhar de seus conhecimentos, e de acreditar na realização deste trabalho. Ao Professor Dr. Paulo Mariot, que foi de fundamental importância pela significativa contribuição com seus conhecimentos. À STARA S/A Industria de Implementos Agrícolas por disponibilizar os ambientes, equipamentos e contribuir financeiramente para realização dos testes a campo e para os ensaios laboratoriais, além de disponibilizar materiais e horas de estudo. Aos colegas de trabalho da empresa STARA S/A Industria de Implementos Agrícolas, que acompanharam e contribuíram com este desafio, em especial Antônia Tanara de Carvalho Dolne, Cristian Elias do Nascimento, João Henrique Vieira Gatto, Leonardo Seibel Sander e Luciano Bernardi. Ao Laboratório de Metrologia e Metalografia da Escola Politécnica da Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI pela disponibilização dos ensaios metalográficos. Aos colegas Victor Velho de Castro e Matheus Bullman do Laboratório de Pesquisa Em Corrosão – LAPEC que muito contribuíram nos estudos. À UFRGS pela oportunidade de realização deste trabalho. A toda minha família e amigos pelo apoio e cumplicidade.

“Pensava que quando se sonha tão grande a realidade aprende.” – Valter Hugo Mãe

## RESUMO

Devido ao desgaste excessivo que as ponteiros das hastes sulcadoras apresentam durante poucos hectares de utilização – em torno de 7 hectares – acarretando em paradas excessivas de máquina a campo para substituição de peças e conseqüentemente um alto custo para o agricultor devido a trocas de componentes, o trabalho avaliou a resistência ao desgaste dos revestimentos comerciais – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC), revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr, revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb – com o objetivo de definir o revestimento que possibilite sanar os problemas gerados pelo desgaste excessivo. Para isso executou-se testes *in situ* na região de Bagé-RS, utilizando um escarificador agrícola de 11 hastes. As ponteiros foram alocadas na máquina variando seu posicionamento de forma a descartar a variável posição na máquina como algo a ser levado em consideração. O desgaste foi mensurado através de medições de massa e da geometria das peças antes e após a execução dos testes. Análises laboratoriais como medição de microdureza, espessura da camada do revestimento, rugosidade, microscopia óptica, e microscopia eletrônica de varredura das peças foram empregadas para caracterização do revestimento e dos micromecanismos de desgaste acarretados nas peças. Além disso, executaram-se análises físicas do solo e de penetração do solo da propriedade rural onde o teste *in situ* foram executados. Verificou-se que o solo da área testada é predominantemente arenoso e altamente compactado, fatos estes que conferem uma condição de desgaste mais severo sobre as peças. Após a execução dos testes realizados evidenciou-se que entre os revestimentos testados, o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb apresentou melhores resultados, proporcionando um aumento de 10 vezes na vida útil da peça quando comparado com a peça não revestida

Palavras-chave: haste subsoladora, solo, resistência ao desgaste, revestimentos.

## ABSTRACT

Due to the excessive wear that the furrow rod tips show during a few hectares of use – around 7 hectares – resulting in excessive machine stops in the field to replace parts and consequently a high cost for the farmer due to component changes, the work evaluated the wear resistance of commercial coatings – composite coating (40% NiCrBSi and 60% WC), Ni-Cr HVOF spray coating, coating welded with Fe-Cr-Nb wire, coating welded with Fe-Cr-Nb wire – with the aim of defining the coating that makes it possible to remedy problems caused by excessive wear. To this end, in situ tests were carried out in the Bagé-RS region, using an 11-rod agricultural scarifier. The tips were allocated to the machine, varying their positioning in order to rule out the variable position on the machine as something to be taken into consideration. Wear was measured by measuring the mass and geometry of the parts before and after carrying out the tests. Laboratory analyzes such as measuring microhardness, coating layer thickness, roughness, optical microscopy, and scanning electron microscopy of the parts were necessary to characterize the coating and the wear micromechanisms caused by the parts. In addition, physical soil and soil penetration analyzes were carried out on the rural property where the in situ test was carried out. It was found that the soil in the tested area is predominantly sandy and highly compacted, which gives the pieces a more severe wear condition. After carrying out the tests carried out, it was evident that among the coatings tested, the coating welded with Fe-Cr-Nb wire presented better results, providing a 10-fold increase in the useful life of the part when compared to the uncoated part.

Keywords: Subsoil Rod. Soil. Wear. Resistance. Coatings.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Triângulo Textural</b> .....	38
Figura 2 – Parâmetros de rugosidade .....	44
Figura 3 – Diferença de Natureza Entre os Parâmetros de Rugosidade de Mesmos Valores	45
Figura 4 - Classificação dos Modos de Desgaste .....	47
Figura 5 – Mecanismos de Desgaste Erosivo .....	49
Figura 6 – Formação de Partículas de Desgaste por Fadiga Superficial .....	50
Figura 7 - Processo de Desgaste por Adesão.....	51
Figura 8 - Transferência de Partícula Encruada e Formação de Sulcos .....	52
Figura 9 - Processo de Desgaste por Abrasão .....	53
Figura 10 - Classificação de Fases Dispersas dos Materiais Compósitos .....	56
Figura 11 – Imagens de compósitos sinterizados de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ti em diferentes composições de alumina .....	57
Figura 12 – Resumo do Processo de Aspersão Térmica .....	59
Figura 13 – Estrutura do Revestimento Aplicado por Aspersão térmica via HVOF .....	60
Figura 14 - Componentes Utilizados para Aplicação de Solda por GTAW .....	63
Figura 15 - Fluxograma de Etapas Experimentais .....	65
Figura 16 – Implemento Agrícola Utilizado Para Execução dos Testes In Situ .....	69
Figura 17 - Procedimento de Escaneamento das Amostras: a) scanner, b) fixação da amostra para ser escaneada, c) arquivo digitalizado da amostra escaneada.....	70
Figura 18 – Ponto Zero para Análise do Desgaste .....	71
Figura 19 Seção da Peça a Ser Analisada.....	71
Figura 20 – Delimitação da Área para Execução do Teste In Situ.....	73
Figura 21 – Disposição dos Pontos de Coleta das Amostras do Solo .....	74
Figura 22 – Sistema de Medição de Condutividade Elétrica do Solo .....	75
Figura 23 – Área de Teste x Área Total .....	76
Figura 24 - Imagem obtida por microscopia óptica da seção transversal do substrato da ponteira da haste do subsolador.....	77
Figura 25 - Perfil de Dureza da Amostra Sem Revestimento .....	78
Figura 26 – Procedimento de aplicação de revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) .....	79
Figura 27 - Imagem obtida por Microscopia óptica do revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC): a) em corte transversal, e b) topo.....	80
Figura 28 – Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Compósito (40% NiCrBSi e 60% WC).....	81
Figura 29 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica do Revestimento Aspersão HVOF de Ni-Cr: a) em corte transversal, e b) ampliação 600X .....	83
Figura 30 - Imagem Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura - Morfologia do Revestimento Aspersão HVOF de Ni-Cr .....	84
Figura 31 – Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Aspersão HVOF de NiCr.....	85
Figura 32 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb: a) em corte transversal, e b) ampliação 600X .....	86
Figura 33 – Imagem Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura – Morfologia do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb: A) Topo, e B) Transversal.....	88
Figura 34 - Análise DRX do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb .....	88
Figura 35- Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb	90
Figura 36 – Gráfico de Penetrometria da área de teste em 00-05 cm de profundidade.....	91
Figura 37 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 05-10cm de profundidade .....	91

Figura 38 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 10-15cm de profundidade .....	92
Figura 39 – Gráfico de Penetrometria da área de teste em 15 – 20cm de profundidade.....	92
Figura 40 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 20-25cm de profundidade. ....	93
Figura 41 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 25-30cm de profundidade. ....	93
Figura 42 - Gráfico de Textura do solo – Teor de Areia .....	94
Figura 44 - Gráfico de Textura do solo – Teor de Silte.....	95
Figura 45 - Aspecto visual após os testes a campo – amostra sem revestimento.....	96
Figura 46- Imagem Obtida Por Microscopia Óptica de Topo – amostra sem revestimento. ...	98
Figura 47 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC).....	98
Figura 48 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC).....	99
Figura 49 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC). ....	101
Figura 50 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento por aspensão HVOF de Ni-Cr .....	102
Figura 51 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento por aspensão HVOF de Ni-Cr .....	103
Figura 52 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – Revestimento por Aspensão HVOF de Ni-Cr .....	105
Figura 53 - Análise EDS – Revestimento Por Aspensão HVOF de Ni-Cr Antes dos Testes a Campo.....	106
Figura 54 - Análise EDS – Revestimento Por Aspensão HVOF de Ni-Cr Após dos Testes a Campo.....	107
Figura 55 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb .....	108
Figura 56 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb .....	109
Figura 57- Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb.....	111
Figura 58 - Gráfico de Relação Massa x Hectares. ....	113
Figura 59 - Gráfico de Relação Volume X Hectares.....	114
Figura 60 - A) Rugosidade do substrato; B) Rugosidade do revestimento; C) Volume desgastado do substrato; D) Volume desgastado do revestimento.....	117
Figura 61 - Superfícies desgastadas em diferentes áreas do revestimento após teste de campo .....	117
Figura 63 - Cálculo e determinação dos submecanismos de desgaste. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação das Amostras .....	66
Tabela 2 - Composição Química obtida por espectrofotometria do substrato da ponta da haste do subsolador.....	78
Tabela 3 - Composição química obtida por FRX do revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC).....	79
Tabela 4 - Rugosidade e Espessura de Camada das Amostras Com Revestimento Compósito (40% NiCrBSi e.....	81
Tabela 5 - Composição Química Obtida por FRX do Revestimento Aspersão HVOF de Ni-Cr .....	82
Tabela 6 - Rugosidade e espessura de camada das amostras revestimento aspersão HVOF de Ni-Cr.....	83
Tabela 7 - Composição Química Obtida por FRX do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb.....	86
Tabela 8 - Rugosidade e espessura de camada das amostras do revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb.....	87
Tabela 9 - Rugosidade e espessura de camada das amostras sem revestimento .....	97
Tabela 10 - Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% .....	100
Tabela 11- Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr .....	104
Tabela 12 - Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb.....	110
Tabela 13 - Dados referentes aos volumes e massas antes e após a realização do teste	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ra	Rugosidade Superficial Média
Rz	Rugosidade Total
HV	<i>Hardness Vickers</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
HVOF	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/ Metal Active Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
GTAH	<i>Gas Tungsten Arc Hardfacing</i>
PRMMC	<i>Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coating</i>
W	Tungstênio
C	Carbono
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Fe	Ferro
B	Boro
Si	Silício
Nb	Nióbio
WC	Carbeto de Tungstênio

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	31
1.1 Objetivo geral .....	34
1.2 Objetivos específicos .....	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	35
2.1 Mecanização Agrícola .....	35
2.2 Solo e Tipos de Partículas Minerais .....	36
2.3 Compactação do Solo .....	39
2.3.1 Resistência a Penetração do Solo .....	40
2.4 Mobilização do Solo .....	40
2.5 Utilização dos estudos tribológicos no desenvolvimento dos testes in situ	42
2.5.1 A Importância do papel da Rugosidade no comportamento de componentes mecânicos .....	44
2.5.2 Desgaste: caracterização de um dos princípios básicos da tribologia ....	46
2.5.2.1 Desgaste Erosivo .....	48
2.5.2.2 Desgaste por Fadiga .....	49
2.5.2.3 Desgaste Adesivo .....	50
2.5.2.4 Desgaste Abrasivo .....	52
2.6 Revestimentos como solução ao desgaste de peças e equipamentos .....	54
2.6.1 Revestimento Compósito com Matriz Metálica.....	55
2.6.2 Aspersão Térmica por HVOF .....	58
2.6.3 Revestimentos Soldados.....	61
3 METODOLOGIA.....	65
3.1 Materiais.....	67
3.2 Metodologia de Caracterização dos Revestimentos .....	68
3.3 Metodologia de Execução dos Testes in Situ.....	69
3.4 Metodologia de Análise Quantitativa do Desgaste .....	70
3.5 Metodologia de Análise dos Mecanismos de Desgaste .....	72
3.6 Metodologia de Análise de Solo .....	72
3.6.1 VERIS.....	74
4 RESULTADOS e DISCUSSÃO .....	77
4.1 Revestimentos obtidos .....	77

4.2 Análises de Solo.....	90
4.3 Resultados após ensaio de campo .....	96
5 CONCLUSÕES .....	121
6 TRABALHOS PUBLICADOS .....	122
7 REFERÊNCIAS .....	123

## 1 INTRODUÇÃO

Tendo um papel fundamental no desenvolvimento econômico brasileiro, o setor agrícola teve um crescimento de 8,36% no ano de 2021 segundo dados do IBGE. Segundo Agra e Santos (2001), esta crescente se deve muito a mecanização agrícola brasileira intensificada a partir de 1970. Esta mesma mecanização da agricultura que é responsável pela crescente deste setor na economia brasileira, trouxe consigo máquinas cada vez maiores e mais pesadas, fato este que de acordo com Furini (2018) acarreta sérios problemas de compactação de solo reduzindo seu desempenho produtivo. Machado *et al.* (2005) relata que para que o desempenho produtivo das culturas agrícolas não seja afetado pela compactação do solo, faz-se necessário intervir neste através de técnicas mecânicas de preparação do solo tais como a subsolagem e a escarificação.

Ambas as técnicas mencionadas anteriormente fazem uso de ferramentas de corte de solo, as quais acabam tendo uma vida útil de baixo alcance devido as avarias que o solo impõe sobre estas ferramentas. Kalacska (2008) relata que as partículas minerais do solo podem causar desgastes e danos severos nas ferramentas em trabalho. Estudos feitos pela National Research Council of Canada em 1986 estimaram que o custo total originado pelo desgaste em ferramentas de corte solo no setor agrícola seja de \$940 milhões por ano.

Kalacska *et al.* (2019) elucida que além do custo da própria ferramenta desgastada severamente durante a operação, o desgaste desta resulta em um aumento de consumo de combustível e energia, além de diminuir a qualidade do trabalho executado. A qualidade do trabalho desempenhado pelas ferramentas de corte de solo, como a ponteira da haste sulcadora por exemplo, depende de vários fatores tais como velocidade de operação, condições do solo, da adesão solo-metal, e das características das próprias peças. Neste sentido, Santo (2005) ressalta que a ponteira sulcadora que se constitui no principal elemento de mobilização do solo por ser responsável pela formação do sulco neste, tem seu desempenho vinculado a função abrasiva do solo ao material de constituição da ponteira sulcadora.

Desta maneira fica evidente que o desgaste de ferramentas de preparo do solo, tal como a ponteira sulcadora, acarreta problemas tanto operacionais onde há uma redução na qualidade do trabalho realizado quanto em um aumento de custo gerado pela troca destas peças. A vida útil destas ferramentas pode ser aumentada ao selecionar um material adequado para as solicitações de trabalho destas peças. A tarefa de escolher o material correto para certos

equipamentos ou estruturas é bastante árdua, devido à grande variedade de materiais disponíveis.

Conforme mencionado anteriormente, devido as condições de uso da peça o presente trabalho buscou pesquisar um material que atendesse essas especificações e que gerasse um baixo custo de manutenção da ferramenta. Fernandes *et al.* (2018) em seus estudos aponta que os metais duros são materiais que possuem notáveis propriedades mecânicas e a ampla gama de aplicações, sendo o carboneto de tungstênio (WC) a classe de metais duros mais utilizadas. Segundo Vilhena *et al.* (2022) os compósitos a base de carboneto de tungstênio (WC) possuem altas propriedades mecânicas e se destacam principalmente pela excelente resistência ao desgaste.

Devido as boas propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste mencionados anteriormente, o presente trabalho utilizou como objeto de estudo a parteira da haste subsoladora com três tipos diferentes de revestimentos comerciais resistentes ao desgaste. Jonda *et al.* (2022) relata que um dos muitos métodos que permitem uma combinação benéfica das propriedades do substrato da peça com a resistência ao desgaste abrasivo e uma maior dureza é a deposição de um revestimento. A utilização de um revestimento também se justifica devido ao custo elevado de desenvolvimento de um novo componente com uma nova matéria prima além de todos os possíveis problemas gerados pela não intercambialidade entre os componentes.

Nesta senda, o presente trabalho avaliou a resistência ao desgaste de três revestimentos comerciais – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC), revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb, revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb – aplicados em ponteiros de hastes subsoladoras através de testes *in situ*. Conforme mencionado, o objeto de estudo escolhido deveu-se ao desgaste excessivo que as ponteiros de hastes sulcadoras apresentam durante poucas horas de utilização em determinadas regiões – em torno de 7 hectares – acarretando paradas excessivas de máquina a campo para substituição e conseqüentemente um alto custo gerado pela parada de máquina e pelas trocas de componentes. Através de teste *in situ* realizados na região sul do Brasil, na cidade de Bagé – RS, foi possível mensurar o desgaste nas peças. A localidade foi escolhida através do apontamento da região onde havia maior solicitação de troca destes componentes em campo. Os testes laboratoriais como microscopia óptica e eletrônica, rugosidade, dureza, espessura de camada foram executados em uma parceria feita entre os laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da Universidade do Vale do Itajaí.

Para realização dos testes, cada revestimento foi aplicado em 3 ponteiros subsoladoras, sendo comparado a perda de massa e modificação da geometria das peças entre estes e com outras 3 ponteiros subsoladoras não revestidas. Para isso foi realizado um teste in situ, onde foram realizadas análises físicas do solo e de compactação da área onde os testes foram executados. De forma garantir um mapeamento da área e gerar um gráfico de gradiente de migração de compactação e de estrutura física do solo, foi utilizado o equipamento VERIS para executar a leitura do terreno e realizar o agrupamento das regiões. As avaliações referentes aos desgastes foram realizadas através de análises das superfícies das amostras com auxílio de técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, rugosidade, dureza e da quantificação da perda de massa e volume das amostras através da utilização de uma balança de precisão e de um escâner tridimensional.

Tem-se como objetivo geral deste trabalho aumentar a resistência ao desgaste das ponteiros das hastes sulcadoras e conseqüentemente a vida útil destas através da aplicação dos revestimentos testados, evidenciando o revestimento que apresentar melhor resultado. Além disso o trabalho se propôs a analisar o solo da área testada a fim de identificar influência deste sobre o desgaste das peças; quantificar o desgaste de ponteiros de hastes sulcadoras, analisando sua perda de massa e modificação de sua geometria em função da área trabalhada, no sentido de estabelecer-se a vida útil da ferramenta na condição do solo testado; avaliar o custo-benefício da utilização do revestimento testado.

## **1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é aumentar a resistência ao desgaste das ponteiros das hastes sulcadoras e conseqüentemente a vida útil destas através da aplicação dos revestimentos testados, evidenciando o revestimento que apresentar melhor resultado.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar o tipo de solo da área de teste na região de Bagé (RS);
- Caracterizar os três revestimentos aplicados na ponteira da haste subsoladora;
- Quantificar o desgaste das amostras através da perda de massa e de volume;
- Analisar qual o revestimento, dentre os testados, apresentou maior eficiência no solo da área testada;
- Aprofundar as análises sobre os mecanismos de desgastes do revestimento que apresentou maior eficiência;
- Apresentar o custo benefício do revestimento que obteve o melhor resultado

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao objeto de estudo ser um componente de maquinário agrícola e estar em contato com o solo, com o objetivo de auxiliar na concepção do trabalho fez-se necessário discorrer sobre mecanização agrícola, solo e tipos de partículas minerais e, desta maneira, formar as bases da compreensão dos estudos das influências que o solo possui no desgaste. Para a elaboração do presente trabalho investigou-se sobre desgaste com o intuito de compreender suas implicações, funcionamento e como pode ser minimizada a ação deste através de mecanismos de proteção. E, por fim, mas não menos importante, fez-se necessário discorrer sobre os revestimentos protetores aplicados, já que o presente estudo fez uso destes para mitigar os problemas enfrentados com o desgaste excessivo.

### 2.1 Mecanização Agrícola

Upadhyaya *et al.* (2009) relata que há cerca de 3000 anos os habitantes do vale do Nilo e do Eu-Phrates usavam arados simples em forma de cunha para o preparo do solo, e que a China já utilizava arados de ferro há mais de 2000 anos atrás. Segundo os autores o primeiro arado de ferro fundido foi patenteado em 1785 por Robert Ransome na Inglaterra, sendo o de aço desenvolvido por John Deere em 1830.

Lanças (2002), relata que o interesse no projeto de equipamentos para romper as camadas compactadas do subsolo, principalmente através da ação de máquinas de preparo de solo como enxada rotativa e grade, teve início em meados de 1950 nos Estados Unidos da América. Até 1960 as máquinas agrícolas no Brasil eram totalmente importadas (VEGRO; FERREIRA; CARVALO, 1997). De acordo com Sobral (2010), a necessidade de mecanizar a agricultura era existente, mas somente foi possível desenvolver essa indústria a partir de meados de 1970. Silva, 2019 relata que no decorrer das necessidades adquiridas através das mudanças dos sistemas de produção, outras máquinas e implementos foram sendo inseridos ou aperfeiçoados.

Freitas (2014) menciona que na cidade em 1982 durante a FIMA 82, na Espanha, a empresa Howard Rotavator apresentou o Paraplow 1000, um descompactador de solo com inclinação lateral na haste, afim de descompactar as camadas de solo mais adensadas. O Paraplow 1000 difere-se dos subsoladores e escarificadores existentes no mercado agrícola por possuir uma haste de pequena espessura.

Segundo Furini (2018) a subsoloagem desenvolvida para resolver especificamente o problema de compactação de camadas de solo mais adensadas, o escarificador, implemento semelhante ao subsolador, passou a ser utilizado pelos agricultores. Ambos os implementos, o escarificador e o subsolador, possuem o mesmo princípio de rompimento do solo através da propagação de trincas. Lanças (2002) ressalta que desta maneira o solo não é cortado como na aragem ou gradagem, e sim rompido em suas linhas de fratura naturais ou através da interface de seus agregados.

Em 2009, o escarificador FOX foi lançado, resultante de pesquisas realizadas pela empresa Stara S/A e o projeto *Aquarius*. As pesquisas concluíram que um dos fatores limitantes de produtividade é a compactação do solo, pois esta dificulta a absorção da água da chuva e de nutrientes, impactando negativamente a germinação e desenvolvimento radicular das plantas. Segundo Stara S/a (2018) buscou-se desenvolver um implemento que descompactasse o solo e, ao mesmo tempo preservasse a maior quantidade de palhada possível na superfície.

Sendo destaque no cenário econômico mundial, o setor agropecuário brasileiro possui como peça chave de crescimento a modernização do agronegócio. As indústrias de máquinas e implementos agrícolas brasileiras vem investindo em tecnologias para atender a demanda dos produtores rurais e as peculiaridades de cada região do país. Silva e Winck (2019), relatam que há uma relação entre a expansão da área plantada e o número de máquinas agrícolas. O índice de mecanização mostra que houve um aumento do número de tratores por hectares de área cultivada de lavoura. Para Da Silva *et al.* (2015), o processo de mecanização agrícola foi essencial para que esse avanço da agropecuária ocorresse, já que com ela foi possível uma melhor utilização dos insumos, além da própria qualidade dos implementos.

## **2.2 Solo e Tipos de Partículas Mineraiis**

A Embrapa (2009) defini tecnicamente, o solo, como sendo uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosa, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos. Andreoli (2019) relata que o solo é formado a partir da decomposição das rochas, por meio de um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos.

As características de formação do solo permitem separá-lo em camadas, as quais Silva (2014) denomina como horizontes, os quais dependendo de seu processo de formação apresentam constituições diversas, tendo tonalidades e texturas variáveis. Andreoli (2019)

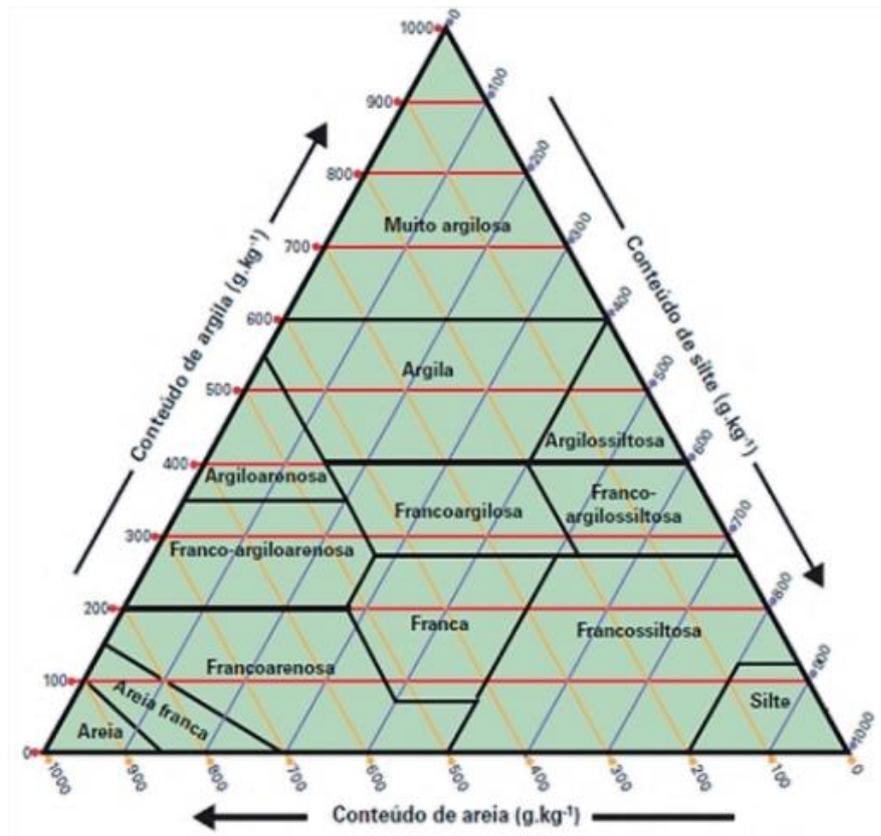
relata os horizontes podem geralmente ser separados em dois: o horizonte A, está na superfície, suscetível as intempéries, e com maior quantidade de material orgânico; o horizonte B, mais profundo e com maior quantidade de partículas minerais.

Moreira *et al.* (2013) menciona que as partículas minerais são aquelas que vieram da decomposição das rochas durante o processo de formação dos solos. Pode-se obter 3 tipos de partículas minerais, as quais são separadas pelo tamanho: a areia, o silte e a argila. Silva (2014), afirma que a areia ou sílica é a partícula de maior tamanho – 2,0 a 0,05 mm – sendo mais familiar pelo fato de conseguirmos vê-la na massa do solo sem ajuda de microscópio. Pelinson *et al.* (2021) relata que as partículas de sílica são ásperas ao tato em uma amostra de solo e não apresentam alto índice de adesão e, portanto, não conferem pegajosidade ao solo.

O silte, segundo Silva (2014), tem seu tamanho variando de 0,05 a 0,002 mm, sendo impossível vê-lo sem ajuda de microscópio ou senti-lo individualmente. Pelinson *et al.* (2021) relata que a presença de silte no solo confere maciez a este, porém não pegajosidade quando o solo está úmido. O último tipo de partícula mineral a ser classificado é a argila, sendo considerado como a menor classe de partículas minerais que, segundo Silva (2014), possui um tamanho menor que 0,002 mm. De acordo com Pelinson *et al.* (2021), é essa a classe de tamanho de partícula mineral capaz de se aderir e formarem uma massa pegajosa quando molhadas, com presença de torrões quando secas.

Silva (2014) relata que a quantidade de cada um desses constituintes minerais no solo, chamamos de textura do solo. Pelinson *et al.* (2021), relata que uma forma de avaliar o que as quantidades de areia, silte e argila representam em um solo é estimar sua proporção a partir de um diagrama triangular, conforme figura 1 abaixo.

Figura 1 - Triângulo Textural



Fonte: IBGE (apud Pelinson et al., 2021)

Comforme relata Moreira *et al.* (2013) as partículas mencionadas anteriormente não estão individualizadas no solo e sim agrupadas formando o que chamamos agregados do solo ou torrões. Rabot *et al.* afirma que a perspectiva dos agregados está mais relacionada à estabilidade mecânica da estrutura do solo do que à própria estrutura ou arranjo (apud PELINSON, 2021). Silva *et al.* (2003) menciona que as forças de coesão e adesão influem em propriedades como dureza ou tenacidade, friabilidade, plasticidade e pegajosidade, podendo indicar a tendência do solo em aderir a outros corpos como, por exemplo, as máquinas e equipamentos agrícolas. Santo (2005) menciona que a dinâmica do solo procura correlacionar aspectos na interface máquina-solo, ou seja, utilizar as ferramentas da mecânica do solo em conjunto com parâmetros de projeto de máquinas agrícolas, com o objetivo de prever a maneira como ocorrerá a inter-relação destes.

### 2.3 Compactação do Solo

Richart *et al.* (2005) relata que desde o início da mecanização agrícola brasileira a compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas tem sido uma preocupação, sendo um dos fatores que mais influencia a sustentabilidade dos solos agrícolas, devido as modificações ocasionadas em propriedades físicas do solo. A compactação resultante do tráfego de máquinas é induzida pelo teor de água no solo, o teor de matéria orgânica, o tipo do solo, o peso total da máquina, juntamente com a intensidade que ocorre o trânsito no solo.

Girardello (2013) explica que o aumento do peso e do tamanho dos tratores se deu-se para manter a relação entre peso e potência adequado para suprir a tração de implementos agrícolas cada vez maiores, como por exemplo, semeadoras e carretas graneleiras. Girardello (2014), cita que a transferência do peso das máquinas para o solo causará uma modificação na sua estrutura física, influenciará o fluxo de gases e afetará a presença de água, causando uma alteração na absorção de nutrientes, restringindo o desenvolvimento do sistema radicular da cultura e diminuindo a produtividade, especialmente em regiões com déficit hídrico.

Além dos problemas gerados pela utilização de maquinários cada vez maiores e mais pesados, as novas técnicas de cultivo agrícola também acabam contribuindo para o adensamento do solo. Lanças (2002), relata que no plantio convencional, a camada do solo era rompida pelos implementos de preparo do solo - como arados, grades e enxadas rotativas – transferindo a compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial.

Com o plantio direto ou em pastagens, como não há o revolvimento do solo, a compactação do solo fica mais restrita a sua superfície (Richart *et al.*, 2005). Segundo Navarini (2010), a compactação subsuperficial do solo já existia desde a época em que eram realizadas mobilizações intensas por diversos implementos como arados e grades, porém este problema foi agravado com a adoção do plantio direto em função do não revolvimento do solo.

Segundo Furini (2018) as modificações agronômicas que ocorrem em solos compactados são influenciadas por alguns fatores tais como: o aumento da resistência mecânica à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor, e disponibilidade de nutrientes. Para Camargo e Alleoni (2006), quaisquer um desses fatores pode restringir o desenvolvimento das plantas, a depender do tipo do solo, da condição climática, da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta.

De acordo com Furini (2018), quando a compactação for impeditiva para o crescimento das raízes, há a necessidade de romper essas camadas através da utilização de escarificadores ou subsoladores.

### **2.3.1 Resistência a Penetração do Solo**

De acordo com Raper (2005), devido a facilidade de operação, o método mais utilizado para verificar a profundidade da camada compactada do solo é o índice de cone. Este termo é definido como a força necessária para inserir um cone padrão no solo, sendo que quando os valores do índice de cone se aproximam de 1,5 – 2,0 Mpa o crescimento das raízes torna-se limitado e as plantas podem sofrer os efeitos negativos da compactação do solo. Klein (2014) relata que no caso do penetrômetro, a avaliação da resistência do solo à penetração é realizada pelo índice de cone (IC), definido como sendo a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica, sendo expressa como a força por unidade de área da base do cone.

Para Macedo *et al.* (2016), o penetrômetro não mede a compactação do solo diretamente, e sim a resistência à penetração ao qual o solo em questão submete qualquer corpo que queira perfurá-lo. Furini (2018) sintetiza que o funcionamento do penetrômetro consiste de sua haste perfurando o solo a uma velocidade constante, de maneira que a resistência que o solo induz a esta penetração em diferentes profundidades é registrada em forma de pressão no visor do aparelho. Desta maneira, Macedo *et al.* (2016) elucida que o penetrômetro mede indiretamente a compactação porque não possui um valor de resistência a penetração associado a compactação. Klein *et al.* (1998), relata que a resistência à penetração é altamente influenciada pela condição de umidade do solo. Portanto é importante que determinação da resistência à penetração do solo seja realizada juntamente com a determinação ou controle da umidade do solo. Em densidade de solo baixo, o efeito da umidade é pequeno, quando a densidade do solo aumenta pequenas variações da umidade acarretam um grande incremento na resistência (KLEIN, 2014).

### **2.4 Mobilização do Solo**

De acordo com Montana (2013), várias operações agrícolas realizadas no campo apresentam algum tipo de atividade mecanizada com o intuito de buscar melhores resultados da eficiência operacional e retorno econômico ao produtor rural. Para Denardin *et al.* (2014) dentre as mudanças ocorridas no manejo de sistemas agrícolas produtivos, a mais impactante

no quesito de conservação do solo foi o crescente abandono das práticas de intensa mobilização, como aragens e gradagens, pela adoção do plantio direto.

Para Bottega *et al.* (2011), deve-se dar atenção às características físicas do solo, tais como porosidade, agregação, resistência à penetração e densidade, sendo que as condições físicas em que o solo se encontra durante a fase de implantação e desenvolvimento de uma determinada cultura. Desta maneira Furini (2018) enfatiza que para criação de condições estruturais favoráveis ao crescimento da planta, busca-se alterar a condição física do solo através de seu manejo.

Para Santos *et al.* (2011) os implementos de hastes aparecem como uma boa opção dentro do manejo conservacionista, sendo que eles têm como vantagem mobilizar o solo sem revolvê-lo, conseguindo romper camadas compactadas do solo e atingir profundidades de trabalho maiores. De acordo com Gamero (2008), a partir da necessidade de descompactação do solo, os agricultores utilizam a mobilização do solo através de escarificadores e subsoladores visando corrigir essa limitação.

De acordo com Furini (2018), a mobilização do solo com o uso de escarificadores é feito principalmente para o preparo de solo no sistema plantio direto, ou seja, descompactar camadas de solo rasas mantendo considerável porcentagem da cobertura vegetal. Silva *et al.* (2014) concluí que a escarificação é a prática pela qual se rompe camadas adensadas e/ou compactadas formadas no interior do solo causada pelo tráfego intenso de máquinas, pisoteio animal e operações de preparo do solo com uso de aradas e grades, atuando em menor profundidade (até 30 cm). Para Lanças (2002), os subsoladores diferem dos escarificadores por trabalharem em profundidades maiores que 40 cm e possuírem menor número de hastes por trabalharem em profundidades maiores, necessitando desta maneira de maior potência de trabalho.

Ambas as técnicas de mobilização de solo fazem uso de ferramentas de corte de solo, as quais acabam tendo uma vida útil de baixo alcance devido as avarias que o solo impõe sobre estas ferramentas. Kalacska (2008) relata que as partículas minerais do solo podem causar desgastes e danos severos nas ferramentas em trabalho. Estudos feitos pela National Research Council of Canada em 1986 estimaram que o custo total originado pelo desgaste em ferramentas de corte solo no setor agrícola seja de \$940 milhões por ano.

Kalacska *et al.* (2019) elucida que além do custo da própria ferramenta desgastada severamente durante a operação, o desgaste desta resulta em um aumento de consumo de

combustível e energia, além de diminuir a qualidade do trabalho executado. Neste sentido, Santo (2005) ressalta que a ponteira sulcadora que se constitui no principal elemento de mobilização do solo por ser responsável pela formação do sulco neste, tem seu desempenho vinculado a função abrasiva do solo ao material de constituição da ponteira sulcadora.

Desta maneira fica evidente que o desgaste de ferramentas de preparo do solo, tal como a ponteira sulcadora, acarretam em problemas tanto operacionais onde há uma redução na qualidade do trabalho realizado quanto em um aumento de custo gerado pela troca destas peças.

## **2.5 Utilização dos estudos tribológicos no desenvolvimento dos testes in situ**

Silva (2017), define a tribologia como a ciência e a tecnologia que concentra os seus estudos no desgaste, no atrito, lubrificação e como minimizar o impacto provocado pelos efeitos do desgaste e atrito em uma determinada superfície. Segundo Castro (2014) e Afonso (2012), a tribologia está embasada na mecânica, física, química e ciência dos materiais, já que são diversos os mecanismos que envolvem o desgaste e o modo como cada superfície é desgastada, podendo vários mecanismos atuar simultaneamente.

O estudo e conhecimento a respeito da área tribológica é de suma importância, já que o mal dimensionamento ou análise de um sistema tribológico pode causar prejuízos econômicos significativos. Bhushan (2013), relata que somente nos Estados Unidos, estas perdas giraram em torno de 4% do seu produto interno bruto e aproximadamente, 1/3 dos recursos energéticos do mundo aparecem relacionados de alguma forma com a questão do atrito. Todos os campos da tecnologia podem ser beneficiados pelas pesquisas na área tribológica, já que estratégias de minimização de perdas provocadas pelo desgaste e atrito são apontadas por esta. Accadrolli (2020), afirma que uma maior eficiência e melhor desempenho de mecanismos que envolvam contato entre superfícies, conseqüentemente refletem em diminuição de avarias e economia de recursos.

Para Paz (2016), o estudo dos fenômenos relacionados a tribologia é complexo, de modo que normalmente, pode abranger diversas áreas para melhor compreensão dos fenômenos tribológicos entre elas estão:

- Ciência dos materiais: Micromecanismos atômicos que atuam no desgaste e atrito entre superfícies.
- Mecânica dos sólidos: Ênfase das tensões e temperaturas de contato. Utiliza modelos matemáticos para descrever atrito e desgaste em componentes.

- Química: Foco na reatividade entre superfícies sólidas e lubrificantes.
- Mecânica dos fluidos: Estuda os fenômenos envolvidos no comportamento de lubrificantes líquidos entre superfícies.

Desta maneira, Menezes *et al.* (2013) e Souza (2017) relatam que vários fatores afetam no comportamento tribológico de um sistema, desde o material dos corpos em contato, a rugosidade e tipo de acabamento dado a cada superfície, a lubrificação, meio em que o sistema tribológico se encontra, carga aplicada no sistema, velocidade de deslizamento entre os corpos, etc. Neste sentido Mielczarski (2015) relata que o entendimento do atrito e fenômenos de desgaste se torna imprescindível.

Santos (2006) e Franceschini (2014) definem atrito como “a resistência ao movimento que existe quando dois corpos sólidos, em contato, deslizam tangencialmente um em relação à superfície do outro, ou quando uma tentativa é realizada para produzir tal movimento”.

A força de atrito ( $F_{at}$ ), ou força resistiva ao movimento, é uma força tangencial e atua sobre os corpos em contato. A força de atrito pode ser classificada ainda como: força de atrito estático e força de atrito dinâmico. No primeiro caso, chama-se de força de atrito estático ( $F_s$ ), quando a força de atrito exercida na interface de contato é exatamente igual e oposta à força uma força tangencial  $F$  inferior a um determinado valor limite que não provoque deslizamento. No segundo caso, chama-se de força de atrito dinâmico ( $F_k$ ) a força de atrito que atua sobre a interface de contato durante o deslizamento quando a força tangencial  $F$  for suficientemente para causar o deslizamento do corpo em sua direção. Outro ponto importante a ser observado é que sendo o coeficiente de atrito estático geralmente maior que o dinâmico, a força necessária para iniciar o deslocamento é maior do que a força para que este seja mantido.

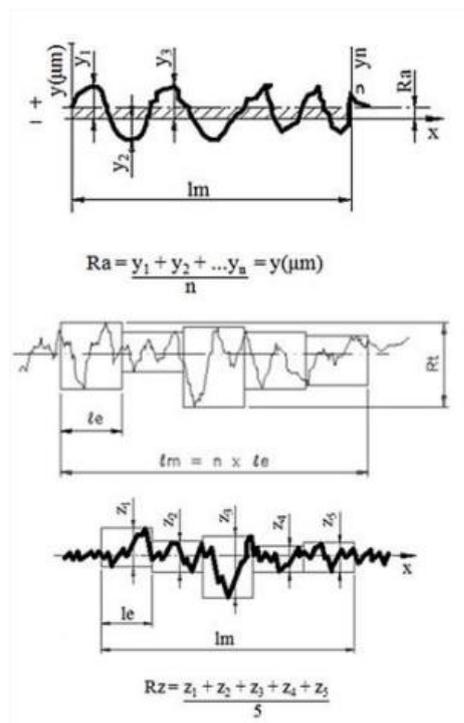
Suh e Sin (1981), mostraram que as propriedades mecânicas afetam o desempenho em fricção de forma mais significativa que as propriedades químicas, ao contrário de como se acreditava anteriormente. Segundo Czichos (1992), o efeito do atrito pode ser dividido em três mecanismos básicos, um devido à rugosidade, um devido à adesão e outro devido à penetração da partícula de material mais duro em um de menor dureza. Desta maneira, Mielczarski (2015), ressalta a importância de um maior esclarecimento a respeito da rugosidade superficial, como será abordado posteriormente.

### 2.5.1 A Importância do papel da Rugosidade no comportamento de componentes mecânicos

Para Silva (2017), a rugosidade desempenha um importante papel no comportamento de componentes mecânicos, onde a capacidade de deslizamento, resistência ao desgaste, fadiga e o atrito das superfícies, é afetada diretamente pela qualidade das superfícies. O tipo de topografia e o grau de rugosidade do revestimento são fatores importantes referentes a interpretação de resultados relativos à qualidade e a estabilidade dimensional.

Outro ponto de importância referente a rugosidade é o estudo da morfologia da superfície realizada a partir da análise perfilométrica. Peltz (2013) esta é uma técnica padrão para avaliar a medida de rugosidade da superfície analisando diretamente os picos e os valores sobre a superfície. Mielczarski (2015) menciona que o procedimento de análise é realizado a partir do contato entre uma ponteira que tem deslocamento vertical em resposta as características da superfície da amostra. O perfil de rugosidade superficial do material é determinado pela digitalização do sinal elétrico amplificado. A partir desses perfis, uma série de parâmetros estatísticos pode ser calculada. Norton (2013) relata que a ISO define pelo menos 19 desses parâmetros. Alguns deles são mostrados na figura 2.

Figura 2 – Parâmetros de rugosidade

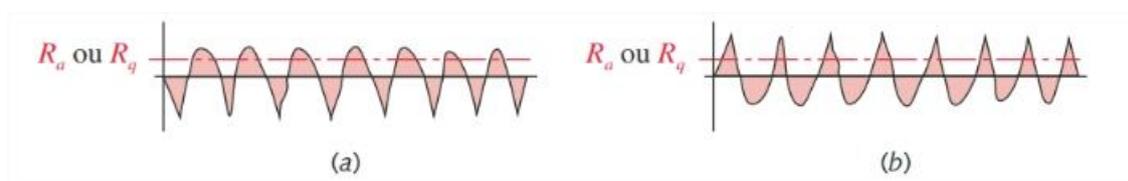


Fonte: AGOSTINHO *et al.* (1995)

Segundo Souza (2017), a rugosidade de uma superfície é caracterizada através da Rugosidade Superficial Média ( $R_a$ ), que é a média aritmética dos desvios de uma linha média, medidos dentro de um deslocamento. Mielczarski (2015) menciona que somente o parâmetro  $R_a$  não é capaz de descrever totalmente uma superfície. Desta maneira, Menezes *et al.* e Bhushan (2013) citam que rugosidade também pode ser caracterizada através da medição da rugosidade total (ten point height) ( $R_z$ ) que é uma média entre os 5 maiores picos e os 5 vales mais profundos, impedindo desta maneira interferência no resultado gerada por alguns riscos e irregularidades. Outro parâmetro relevante é  $R_t$ , o qual corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002) (AGOSTINHO *et al.*, 1995).

Os parâmetros mais utilizados são  $R_a$ , que é a média dos valores absolutos medidos em cada ponto, ou  $R_q$ , que é o desvio médio quadrático. Esses dois parâmetros são muito parecidos em valor e significado. Norton (2013) relata que infelizmente, muitos engenheiros especificam somente o parâmetro  $R_a$  ou  $R_q$ , parâmetros estes que são muito parecidos em valor e significado. As figuras 3a e b possuem os mesmos valores de  $R_a$  e  $R_q$ , mas com naturezas claramente diferentes, uma possuindo propriedades predominantemente favoráveis, e outra, predominantemente desfavoráveis. Essas duas superfícies irão reagir de maneira bastante diferente ao deslizar ou rolar contra uma outra superfície (NORTON, 2013).

Figura 3 – Diferença de Natureza Entre os Parâmetros de Rugosidade de Mesmos Valores



Fonte: Norton, 2013.

Para isso, Norton (2013) indica o cálculo da assimetria do perfil  $Sk$ , que é uma estimativa da média da primeira derivada do contorno da superfície. Se  $Sk$  apresentar valor negativo indica que a superfície tem uma predominância de vales (Figura 3a), e em caso de  $Sk$  for positivo define uma predominância de picos (Figura 3b).

As principais dificuldades de se relacionar o efeito da rugosidade com o desgaste de dois corpos em contato por deslizamento devem-se ao fato que o acabamento superficial inicial

é alterado durante o período de running-in, e as particularidades de cada tribossistema podem resultar em desgastes distintos para corpos com a mesma topografia inicial. Zum Gahr (1987) exemplifica, para um caso de deslizamento entre corpos planos ou cilíndricos de bronze ou ferro fundido, que o desgaste reduz quatro vezes quando a rugosidade média reduz de  $11\mu\text{m}$  para  $2\mu\text{m}$ . Em contrapartida, para um caso de deslizamento a seco entre corpos de aço, nenhuma influência no desgaste foi observada para rugosidade variando entre  $0,1\mu\text{m}$  e  $1,8\mu\text{m}$  (ZUM GAHR, 1987). O resultado do primeiro estudo pode ser explicado com a mudança do mecanismo de desgaste passando de micro corte para micro sulcamento, enquanto o segundo estudo indica que para rugosidades muito baixas o desgaste é praticamente por deslizamento com uma ligeira tendência à adesão. Logo, o efeito da rugosidade no desgaste pode variar em função do tribossistema.

A figura apresenta uma possível relação entre rugosidade e intensidade de desgaste proposta por Zum Gahr (1987) para corpos metálicos submetidos ao deslizamento. No contato não lubrificado, o desgaste devido à abrasão é reduzido à medida que a rugosidade diminui.

### **2.5.2 Desgaste: caracterização de um dos princípios básicos da tribologia**

Sendo um dos princípios básicos da tribologia, o desgaste pode ser caracterizado como perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido causado pela alteração ou remoção do material devido à ação mecânica, podendo esta ação ser em relação ao contato e movimento relativo de um sólido, líquido ou gás contra uma superfície. Em suma, Souza (2016) define desgaste como as modificações da forma original de um corpo por ação do tempo ou frequência de contato com outro corpo. Em seus estudos sobre o desgaste, Mielczarski (2015) relata que Leonardo da Vinci descobriu que o desgaste aumenta com a carga aplicada à superfície sendo a direção de desgaste não necessariamente na direção vertical, seguindo a direção do vetor principal da carga.

Zum Gahr (1987) afirma que toda análise de desgaste deve ser iniciada pela definição do tribossistema. Souza (2016) cita que usualmente um sistema tribológico é constituído de quatro elementos: ambiente, corpo sólido, elemento interfacial, contra corpo, podendo este último ser um sólido, um líquido, um gás, ou uma mistura destes. Já os lubrificantes e poeira nos estados sólidos, líquidos, gasosos ou uma combinação entres estes, atuam como elemento interfacial. Em casos especiais, o elemento interfacial pode estar ausente. Outro ponto de relevância quanto aos tribossistemas segundo Mielczarski (2015), é que estes podem ser função das condições iniciais ou de entrada do sistema. Dependendo das entradas, como vibrações,

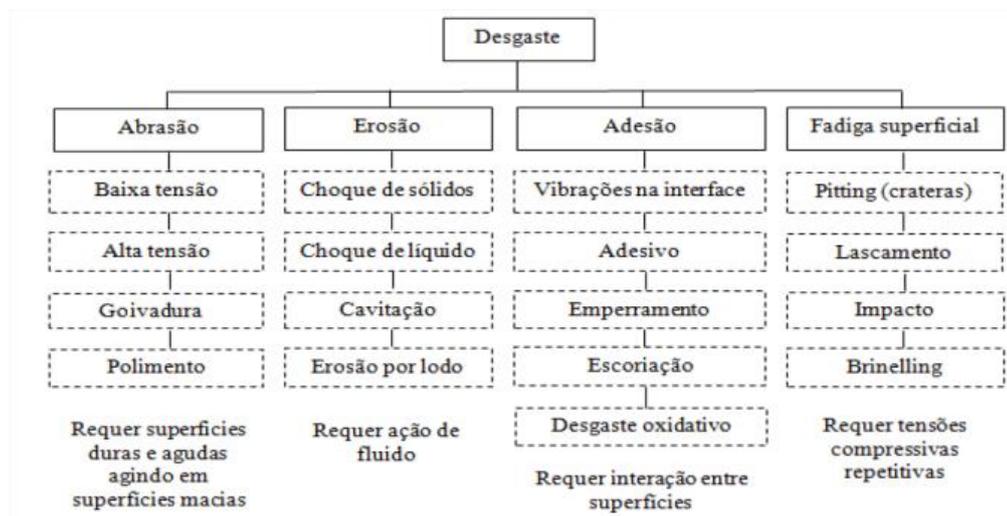
tipo de material, aquecimento e atmosfera, podem-se ter fragmentos de desgaste, aquecimento, vibração e ruído.

O desgaste de uma superfície pode ocorrer de formas diferentes, de acordo com a forma de interação entre os elementos do tribossistema. A complexidade deste varia com comportamento do material e as alterações de superfície na interface durante o deslizamento de duas superfícies. Desta maneira, faz-se necessário conhecer os diferentes tipos de desgastes que uma superfície pode vir a sofrer, de acordo com as interações do tribossistema.

Segundo Souza (2016), o desgaste pode ser dividido em diversos tipos, variando sua classificação entre os autores. Hutchings (1992) classifica o processo em desgaste por deslizamento e desgaste por partículas duras. Zum Gahr (1987) por sua vez classificou o processo em desgaste por deslizamento, desgaste por rolamento, desgaste por movimento oscilatório, desgaste por impacto, e desgaste por erosão.

Segundo Both (2011) são aceitos quatro principais mecanismos de desgaste, seguindo uma classificação bastante utilizada na literatura, sendo eles: Desgaste por Fadiga, Desgaste Erosivo, Desgaste Adesivo, e Desgaste Abrasivo. Menezes (2013) relata que em muitos casos, o desgaste é iniciado por um mecanismo e pode proceder por outros mecanismos de desgastes. Desta maneira vale ressaltar que além da importância em classificar os mecanismos de desgaste, é importante salientar que, em contatos tribológicos reais, diferentes mecanismos de desgaste atuam simultaneamente, sendo um fator de dificuldade significativa na determinação de qual mecanismo está ocorrendo o processo. A figura 4 mostra uma das classificações aceitas para os tipos de desgaste, segundo Budinski (ASM,2001).

Figura 4 - Classificação dos Modos de Desgaste



Fonte: Adaptado ASM (2001).

Apresenta-se a seguir os quatro principais mecanismos de desgaste aceitos, seguindo uma das classificações mais utilizada na literatura.

### **2.5.2.1 Desgaste Erosivo**

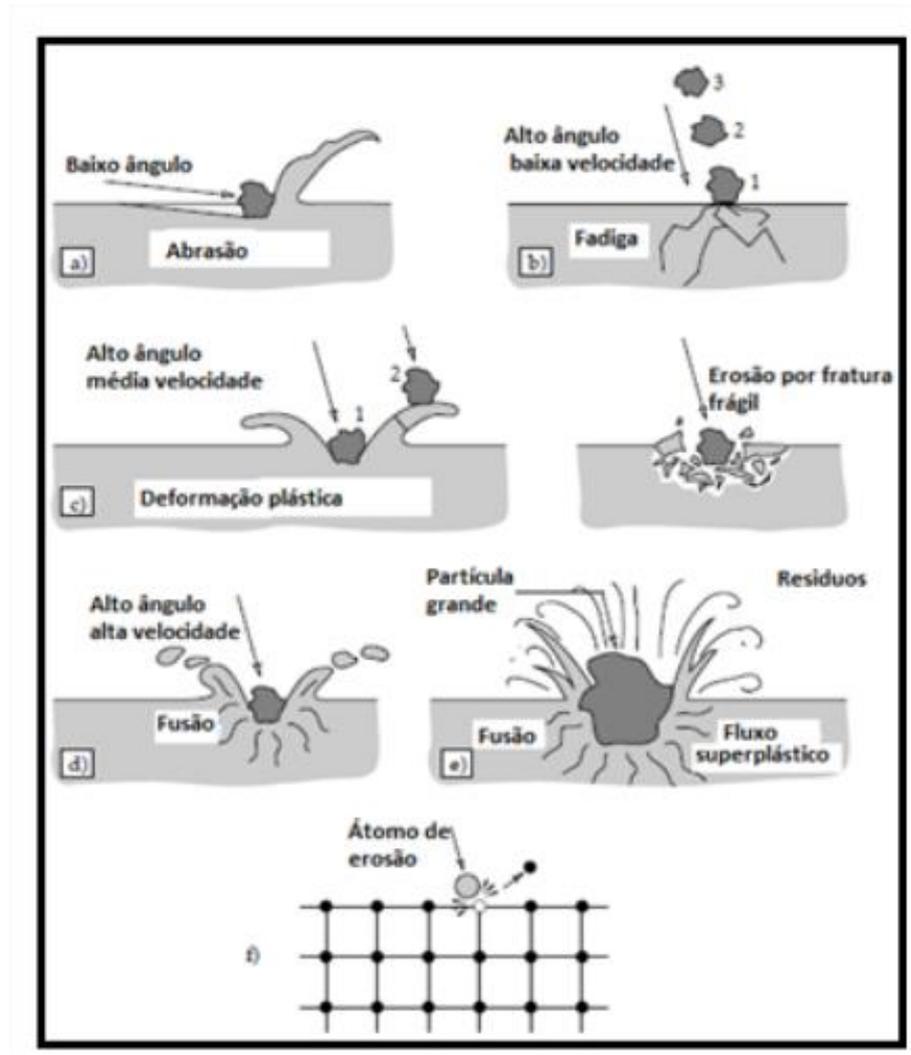
Mielczarski (2015) define desgaste erosivo como a perda de material ou modificação superficial causada pelo impacto de partículas sólidas ou de líquidos contra esta superfície. Segundo Souza (2011), o desgaste erosivo envolve vários mecanismos de desgaste que são controlados pelo material da partícula, do ângulo de impacto, da velocidade de impacto, o tamanho e forma da partícula, etc. Mielczarski (2015) relata que a resistência mecânica não garante resistência ao desgaste, em comum com as outras formas de desgaste, e estudos detalhados das características dos materiais são necessários para evitar ou reduzir o desgaste.

Souza (2011) afirma que o termo desgaste erosivo se refere a um número não específico de mecanismos de desgaste que ocorre quando partículas relativamente pequenas colidem contra superfícies. Os mecanismos conhecidos de desgaste erosivo são:

- Abrasão a baixo ângulo de impacto;
- Fadiga da superfície a baixa velocidade e alto ângulo de impacto;
- Fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo de impacto;
- Fusão da superfície causada por altas velocidades de impacto; Erosão macroscópica com efeitos secundários;
- Degradação da aresta do cristal causada pelo impacto de átomos.

A figura 5 ilustra os mecanismos de desgaste por erosão mencionados anteriormente.

Figura 5 – Mecanismos de Desgaste Erosivo



Fonte: Souza, 2011.

### 2.5.2.2 Desgaste por Fadiga

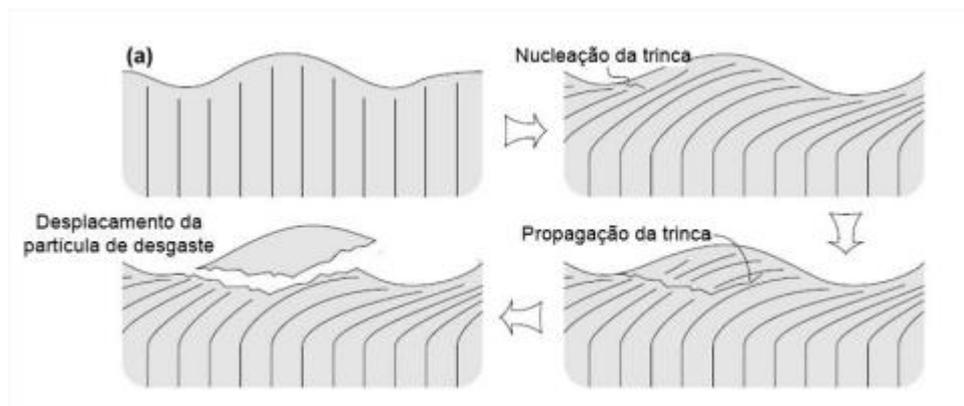
Radi (2007) afirma que se denomina desgaste por fadiga o mecanismo de desgaste que ocorre em um material sujeito a esforços cíclicos na superfície do sólido a um nível de tensões abaixo do limite de escoamento do material. Estes carregamentos podem ser resultantes de rolamento, escorregamento de contato ou impacto de sólidos ou líquidos na superfície. Manhobosco (2009) relatar que este mecanismo de desgaste é caracterizado pela formação de trincas, lascamento de material e formação de fragmentos.

Souza (2016) afirma que o desgaste por fadiga superficial se caracteriza pela formação de trincas e deslocamento de material causado por repetidos carregamentos cíclicos na superfície sólida de contato. O contato por rolamento ou escorregamento de sólidos, ou impacto

de sólidos em contato, com ou sem a presença de lubrificantes, geram tensões cíclicas na superfície, podendo levar a fadiga localizada em escala microscópica (ZUM GAHR, 1987).

Souza (2016) relata que em análises de seções transversais das superfícies desgastadas geralmente revelam intensa deformação plástica, por cisalhamento, do material imediatamente abaixo da superfície. Os níveis de deformação plástica dependem da ductilidade do material e das condições impostas durante o deslizamento. Com o progresso da deformação plástica, as discordâncias se acumulam e geram regiões de alta energia (DIETER, 1988). Tais regiões são propensas a nucleação de trincas abaixo da superfície que se propagam até a superfície, gerando o deslocamento de uma partícula de desgaste (STACHOWIAK, 2013). A figura 6 ilustra o processo de formação de partículas de desgaste.

Figura 6 – Formação de Partículas de Desgaste por Fadiga Superficial



Fonte: Souza, 2016.

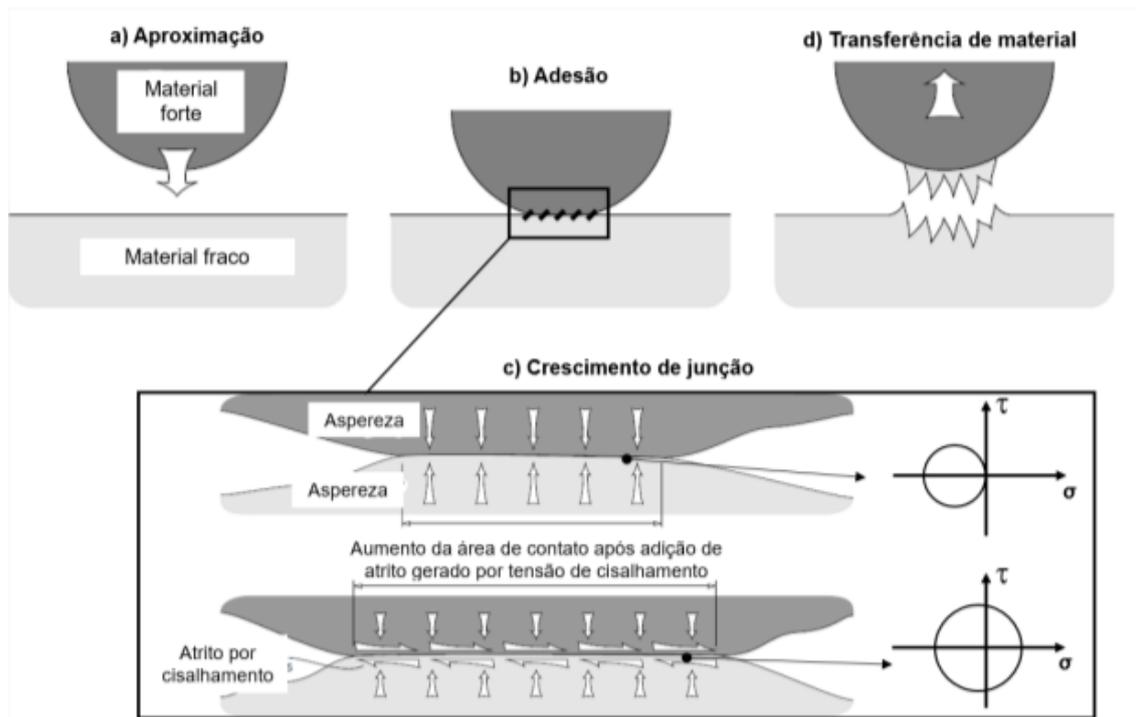
### 2.5.2.3 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo é definido como a transferência de material de uma superfície para outra sob carga e movimento relativo causada pela forte ligação no estado sólido. A fratura deste ponto de união faz com que partículas de uma superfície fiquem aderidas na outra de maneira temporária ou permanente (ASM International, 2001, citado em BOTH, 2011).

As asperezas e irregularidades que constituem as superfícies dos materiais ao serem postas em contato, podem desenvolver tensões muito elevadas nessas regiões, devido a concentração destas tensões em alguns pontos, podendo ocasionar deformações elásticas ou plásticas causando a união do material. Segundo Souza (2016), com o aumento da carga normal e subsequente movimento relativo, as áreas reais de contato entre as superfícies formam junções adesivas. O tamanho dessas junções aumenta à medida que uma força tangencial é introduzida

no sistema, o que altera o estado de tensões de uniaxial compressivo para biaxial com compressão e tração. Eventualmente, ocorre o cisalhamento das junções no material mais fraco, o que leva à uma transferência de material de uma superfície para a outra (MIELCZARSKI, 2015). A figura 7 abaixo exemplifica o processo de transferência de material e o aumento das junções entre os materiais.

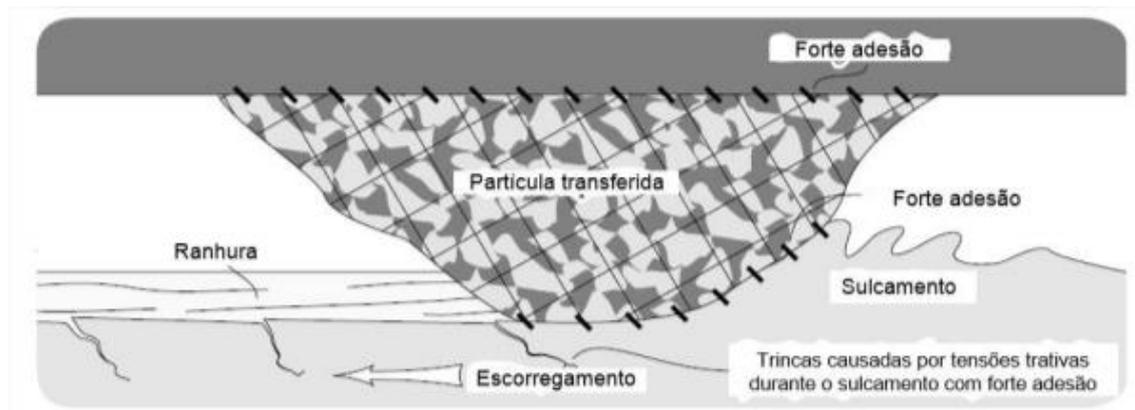
Figura 7 - Processo de Desgaste por Adesão



Fonte: Souza, 2016.

Sobre essas partículas de transferência, Mielczarski (2015) ressalta que estas são geralmente mais duras do que o material de substrato devido ao encruamento, sendo capazes de produzir sulcamentos na superfície, frequentemente observada quando ocorre o desgaste adesivo. Souza (2016) ressalta que apesar do sulcamento ser um mecanismo de desgaste menos severo do que o micro corte, ele pode levar a nucleação de trincas no sentido perpendicular ao deslizamento na superfície desgastada devido à altas tensões trativas geradas pelo atrito entre a partícula transferida e o substrato de menor dureza. A figura 8 abaixo demonstra a partícula transferida encruada gerando as ranhuras ou sulcamentos na superfície de menor dureza, e a nucleação de trincas.

Figura 8 - Transferência de Partícula Encruada e Formação de Sulcos



Fonte: Mielczarski, 2015.

Both (2011) relata que o material pode se desprender como uma partícula livre ou de terceiro corpo, evoluindo para um desgaste abrasivo, o que torna a aplicação do termo desgaste adesivo em alguns casos é limitada. Neste caso, torna-se mais apropriado o termo desgaste metal-metal.

#### 2.5.2.4 Desgaste Abrasivo

O mecanismo de desgaste abrasivo é provocado pela interação mecânica de partículas abrasivas ou protuberâncias duras que são forçadas contra uma superfície em deslizamento. De modo geral, no desgaste abrasivo, um material com maior dureza provoca a remoção progressiva de material da superfície de outro com menor dureza. A dureza, a rugosidade, a presença de abrasivos na superfície, a pressão exercida e a velocidade de contato, são fatores que influenciam na taxa com que superfícies em contato sofrem abrasão.

As partículas presas entre as duas superfícies deslizantes têm efeito de riscos e ranhuras sobre elas. Como suportam parte da carga aplicada, tentam penetrar nas superfícies causando pontos concentradores de tensão, podendo no caso de revestimento causar a nucleação de trincas (BOTH,2011). Mielczarski (2015) em sua pesquisa cita que na maioria dos casos, há diferentes mecanismos de desgaste abrasivo atuando e todos eles possuem características bem diferentes. Para Both (2011) as duas formas de desgaste abrasivo são: Desgaste abrasivo a dois corpos, e Desgaste abrasivo a três corpos.

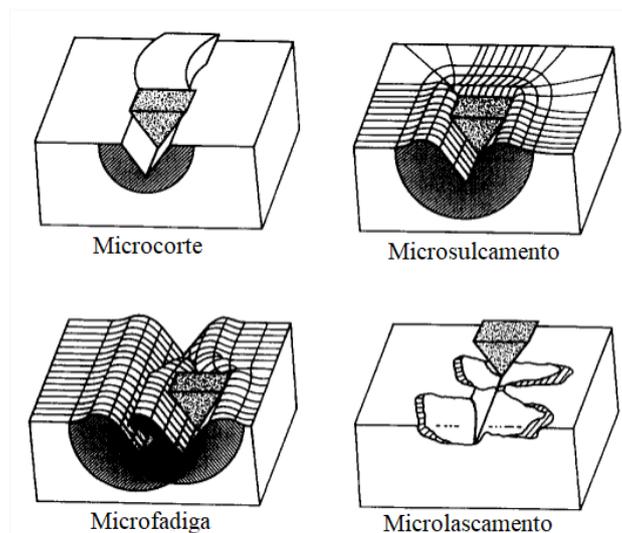
Segundo Souza (2016), a abrasão a dois corpos acontece quando uma superfície rugosa ou partículas abrasivas fixas deslizam através de uma superfície removendo material. A remoção acontece pela ação do deslizamento unidirecional de partículas discretas de um outro material sem haver movimento das superfícies entre si. Estas superfícies mantêm uma

orientação constante entre si durante o período de contato (MELO, 2008). Já superfície gasta pelo desgaste abrasivo a três corpos exibe uma topografia aleatória, sugerindo a remoção gradual da superfície pelo contato sucessivo dos grãos, se diferenciando do desgaste abrasivo a dois corpos, no qual o desgaste do material é feito por uma série de riscos. Ainda sobre o desgaste abrasivo a três corpos, este pode ser classificado em desgaste abrasivo ocorre por deslizamento quando o abrasivo risca continuamente o corpo, ou por rolamento quando a cinemática da partícula abrasiva é essencialmente rolamento (GATES, 1998 e TREZONA, 1999).

Originalmente, o desgaste abrasivo foi pensado como sendo apenas cortes na superfície causados por partículas duras. No entanto, de acordo com a pesquisa de Mulhearn (1962), citado por Melo (2008), as análises microscópicas revelaram que outros mecanismos estão envolvidos no processo. As partículas duras podem remover material da superfície por micro corte, micro sulcamento, microfatura, deslocamento ou fadiga por repetidas deformações plásticas, conforme ilustrado (SOUZA,2016).

Referente aos micros mecanismos de desgaste abrasivo, segundo Souza (2011) o micro corte pode ser considerado um modelo clássico de desgaste, em que à forma da aspereza, corta a superfície macia, ocorrendo em forma de cavacos. Conforme se observa na figura 9 o material que é cortado é removido como resíduos de desgaste

Figura 9 - Processo de Desgaste por Abrasão



Fonte: Mielczarski, 2015.

Já o micro sulcamento se caracteriza quando a perda de material ocorre devido a deformação do material ecoado sob a partícula (SILVA,2017). Yu e Bhole (1990) relatam que para os casos em que um material esteja sujeito a esforços cíclicos na superfície do sólido a um nível de tensões abaixo do limite de escoamento do material, ocorrerá desgaste por micro fadiga, sendo caracterizado pela formação de trincas, lascamento de material e formação de fragmentos. Outro micro mecanismo de desgaste abrasivo que ocorre é o micro lascamento, Mielczarski (2015) relata que neste caso as partículas abrasivas impõem altas concentrações de tensões dos materiais, e fragmentos de desgaste são destacados da superfície devido à formação e propagação das trincas.

## **2.6 Revestimentos como solução ao desgaste de peças e equipamentos**

Os materiais de aço são amplamente utilizados devido as suas boas propriedades de processamento e propriedades mecânicas abrangentes. Os elementos de máquinas e equipamentos operados em condições adversas como em meios abrasivos, erosivos ou corrosivos estão expostos a danos. Jijie Yang *et al.* (2023) afirma que a falha prematura de peças e equipamentos ocasionada por estas condições adversas resultam em um grande número de perdas econômicas. Além disso, Moreira *et al.* (2022) exemplifica a situação em que a substituição da liga da matéria prima de elementos de máquina e equipamentos por outras ligas de aços de melhor desempenho frente ao desgaste, em muitos casos elevam significativamente os custos destas peças.

Soma-se a estes fatos o que Jijie Yang *et al.* (2023) menciona em seus estudos, que os tipos de avarias em peças e equipamentos como o desgaste, a oxidação e a corrosão dos materiais são principalmente determinadas por suas propriedades superficiais, e não por suas propriedades gerais. De acordo com Jonda *et al.* (2021), este desempenho das propriedades superficiais do material pode ser melhorado e ainda haver o custo efetivamente reduzido através da aplicação de tecnologias de modificações de superfícies quando comparado com a troca de liga, além de melhorar a vida útil do componente. Jijie Yang *et al.* (2023) acrescenta a este argumento o fato de que se pode preparar camadas de modificação de superfície de alto desempenho em várias peças de formato complexo, a composição é controlável.

Há várias metodologias e maneiras diferentes de se modificar a superfície de componentes e equipamentos para que o desempenho das propriedades superficiais do material possa ser melhorado. Um dos numerosos métodos que permitem uma combinação dos benefícios propriedades do núcleo com resistência ao desgaste abrasivo, resistência ao calor e aumento dureza é a deposição do revestimento. Uma das mais frequentes tecnologias aplicadas

de deposição de revestimento protetor é a aspersão térmica. Segundo Jonda *et al.* (2021), este processo produz revestimentos metálicos, de metal duro, cerâmicos e compósitos de qualquer tipo químico e de fase composição sobre uma base adequadamente preparada. Moreira *et al.* (2022) complementa dizendo que alternativamente, um tratamento térmico superficial, um revestimento térmico por aspersão, ou uma abordagem menos tradicional com um reforço de compósito com matriz metálica (MMC) pode ser aplicados para melhorar suas propriedades de superfície.

Em relação as técnicas de deposição de material, Davis (1993) afirma que estas promovem características quanto ao mecanismo de união entre o metal de base e o revestimento, nos casos de aspersão térmica a aderência é mecânica, nos processos a arco elétrico e laser ocorre a fusão dos materiais proporcionando uma ligação metalúrgica entre o revestimento e o metal de base. Nos capítulos seguintes serão abordados três tipos diferentes de revestimentos utilizados para aumentar a resistência ao desgaste de superfícies de peças e equipamentos, sendo eles: Revestimento Compósito por Matriz Metálica, Aspersão Térmica por HVOF e Revestimentos Soldados.

### **2.6.1 Revestimento Compósito com Matriz Metálica**

Como mencionado no capítulo anterior, as aplicações para aços são muitas, devido ao baixo custo, propriedades mecânicas e soldabilidade. No entanto, em alguns casos, os componentes fabricados em aço com baixo teor de carbono, apresentam baixa resistência ao desgaste e, portanto, necessitam ser substituído. Alternativamente, para sanar ou diminuir as avarias causadas pelo desgaste, pode ser aplicado revestimentos compósitos com matriz metálica para melhorar suas propriedades superficiais. De acordo com Jun Liu (2016), esta é uma maneira eficaz de melhorar o desempenho da resistência ao desgaste, aplicando um revestimento resistente ao desgaste na superfície de materiais internos mais macios e resistentes. Moreira (2022) afirma que o desenvolvimento de reforços com compósitos de matriz metálica (CMM ou MMC — metal-matrix composite), é altamente eficiente e requer investimento de baixo custo, além disso, pode ser aplicado em componentes com qualquer geometria ou dimensão.

Assim como os demais materiais compósitos, os compósitos de matriz metálica são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, chamada com frequência de fase dispersa. De acordo com Callister (2020) a fase dispersa, ou reforço, pode apresentar quatro divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras, os compósitos estruturais e os

nanocompósitos. A figura 10 abaixo apresenta os tipos de fase dispersa que podem ser utilizadas em materiais compósitos.

Figura 10 - Classificação de Fases Dispersas dos Materiais Compósitos



Fonte: Callister, 2020.

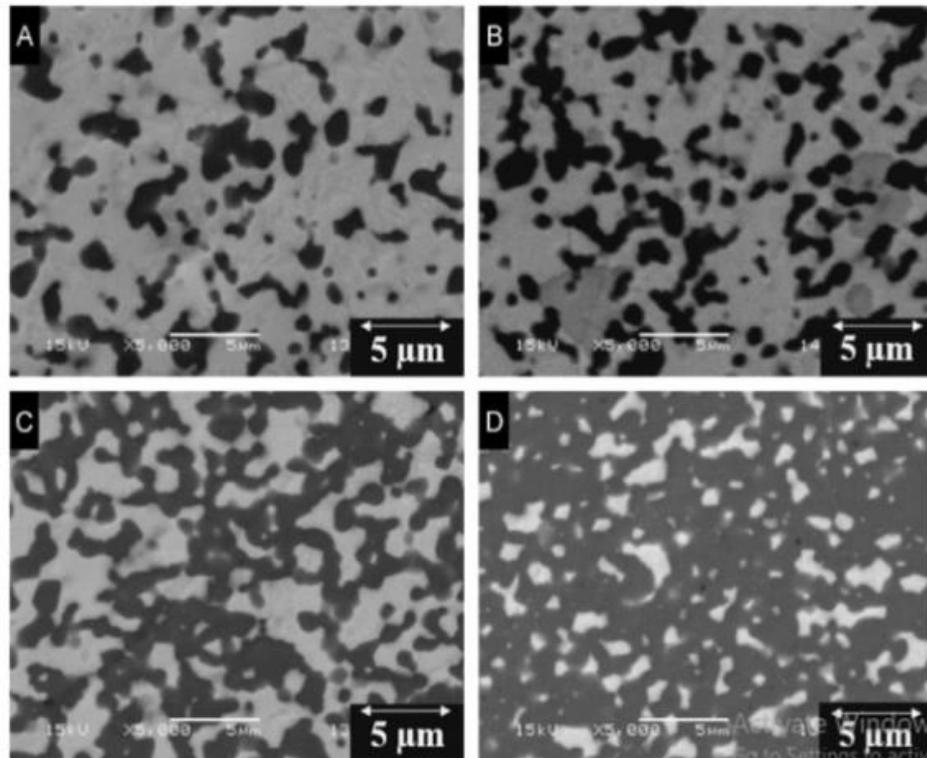
Callister (2020) distingue as fases dispersas, onde os compósitos reforçados com partículas, onde estas apresentam-se equiaxialmente, isto é, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções; nos compósitos reforçados com fibras, o material reforço apresenta a geometria de uma fibra, isto é, um comprimento superior ao diâmetro. Quanto aos compósitos estruturais, estes possuem múltiplas camadas e são projetados para apresentar baixas massas específicas e altos graus de integridade estrutural. Em relação aos nano compósitos, as dimensões das partículas do material reforço são da ordem de nanômetros. Segundo Jun Liu (2016), os revestimentos compósitos de matriz metálica reforçados com partículas (PRMMCs), podem melhorar significativamente as propriedades tribológicas dos componentes, empregando uma liga metálica como matriz e as partículas cerâmicas como reforços.

Callister (2020) explica que nos compósitos com matriz metálica, a matriz é um metal dúctil e a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração da carga. O grau de reforço ou de melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula. Jun Liu (2016) elucida a importância da ligação forte na interface matriz-partícula, pois se a partícula reforçada não apresentar boa compatibilidade com a matriz metálica, muitas vezes leva a trincas e alguns outros defeitos na

interface da matriz metálica e dos reforços, e até mesmo resulta na segregação de partículas e da matriz metálica.

A figura 11 abaixo apresenta a microestrutura de compósitos sinterizados de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  como exemplo de uma microestrutura de um material compósito de matriz metálica. Segundo S.Meier (2015), mesmo variando os percentuais de concentração de alumina no compósito, não houve interações visíveis entres o Ti e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e muito menos a formação de novas fases.

Figura 11 – Imagens de compósitos sinterizados de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  em diferentes composições de alumina



Fonte: S. Meier, 2015.

Callister (2020), demonstra que para os compósitos reforçados por dispersão - partículas com diâmetros entre 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$  - as interações partícula-matriz que levam ao aumento da resistência ocorrem no nível atômico ou molecular, sendo o mecanismo do aumento da resistência semelhante àquele do endurecimento por precipitação. Desta forma, a maior parte de uma carga aplicada recaia sobre a matriz, tendo as pequenas partículas de reforço dispersas a função de impedir e dificultar o movimento das discordâncias.

D. Joslin Vijaya e D.S. Robinson Smart (2023) em seus experimentos para encontrar a resistência a corrosão e desgastes e dureza, avaliaram o material de matriz metálica Al7075 e

do compósito de reforço de nanopartículas NbC/Ti variando os percentuais de NbC e Ti para verificar a efetividade na resistência ao desgaste, corrosão e dureza. Após os experimentos os autores verificaram que a amostra com 79% Al7075, 15% NbC e 6% Ti, apresentou os melhores resultados tanto para resistência a corrosão quanto para o desgaste, além de obter uma dureza superior aos demais. Silva (2022) também investigou a resistência ao desgaste de revestimentos compósitos ao fazer a caracterização de Ni-5Al-5Mo/TiC produzido por meio de laser cladding, onde o revestimento compósito Ni-5Al-5Mo + 20% TiC aumentou a resistência ao desgaste da liga de níquel em 36%. Além disso o revestimento analisado por Silva (2022) demonstrou ter uma dureza e resistência ao desgaste superiores quando comparadas a do substrato.

Quanto ao processo de fabricação de revestimentos compósitos de matriz metálica reforçados com partículas, Jun Liu (2016) frequentemente são utilizadas partículas de carboneto e óxido como reforço que são dispersas homoganeamente na liga da matriz metálica. Segundo Leech (2012), quanto aos carbonetos utilizados como reforço, o carboneto de tungstênio (WC) é amplamente selecionado para aplicações de resistência ao desgaste. Segundo Jun Liu (2016), o WC é uma espécie de carboneto de metal de transição, que possui baixo coeficiente de expansão térmica, certa plasticidade e pode reter sua dureza à temperatura ambiente de até 1400 °C sem qualquer mudança de fase. Para Jun Liu (2016), a introdução de partículas de WC tem um efeito positivo no desempenho final da resistência ao desgaste, que está relacionado com o tamanho e conteúdo das partículas de WC no revestimento compósito.

### **2.6.2 Aspersão Térmica por HVOF**

Caracteriza-se a aspersão térmica como um grupo de processos utilizado para aplicar revestimentos metálicos ou não metálicos (ASM INTERNATIONAL, 2004), através dos quais partículas – fundidas, semifundidas ou sólidas – são depositadas em um substrato (CANARIM, 2013). As partículas aquecidas são então aceleradas e projetadas em direção a um substrato preparado, sendo carregadas tanto por meio de gases do processo como jatos de atomização (ASM INTERNATIONAL, 2004). A figura 12 representa de forma resumida este processo.

Figura 12 – Resumo do Processo de Aspersão Térmica



Fonte: Marques, 2019.

Os revestimentos podem ser construídos apenas se as partículas se deformarem no impacto com esse substrato, razão pela qual os materiais de alimentação são aquecidos e acelerados, conforme citado anteriormente (PAWLOWSKI, 2008).

As partículas ao entrarem em contato com a superfície através do impacto nesta se ancoram mecanicamente, forma-se a ligação com a superfície; as partículas subsequentes causam o aumento da espessura do revestimento, e o resultado final é a formação de uma estrutura lamelar. As partículas que forem impacto no substrato estão sujeitos a altas taxas de resfriamento, tipicamente superiores a  $10^6$  K/s (para os metais) (ASM INTERNATIONAL, 2004).

Ao impacto, forma-se a ligação com a superfície; as partículas subsequentes causam o aumento da espessura do revestimento, e o resultado final é a formação de uma estrutura lamelar. Os splats<sup>2</sup> estão sujeitos a altas taxas de resfriamento, tipicamente superiores a  $10^6$  K/s (para os metais) (ASM INTERNATIONAL, 2004).

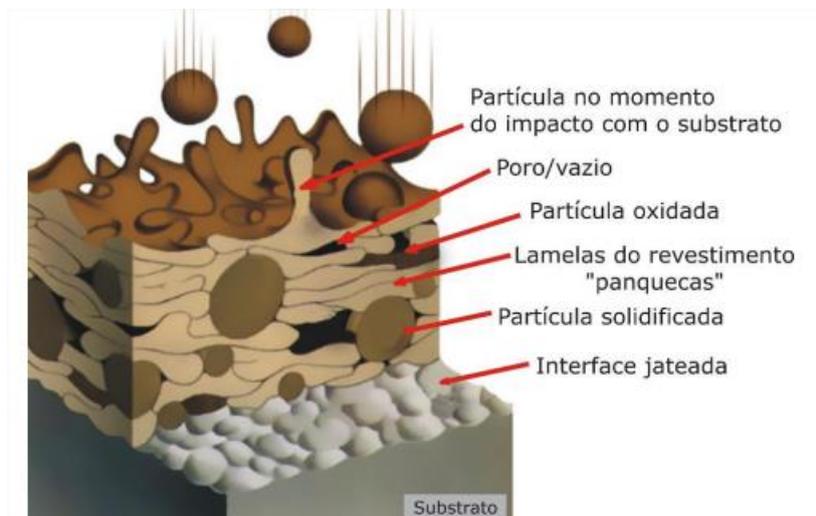
De acordo com Canarim (2013), o tipo de dispersão térmica difere basicamente em relação à forma pela qual o metal é alimentado (fio ou pó), fonte de calor que produz sua fusão e velocidade de dispersão. Gomes (2003) relata que os tipos de dispersão térmica são: dispersão térmica por chama, dispersão térmica por arco elétrico, dispersão térmica por plasma e dispersão oxicomustível de alta velocidade (High Velocity Oxi-Fuel – HVOF).

No presente trabalho, o tipo de dispersão térmica utilizada para aplicação de um dos revestimentos avaliado foi dispersão oxicomustível de alta velocidade (High Velocity Oxi-Fuel – HVOF). Segundo Lee (2000), o processo de dispersão térmica por HVOF é uma técnica muito bem combinada para obtenção de revestimentos resistentes a corrosão e ao desgaste. Isto se deve a baixa porosidade e baixo teor de óxidos deste tipo de revestimento. Para Patel (2022), o processo de dispersão térmica por HVOF consiste em depositar uma fina camada de materiais metálicos e/ou não metálicos em uma condição fundida sobre a superfície de uma peça, para aumentar as propriedades tribológicas do material substrato. Singh (2020) observa que que a

aspersão por HVOF é muito versátil e uma forma efetiva de proteção e aumenta a performance de uma variedade de substratos em muitas aplicações.

Selvadurai et a. (2015) afirmam que em revestimentos aspergidos por HVOF, a alta velocidade de impacto das partículas aquecidas – que variam de 400 a 1000 m/s – geram uma microestrutura de camadas laminares, constituídas por inclusões de óxidos, vazios, porosidades e partículas solidificadas, conforme mostra a figura 13. Além disso, a taxa de resfriamento de cada partícula aquecida sobre impacto é extremamente alta, gerando uma têmpera destes materiais aspergidos: isto resulta em cristais submicrométricos muito finos, soluções sólidas metaestáveis supersaturadas, e até fases amorfas (BOLELLI, 2014).

Figura 13 – Estrutura do Revestimento Aplicado por Aspersão térmica via HVOF



Fonte: Marques, 2019.

Através da figura 13 acima, Marques (2019) auxilia na caracterização das fases constituintes do revestimento aplicado por aspersão térmica via HVOF. Considera-se como vazios, os espaços existentes nos interstícios entre as partículas e lamelas do revestimento. As fases escuras e alongadas presentes nos contornos das lamelas e partículas, são referentes as inclusões de óxido nos revestimentos metálicos que aparecem na secção transversal, paralela ao substrato. O termo “poro” está relacionado aos defeitos internos das lamelas e partículas, como a formação de inclusões pelo efeito de elevadas temperaturas. As partículas solidificadas são aquelas que se resfriaram antes das outras e não ficam achatadas (ASM INTERNATIONAL, 2004).

Assim como demais processos de aplicação de revestimento, as propriedades mecânicas e a microestrutura dos revestimentos aplicados por deposição oxicomustível de alta velocidade

(HVOF) são influenciados pelos parâmetros de temperatura e velocidade das partículas. Pesquisas realizadas por Gaona, Lima & Marple (2008) demonstram uma forte dependência das condições de processamento na composição de fase, na microdureza e na tensão residual.

Segundo Marques (2019), outro item que merece destaque, pois tem forte influência na qualidade e no êxito da camada depositada, é a preparação da superfície que vai receber o revestimento, visando criar uma rugosidade controlada. Patel (2022) afirma que antes de iniciar a aplicação deste revestimento, a superfície das amostras deve ser jateada com alumina em 6 bar de pressão para alcançar o valor da rugosidade superficial necessária de aproximadamente  $Ra \approx 6\mu\text{m}$  como determinado. Marques (2019) que a importância de uma rugosidade adequada do substrato é para que à medida que as partículas, fundidas ou semifundidas, se resfriam e se contraem, estas aderem a uma superfície, favorecendo o ancoramento mecânico e desta forma garantindo a adesão da camada.

### **2.6.3 Revestimentos Soldados**

Kirchgaßner (2008) afirma que revestimentos aplicados por meio de processos de soldagem, são selecionados em função da aplicação, com objetivo de apresentar melhores resultados diante das solicitações mecânicas a que estes componentes são submetidos, fato este que fomenta o interesse, por parte das empresas, por materiais e tecnologias “antidesgaste”, com a pretensão de estender a vida útil de peças e equipamentos. Segundo Coronado (2009), a escolha dos processos de soldagem, utilizados pelos setores industriais para a aplicação dos revestimentos, é feita de forma que se obtenha a melhor taxa de deposição combinada à mínima diluição. De acordo com Oliveira (2019), através da utilização de revestimentos aplicados por solda é possível obter um maior rendimento sem que ocorram mudanças na composição química do revestimento, fator que pode causar perdas nas propriedades pretendidas.

Para Buchely (2005) os processos de soldagem por arame (MIG/MAG) – também conhecido como SMAW (Shielded Metal Arc Welding) – e por eletrodo revestido – GMAW (gas metal arc welding) – respectivamente, são os mais utilizados para aplicação de tais revestimentos. Oliveira (2019) afirma que isto se deve ao controle de variáveis apresentado pelo processo GMAW, o que permite obter melhores resultados, bem como as vantagens de menor custo de processo e simplicidade de procedimento apresentada pelo processo SMAW. O presente trabalho abordará o funcionamento e aplicação do processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), por ser a metodologia de aplicação utilizado em um dos revestimentos testados.

Além do controle de variáveis mencionado por Oliveira (2019), o processo GTAW, também conhecido como (TIG - Tungsten Inert Gas), é comumente utilizado em aplicações

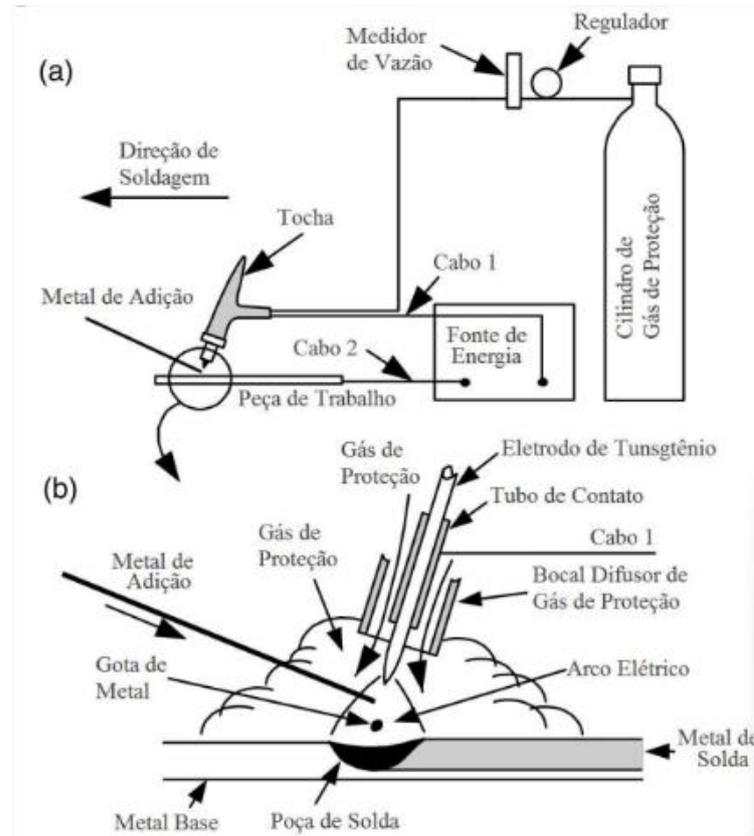
onde se requer precisão na deposição e qualidade do cordão, características interessantes para o depósito de revestimentos que demandam resistência à abrasão. Entretanto, para aplicações em revestimentos, Balaguru *et al.* (2020) sugere uma nova nomenclatura para este processo como GTAH (Gas Tungsten Arc Hardfacing).

O princípio básico de funcionamento do processo de solda por GTAW/GTAH, segundo Colaço (2021), acontece pela manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho, a sustentação do arco e a proteção do metal fundido da contaminação atmosférica é realizada por um gás inerte, normalmente argônio, hélio ou mistura entre estes gases. Entre as vantagens na utilização do processo GTAW estão a alta qualidade das soldas, baixa distorção das peças, processo livre de respingos, controle preciso da soldagem, faz a união de quase todos os tipos de materiais metálicos (com exceção do cádmio, zinco e estanho), além de possibilitar a soldagem com ou sem adição de material (KEN-HICKEN, 1993).

Como mencionado o processo GTAW utiliza de material de adição para formar a poça de fusão sobre o substrato, sendo estes de acordo com Colaço (2021) depositados na forma de pó metálico ou hastes maciças. Segundo Oliveira (2019), as ligas de revestimento duro, do tipo Fe-Cr-C – no caso da aplicação em revestimentos resistentes à abrasão – com ou sem adição de outros elementos de ligas, têm sido muito utilizadas nestes materiais de adição, devido à grande variedade de microconstituintes aliado a uma matriz metálica, conferindo-lhes dureza e resistência mecânica satisfatória à aplicação.

Em relação ao equipamento necessário para executar o processo GTAW, Colaço (2021) diz que este é composto por uma fonte de energia com característica de corrente constante, um cilindro de gás (argônio, ou hélio, ou mistura entre estes dois gases) com regulador de vazão, sistema de refrigeração e uma tocha. Esta tocha, segundo Colaço (2021) é formada por um sistema de fixação do eletrodo não consumível, composto por uma pinça cônica e uma capa para evitar vazamento do gás de proteção. Além disso, um bocal, construído com material cerâmico para suportar altas temperaturas, é utilizado para o direcionamento do gás de proteção. A alimentação do metal de adição pode ser realizada manualmente ou mecanizada. A figura 14 apresenta o desenho esquemático dos componentes do processo GTAW.

Figura 14 - Componentes Utilizados para Aplicação de Solda por GTAW



Fonte: Colaço, 2021.

Nos processos a arco elétrico como o GTAW demonstrado acima, ocorre a fusão dos materiais proporcionando uma ligação metalúrgica entre o metal de base e o revestimento. Esta fusão que acontece pela mistura de uma parcela do metal de base e do metal de adição dá-se o nome de diluição e proporciona um metal depositado composto por esta combinação destes materiais fundidos.

Segundo Colaço (2021), nos processos a arco elétrico, o aporte térmico, ou energia de deposição, é um fator muito importante pois, além de ser responsável pela fusão do metal de adição e de base, afeta a taxa de resfriamento, microestrutura, diluição, dureza e tamanho de grão. Para Ravisankar (2014) o aporte térmico é composto pelos componentes elétricos: tensão e corrente, e pelos componentes do sistema: eficiência térmica inerente do processo e velocidade de deslocamento da tocha. O que torna estes parâmetros importantes a se controlar durante o processo de GTAW.

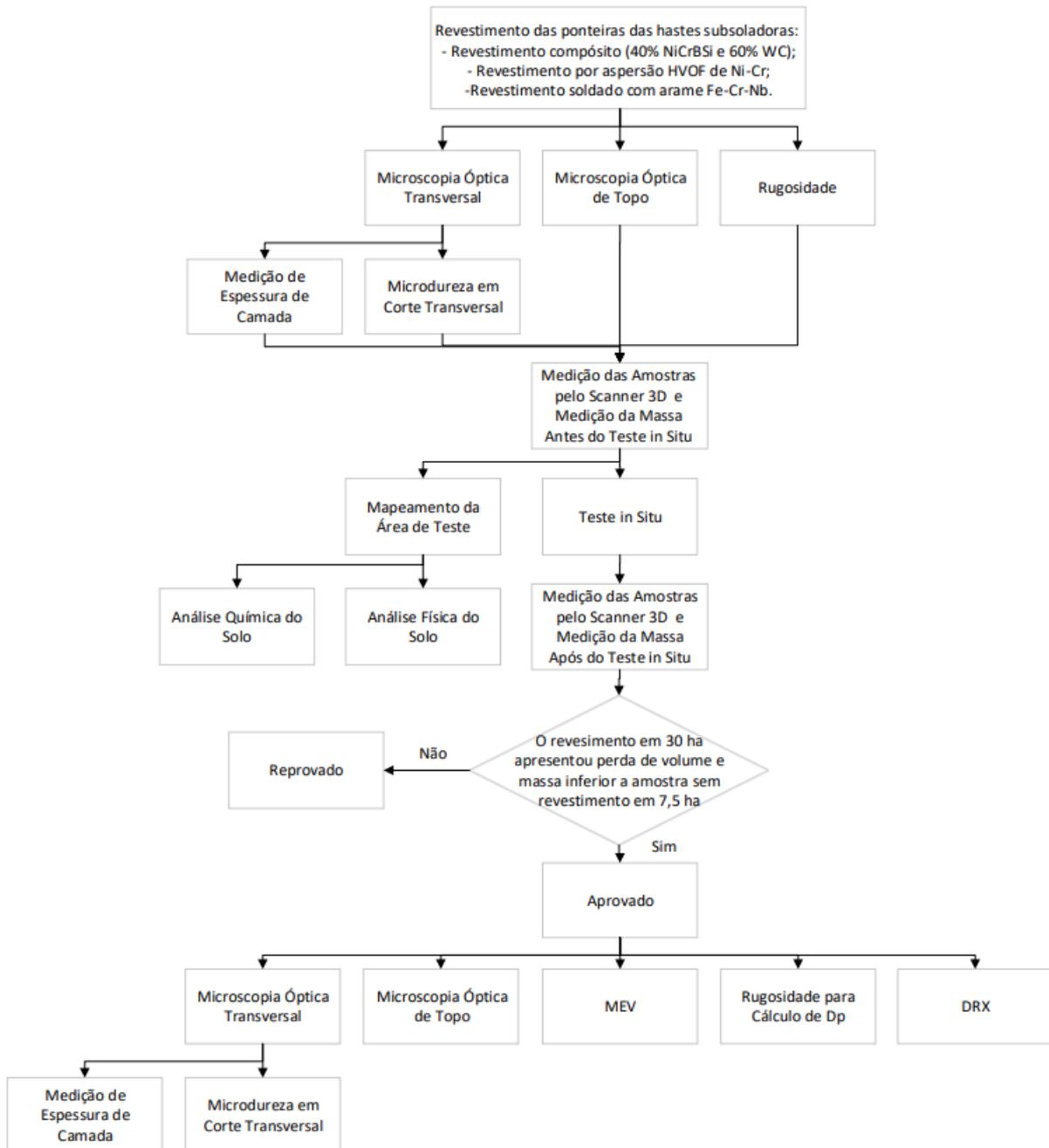
Balasubramanian *et al.* (2009) durante sua pesquisa avaliou os efeitos do aporte térmico na diluição e nas características superficiais do depósito de cinco processos de deposição de revestimentos, onde foi possível verificar que para valores idênticos de aporte térmico, o processo tem influência significativa na diluição da solda. Colaço (2021) afirma que esse

comportamento está associado às características de cada processo de deposição, como: diâmetro do metal de adição, tipo de atmosfera gasosa, controle e concentração do arco elétrico, eficiência térmica do processo, dentre outros fatores.

### 3 METODOLOGIA

Através do embasamento técnico-científico construído no capítulo anterior pode-se buscar a metodologia mais adequada para a execução deste trabalho. Para trazer uma melhor compreensão dos procedimentos realizados neste trabalho, o fluxograma da figura 15 abaixo elucidada as etapas executadas no desenvolvimento desta pesquisa.

Figura15 - Fluxograma de Etapas Experimentais



Fonte: o Autor.

Devido a quantidade de revestimentos testados e a variação na quantidade de hectares na coleta das amostras do teste em campo, fez-se necessário identificar as amostras quanto aos seus revestimentos e ao tempo de aplicação em campo. O tempo de coleta das amostras foi estipulado com base no relato do produtor rural que informou que as peças sem revestimento sofrem um desgaste severo a ponto de serem inutilizadas após 30 hectares.

Desta maneira, a fim de poder qualificar e quantificar o desgaste nas peças sem que houvesse perda total dos revestimentos aplicados, estipulou-se que após 7,5 hectares de aplicação da máquina em campo seria feita a primeira coleta de amostras, sendo retirada uma amostra de cada revestimento testado. Após 15 hectares seria feita uma coleta intermediária de amostras e a última coleta seria feita com 30 hectares. Sendo assim além de identificar as peças conforme o revestimento estas necessitaram ser identificadas também conforme ordem de retirada de amostras do teste, conforme tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Identificação das Amostras

<b>Identificação</b>	<b>Descrição</b>
1A	Ponteiras de hastes subsoladoras sem revestimento retiradas após subsolar 7,5 hectares
1B	Ponteiras de hastes subsoladoras sem revestimento retiradas após subsolar 15 hectares
1C	Ponteiras de hastes subsoladoras sem revestimento retiradas após subsolar 30 hectares
2A	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 7,5 hectares
2B	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 15 hectares
2C	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 30 hectares
3A	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 7,5 hectares
3B	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 15 hectares
3C	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 30 hectares

4A	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 7,5 hectares
4B	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 15 hectares
4C	Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 30 hectares

Fonte: o Autor.

### 3.1 Materiais

Como mencionado anteriormente o presente trabalho visou testar um revestimento que agregasse resistência ao desgaste na ponteira da haste de um subsolador. Primeiramente faz-se necessário discorrer sobre o material base da ponteira da haste, que é um aço fundido com alto teor de cromo, manganês e silício. Os índices elevados dos elementos mencionados se justificam pela produção de uma estrutura eutetóide com teor de carbono comparativamente baixo, conferindo a peça uma estrutura inteiramente perlítica fato este que contribui para uma menor fragilidade da peça. Este aço não possui uma normatização padrão, sendo sua liga desenvolvida especificamente para a empresa de implementos agrícolas Stara. Para aumentar a resistência mecânica da peça adicionou-se um processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento, gerando uma matriz martensítica com uma fina camada de 0,3mm de martensita revenida em sua superfície.

O primeiro revestimento a ser avaliado foi uma pasta comercial - DURMAT® - de carboneto de tungstênio, cuja matriz é composta por 40% de NiCrBS e 60% de partículas de carboneto de tungstênio sinterizado. Este revestimento é aplicado com uma espátula e curado por um processo de indução a 680°C com resfriamento lento ao ar.

O próximo revestimento testado foi depositado por aspensão térmica (HVOF) normalizado a 1050°C por 10min com resfriamento lento ao ar. O revestimento aplicado tem a seguinte composição química:  $\leq 21\%$  Cr,  $\leq 7\%$  B,  $\leq 6\%$  Nb,  $\leq 6\%$  Mo,  $\leq 2\%$  Si,  $\leq 2\%$  Mn,  $\leq 1,90\%$  C e  $\leq 54\%$  Fe.

O último revestimento testado foi depositado no substrato de metal através do processo de soldagem a arco de gás tungstênio (GTAW). O arame NANOSTEEL® tem a seguinte composição química:  $\leq 21\%$  Cr,  $\leq 7\%$  B,  $\leq 6\%$  Nb,  $\leq 6\%$  Mo,  $\leq 2\%$  Si,  $\leq 2\%$  Mn,  $\leq 2\%$  C e  $\leq 54\%$  Fe.

Devido as análises a serem executadas no decorrer do trabalho terem abrangido diferentes áreas, para melhor compreensão das etapas e procedimentos executados faz-se necessário uma subdivisão das diferentes metodologias aplicadas e percorridas nas subseções a seguir, sendo elas: *Metodologia de Caracterização dos Revestimentos*, *Metodologia de Execução dos Testes in Situ*, *Metodologia de Análise dos Mecanismos de Desgaste*, *Metodologia de Análise Quantitativa de Desgaste*, *Metodologia de Análise do solo*.

### **3.2 Metodologia de Caracterização dos Revestimentos**

A composição química do substrato metálico foi analisada por um espectrômetro de emissão óptica Q2 ION (Bruker). As composições químicas dos revestimentos foram analisadas por um espectrômetro por fluorescência de raios Niton XL3t Gold+ Portátil (Thermo Scientific). A análise de difração de raios X de incidência rasante (GIXRD) foi realizada em um difratômetro Bruker D8 ADVANCED (Bruker, Alemanha) (radiação incidente Cu-K $\alpha$ ,  $\lambda = 0,15418$  nm) e as medições foram realizadas com um ângulo de incidência de 1,5°. Os padrões GID foram registrados com um tamanho de passo de 0,02° na faixa de 15 a 75°.

As microestruturas foram analisadas em microscópio óptico Zeiss, modelo Axio Lab. A1, após condicionamento com Nital 3%. O software ZEN 2.6 (edição azul) foi usado para análises de imagens.

Imagens de superfície obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) foram realizadas usando o modelo ZEISS EVO LS-10.

A rugosidade superficial média (Ra e Rz) foi medida em um medidor de rugosidade linear Mitutoyo, modelo SJ-400.

A espessura do revestimento foi medida cortando uma seção transversal da amostra, que foi analisada em um microscópio óptico de luz Leica DM IL LED. O perfil de dureza da seção transversal das amostras revestidas e não revestidas foi realizado utilizando um microdurômetro, modelo Buehler 1600. A carga aplicada foi de 1000 g.

### 3.3 Metodologia de Execução dos Testes in Situ

Justifica-se a aplicação de testes in situ devido aos testes laboratoriais nem sempre conseguirem serem fiéis as condições encontradas na prática de campo. Santo (2005) relata que realizar testes de desgaste em laboratório onde aplica-se areia como abrasivo, possui uma desvantagem que é a diminuição na habilidade abrasiva do meio devido a desintegração dos grãos de quartzo. Esta condição pode ser evitada quando a pesquisa é conduzida através de testes in situ.

Conforme mencionado anteriormente os revestimentos foram testados na ponteira da haste de um subsolador. O subsolador em questão que foi utilizado para execução dos testes foi um implemento agrícola FOX de marca Stara e possui 11 hastes, conforme mostrado na figura 16. Segundo Kalácska *et al.* em seu estudo desenvolvido em 2019 onde estes avaliaram a influência da geometria da peça no desgaste destas, o autor não considerou que variação de posicionamento das peças na máquina pudesse ter alguma relação com maior ou menor desgaste sofrido por estas, sendo assim uma variável a não ser considerada. Sendo assim para que nenhuma dúvida pudesse ser levantada quanto ao impacto do posicionamento das peças na máquina estipulou-se uma maneira de remover a variável “posição da peça na máquina”, as peças com revestimento e sem revestimentos foram alocadas em pontos diferentes da máquina, variando desta forma seu posicionamento, tomando o cuidado para não deixar pares do mesmo revestimento na mesma região.

Figura 16 – Implemento Agrícola Utilizado Para Execução dos Testes In Situ

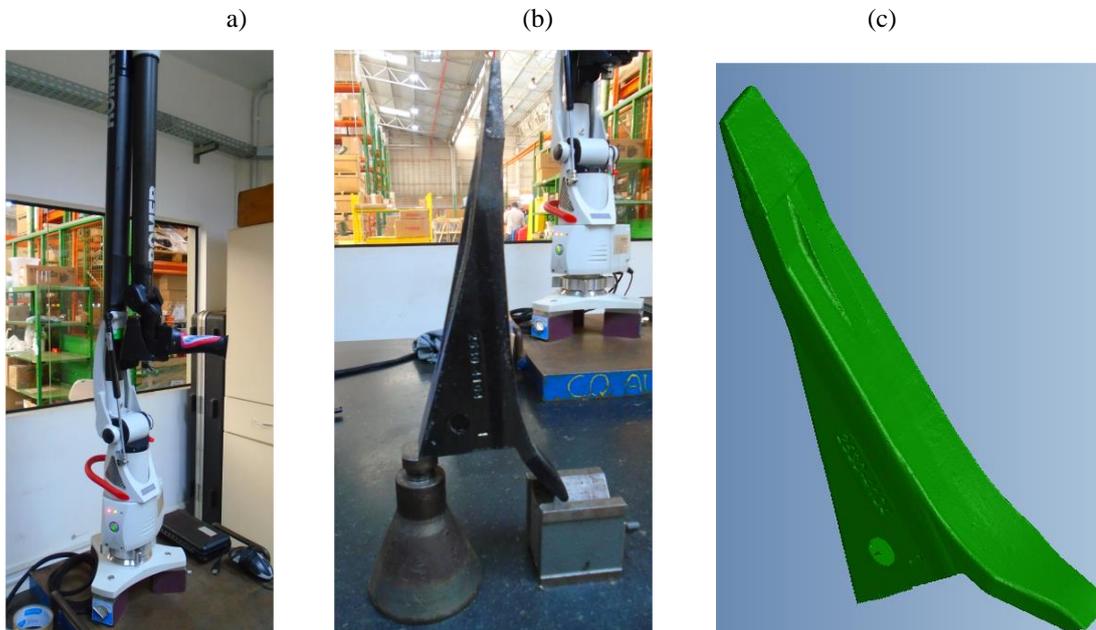


Fonte: o Autor.

### 3.4 Metodologia de Análise Quantitativa do Desgaste

Para isto, a quantificação do desgaste em testes in situ foi realizada através da medição da geometria de todas as amostras antes e após a execução dos testes in situ. Para isto foi utilizado um escâner a laser de variação dimensional de 0,2mm, afim de gerar arquivos tridimensionais das peças com a geometria real destas para posterior tabulação de dados de volume. A figura 17 apresenta o escâner a laser utilizado, bem como a forma como a peça foi apoiada para ser escaneada e o arquivo gerado pelo escâner.

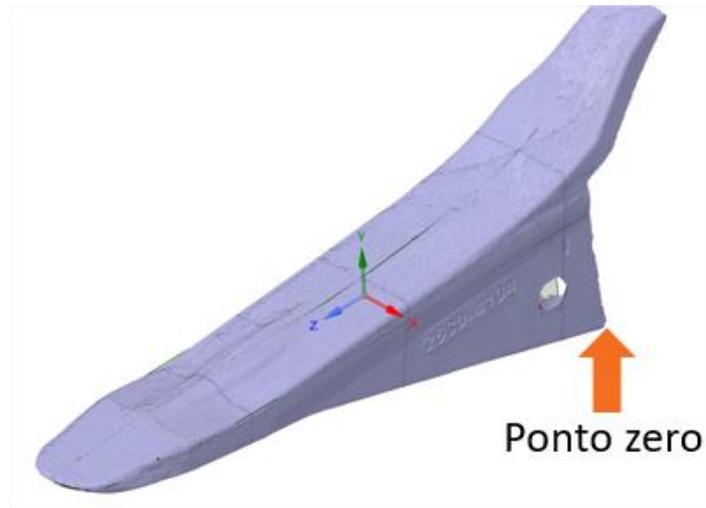
Figura 17 - Procedimento de Escaneamento das Amostras: a) scanner, b) fixação da amostra para ser escaneada, c) arquivo digitalizado da amostra escaneada



Fonte: o Autor.

Para execução das medidas de volume das peças escaneadas foi utilizado o software SPACE CLAIM 2021 R2 para transformar a nuvem de pontos geradas pelo escaneamento das peças em um sólido capaz de retornar dados de volume das peças. Após o tratamento adequado destes arquivos foi possível partir para a análise volumétrica destes. Para isto buscou-se encontrar um ponto em comum entre todas as amostras, que se mantivesse intacto após a utilização das peças nos testes in situ, afim de podermos quantificar a variação volumétrica sofrida por estas após o desgaste abrasivo. Sendo assim adotou-se como ponto zero de medição a aresta posterior da ponteira da haste, conforme figura 18 abaixo, para a partir deste ser executadas as medições volumétricas.

Figura 18 – Ponto Zero para Análise do Desgaste



Fonte: o Autor.

A partir do ponto zero, foi verificado que o desgaste nas ponteiros das hastes está localizado a 223,00 mm deste e que a partir deste ponto a peça tornasse inutilizada devido a perfuração da parede do material. Devido a isto as medições de variação de volume foram realizadas transportando o ponto zero para o ponto de 223,00 mm, tornando desta forma este o novo ponto em comum entre todas as amostras. Desta forma os arquivos tridimensionais das amostras foram seccionados a 223,00 mm do ponto zero a fim de realizar as medições apenas nas áreas que sofreram perdas de volume em decorrência do desgaste sofrido. A figura 19 abaixo nos mostra a área da peça que foi utilizada para análise e tabulação de dados.

Figura 19 Seção da Peça a Ser Analisada



Fonte: o Autor.

Já para a medição de perda de massa o procedimento executado foi a medição da massa das amostras antes e após a execução do teste *in situ*. Para isto utilizou-se uma balança de precisão com variação de  $\pm 5,0\text{g}$ . Diferente das análises de volume feitas as medições de massa foram realizadas considerando a massa da peça inteira, pois não havia possibilidade de seccionar a somente a parte que seria afetada pelo desgaste antes da execução dos testes *in situ*.

### 3.5 Metodologia de Análise dos Mecanismos de Desgaste

Kalácska *et al.* (2019) afirma que mesmo as técnicas de medição de desgaste sendo baseadas na perda de massa ou em mudanças dimensionais os mecanismos de desgaste influenciam na taxa deste, sendo necessário compreendê-los para uma boa caracterização tribológica. Desta maneira torna-se de suma importância o estudo dos mecanismos de desgaste, Santo (2005) relata que estudo dos mecanismos otimiza a escolha dos materiais, sendo capaz de avaliar a durabilidade de um equipamento.

Desta forma, o presente trabalho se propôs a quantificar a taxa de desgaste através da medição de massa e de volume anteriormente citadas e também avaliar os micromecanismos presentes no processo de desgaste através de avaliações feitas com técnicas de microscopia óptica e de microscopia eletrônica de varredura para analisar os efeitos dos micro mecanismos na superfície da peça com e sem revestimento.

Para definir a demarcação entre micro aragem e micro corte, o valor crítico de  $D_p$  fica em torno de 0,2. Após uma medição de caracterização topográfica da superfície, é possível calcular o  $D_p$  médio de todos os sulcos presentes na superfície desgastada através da equação (1) já utilizada para esta definição por Kalácska *et al.* (2020) e Kayaba *et al.* (1986).

$$D_p = \frac{R_z}{\frac{R_{sm}}{2}} \quad (1)$$

Onde  $R_z$  é a altura de dez pontos [ $\mu\text{m}$ ] e  $R_{sm}$  [ $\mu\text{m}$ ] é o espaçamento médio na linha média.

### 3.6 Metodologia de Análise de Solo

O trabalho foi desenvolvido em uma área no município de Bagé, localizada na mesorregião Sudoeste do Rio Grande do Sul, bioma Pampa. – Rio Grande do Sul (IBGE, 2021), seu clima segundo a classificação Köppen-Geiger é denominado Cfa temperado (MORENO, 1961).

De maneira a ter maior controle diante as variáveis que implicam no processo de desgastes das ferramentas de corte de solo, foi necessário caracterizar o solo onde realizou-se os testes in situ. Para caracterização do solo, primeiro delimitou-se a área onde seria executados os testes. A área foi delimitada com um receptor de GPS portátil, modelo Garmin eTrex 22x, de modo que se percorreu por todo o perímetro externo, este representado pela figura 20, o mesmo equipamento realizou uma medida total do campo experimental que totalizou 41 hectares.

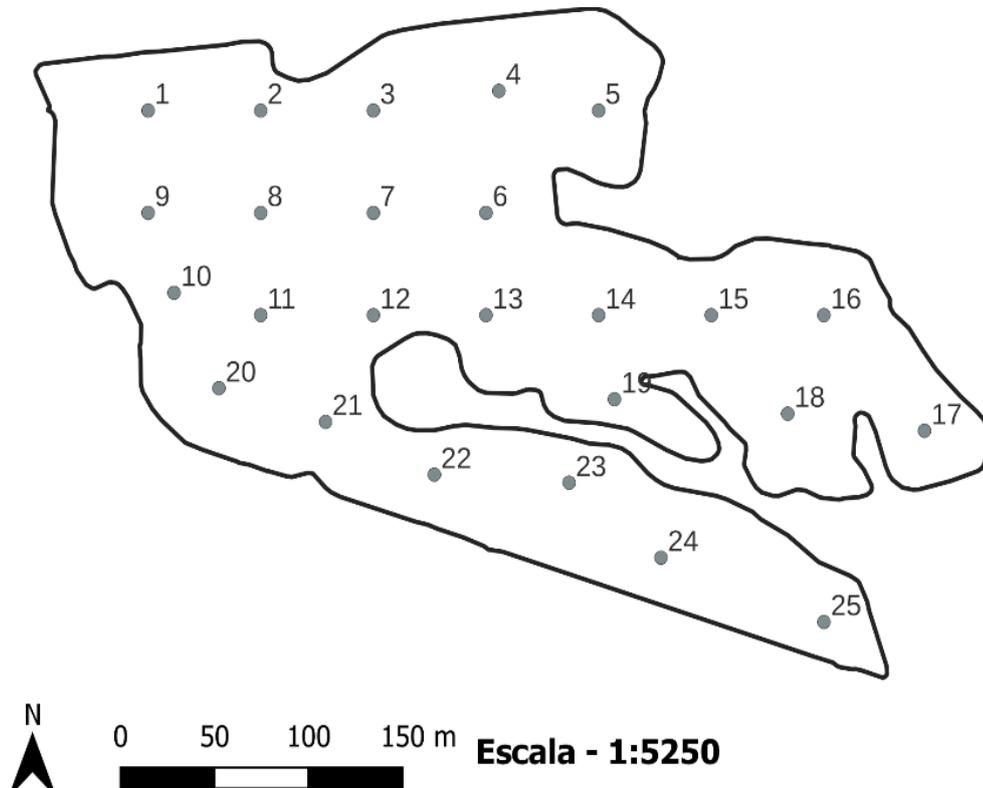
Figura 20 – Delimitação da Área para Execução do Teste In Situ



Fonte: o Autor.

A partir da delimitação, criou-se a grade regular de pontos geolocalizados para realização de coletas de solo para execução das análises referentes as suas propriedades físicas, e também para determinação da compactação. A disposição dos locais, possuem o mesmo espaçamento entre si, e esta malha contempla um total de 25 pontos para coleta, ou seja, grids espaciais de 1,64 amostras por hectare. A figura 21, apresenta o mapa descrito anteriormente.

Figura 21 – Disposição dos Pontos de Coleta das Amostras do Solo



Fonte: o Autor.

As coletas das amostras de solo, foram realizadas com o método da pá de corte, de modo que se retira uma fatia do solo, com uma espessura de aproximadamente 5 cm, e profundidade de 20 cm. O processo requer primeiramente retirar a camada vegetal superior, com uma simples raspagem, posterior é aberta uma trincheira para a camada que é desejado coletar, pós isso basta realizar a coleta. Todas as amostras foram homogeneizadas, identificadas e enviadas para o laboratório de solos para as respectivas análises.

A determinação da compactação do solo foi realizada de um modo indireto, através de um equipamento que realiza a leitura da tensão necessária para ser exercida sobre o solo visando encontrar sua resistência à penetração, neste caso foi utilizado o modelo PenetroLog PLG2040, desenvolvido pela Falker. Ele realiza leituras em até 60 cm de profundidade, também possui um receptor GPS interno, ou seja, possui capacidade de registrar as coordenadas espaciais, e através de uma conexão Bluetooth, transfere os arquivos para uma plataforma própria da fabricante (FALKER, s/d).

### 3.6.1 Medida de Condutividade Elétrica

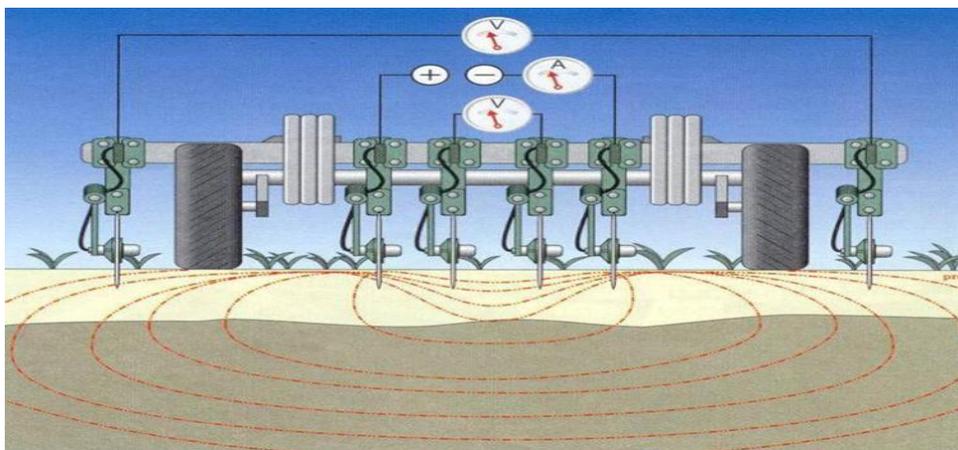
O trabalho também se propôs a utilizar um equipamento de medição de condutividade elétrica do solo, devido a sua capacidade de leitura e alta densidade amostral, buscando auxiliar no entendimento das demais variáveis estudadas na área em que foram executados os testes in situ.

O equipamento em questão é comercializado pela empresa Stara S/A, o modelo é denominado como Veris CE, ele realiza a medição através de 6 eletrodos que ficam em contato direto com o solo, a frequência de leituras é de 1 Hz, ou seja, um ponto por segundo, essa informação coletada é enviada para o terminal virtual Topper 4500 VT, que tem função de armazenamento.

Para a coleta das informações, segundo o fabricante, os discos (eletrodos) devem estar em contato direto com o solo, o espaçamento lateral entre uma linha e outra foi de 15 metros, já configurada no terminal virtual que possui um sistema de geoposicionamento.

O equipamento realiza a medição da condutividade elétrica de maneira indireta, onde a solução de solo é colocada entre dois eletrodos, igualmente distanciados e de geometria conhecida. Aplicando-se uma diferença de potencial constante entre dois eletrodos a corrente é inversamente proporcional a resistência da solução do solo. A figura 22 elucidam o método de coleta de dados.

Figura 22 – Sistema de Medição de Condutividade Elétrica do Solo

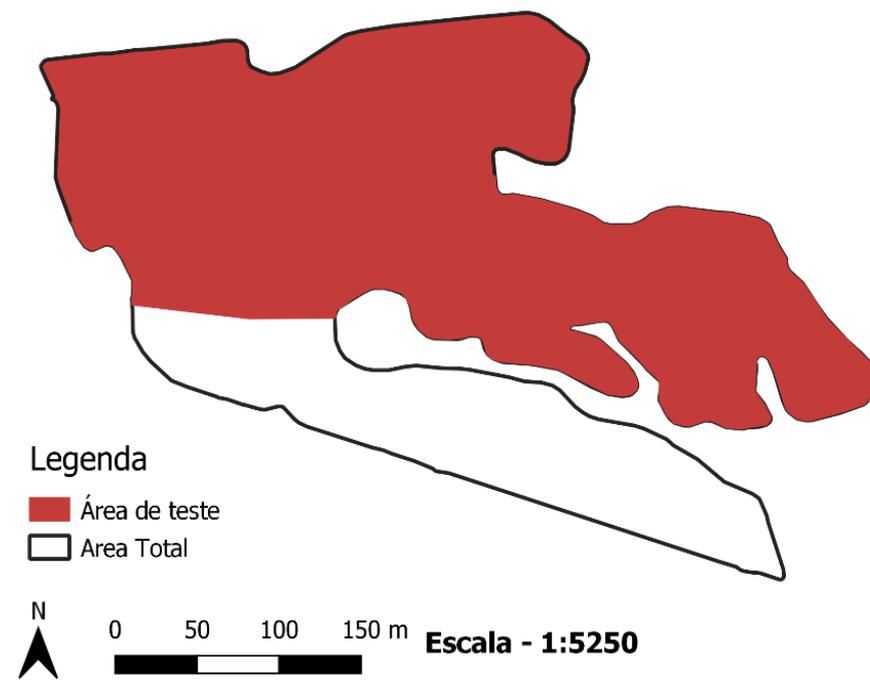


Fonte: Franceschini, 2007 .

Os discos das pontas realizam amostras de 90 cm de profundidade, já os discos centrais realizam amostras de 30 cm de profundidade. A condutividade elétrica serve como um meio de definir padrões espaciais que se mostram devido a variação da condutância elétrica influenciadas pela salinidade, umidade, textura e resistividade.

Embora todo o talhão tenha sido mapeado, a área efetiva de teste ocupou apenas uma parcela, devido ao arranjo experimental exigir trocas dos corpos cortantes do solo, os mesmos ainda deveriam ser retirados com uma camada do tratamento adicionado para os testes metalográficos subsequentes, dessa forma para ter um teor considerável, os testes in situ foram finalizados com 30 hectares, tudo isso está elucidado na figura 23, apresentada abaixo.

Figura 23 – Área de Teste x Área Total



Fonte: o Autor.

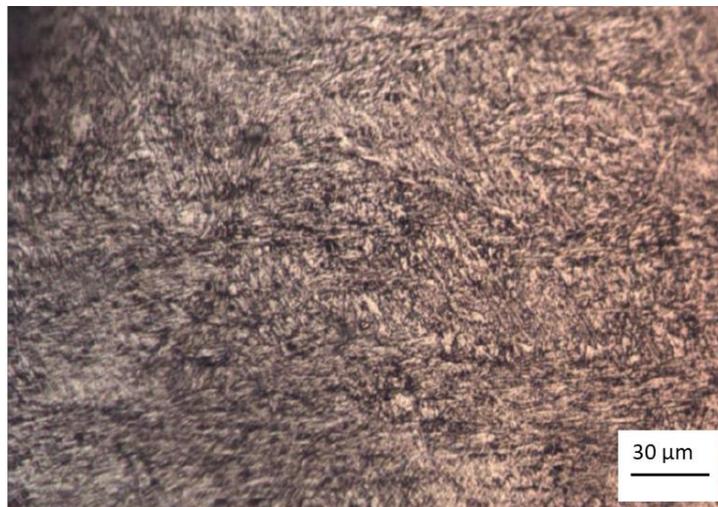
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após finalizar as etapas dos testes mencionados no capítulo anterior, pode-se verificar o comportamento dos revestimentos aplicados nas ponteiros subsoladoras.

### 4.1 Revestimentos obtidos

A tabela 2 apresenta a composição química do substrato. Deve-se notar que este aço foi escolhido para esta aplicação devido a habilidade de seus elementos de liga, por exemplo, Mn, Cr, Mo, Si, Ni, etc., para produzir uma estrutura cristalina perlítica com uma redução percentual do carbono (aproximadamente 0,35% de carbono). Desta forma, a formação excessiva de  $Fe_3C$  é evitada, a qual aumentaria a fragilidade deste material, como ocorre em aços carbono eutetóides. Portanto, após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, a microestrutura cristalina das amostras após a aplicação do tratamento foi martensita, como mostrada na figura 24.

Figura 24 - Imagem obtida por microscopia óptica da seção transversal do substrato da ponteira da haste do subsolador



Fonte: o Autor.

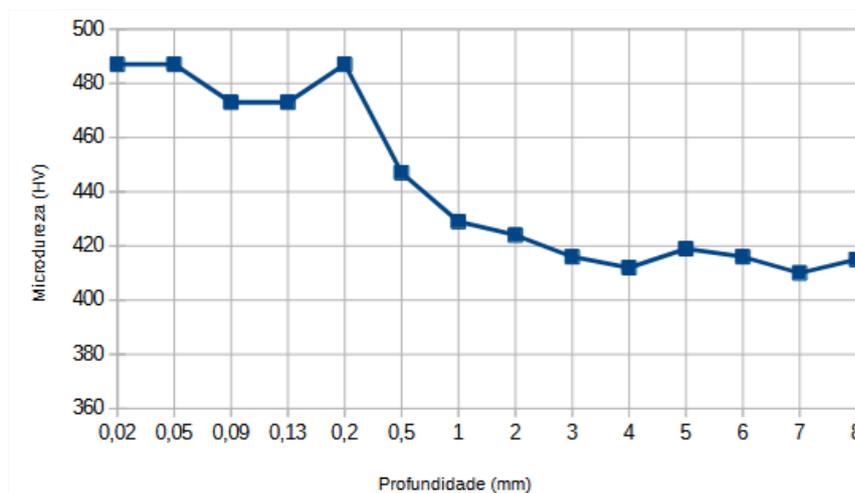
Tabela 2 - Composição Química obtida por espectrofotometria do substrato da ponteira da haste do subsolador.

Elemento	Percentual em Massa (%)
	Substrato
Fe	Balanço
C	0,37
Al	0,053
Si	1,384
Cr	1,962
Mn	0,745
Mo	0,274
Ti	0,024
Ni	0,091
Cu	0,02
Nb	0,013
Co	0,0089
V	0,012

Fonte: o Autor.

A figura 25 abaixo apresenta o perfil de dureza da amostra sem revestimento. Através desta observa-se que a amostra possui uma dureza superficial de 487 HV (~48HRC) até uma profundidade de 0,2 mm e que a partir deste ponto a dureza do material da amostra decai significativamente até 415 HV (~42HRC). Os valores de dureza maiores encontrados até aproximadamente 0,2mm vem ao encontro da microestrutura da camada de aproximadamente 0,3mm de martensita revenida.

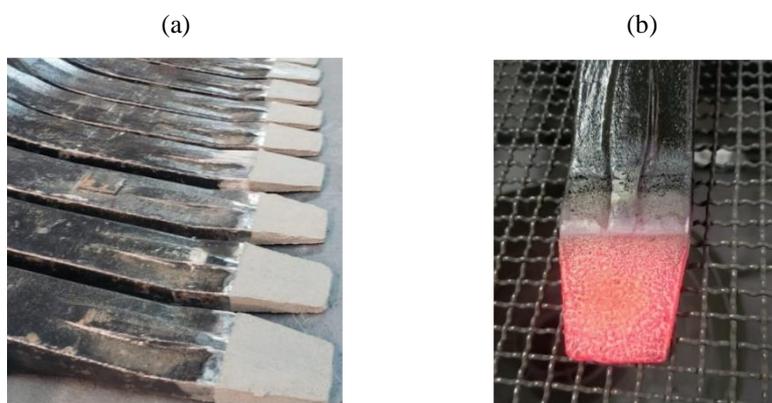
Figura 25 - Perfil de Dureza da Amostra Sem Revestimento



Fonte: o Autor.

O primeiro revestimento a ser avaliado foi o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) aplicado na forma de uma pasta. As figuras 26 (a) e (b) mostram o revestimento após a aplicação na peça e durante a cura por indução.

Figura 26 – Procedimento de aplicação de revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)



Fonte: o Autor.

A tabela 3 apresenta a composição química do revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC). Segundo o Cabral (2014), as partículas de carbeto de tungstênio sinterizados são estruturas com elevada dureza e boa resistência ao desgaste abrasivo. Este fato justifica a utilização destas partículas como material reforço em revestimentos compósitos. Os demais elementos presentes em sua composição química ajudam na criação de uma matriz com boa tenacidade.

Tabela 3 - Composição química obtida por FRX do revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)

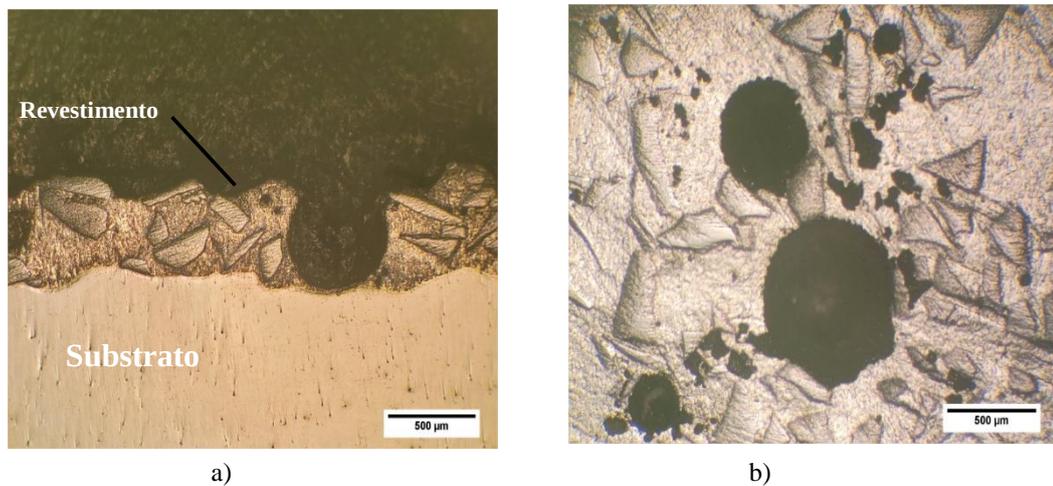
Elemento	Percentual em Massa (%)
	Revestimento
Ni	37,769
Fe	26,913
W	13,278
Cr	10,473
Co	4,792
Mn	0,745
Mo	0.274
Si	3.762
Al	1.066
Ti	0.983

Fonte: o Autor.

Através da microscopia transversal – figura 27 (a) – observa-se uma interface revestimento/substrato bem demarcada, demonstrando que não houve uma união metalúrgica entre o revestimento e o substrato. Nesta mesma figura notou-se que o revestimento apresentou características de um material compósito, com fases bem delimitadas entre si, sendo o NiCrBS a matriz e as partículas de carbeto de tungstênio sinterizado o material reforço. Callister (2020) afirma que a estruturação do material compósito desta maneira proporciona ao revestimento um aumento em sua tenacidade e sua dureza.

Na microscopia de topo – figura 27(b) – também pode-se observar as duas fases diferentes do revestimento, apresentando uma superfície bem heterogênea, sendo possível visualizar os cermetes de carbeto de tungstênio e a matriz. Tanto na 27(a) quanto na 27(b) observa-se a presença de porosidades no revestimento, originado possivelmente pela ebulição de gases dos materiais ligantes.

Figura 27 - Imagem obtida por Microscopia óptica do revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC): a) em corte transversal, e b) topo.



Fonte: o Autor.

Foram realizadas 40 medições da espessura de camada do revestimento em uma amostra que não passou pelos testes a campo onde constatou-se que o revestimento possui variações ao longo de sua espessura. A grande variação da camada do revestimento é justificada pelo método de aplicação totalmente manual, onde este é aplicado através de uma espátula. Fez-se necessário calcular a média das espessuras medidas, o que correspondeu a um valor de camada média de 518,5 µm para amostra que não passou pelos testes a campo. A tabela 4 apresenta os valores da espessura e das rugosidades aferidas.

Tabela 4 - Rugosidade e Espessura de Camada das Amostras Com Revestimento Compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)

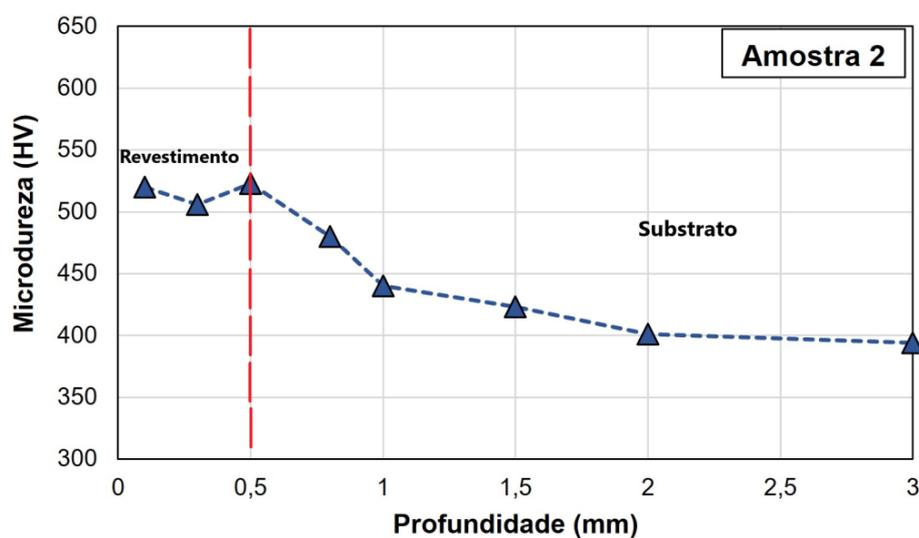
Amostra	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
Substrato	$0,56 \pm 0,05$	$4,30 \pm 0,60$	****
Revestimento	$5,99 \pm 1,68$	$24,52 \pm 5,45$	$518 \pm 60$

Fonte: o Autor.

A rugosidade média (Ra) apresentou uma média de  $5,99 \mu\text{m}$  com um desvio de  $1,68 \mu\text{m}$ . Já a rugosidade média parcial (Rz) teve valor médio de  $24,52 \mu\text{m}$  e desvio de  $5,45 \mu\text{m}$ . Estes dados demonstram que mesmo a rugosidade média (Ra) apresentando valores relativamente baixos – próximos de  $6,0 \mu\text{m}$  – a rugosidade parcial (Rz) apresenta uma distância significativa entre os picos e os vales na ordem de  $24,52 \mu\text{m}$ .

A figura 28 apresenta o perfil de dureza das amostras na região de transição entre o revestimento e o substrato. O revestimento tinha uma dureza de aproximadamente  $520 \text{ HV}$  ( $\sim 50 \text{ HRC}$ ). Após a profundidade  $0,5 \text{ mm}$ , que é a espessura da camada do revestimento nota-se que a dureza deste decai até aproximadamente  $400 \text{ HV}$  ( $\sim 41 \text{ HRC}$ ). Os últimos valores apresentados no perfil de dureza se mostraram similares aos encontrados na amostra sem revestimento.

Figura 28 – Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)



Fonte: o Autor.

O revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr depositado no substrato de metal seguindo a “ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” [10] a uma temperatura ambiente de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ , e a umidade relativa do ar era  $\leq 70\%$ . O método de deposição utilizado foi depositado por aspersão térmica (HVOF) normalizado a  $1050^\circ\text{C}$  por 10min com resfriamento lento ao ar.

Segundo Ribeiro (2004), as ligas de FeCrC são empregadas quando se necessita de um aumento na resistência a abrasão, choque e pressão. Desta forma pode-se associar os altos valores dos elementos Fe e Cr com a necessidade de aumentar a resistência a abrasão e ao impacto. De acordo com Oketola (2023), o Ni presente na composição do revestimento tende a aumentar a resistência ao impacto, por possuir estabilidade estrutural, resistência e boas propriedades mecânicas. O Si foi empregado para aumentar a resistência mecânica de revestimento. De acordo com estudos feitos por Canarim (2013), o Al disponível na composição de revestimento provém da possibilidade de formação de aluminetos de ferro (FeAl ou Fe<sub>3</sub>Al) ou aluminetos de níquel ( Ni<sub>3</sub>Al ), sendo o primeiro utilizado para aumentar a resistência ao desgaste e o segundo utilizado estruturalmente como material reforço. Co mesmo que em baixas quantidades acaba sendo utilizado como ligante. A tabela 5 abaixo apresenta a composição química do revestimento.

Tabela 5 - Composição Química Obtida por FRX do Revestimento Aspersão HVOF de Ni-Cr

Elemento	Percentual em Massa
	(%)
	Revestimento
Fe	59,699
Cr	20,663
Ni	10,241
Si	4,753
Al	2,842
Co	0,365

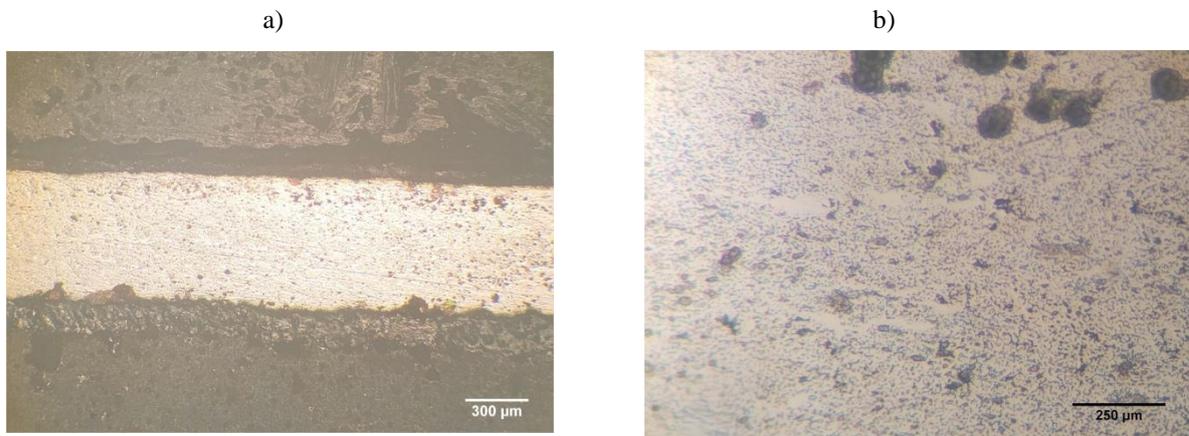
Fonte: o Autor.

Através da microscopia transversal – figura 29(a) – Nesta mesma figura notou-se que o revestimento apresentou uma camada compacta, possuindo uma baixa variação de espessura. Observa-se também uma interface revestimento/substrato bem demarcada com presença de porosidades e óxidos entre a camada do revestimento e do substrato, demonstrando uma preparação de superfície deficiente. Assim como Canarim (2013) aponta em seus estudos,

revestimentos aplicados por aspersão térmica HVOF, tendem a apresentar características heterogêneas em função de serem aspergidos com pós de diferentes tamanhos.

Na microscopia de 600X – figura 29 (b) – pode-se observar uma matriz predominantemente ferrítica com partículas de Ni-Cr. Tanto na figura 29 (a) quanto na figura 28 (b) observa-se a presença de porosidades no revestimento, originado possivelmente pela variação do tamanho das partículas e pela forma de compactação desta.

Figura 29 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica do Revestimento Aspersão HVOF de Ni-Cr: a) em corte transversal, e b) ampliação 600X



Fonte: o Autor.

Novamente se aferiu 40 pontos da espessura de camada do revestimento em uma amostra que não passou pelos testes a campo onde constatou-se que o segundo revestimento testado possui sua espessura mais uniforme. Fez-se necessário calcular a média das espessuras medidas, o que correspondeu a um valor de camada média de 470,0 µm para amostra que não passou pelos testes a campo. A tabela 6 apresenta os valores da espessura e das rugosidades aferidas.

Tabela 6 - Rugosidade e espessura de camada das amostras revestimento aspersão HVOF de Ni-Cr.

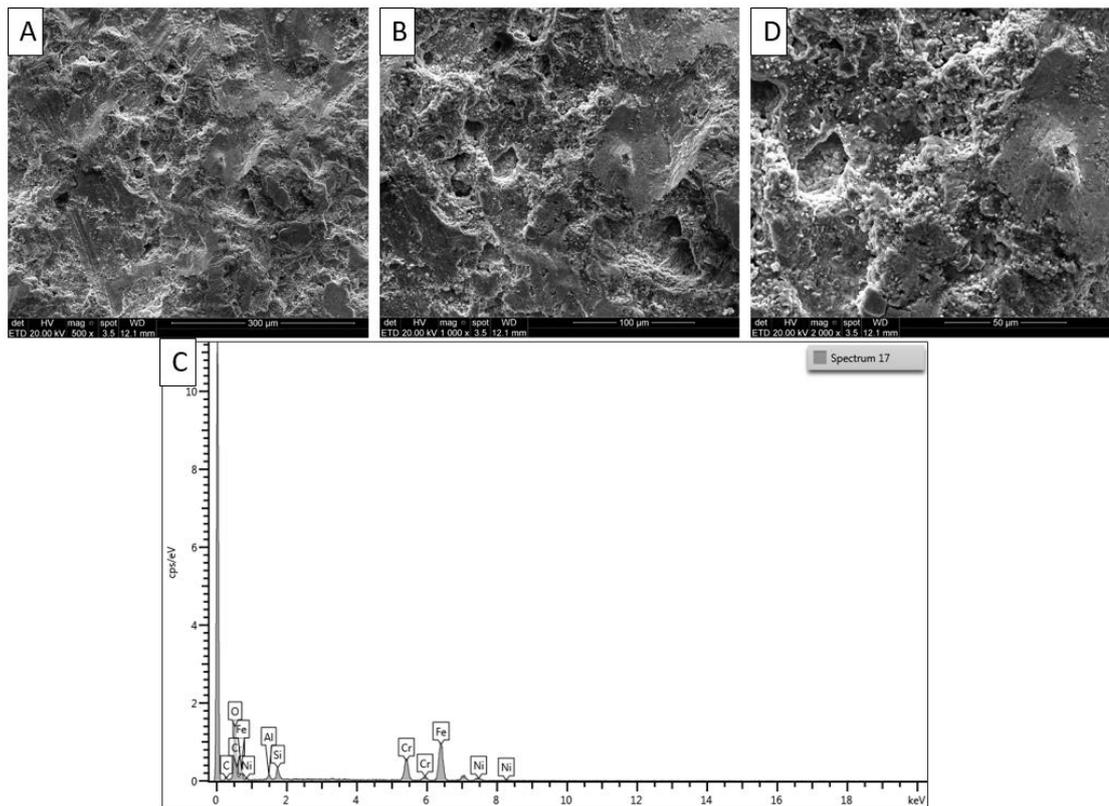
<b>Amostra</b>	<b>Ra (µm)</b>	<b>Rz (µm)</b>	<b>Espessura (µm)</b>
<i>Substrato</i>	0,56 ± 0,05	4,30 ± 0,60	****
<i>Revestimento</i>	7,166 ± 0,50	36,58 ± 4,14	470 ± 20,00

Fonte: o Autor.

A rugosidade média (Ra) apresentou uma média de  $7,166 \pm 0,50$ . Já a rugosidade média parcial (Rz) teve valor médio de  $36,58 \pm 4,14\mu\text{m}$ . Estes dados demonstram uma elevação na rugosidade da superfície do revestimento quando comparado com a rugosidade superficial do substrato, tanto para Ra quanto para Rz.

A figura 30 mostra as imagens da morfologia do revestimento obtidas por MEV do revestimento por aspensão HVOF de Ni-Cr. O revestimento apresentou estruturas assimétricas e irregulares com presença de crateras geradas pelo processo de aplicação do revestimento. A análise EDS (Figura 30C) detectou a presença de Fe e Cr nessas regiões. Sendo o Fe associado a fase da matriz ferrítica e o Cr a formação de carbonetos de Cr ao longo dos contornos de grãos (Figura 30D).

Figura 30 - Imagem Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura - Morfologia do Revestimento Aspensão HVOF de Ni-Cr

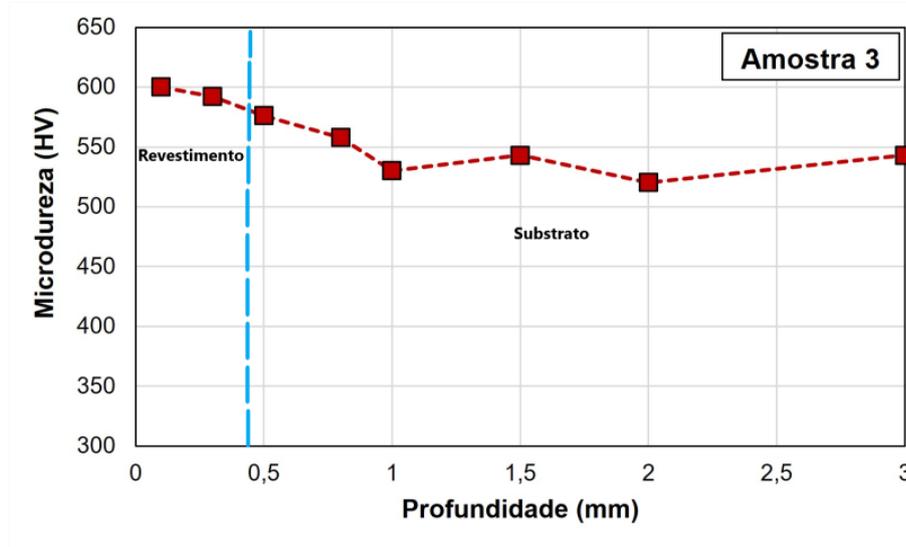


Fonte: o Autor.

A figura 31 apresenta o perfil de dureza da amostra na região de transição entre o revestimento e o substrato. O revestimento apresentou uma dureza de aproximadamente 600 HV (~56HRC). Após aproximadamente 0,47 mm, espessura da camada do revestimento, os valores de dureza tendem a diminuir chegando a valores próximos de 550 HV (~52HRC) no

substrato da amostra. Observa-se uma alteração da microdureza do substrato que pode ser devido ao aquecimento durante o processo de aplicação do revestimento por aspersão HVOF, pois o substrato sem revestimento, apresentou uma microdureza na ordem de 420 HV.

Figura 31 – Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Aspersão HVOF de NiCr



Fonte: o Autor.

O último revestimento testado foi depositado no substrato de metal seguindo a “ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” – conforme os estudos de Kayaba *et al.* (1986) – a uma temperatura ambiente de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ , e a umidade relativa do ar era  $\leq 70\%$ . O método de deposição utilizado foi a soldagem a arco de gás tungstênio (GTAW). O arame utilizado foi o NANOSTEEL®. Como o revestimento anterior este também apresenta elevados índices de Fe e Cr, seguindo a mesma justificativa de incrementar a resistência a abrasão e ao impacto. Também como no revestimento anterior, atrela-se o Al a formação de aluminetos para aumentar a resistência ao desgaste e estruturalmente. O Si eleva a resistência ao desgaste através de sua dissolução na ferrita, aumentando sua dureza. Tanto o Si e quanto o Mn foram utilizados para aumentar a resistência e a dureza deste revestimento. De acordo com Qincong Liu *et al.* (2023), a adição do elemento Mn à camada de liga de revestimento promove o refinamento da estrutura eutética em pequenos blocos, o que aumenta a tenacidade da camada de liga de revestimento. A presença de Nb no revestimento propicia a formação de carbeto na microestrutura do revestimento, o que contribui para a maior resistência a abrasão (SHA LIU *et al.*, 2023). A tabela 7 abaixo apresente a composição química do revestimento realizado com este arame.

Tabela 7 - Composição Química Obtida por FRX do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb

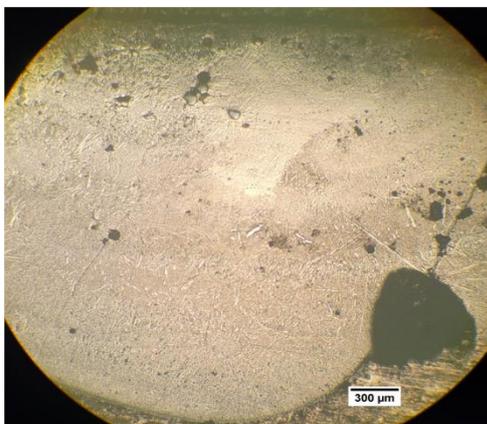
Elemento	Percentual em Massa (%)
	Revestimento
Fe	73,375
Cr	14,574
Al	4,702
Nb	2,943
Mo	2,314
Si	0,557
Mn	0,369

Fonte: o Autor.

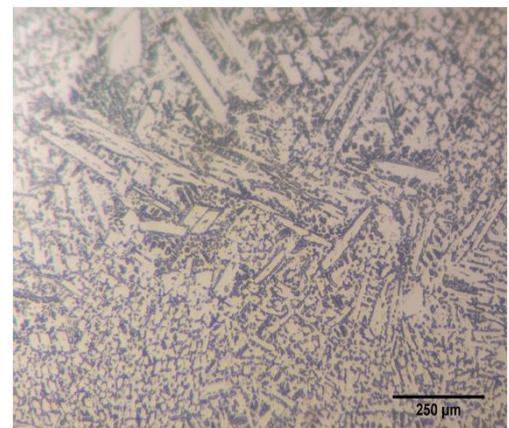
A microscopia transversal – figura 32(a) – mostra que o revestimento apresentou uma camada com grande variação de espessura. A presença de porosidades também pode ser observada, além de uma coloração diferente entre a parte superior e inferior do revestimento – provenientes de etapas de solidificação diferentes do revestimento. O revestimento também apresentou uma microestrutura acicular evidenciada pelas linhas mais claras. Observa-se também na interface revestimento/substrato a presença de poro da ordem de 500  $\mu\text{m}$ , demonstrando um problema no processo de aplicação deste na fusão do metal de adição.

Na microscopia de 600X – figura 32 (b) – pode-se observar uma matriz predominantemente ferrítica-martensítica. Observa-se uma variação no tamanho dos grãos, sendo possivelmente provenientes do aquecimento gerado pelo processo de solda.

Figura 32 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb: a) em corte transversal, e b) ampliação 600X



a)



b)

Fonte: o Autor.

O revestimento aplicado resultou em uma topografia desigual formada durante o processo de deposição por soldagem, levando a uma rugosidade superficial maior que a do substrato. A tabela 8 apresenta os resultados das medições de rugosidade de espessura de camada do revestimento.

Tabela 8 - Rugosidade e espessura de camada das amostras do revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb

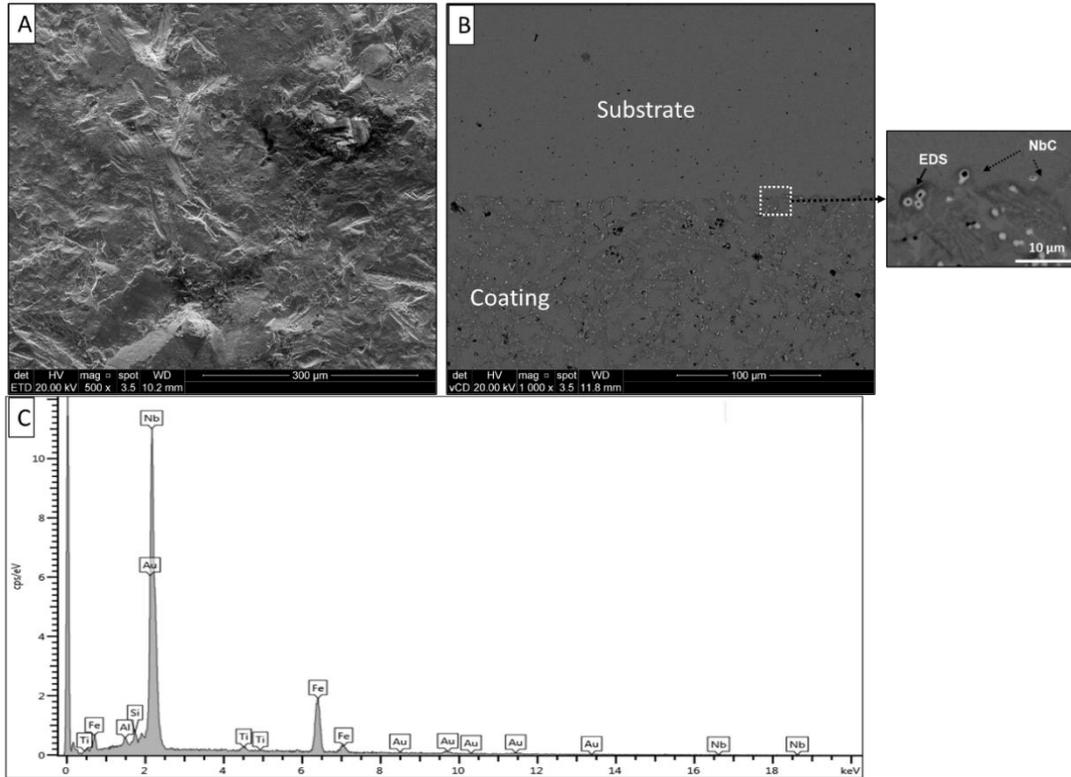
<b>Amostra</b>	<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Rz (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<i>Substrato</i>	$0,56 \pm 0,05$	$4,30 \pm 0,60$	****
<i>Revestimento</i>	$2,40 \pm 0,20$	$14,00 \pm 2,00$	$2300 \pm 500$

Fonte: o Autor.

A rugosidade média (Ra) apresentou uma média de  $2.40 \pm 0,20$ . Já a rugosidade média parcial (Rz) teve valor médio de  $14,00 \pm 2,00\mu\text{m}$ . Estes dados demonstram uma elevação na rugosidade da superfície do revestimento quando comparado com a rugosidade superficial do substrato, tanto para Ra quanto para Rz.

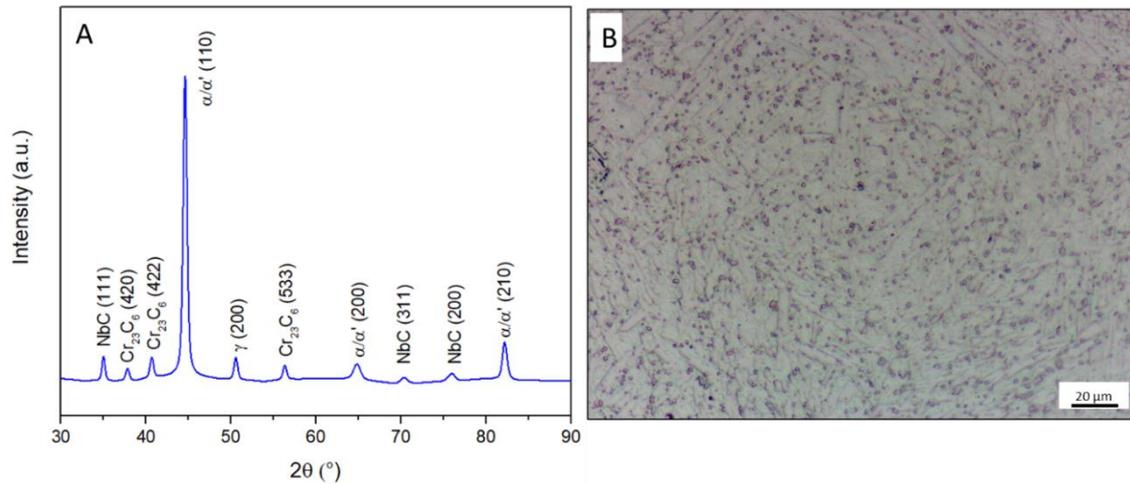
A figura 32B mostra a imagem da seção transversal da amostra de aço com o revestimento. Notavelmente, o revestimento tem diferentes fases. Portanto, o revestimento da microestrutura não é homogêneo. Além disso, destacam-se as fases com coloração clara, geralmente em formato circular. A análise EDS (Figura 33C) detectou a presença de Nb nessas regiões. A análise da microestrutura, realizada por DRX (Figura 34), confirmou a presença de NbC, como apontado pelos estudos de Li *et al.* (2020). Devido à sua alta dureza e excelente resistência ao desgaste, a aplicação de NbC em materiais compósitos de matriz ferrítica foi estudada por Li *et al.* (2015) e Liu *et al.* (2016). Sabe-se que o NbC possui densidade semelhante à matriz de ferro dos revestimentos, o que pode promover a distribuição uniforme do NbC (HUANG, 2008). Além disso, a morfologia e a distribuição encontradas (distribuídas uniformemente e não concentradas nos contornos de grão) favorecem a resistência ao desgaste desses revestimentos (ZHAO, 2018).

Figura 33 – Imagem Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura – Morfologia do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb: A) Topo, e B) Transversal



Fonte: o Autor.

Figura 32 - Análise DRX do Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb



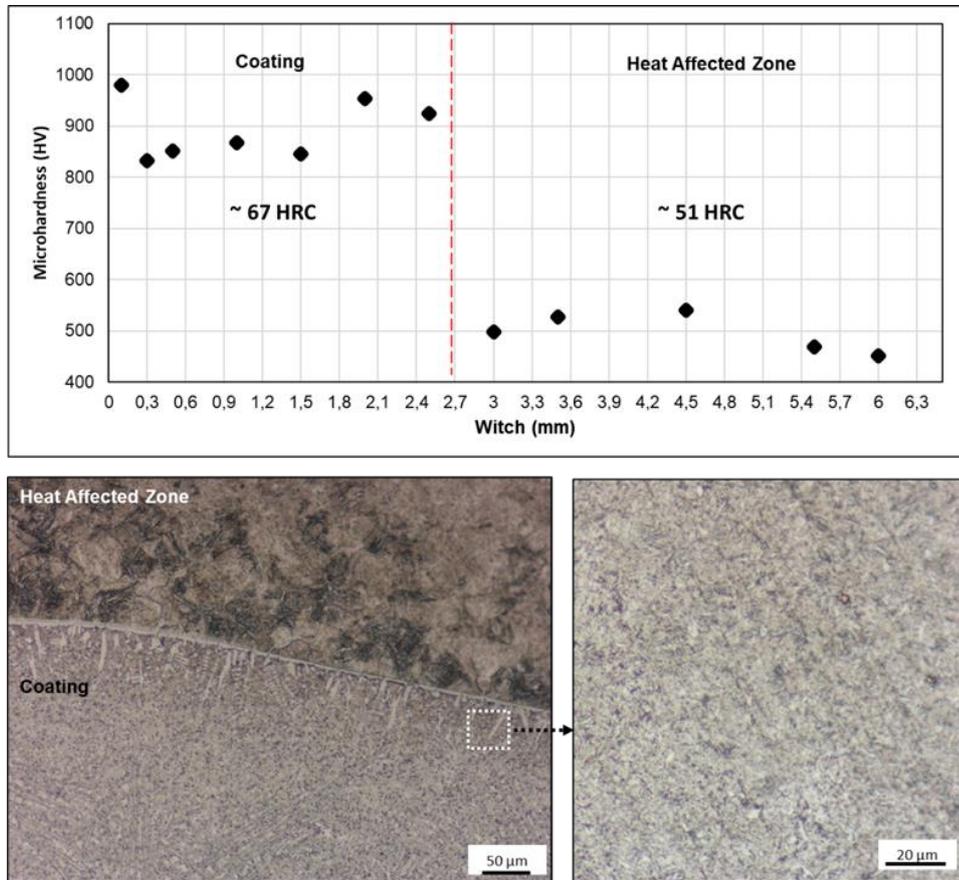
Fonte: o Autor.

Além das fases associadas à matriz ferrítica – martensita ( $\alpha'$ ) e austenita retida ( $\gamma$ ) – as quais Li *et al.* (2020) também relata em seus estudos – como mostra a Figura 33B, também foi detectada a fase metaestável  $Cr_{23}C_6$ , mencionada por Gholipour *et al.* (2011) em sua pesquisa. A precipitação de carboneto de cromo se desenvolveu devido à taxa de resfriamento das soldas. Essa formação ocorre especificamente devido à alta entrada de calor nas zonas de fusão e

afetadas pelo calor, que são suscetíveis à formação de carbonetos de cromo. De acordo com Sivalingam *et al.* (2020), a entrada de calor é contínua e alta durante o processo GTAW. Segundo Sivalingam *et al.* (2020), sabe-se que o surgimento dessas fases, principalmente se estiverem localizadas no contorno de grão, pode ser responsável pela fragilização e aparecimento de trincas na região da solda. No entanto, alguns artigos relatam que os carbonetos de Cr ao longo do limite de grão podem impedir a difusão de Cr da matriz. Assim, a precipitação de carbonetos de Cr pode aumentar a resistência à corrosão sob tensão, como visto por Jeng *et al.* (2007) em sua pesquisa.

A figura 35 apresenta o perfil de dureza e a análise metalográfica das amostras na região de transição entre o revestimento e o substrato. O revestimento tinha uma dureza de aproximadamente 1000 HV (~67 HRC), o que concorda com as fases detectadas por DRX. A zona afetada pelo calor do substrato (HAZ) tinha uma dureza de aproximadamente 500 HV (~51 HRC). O mesmo efeito do HVOF sobre a microdureza no substrato é observado aqui com o quanto ao valor da dureza do substrato em maiores profundidades, baixando somente perto de 6mm da superfície. Além disso, embora o difratograma não tenha detectado a formação de Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, os trabalhos de Jha *et al.* (2003) e Berns *et al.* (1997) que analisaram revestimentos formados por soldagem com composição química semelhante indicam a formação desta fase, o que pode contribuir para o aumento da dureza do revestimento. Além da alta dureza do revestimento formado, deve-se ressaltar que a dureza da ZAC, formada por um predominantemente bainítico, pode contribuir para o aumento da resistência ao desgaste das amostras.

Figura 35- Perfil de Dureza da Amostra Com Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb

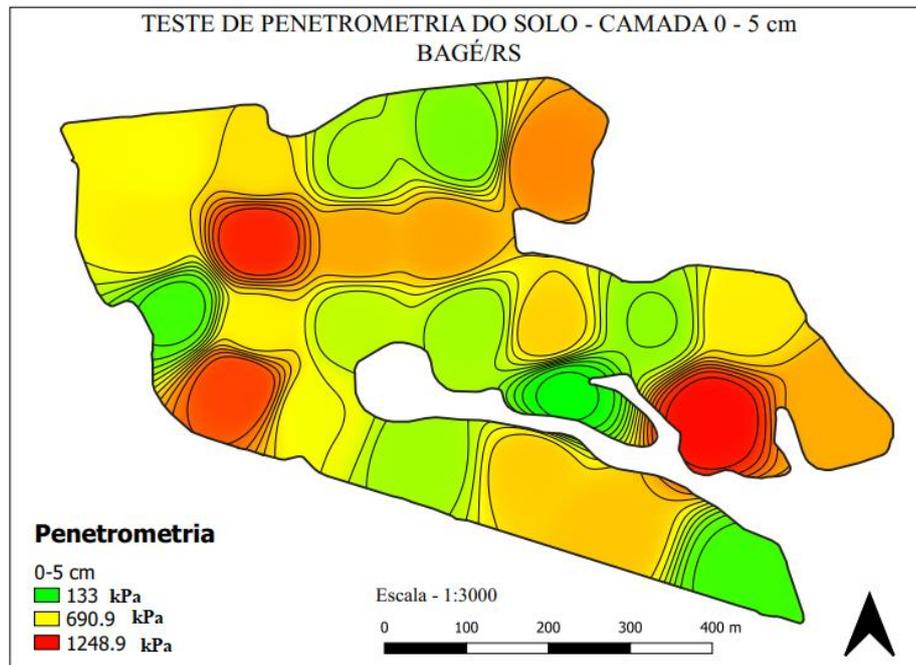


Fonte: o Autor.

## 4.2 Análises de Solo

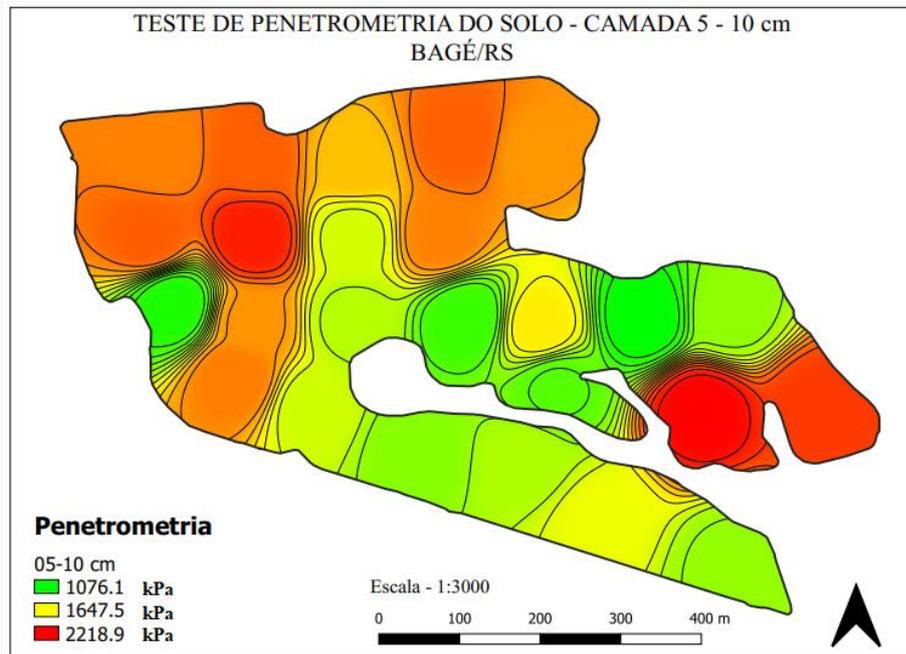
Conforme mencionado, as análises de solo realizadas servem para controlarmos a variável solo no teste in situ realizado. Para isso foram realizadas as análises físicas do solo e de compactação. As figuras 36 a 41 apresentam os valores obtidos através do ensaio de penetrometria realizado a fim de verificar o nível de compactação do solo. Cada figura apresenta um gráfico da área de teste com os valores da resistência a penetração do solo encontrados na faixa de profundidade avaliada, sendo eles de 0 a 5 cm, de 5 cm a 10 cm, de 10 cm a 15 cm, de 15 cm a 20 cm, de 20 cm a 25 cm e de 25 cm a 30 cm.

Figura 36 – Gráfico de Penetrometria da área de teste em 00-05 cm de profundidade



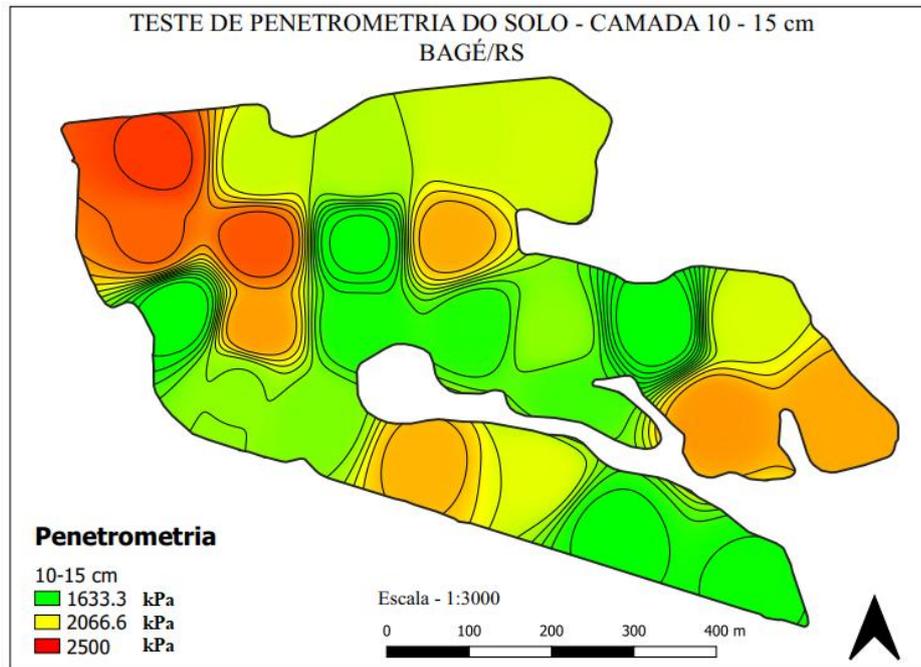
Fonte: o Autor.

Figura 37 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 05-10cm de profundidade



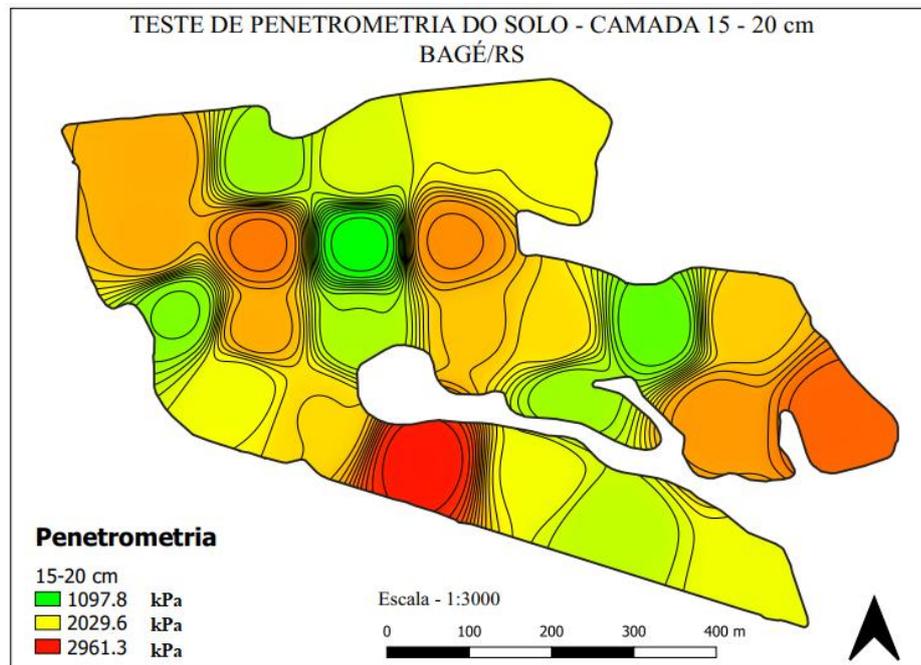
Fonte: o Autor.

Figura 38 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 10-15cm de profundidade



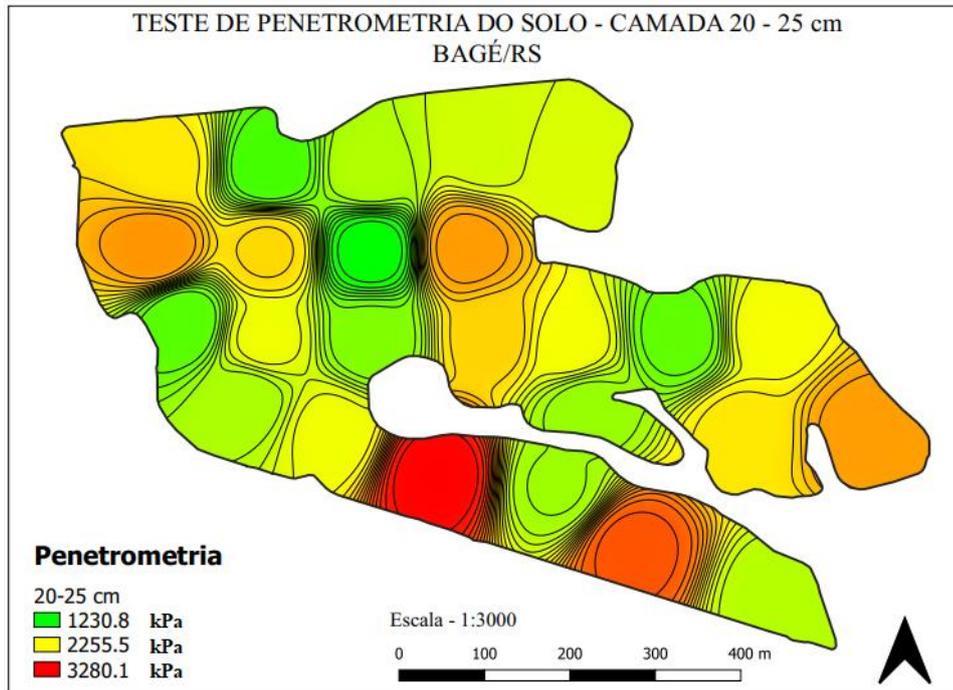
Fonte: o Autor.

Figura 39 – Gráfico de Penetrometria da área de teste em 15 – 20cm de profundidade



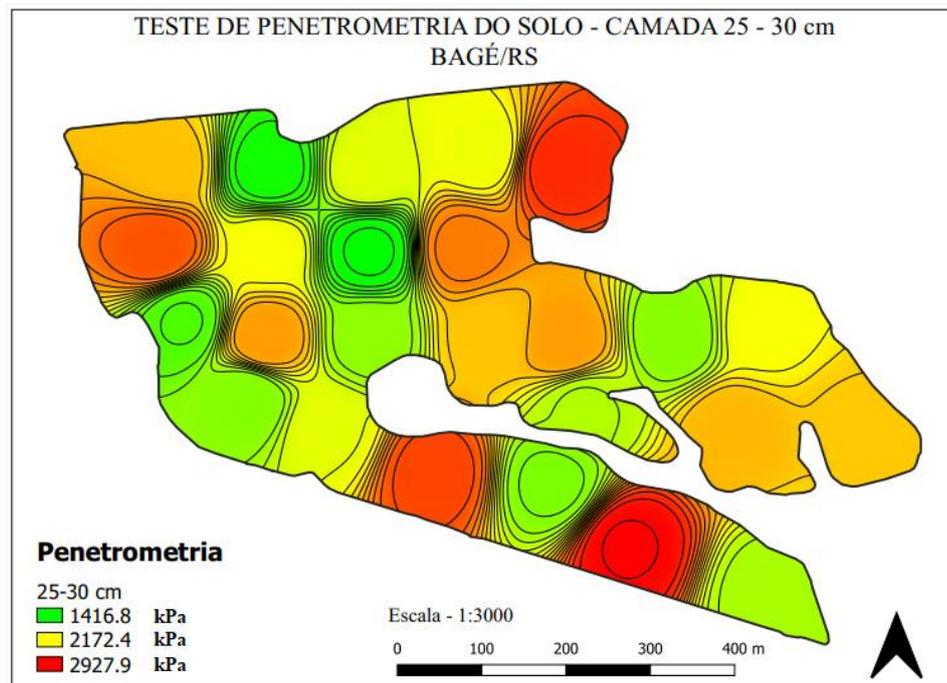
Fonte: o Autor.

Figura 40 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 20-25cm de profundidade.



Fonte: o Autor.

Figura 41 - Gráfico de Penetrometria da área de teste em 25-30cm de profundidade.



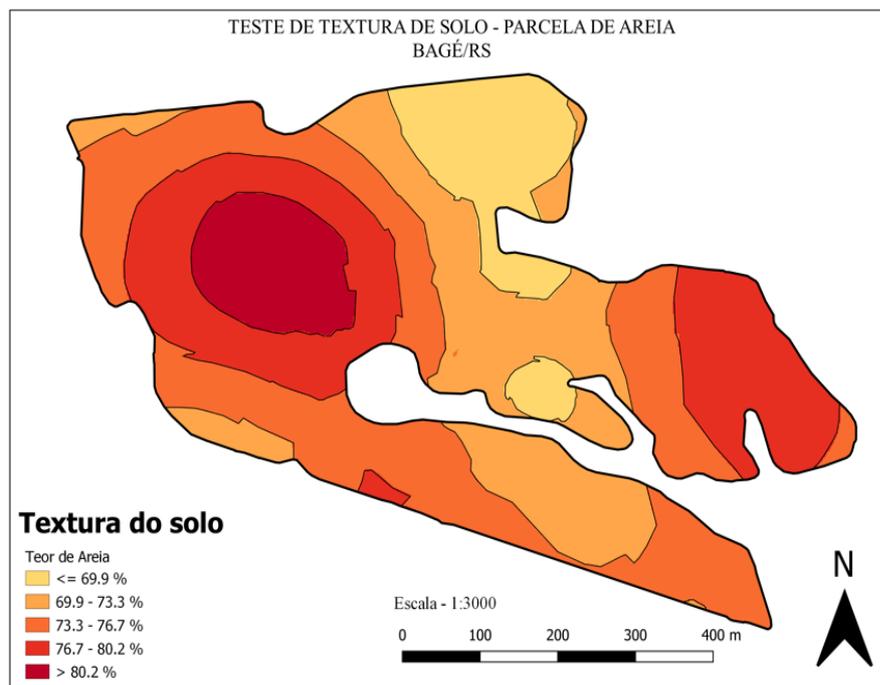
Fonte: o Autor.

Através dos gráficos cima podemos observar que o solo da área de teste estava altamente compactado, apresentando níveis de compactação desde a camada superficial de profundidade de 0 a 5 cm – sendo o valor máximo encontrado de 1,2489 MPa – até a camada subsuperficial de 25 cm a 30 cm – onde encontrou-se o valor máximo de 2,9219 MPa. Observamos que os resultados encontrados vêm ao encontro da pesquisa de Bertollo e Levien (2019) onde estes relatam que as camadas mais densas são localizadas nas regiões mais profundas do perfil do solo.

Observou-se também que a área não apresenta uma compactação homogênea em cada faixa de profundidade avaliada, tendo em uma mesma faixa de profundidade regiões de diferentes níveis de compactação – fato este que Bertollo e Levien (2019) se deve as fendas de encolhimento que canais formados pela fauna do solo, crescimento radicular de culturas ou vegetação anteriormente cultivada.

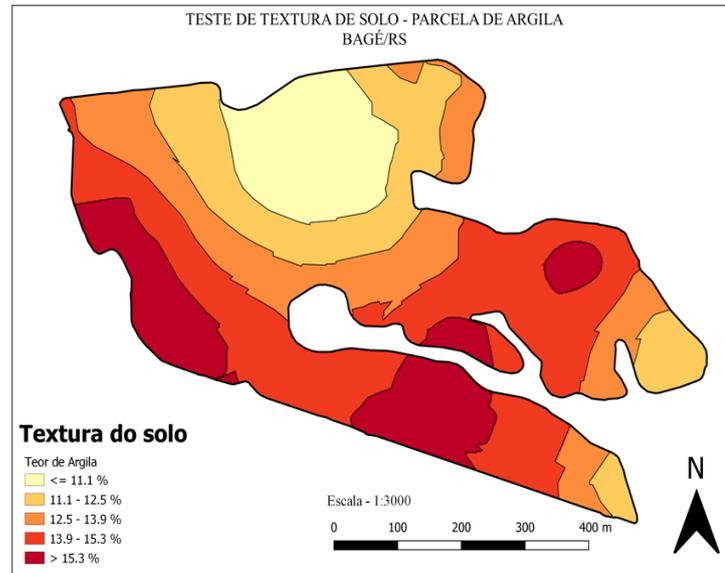
Além da compactação do solo, outro aspecto de importância para análise do desgaste das ponteiros sulcadoras foi a análise física do solo. As figuras 42 a 44 apresentam os percentuais da textura do solo encontrados através das análises laboratoriais de caracterização física do solo. O resultado das análises físicas do solo apresentou um solo predominantemente arenoso – em torno de 80% da área de teste.

Figura 42 - Gráfico de Textura do solo – Teor de Areia



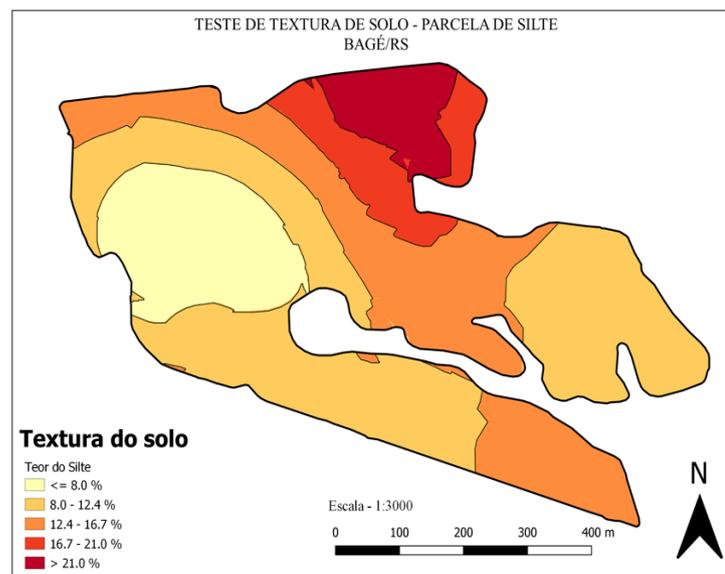
Fonte: o Autor.

Figura 43 – Gráfico de Textura do solo – Teor de Argila



Fonte: o Autor.

Figura 44 - Gráfico de Textura do solo – Teor de Silte.



Fonte: o Autor.

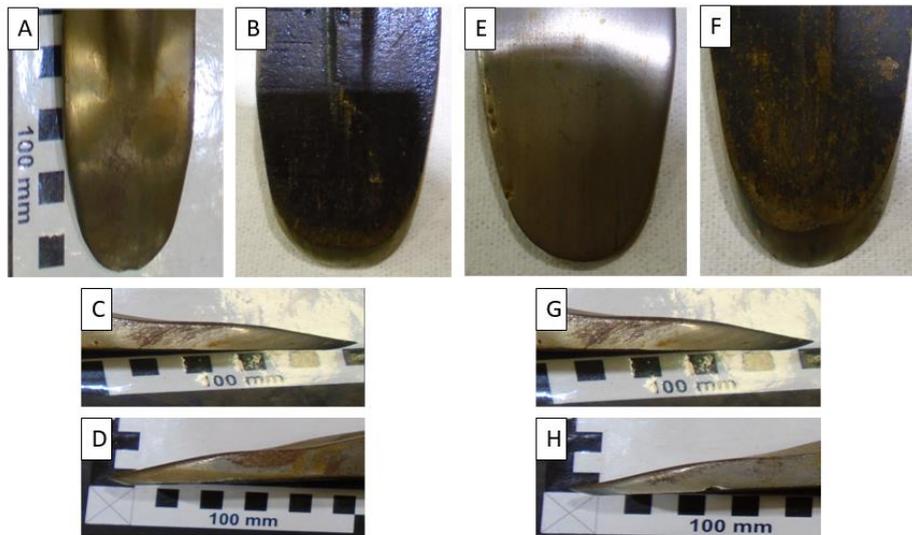
Os dados encontrados tanto pelos ensaios de penetrometria quanto pela análise física do solo demonstram que a área em que os testes foram realizados possui um alto impacto no processo de desgaste das peças, pois trata-se de um solo predominantemente arenoso e altamente compactado. Owsiak em 1997 realizou uma pesquisa, onde este baseado nos resultados obtidos em campo, conclui que: que no solo compactado o desgaste foi aproximadamente 31% maior do que o observado no solo solto; o desgaste no solo arenoso foi aproximadamente 37% maior do que o verificado no solo argiloso.

### 4.3 Resultados após ensaio de campo

Nesta seção serão apresentados os resultados que as amostras dos revestimentos apresentaram após a execução dos testes a campo, tanto em questão dos aspectos visuais com a modificações das geometrias destas, quanto os ensaios laboratoriais realizados pós testes em campo como rugosidade, espessura de camada e microscopias das superfícies.

Quanto ao aspecto visual das amostras sem revestimento, a figura abaixo demonstra o aspecto da superfície de topo, posterior, lateral direita e lateral esquerda das amostras, após 7,5 hectares de teste (Figura 45 A, B, C, D), e após 15 hectares de teste (Figura 45 E, F, G, H). Pode-se notar que as amostras tiveram suas arestas arredondadas, com perda de material em suas laterais gerando um afunilamento destas e perda de material em seu comprimento. Como pode ser observado a perda de material foi progressiva conforme a quantidade de área testada, sendo as mudanças nas geometrias mais evidentes na amostra removida do teste após 15 há (Figura 45 E, F, G, H). Na figura 45 (E) e na figura (H) fica mais evidente o arrancamento de material da amostra devido as crateras próximas as arestas da amostra, bem como algumas ranhuras na superfície da amostra causadas pela ação abrasiva.

Figura 45 - Aspecto visual após os testes a campo – amostra sem revestimento.



Fonte: o Autor.

A tabela 9 abaixo apresenta as rugosidades média ( $R_a$ ) e a rugosidade média parcial ( $R_z$ ) obtidas após os testes a campo.

Tabela 9 - Rugosidade e espessura de camada das amostras sem revestimento

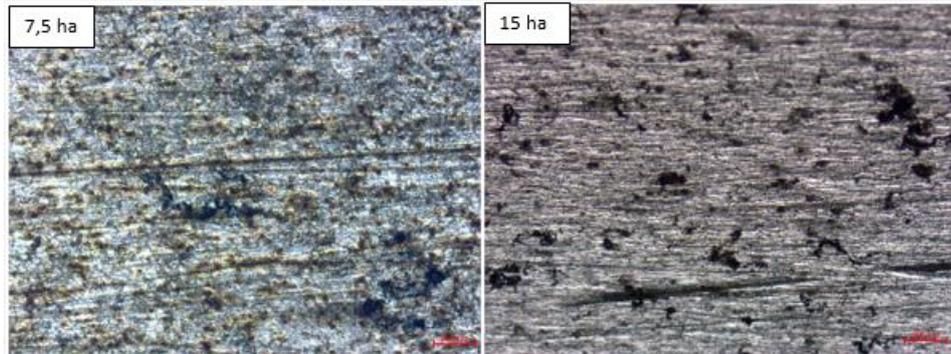
Amostra		Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Ponteiras de hastes subsoladoras retiradas após subsolar 7,5 hectares	sem revestimento	$0,564 \pm 0,02$	$4,301 \pm 0,49$
Ponteiras de hastes subsoladoras retiradas após subsolar 15 hectares	sem revestimento	$0,513 \pm 0,02$	$5,342 \pm 0,80$

Fonte: o Autor.

Observa-se que as rugosidades da amostra após o teste não sofreram alterações significativas pois a rugosidade média antes do teste a campo foi de  $0,56 \pm 0,05 \mu\text{m}$  e a rugosidade média parcial (Rz) de  $4,30 \pm 0,6 \mu\text{m}$ . Houve pouca variação entre a rugosidade média (Ra) medida na amostra sem revestimento retirada em 7,5 hectares e 15 hectares, onde o valor de da rugosidade média (Ra) diminui  $0,051 \mu\text{m}$  entre elas, porém quando avaliado a rugosidade média parcial (Rz) este valor aumenta  $1,041 \mu\text{m}$  entre a amostra removida em 7,5 hectares e a 15 hectares. Isto demonstra que mesmo a rugosidade média tendo uma variação pequena entre as amostras, houve um aumento nos tamanhos dos picos e vales gerados pelo acentuado desgaste na amostra com 15 hectares de teste.

Este fato pode ser correlacionado com as imagens das superfícies das amostras obtidas pelo microscópio óptico onde para a amostra removida com 7,5 hectares de teste nota-se a presença de algumas micro crateras, sulcos e ranhuras em toda a superfície das amostras – figura 46 (a) - que ganham uma profundidade maior com o aumento da quantidade de área testada e uma quantidade maior de micro crateras – figura 45 (b), corroborando o aumento da rugosidade média parcial (Rz).

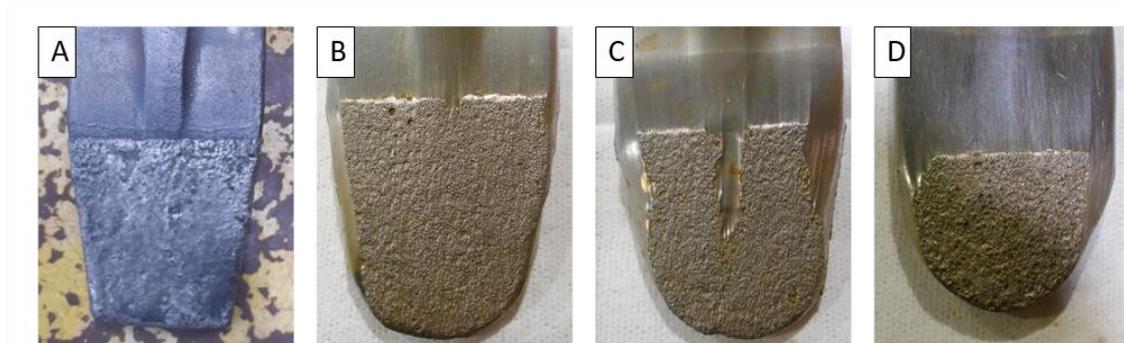
Figura 46- Imagem Obtida Por Microscopia Óptica de Topo – amostra sem revestimento.



Fonte: o Autor.

Quanto ao aspecto visual em relação ao revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC), a figura 47 abaixo demonstra o aspecto da superfície de topo das amostras antes de serem submetidas ao teste (A), após 7,5 hectares de teste (B), após 15 h a de teste (C) e após 30 hectares (D). Pode-se notar que as amostras tiveram suas arestas arredondadas, com perda de material em suas laterais gerando um afunilamento destas e perda de material em seu comprimento. Como pode ser observado a perda de material foi progredindo conforme a quantidade de área testada. Na figura 47(C) fica mais evidente o arrancamento tanto do substrato quanto de revestimento, bem como algumas ranhuras na superfície da amostra causadas pela ação abrasiva.

Figura 43 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)

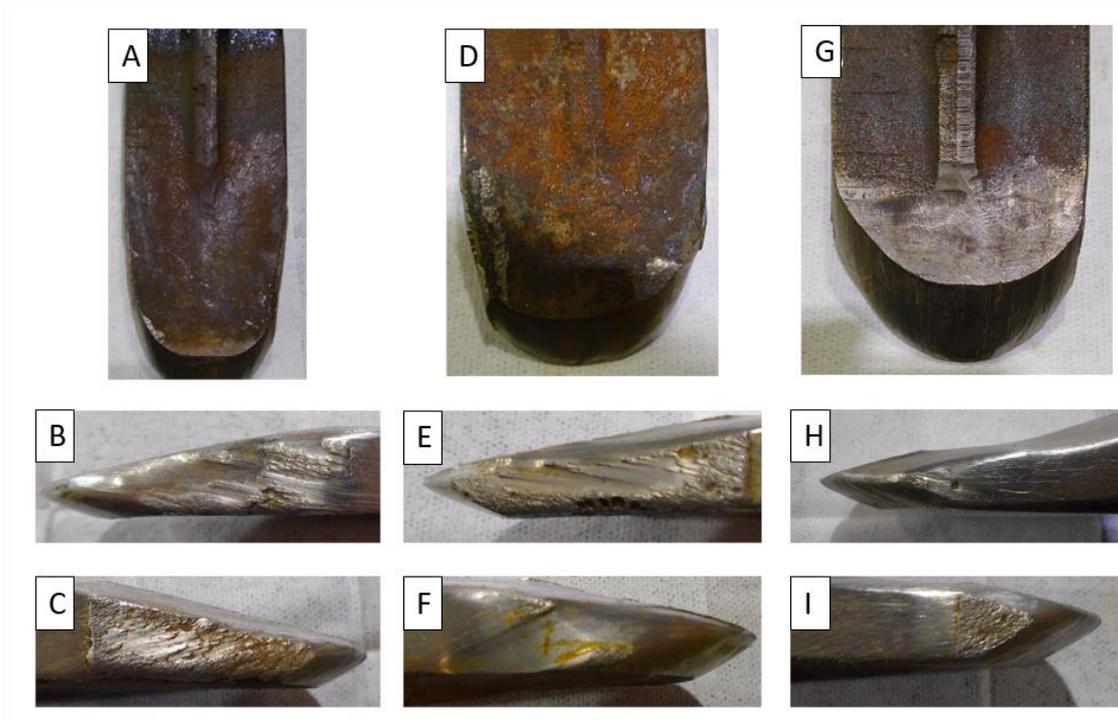


Fonte: o Autor.

A figura 48 abaixo também é referente ao revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC), porém demonstrando os aspectos visuais de uma perspectiva posterior (A, D, G) e laterais direita (B, E, H) e esquerda (C, F, I). Como na superfície posterior das amostras não foi aplicado revestimento este foi desgastando de forma mais acentuada que as demais revestidas. Observa-

se também o afinamento desta região dando um aspecto de gume semelhante ao de facas e navalhas. Em ambas as perspectivas laterais direita e esquerda é possível verificar o arrancamento de revestimento e do material do substrato. Assim como mencionado em relação a superfície de topo, estas superfícies também tiveram um desgaste progressivo, como podemos notar na figura abaixo, sendo 7,5 hectares (A, B, C), 15 hectares (D, E, F) e 30 hectares (G, H, I).

Figura 48 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento composto (40% NiCrBSi e 60% WC)



Fonte: o Autor.

A tabela 10 abaixo apresenta as rugosidades média ( $R_a$ ) e a rugosidade média parcial ( $R_z$ ) obtidas após os testes a campo das superfícies de topo.

Tabela 10 - Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC)

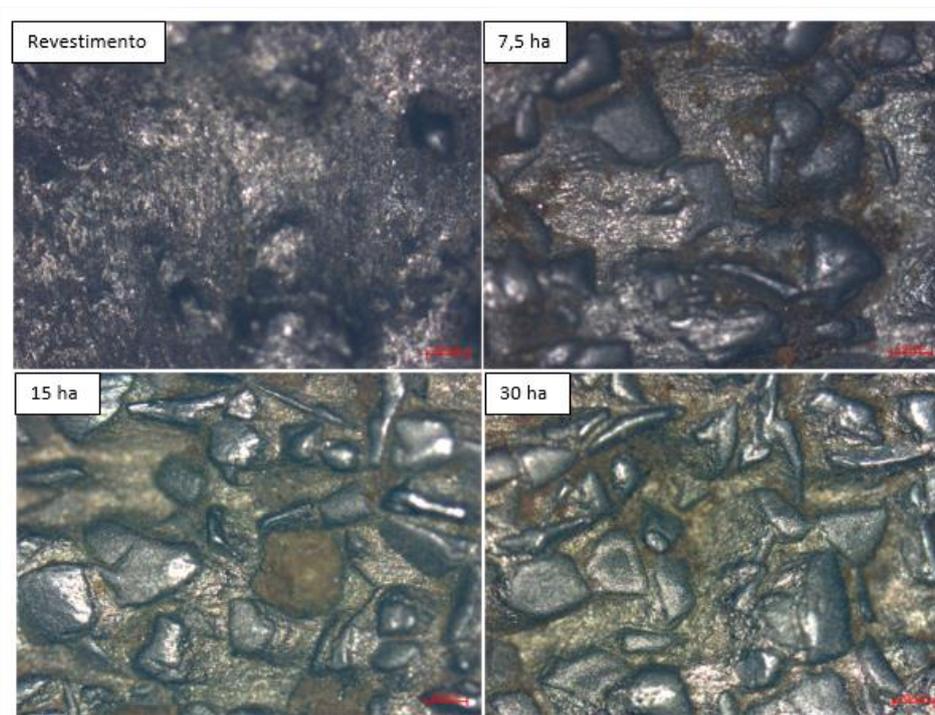
<b>Amostra</b>	<b>Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Rz (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 7,5 hectares	14,0 $\pm$ 3,0	59,70 $\pm$ 10,35
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 15 hectares	12,597 $\pm$ 0,28	60,035 $\pm$ 3,82
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retiradas após subsolar 30 hectares	13,349 $\pm$ 1,27	62,713 $\pm$ 3,92

Fonte: o Autor.

As rugosidades das amostras após o teste sofreram alterações significativas pois a rugosidade média antes do teste a campo foi de  $5,99 \pm 1,68 \mu\text{m}$  e a rugosidade média parcial (Rz) de  $24,52 \pm 5,45 \mu\text{m}$ . Fato este que pode ser relacionado a remoção de boa parte da camada da matriz do material compósito, deixando desta maneira elevações superficiais geradas pelos grãos de carbeto de tungstênio sinterizados. Isto pode ser observado quando comparamos as microscopias ópticas da superfície do revestimento sem passar pelos testes a campo e após transcorrido 7,5 hectares. Em comparação com as rugosidades médias (Ra) da amostra sem revestimento houve uma variação mais significativa entre as rugosidades médias (Ra) medidas nas amostras em 7,5 hectares, 15 hectares e 30 hectares, onde o valor de da rugosidade média (Ra) diminui  $1,403 \mu\text{m}$  entre as amostras 7,5 hectares e 15 hectares, e volta a aumentar  $0,752 \mu\text{m}$  entre as amostras 15 hectares e 30 hectares. Porém quando avaliado a rugosidade média parcial (Rz) este valor segue em aumento crescente ao encontro do aumento da quantidade de hectares testados, demonstrando novamente que houve um aumento nos tamanhos dos picos e vales agravados pelo desgaste na amostra com 15 hectares de teste e com 30 hectares de teste.

Como comentado anteriormente este fato pode ser correlacionado com as imagens das superfícies das amostras obtidas pelo microscópio óptico onde para a amostra do revestimento sem passar pelos testes a campo vemos grande parte da matriz ainda envolvendo os grãos de carbeto de tungstênio sinterizados e em 7,5 hectares de teste nota-se uma quantidade menor da matriz do revestimento compósito. Esta remoção da matriz do material compósito se agrava conforme aumenta a quantidade de hectares de teste como podemos ver na figura 49 abaixo. Deformações e desgastes da matriz podem ser vistos pelas zonas em marrom ao redor dos grãos de carbeto de tungstênio sinterizados, que progride para craterações e conseqüente arrancamento dos grãos de carbeto de tungstênio, colaborando com o aumento da rugosidade média parcial ( $R_z$ ).

Figura 49 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC).



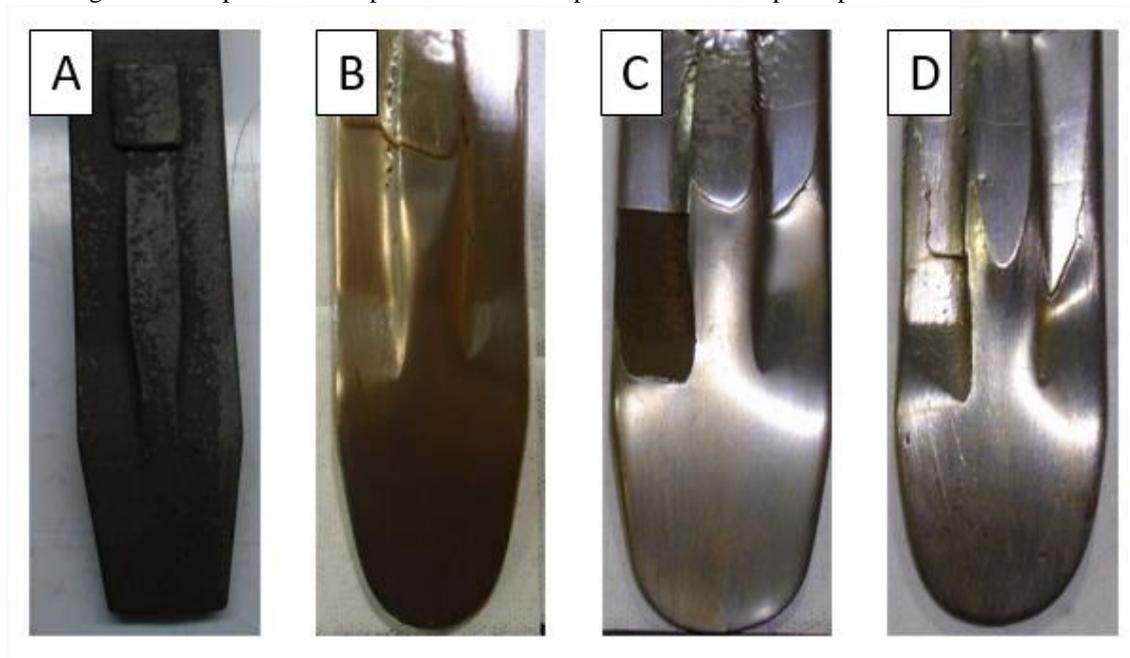
Fonte: o Autor.

Outra forma de verificar o desgaste do revestimento aplicado foi através da medição da espessura de sua camada. Foram realizadas 40 medições da espessura de camada do revestimento em uma amostra que não passou pelos testes a campo e na amostra com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retirada após subsolar 30 hectares, onde constatou-se que o revestimento possui variações ao longo de sua espessura. A grande variação da camada do revestimento é justificada pelo método de aplicação totalmente manual, onde este

é aplicado através de uma espátula. Fez-se necessário calcular a média das espessuras medidas, o que correspondeu a um valor de camada média de 518,5  $\mu\text{m}$  para amostra que não passou pelos testes a campo e 364,58  $\mu\text{m}$  na amostra com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) retirada após subsolar 30 hectares.

Em relação ao aspecto visual em relação ao revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr, a figura 50 abaixo demonstra o aspecto da superfície de topo das amostras antes de serem submetidas ao teste (A), após 7,5 há de teste (B), após 15 h a de teste (C) e após 30 hectares (D). Pode-se notar que as amostras revestidas por aspersão HVOF de Ni-Cr assim como as amostras não revestidas e as revestidas com revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) tiveram suas arestas arredondadas, com perda de material em suas laterais gerando um afunilamento destas e perda de material em seu comprimento. Pode-se constatar através dos relevos de diferentes planos de profundidade nas figuras 50 B C e D que houve deslocamento de revestimento em todas as amostras. Na figura 50 (C) fica mais evidente o deslocamento com arrancamento de parte do substrato por ter gerado uma região mais profunda que as demais partes da superfície, já que esta área não chegou a ficar polida como as demais.

Figura 50 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr

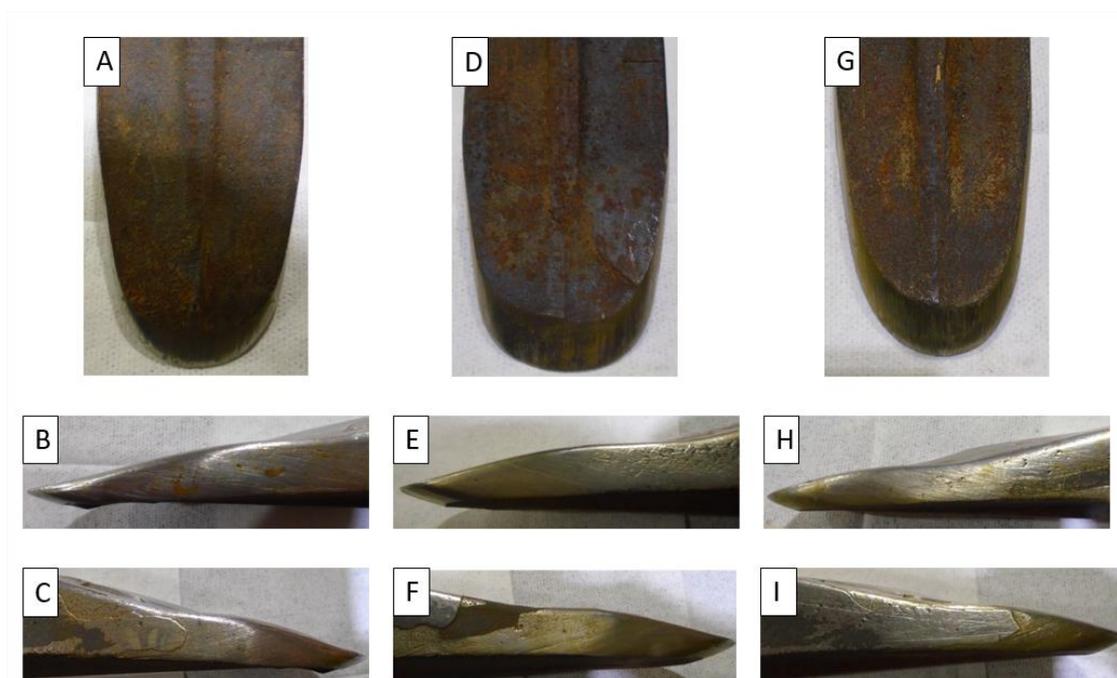


Fonte: o Autor.

A figura 51 abaixo referente ao revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr, demonstrando os aspectos visuais de uma perspectiva posterior (A, D, G) e laterais direita (B, E, H) e esquerda (C, F, I). Como na superfície posterior das amostras não foi aplicado

revestimento este foi desgastando de forma mais acentuada que as demais revestidas conferindo um aspecto de gume semelhante ao de facas e navalhas. Na lateral direita das amostras fica evidente as ranhuras e crateras (B, E, H) geradas pela ação do desgaste. Na lateral esquerda das amostras é possível verificar o deslocamento do revestimento e arrancamento do material do substrato através dos diversos relevos em planos de profundidades distintas formados na superfície (C, F, I). Assim como mencionado em relação a superfície de topo, estas superfícies também tiveram um desgaste progressivo, como podemos notar na figura abaixo, sendo 7,5 há (A, B, C), 15 há (D, E, F) e 30 há (G, H, I).

Figura 51 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr



Fonte: o Autor.

A tabela 11 abaixo apresenta as rugosidades média ( $R_a$ ) e a rugosidade média parcial ( $R_z$ ) das amostras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr obtidas após os testes a campo.

Tabela 11- Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr

Amostra	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 7,5 hectares	$0,570 \pm 0,04$	$4,054 \pm 0,09$
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 15 hectares	$0,539 \pm 0,09$	$5,236 \pm 1,10$
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após subsolar 30 hectares	$1,067 \pm 0,07$	$8,046 \pm 0,33$

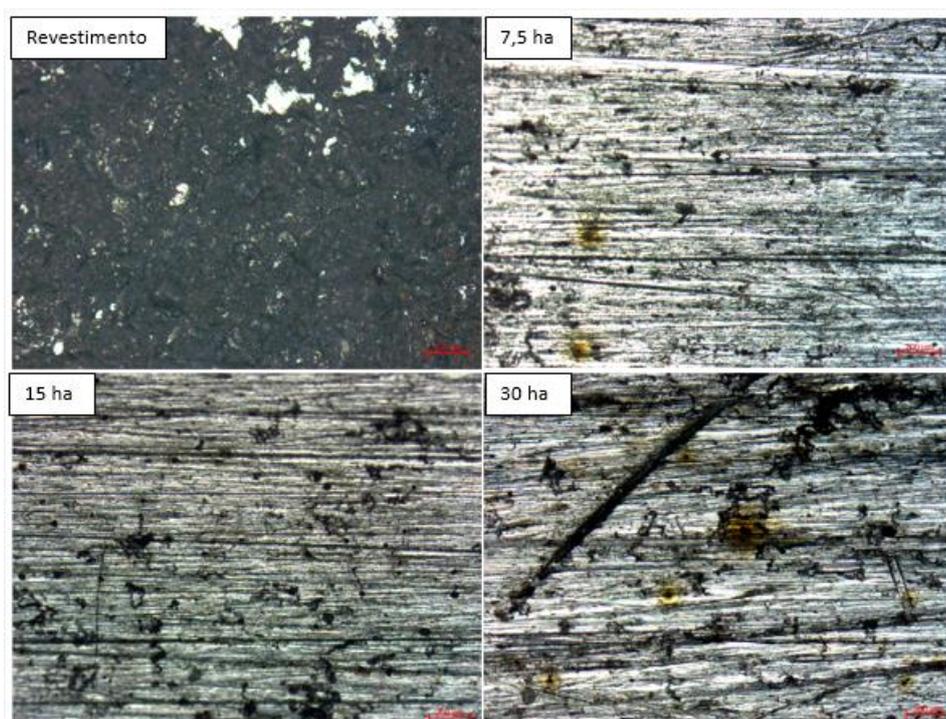
Fonte: o Autor.

As rugosidades das amostras após o teste diminuíram significativamente pois a rugosidade média antes do teste a campo foi de  $7,166 \pm 0,50 \mu\text{m}$  e a rugosidade média parcial (Rz) de  $24,52 \pm 5,45 \mu\text{m}$ . Em comparação com as rugosidades médias (Ra) das amostras não houve uma variação significativa entre as rugosidades médias (Ra) medidas nas amostras em 7,5 hectares e 15 hectares, já entre as amostras de 15 hectares e 30 hectares houve um aumento de  $0,528 \mu\text{m}$ . Quando avaliado a rugosidade média parcial (Rz) este valor segue em aumento crescente ao encontro do aumento da quantidade de hectares testados, ocorreu um aumento nos tamanhos dos picos e vales agravados pelo desgaste na amostra com 15 hectares de teste e com 30 hectares de teste.

O aumento da rugosidade média parcial (Rz) pode ser correlacionada com as imagens das superfícies das amostras obtidas pelo microscópio óptico. No primeiro quadrante da figura 52 abaixo temos a imagem da superfície de topo do revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr sem passar pelos testes a campo. Este apresenta-se intacto, sem presença de ranhuras ou crateras geradas pelo desgaste, já no segundo quadrante da figura 50, em 7,5 hectares de teste nota-se que a superfície da amostra se tornou mais clara e polida com presença de ranhuras e micro crateras. No terceiro quadrante da figura 50, em 15 hectares, a quantidade de ranhuras aumenta

e ganham uma profundidade maior com o aumento da quantidade de área testada e uma quantidade maior de micro crateras, fato este que se intensifica ainda mais na amostra removida com 30 há, conforme observado através do quarto quadrante da figura 52 abaixo. O aumento destes defeitos superficiais e o aumento dos picos e vales destes colaboram com o aumento da rugosidade média parcial (Rz).

Figura 52 - Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – Revestimento por Aspersão HVOF de Ni-Cr



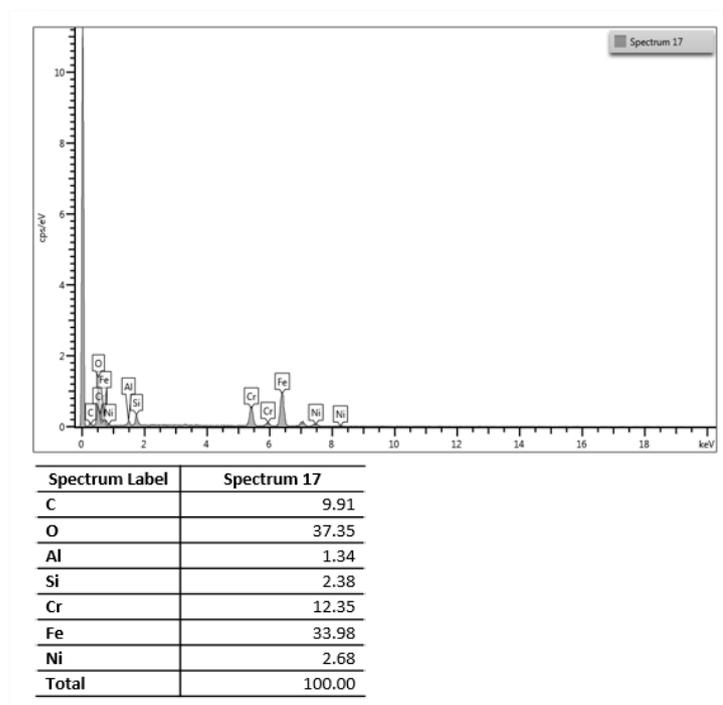
Fonte: o Autor.

Os valores de rugosidade média (Ra) e os valores de rugosidade média parcial (Rz) encontrados após os testes foram muito semelhantes a rugosidade do substrato e das amostras sem revestimento que foram testadas. Fato este que levanta a hipótese de deslocamento do revestimento já nos primeiros hectares de teste e que juntamente com os aspectos visuais das amostras em que estas apresentaram diversos relevos em planos de profundidades distintas formados na superfície contribuem com a hipótese de deslocamento. Soma-se a estas evidências as microscopias da figura acima que são muito semelhantes as microscopias das amostras sem revestimento testadas.

Com todas estas evidências corroborando a hipótese de deslocamento do revestimento fez-se necessário realizar uma análise via EDS da amostra revestida por aspersão HVOF de Ni-Cr sem passar pelos testes a campo e por aspersão HVOF de Ni-Cr coletada após transcorridos

7,5 hectares de teste. A figura 53 abaixo demonstra as diferenças encontradas nas análises EDS das amostras mencionadas acima.

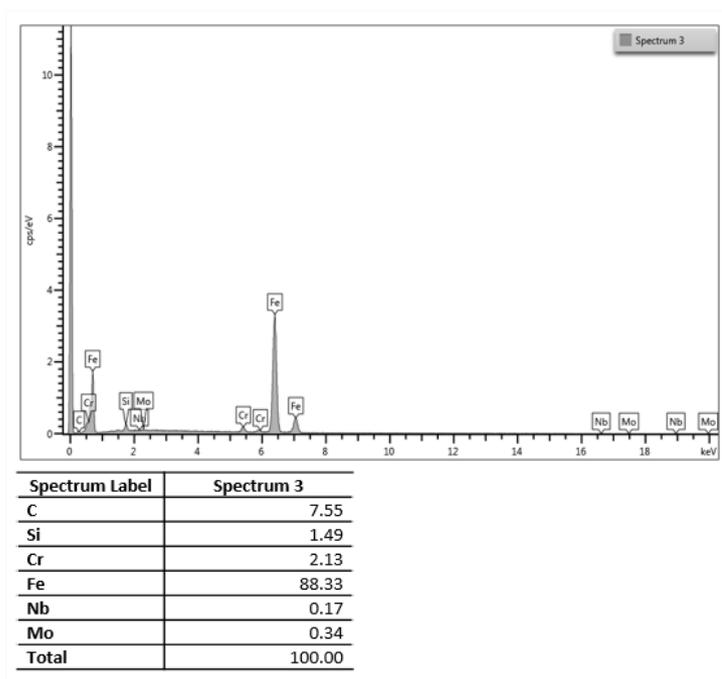
Figura 53 - Análise EDS – Revestimento Por Aspersão HVOF de Ni-Cr Antes dos Testes a Campo.



Fonte: o Autor.

Através da figura 53 acima do EDS podemos notar que os elementos de liga previstos na composição química do revestimento estavam presentes. Já nos resultados de EDS da figura 54 abaixo tanto o Al quanto o Ni são responsáveis por formar respectivamente os aluminetos e os nitretos da estrutura do revestimento não estão presentes. Além disto, outros elementos como o Cr e o Si tiveram seus percentuais de massa reduzidos, enquanto houve um aumento considerável de percentual de massa de Fe.

Figura 54 - Análise EDS – Revestimento Por Aspersão HVOF de Ni-Cr Após dos Testes a Campo.



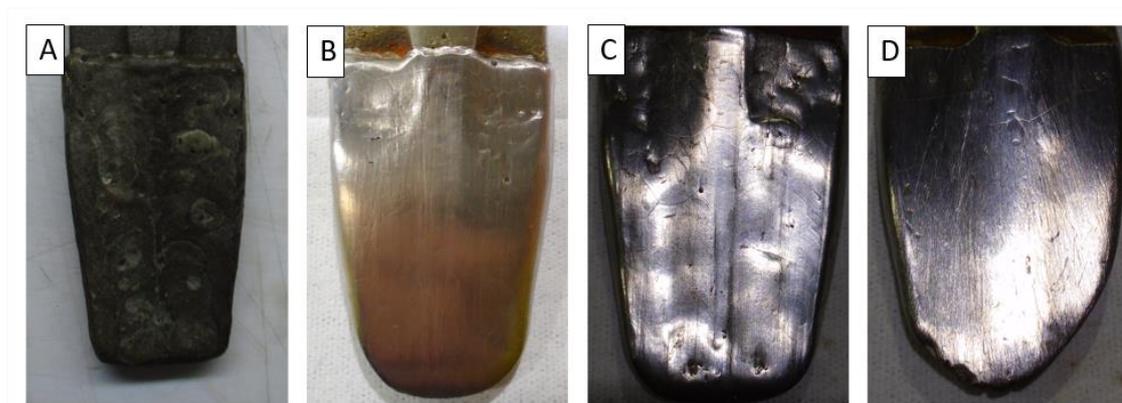
Fonte: o Autor.

O aumento significativo de Fe e a diminuição ou ausência de percentual de massa de outros elementos mencionados anteriormente se aproximam dos valores percentuais de massa dos elementos encontrados na análise de composição química do substrato apresentado na tabela 2, o que fortalece ainda mais a hipótese de deslocamento do revestimento.

Não foi possível realizar uma medição da espessura da camada do revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr retiradas após os testes in situ, pois como podemos verificar tanto pelas análises dos aspectos visuais, rugosidade e microscopias ópticas quanto pelas análises do EDS, a camada foi removida já com 7,5 há de teste.

Quanto ao aspecto visual em relação ao revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb, a figura 55 abaixo demonstra o aspecto da superfície de topo das amostras antes de serem submetidas ao teste (A), após 7,5 há de teste (B), após 15 h a de teste (C) e após 30 há (D). Pode-se notar que assim como as demais amostras, estas também tiveram suas arestas arredondadas, com perda de material em suas laterais gerando um afunilamento destas e perda de material em seu comprimento. Como pode ser observado a perda de material foi progredindo conforme a quantidade de área testada. Na figura 55 (B) fica evidente o aparecimento de trincas no revestimento e pontos de crateração. Na figura 55 (C) observa-se um aumento na quantidade de trincas e craterações.

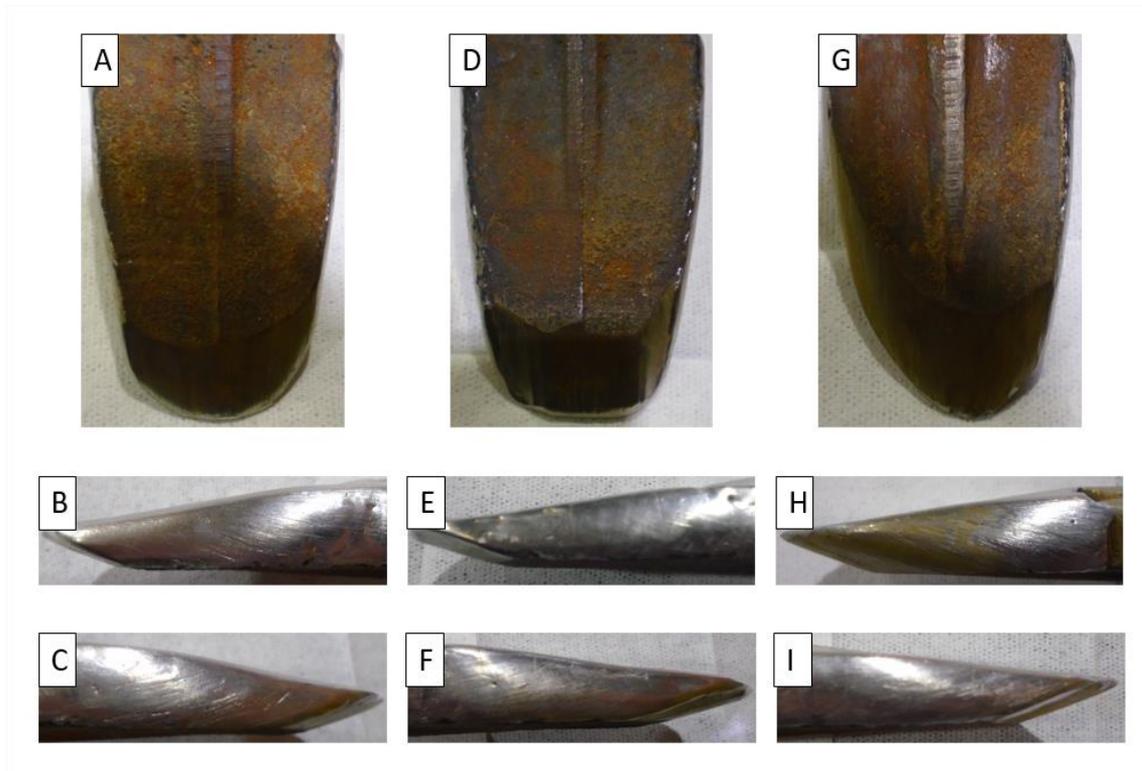
Figura 55 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb



Fonte: o Autor.

A figura 56 abaixo também é referente ao revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb, porém demonstrando os aspectos visuais de uma perspectiva posterior (A, D, G) e laterais direita (B, E, H) e esquerda (C, F, I). Como na superfície posterior das amostras não foi aplicado revestimento este foi desgastando de forma mais acentuada que as demais revestidas. Observa-se também o afinilamento desta região dando um aspecto de gume semelhante ao de facas e navalhas. Em ambas as perspectivas laterais direita e esquerda é possível verificar o arrancamento de revestimento e do material do substrato. Assim como mencionado em relação a superfície de topo, estas superfícies também tiveram um desgaste progressivo, como podemos notar na figura 56 abaixo, sendo 7,5 hectares (A, B, C), 15 hectares (D, E, F) e 30 hectares (G, H, I).

Figura 56 - Aspecto visual após os testes a campo – revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb



Fonte: o Autor.

A tabela 12 abaixo apresenta as rugosidades média ( $R_a$ ) e a rugosidade média parcial ( $R_z$ ) das amostras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb obtidas após os testes a campo.

Tabela 12 - Rugosidade e espessura de camada das amostras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb

Amostra	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 7,5 hectares	$1,512 \pm 0,19$	$9,241 \pm 0,23$
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 15 hectares	$1,210 \pm 0,25$	$7,824 \pm 1,36$
Ponteiras de hastes subsoladoras com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb retiradas após subsolar 30 hectares	$1,581 \pm 0,15$	$8,435 \pm 0,98$

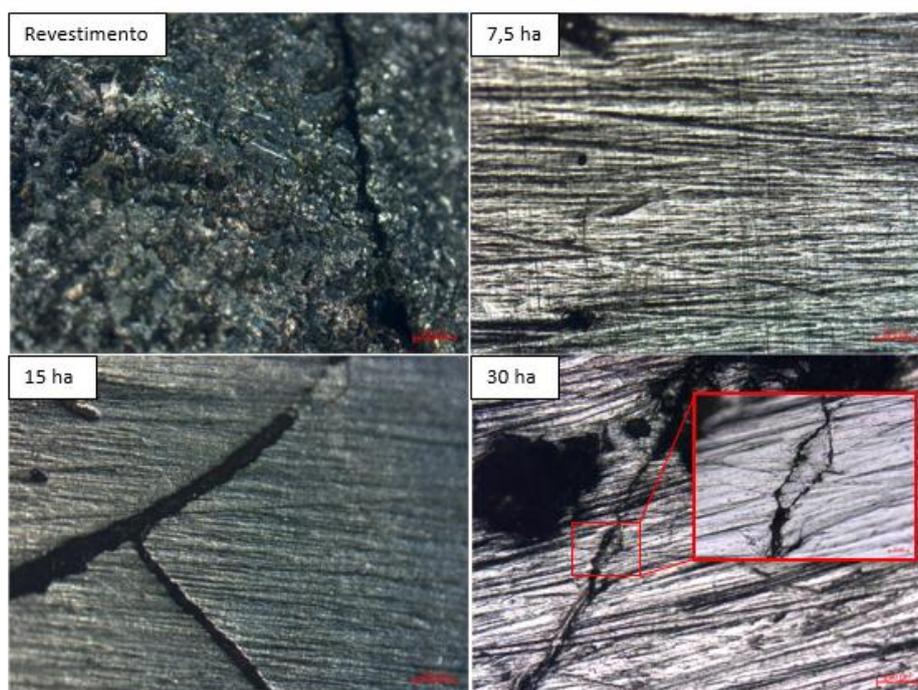
Fonte: o Autor.

As rugosidades da amostra após o teste sofreram alterações onde a rugosidade média antes do teste a campo foi de  $2,4 \pm 0,20 \mu\text{m}$  e a rugosidade média parcial (Rz) de  $14 \pm 2,0 \mu\text{m}$ . Esta mudança nas medidas de rugosidade vem ao encontro da microscopia óptica de topo do revestimento apresentada na figura 57 abaixo, onde a microscopia do primeiro quadrante da imagem referente ao revestimento sem passar pelos testes em campo possui demonstra uma superfície bem rugosa. Já na microscopia do segundo quadrante da figura 57 observa-se a superfície após passar por 7,5 hectares de teste, onde esta aparece em uma tonalidade mais clara e com ranhuras.

Houve pouca variação entre a rugosidade média (Ra) medida na amostra sem revestimento retirada em 7,5 hectares e 15 hectares, onde o valor de da rugosidade média (Ra) diminui  $0,302 \mu\text{m}$  entre elas, e a rugosidade média parcial (Rz) este valor diminuiu  $1,417 \mu\text{m}$  entre a amostra removida em 7,5 hectares e a 15 hectares. Com uma mesma ampliação e escala ao comparar o segundo quadrante da figura 57, referente a amostra removida com 7,5 há com o terceiro quadrante da figura 57, referente a amostra removida com 15 há nota-se que neste último as ranhuras estão mais próximas umas das outras e menos profundas, algo que pode justificar esta pequena queda nas rugosidades desta amostra.

Quando comparadas as rugosidades da amostra removida com 15 hectares e amostra removida com 30 hectares observa-se que a rugosidade média (Ra) volta a subir 0,371  $\mu\text{m}$  e a rugosidade média parcial (Rz) 0,611  $\mu\text{m}$ . Este aspecto também pode ser notado em uma comparação das microscopias ópticas de topo do quarto quadrante da figura 57 abaixo, onde a superfície do revestimento volta a apresentar ranhuras mais separadas e mais profundas do que no terceiro quadrante da mesma figura 57.

Figura 57- Imagem Obtida por Microscopia Óptica de Topo – Revestimento Soldado com Arame Fe-Cr-Nb



Fonte: o Autor.

Ainda referente as microscopias da figura 57 acima podemos notar tanto na amostra do revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb que não passou pelo teste a campo quanto nas demais que passaram, a presença de fendas profundas que em parte podem ter sua origem vinculadas a sobreposição de passes de cordões de solda. Nas microscopias realizadas nas amostras removidas com 7,5 hectares, 15 hectares e 30 hectares vemos a presença de crateras na superfície do revestimento que aumentaram em quantidade e tamanho com o aumento de hectares testados. Outro aspecto a ser observado na microscopia óptica da amostra removida com 30 hectares é a presença de trincas neste como mostrado na ampliação.

Além das análises dos aspectos visuais e dos ensaios laboratoriais, fez-se necessário realizar uma análise quantitativa do desgaste através de medições de massa e de volume, antes e após a aplicação das peças no teste in situ. A tabela 13 abaixo apresenta os dados de

identificação da amostra, em quantos hectares de teste foi retirada a amostra, o volume e a massa antes e após o teste, a diferença entre os valores encontrados e a representação percentual.

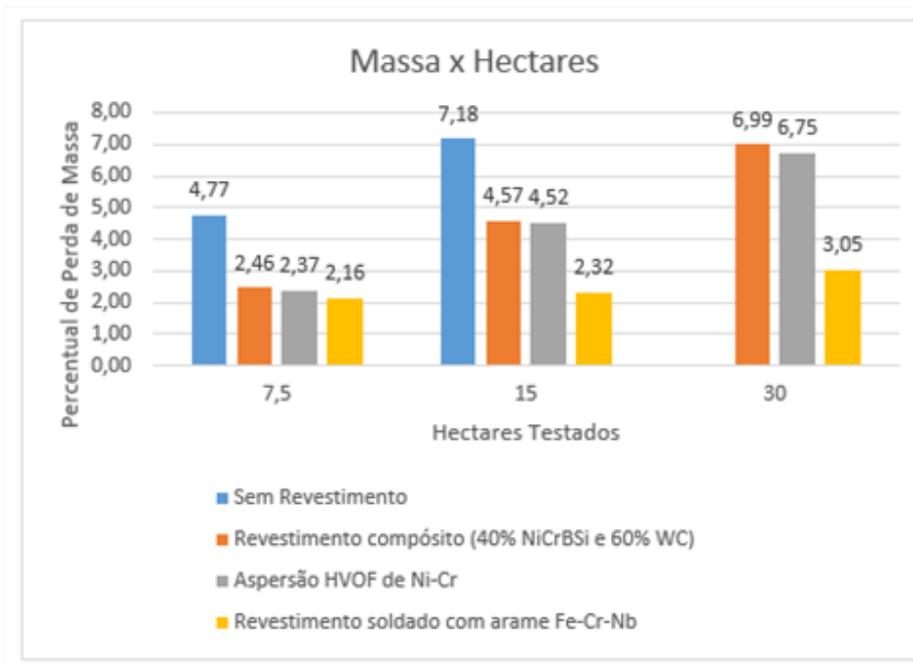
Tabela 13 - Dados referentes aos volumes e massas antes e após a realização do teste

Amostra	ha	Volume (mm <sup>3</sup> )				Massa (kg)			
		Antes	Depois	Diferença	%	Antes	Depois	Diferença	%
1A	7,5	28648,18	15715,41	12932,77	45,14	2,83	2,695	0,135	4,77
1B	15	28862,71	10855,66	18007,05	62,39	2,855	2,65	0,205	7,18
1C	30	-	-	-	-	-	-	-	-
2A	7,5	25605,26	21838,78	3766,48	14,71	2,84	2,77	0,07	2,46
2B	15	28770,44	20496,33	8274,11	28,76	2,845	2,715	0,13	4,57
2C	30	22250,22	10088,25	12161,97	54,66	2,86	2,66	0,2	6,99
3A	7,5	27928,96	17932,55	9996,41	35,79	2,98	2,91	0,071	2,37
3B	15	28537,23	16216,95	12320,28	43,17	2,985	2,85	0,135	4,52
3C	30	28411,29	10432,97	17978,32	63,28	2,965	2,765	0,2	6,75
4A	7,5	28006,84	26761,86	1244,98	4,45	3,015	2,95	0,065	2,16
4B	15	27205,82	25474,19	1731,63	6,36	3,015	2,945	0,07	2,32
4C	30	26591,91	15590,84	11001,073	41,37	3,015	2,923	0,092	3,05

Fonte: o Autor.

Para melhor compreensão e facilidade na comparação de todos os dados dos resultados tabulados, o gráfico da figura 58 abaixo apresenta os valores percentuais de perda de massa da amostra pela quantidade de área de teste. Em relação ao percentual da diferença da massa das amostras antes e após os testes, o gráfico abaixo evidencia que as amostras revestidas tiveram um melhor desempenho do que as amostras sem revestimento

Figura 58 - Gráfico de Relação Massa x Hectares.



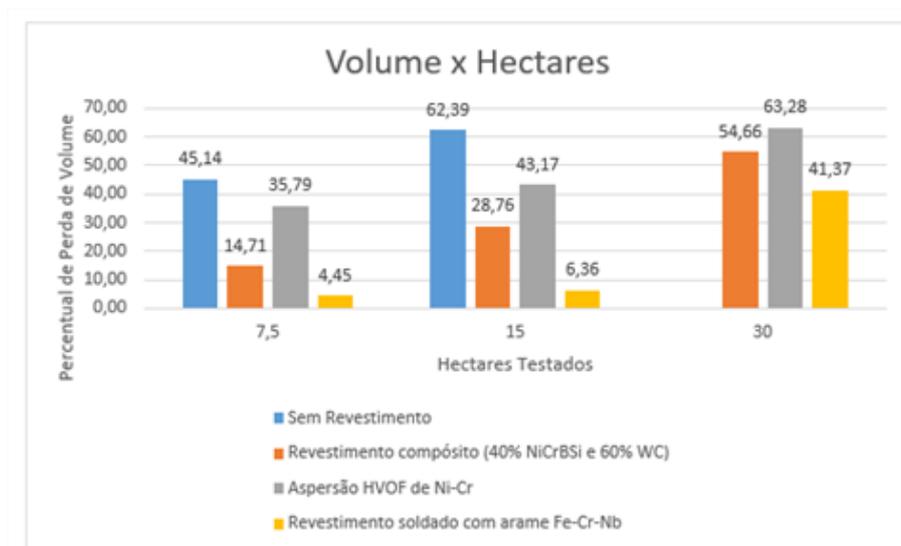
Fonte: o Autor.

Na condição de 7,5 hectares observa-se que os revestimentos tiveram um desempenho semelhante entre si apresentando uma perda de massa de aproximadamente 2 vezes menor que a amostra sem revestimento. Com a condição seguinte – 15 hectares – o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) e o revestimento aspersão HVOF de Ni-Cr tiveram o mesmo desempenho possuindo uma perda de massa de 1,6 vezes inferior a amostra sem revestimento. Nesta mesma condição de quantidade de hectares de teste o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb praticamente manteve seu percentual de perda de massa, apresentando uma perda de massa 3 vezes menor que a amostra sem revestimento e aproximadamente 2 vezes menor que os demais revestimentos. Na condição de teste de 30 hectares observa-se que para o dobro de hectares de teste o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) e o revestimento aspersão HVOF de Ni-Cr ainda obtiveram um percentual de perda de massa inferior a amostra sem revestimento em 15 hectares. Já o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb demonstrou ter uma perda de massa de aproximadamente 2,3 vezes menor que os outros revestimentos testados na condição de 30 hectares de teste. Além disso, o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb na condição de teste de 30 hectares obteve um percentual de perda inferior a amostra sem revestimento em 7,5 hectares.

Outra análise que o presente trabalho se propôs é a análise de perda de volume das amostras pela quantidade de hectares em que estas foram submetidas nos testes a campo. O

gráfico da figura 59 abaixo representa esta relação que apresentou comportamento semelhante a análise de perda de massa.

Figura 59 - Gráfico de Relação Volume X Hectares.



Fonte: o Autor.

Observa-se através do gráfico acima que todas as amostras revestidas tiveram uma perda de volume inferior as amostras sem revestimentos nas três condições de área de teste. As amostras revestidas com aspersão HVOF de Ni-Cr obtiveram uma perda de volume aproximado das amostras sem revestimentos em condições de dobro de área testadas, porém apresentaram perdas de volume superiores aos demais revestimentos. Este fato pode ser justificado pelo deslocamento de parte do revestimento, como pode ser observado pelas análises laboratoriais mencionadas anteriormente.

Em relação ao revestimento composto (40% NiCrBSi e 60% WC) observa-se que a amostra coletada em 7,5 hectares revestida apresentou uma resistência ao desgaste aproximadamente três vezes do que a amostra sem revestimento. Semelhante foi o comportamento das amostras coletadas com 15 hectares, onde a amostra revestida resistiu aproximadamente duas vezes mais do que a sem revestimento. Outro ponto que pode ser analisado é que a amostra revestida coletada com 15 hectares de teste apresentou uma perda de volume inferior 1,57 vezes menor do que a amostra sem revestimento coletada em 7,5 hectares.

Quanto ao revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb observa-se que a amostra coletada em 7,5 hectares revestida apresentou uma resistência ao desgaste aproximadamente 10 vezes mais do que a amostra sem revestimento. Semelhante foi o comportamento das amostras

coletadas com 15 hectares, onde a amostra revestida resistiu aproximadamente 9,8 vezes mais do que a sem revestimento. Outro ponto que pode ser analisado é que a amostra revestida coletada com 30 hectares de teste apresentou uma perda de volume inferior 1,1 vezes menor do que a amostra sem revestimento coletada em 7,5 hectares. Em comparação com os outros revestimentos o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb resistiu 3,30 vezes mais que o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) e 8,0 vezes mais que o revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr em 7,5 hectares. Quando analisados os revestimentos em 15 hectares o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb resistiu 4,52 vezes mais que o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) e 6,80 vezes mais que o revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr. E com 30 hectares de teste o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb resistiu 1,32 vezes mais que o revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) e 1,53 vezes mais que o revestidas com aspersão HVOF de Ni-Cr.

Em suma pode-se dizer que as amostras revestidas apresentaram uma resistência ao desgaste superior as amostras sem revestimento, já que as amostras revestidas resistiram o dobro da área testada com uma perda de volume inferior as amostras sem revestimento. Sendo o revestimento que apresentou melhor desempenho em todas as situações de teste, o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb. Tendo este apresentado melhores resultados no teste a campo conforme evidenciado nos parágrafos anteriores, propõe-se analisar e detalhar o comportamento do revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb.

A figura 60 apresenta os resultados do volume desgastado e da variação de rugosidade das amostras ensaiadas no ensaio de campo. Inicialmente, a rugosidade superficial do substrato apresentou um valor significativamente menor do que as amostras revestidas. Isso se deve à topografia irregular da superfície do revestimento formado, conforme mostrado na figura 33A. Assim, à medida que a área de teste de desgaste de campo foi aumentada, o valor da rugosidade da superfície apresentou uma tendência de queda. A rugosidade superficial Rz diminuiu de aproximadamente 14  $\mu\text{m}$  na área zero para uma rugosidade, Rz, de aproximadamente 8,9  $\mu\text{m}$  após 30 hectares da área testada. Isso indica que as distâncias médias entre picos e vales diminuíram apesar da formação de sulcos na superfície. Esses sulcos (Figura 60) foram formados por desgaste abrasivo e deformação plástica do metal, conforme demonstrado por Singh *et al.* (2020) em seus estudos. A presença de sulcos profundos largos e contínuos indica uma alta taxa de desgaste, conforme evidenciado por Singh *et al.* (2020). Condições de solo arenoso e compactado previamente relatadas contribuiram para a severidade do processo de desgaste nas amostras. Jha *et al.* (2013) relatou que as partículas abrasivas mudam de direção à medida que se movem da região macia para a região dura e, portanto, são desviadas. Esse

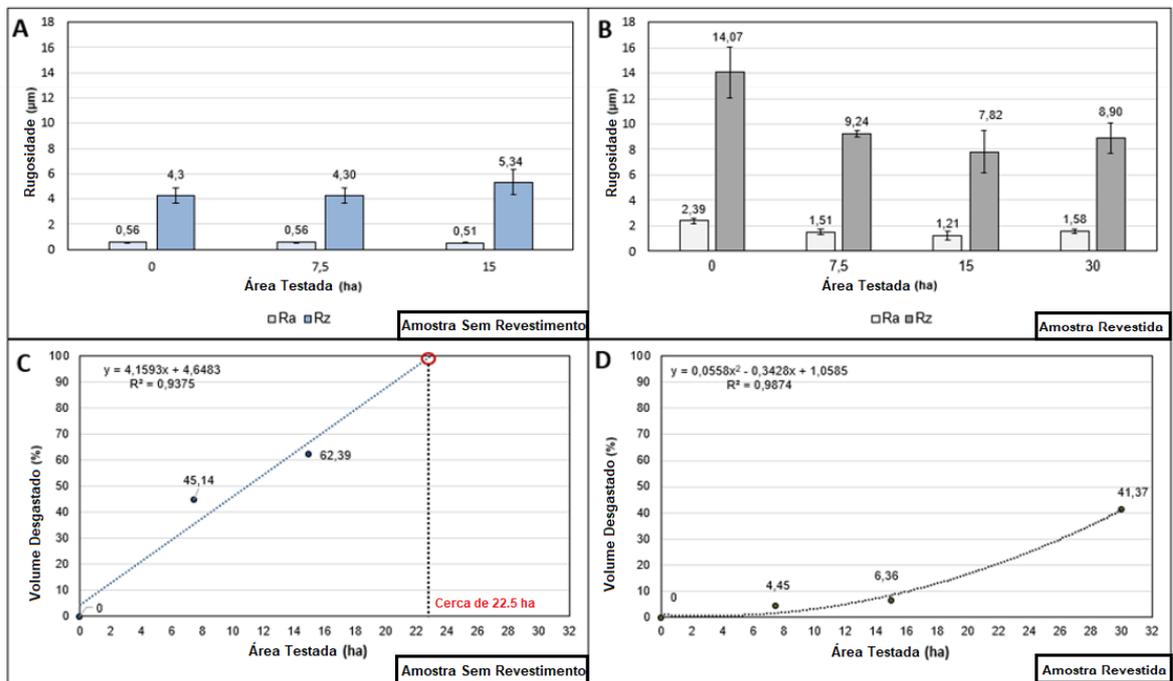
movimento resulta em sulcos descontínuos e rasos, como observado em 7,5 hectares (Figura 60), e indica maior resistência ao desgaste abrasivo do aço revestido, semelhante ao evidenciado por Singh *et al.* (2020).

Quanto ao volume erodido, após 30 hectares de testes, a amostra de substrato (Figura 59C) estava completamente erodida. A última medição da amostra, realizada em 15 hectares, indicou que 62% do volume original da amostra havia sido erodido. Assim, a curva de tendência ( $R^2 = 0,94$ ) gerada a partir dos dados medidos indica que a amostra foi totalmente erodida em aproximadamente 22,5 hectares. Além disso, o comportamento linear da curva de tendência sugere uma taxa de desgaste constante para a amostra não revestida, pois apenas a resistência ao desgaste do substrato temperado e revenido atuou durante este teste.

No entanto, as amostras revestidas (Figura 60D) resistiram aos 30 hectares de ensaios de campo, apresentando um volume desgastado de aproximadamente 41,4% do volume original. Pela curva de tendência obtida ( $R^2 = 0,99$ ), estima-se que a ponteira da haste do cultivador com o revestimento estaria totalmente desgastada em aproximadamente 45,3 hectares. Portanto, a partir desta projeção, o revestimento permitiu que a ponteira da haste do cultivador aumentasse a área total de trabalho em 100% antes que a amostra estivesse completamente desgastada. Portanto, a relação entre a micro dureza e a formação de fases intermetálicas no revestimento aumentou o desempenho dessas amostras, algo que também foi presenciado e confirmado por Li *et al.* (2018) e Heinz e Gahr (1987).

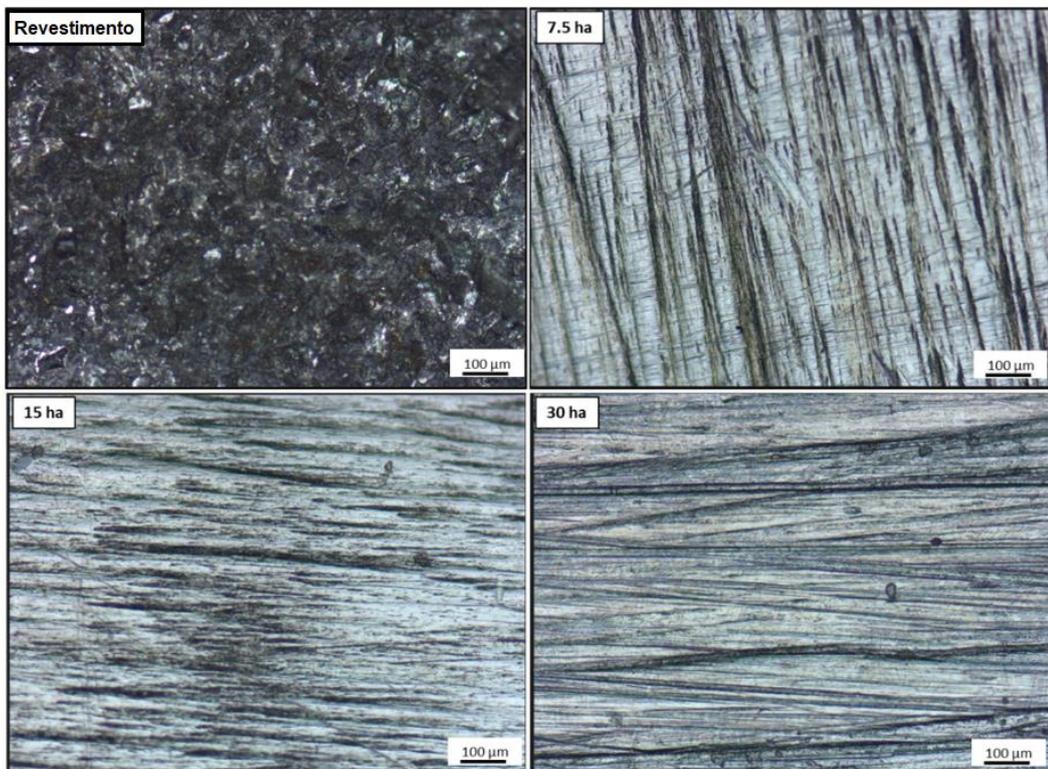
Quanto ao comportamento do volume desgastado da amostra revestida durante o ensaio, notou-se que a partir de 15 hectares, houve uma aceleração do processo de desgaste. Esse fenômeno levou a curva de tendência a um comportamento polinomial de segunda ordem (Figura 60D).

Figura 60 - A) Rugosidade do substrato; B) Rugosidade do revestimento; C) Volume desgastado do substrato; D) Volume desgastado do revestimento.



Fonte: o Autor

Figura 61 - Superfícies desgastadas em diferentes áreas do revestimento após teste de campo

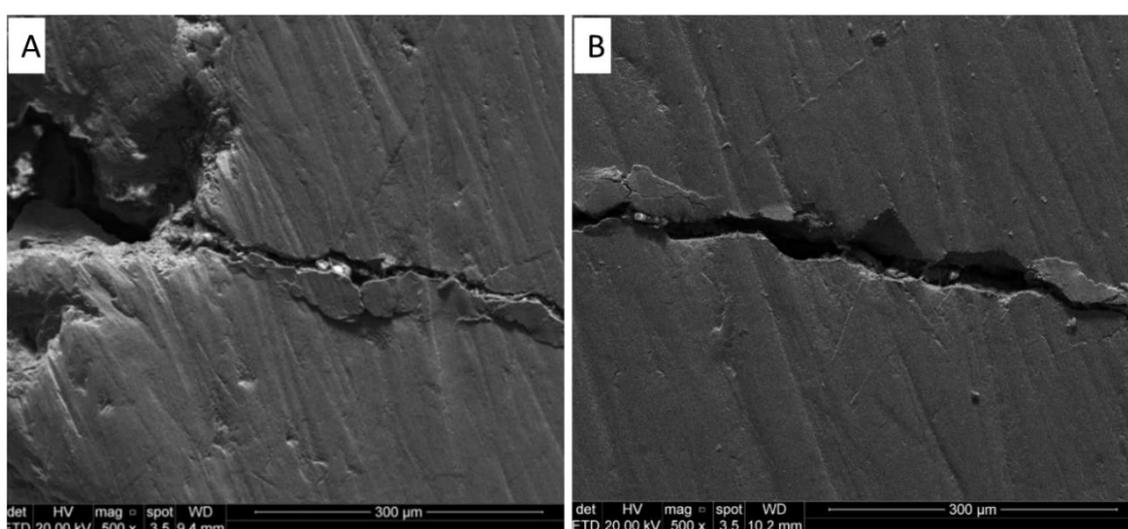


Fonte: o Autor.

Analisando as imagens SEM do revestimento após 30 hectares de testes (Figura 62), pode-se notar a presença de trincas ao longo do revestimento. Além disso, algumas trincas estavam “conectadas” a crateras superficiais, segundo Li *et al.* (2014) típicas do mecanismo de um material frágil, conforme mostrado na figura 62A. Assim, após 15 hectares, a propagação dessas trincas pode ter levado à formação de regiões sem revestimento, devido ao aparecimento de crateras, acelerando o processo de desgaste nas amostras, conforme mostra a curva de tendência da Figura 60D.

Segundo Królicka *et al.* (2020), revestimentos formados por soldagem contendo Fe-C-Cr-Nb podem apresentar três diferentes regiões dentro desta camada hipereutética (camada externa), quase eutética (camada intermediária) e hipoeutética (camada interna). Segundo estes autores, a camada mais interna é caracterizada por apresentar trincas causadas por morfologia desfavorável, o que contribui para a aceleração do processo de desgaste. Nesse caso, é possível que até 15 hectares, as camadas externas e intermediária estivessem em contato com o solo, reduzindo a taxa de desgaste. À medida que o processo de desgaste avança, a camada interna ficava em contato com o solo e a tendência ao aparecimento de trincas aumentava a taxa de desgaste, levando ao comportamento quadrático da curva de tendência.

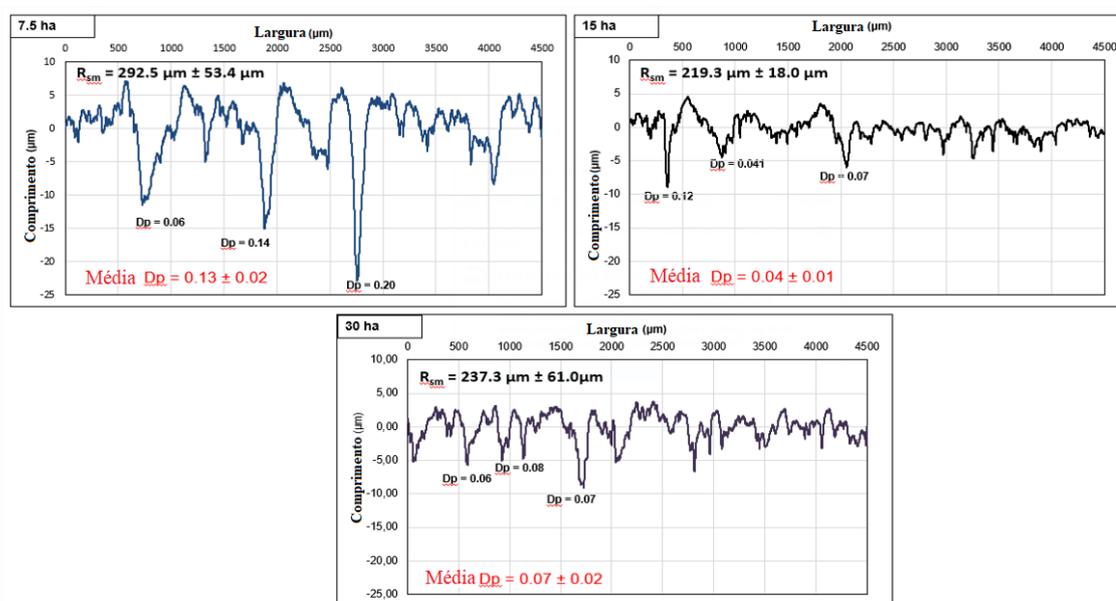
Figura 62 – MEV da superfície de amostra com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb após 30 ha de teste de campo



Fonte: O Autor

Conforme comentado anteriormente, sulcos formados por desgaste abrasivo, deformação plástica e crateramento típico de desgaste em materiais frágeis foram identificados na superfície das amostras revestidas. Assim, para identificar os submecanismos de desgaste, o valor crítico,  $D_p$ , foi calculado por meio da equação (1). A figura 63 abaixo apresenta o cálculo e determinação dos submecanismos de desgaste.

Figura 63 - Cálculo e determinação dos submecanismos de desgaste.



Fonte: o Autor.

Observou-se que nas regiões analisadas, o  $D_p$  médio das amostras apresentou valores inferiores a 0,2. O submecanismo de desgaste predominante foi a micro sulcamento, semelhante ao encontrado por Singh *et al.* (2021) e Li D *et al.* (2019). No entanto, na amostra submetida a testes de campo de 7,5 hectares, foram detectados sulcos formados por micro corte ( $D_p = 0,2$ ). Zangh *et al.* (2019) afirma que esse submecanismo se forma em superfícies com maior dureza e maior resistência ao desgaste. Possivelmente, neste ponto do ensaio, o revestimento ainda continha a camada hipereutética, demonstrada por Silvalingam *et al.* (2020), que possui a maior resistência, permitindo a ocorrência deste submecanismo. A predominância do micro sulcamento em todos os ensaios se deve à menor resistência da matriz metálica em relação aos constituintes não metálicos do revestimento. Portanto, mesmo que a matriz seja constituída predominantemente por martensita, ocorreram deformações plásticas em todas as amostras analisadas. Além disso, a austenita retida detectada no DRX e na micrografia pode ter contribuído para a predominância desse submecanismo de desgaste abrasivo.

Análises de custo benefício da utilização do revestimento foram feitas para verificar a viabilidade de implementação da melhoria proposta. Para as análises de custo benefício dos revestimentos levou-se em consideração a relação de quantas vezes menos o revestimento perderia em volume em relação a amostra sem revestimento para que então, pudesse ser possível saber a quantidade de peças sem revestimento que seriam necessárias para realizar a troca em campo para a mesma quantidade de hectares – 15 hectares – de uma peça revestida. Realizou-se o cálculo do custo pela quantidade total de peças substituídas para peça sem revestimento e relacionado com o custo da peça revestida, levando em consideração o custo de fabricação da peça e aplicação do revestimento.

Quando avaliado o custo benefício da utilização do revestimento compósito revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC), onde, como demonstrado anteriormente, a amostra revestida obteve uma perda de volume 2,17 vezes menor que amostra sem revestimento. Sendo assim, seria necessário trocar 2 vezes uma peça sem revestimento para que tivesse o mesmo desempenho em área de teste. Este fato dá ao revestimento compósito (40% NiCrBSi e 60% WC) um custo benefício aproximado de 10%.

Quanto ao custo benefício da utilização do revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr, adotando a mesma forma de análise anterior, onde, como demonstrado anteriormente, a amostra revestida obteve uma perda de volume 1,45 vezes menor que amostra sem revestimento. Através disso, pode-se afirmar que para cada peça revestida com revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr seria necessário trocar 2 vezes uma peça sem revestimento para que tivesse o mesmo desempenho em área de teste. Neste caso, a aplicação do revestimento por aspersão HVOF de Ni-Cr torna-se inviável pois apresenta um aumento de 72% no custo total da peça.

Já o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb, como demonstrado anteriormente, a amostra revestida obteve uma perda de volume 9,81 vezes menor que amostra sem revestimento. Através disso, pode-se afirmar que para cada peça revestida com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb seria necessário trocar 10 vezes uma peça sem revestimento para que tivesse o mesmo desempenho em área de teste. Este fato dá ao revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb um custo benefício aproximado de 27%, demonstrando desta maneira ser o revestimento com melhor custo benefício entre os revestimentos avaliados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Pode-se constatar a grande influência do solo da área onde o teste foi realizado, já que este apresentou-se altamente compactado e com predominância de sílica em sua composição, ambos fatores que, conforme demonstrado pela literatura, contribuem altamente com o desgaste severo das peças.
- Os resultados destas análises fomentam a importância da realização de testes in situ, pois as variáveis encontradas na realização destes seriam dificilmente reproduzidas por ensaios laboratoriais.
- Todos os revestimentos testados nesta pesquisa apresentaram uma resistência ao desgaste superior ao do material do substrato. Entre estes revestimentos, o que obteve melhor desempenho foi o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb, tendo um perda de volume 9,81 vezes menor que amostra sem revestimento
- Ao contrário do substrato, que estava completamente desgastado em aproximadamente 22 ha de obra, o revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb resistiu durante os 30 ha da área testada, apesar das severas condições do solo na região onde o teste de campo foi realizado. Portanto, um aumento resistência ao desgaste abrasivo foi demonstrada para este Revestimento.
- Pode-se afirmar que para cada peça revestida com revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb seria necessário trocar 10 vezes uma peça sem revestimento para que tivesse o mesmo desempenho em área de teste. Este fato dá ao revestimento soldado com arame Fe-Cr-Nb um custo benefício aproximado de 27%, considerando apenas o valor das peças pela quantidade de peças trocadas.
- Como esperado, as fases intermetálicas formadas contribuíram para o aumento da dureza e da resistência ao desgaste. Contudo, a camada interna (hipeutética) pode ter contribuído para a aceleração da taxa de desgaste de 15 ha do teste.
- Embora microcraterações e microcortes tenham sido detectada, a matriz metálica do revestimento contribuiu ao predomínio da formação de microaragem devido ao desgaste abrasivo.

## 7 TRABALHOS PUBLICADOS

LORENZI, Renan Adrian Pereira; MARIOT, Paulo; MALFATTI, Celia de Fraga. **Revestimento Compósito (40%NiCrBSi e 60% WC) Aplicado em Ponteiras de Hastes Subsoladoras Visando Aumento da Resistência ao Desgaste.** In: SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA DO IFSUL, 11., 2022, Sapucaia do Sul. Anais.

LORENZI, Renan Adrian Pereira; CASTRO, Victor Velho de; BULLMANN, Matheus; ANDRADE, Antônio Marcos Helgueira de; MARIOT, Paulo; MALFATTI, Celia de Fraga. **Increased wear resistance of cultivator coulters coated with Fe–Cr–Nb cladding and evaluated in field conditions: sandy and compacted soil in southern brazil.** The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 129, n. 3-4, p. 1601-1612, 4 out. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-023-12376-z>.

## 8 REFERÊNCIAS

- ACCADROLLI, Gláucio. **Análise de Desgaste de Materiais Aplicados em Ferramentas de Forjamento a Frio**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- AFONSO, A.F. **Estudo da resistência ao desgaste de um ferro fundido branco de alto cromo**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2012.
- AGÊNCIA IBGE NOTÍCIA. PIB cresce 1,2% no trimestre de 2022. Publicado 01/09/2022. Disponível em <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-salade-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/34748-pib-cresce-1-2-no-2-trimestre-de-2022> 2 AGRA, N. G., SANTOS, R. F. D. Agricultura brasileira: situação atual e perspectivas de desenvolvimento. Anais do XXXIX Congresso da Sociedade brasileira de Economia e Sociologia Rural. Recife, PE, Brasil, 2001.
- AGOSTINHO, O.L. *et al.* **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1995.
- ANDREOLI, Cleverson V.; ANDREOLI, Fabiana de Nadai; JUSTI JUNIOR, Jorge. **Formação e Características dos Solos para o Entendimento de sua Importância Agrícola e Ambiental**. 2019. Disponível em: [http://www.agrinho.com.br/site/wp-content/uploads/2014/09/31\\_Formacao-de-caracteristicas.pdf](http://www.agrinho.com.br/site/wp-content/uploads/2014/09/31_Formacao-de-caracteristicas.pdf). Acesso em: 04 de Outubro de 2020
- ASM International – Surface Engineering for corrosion and Wear resistance. ASM international. (2001).
- ASM INTERNATIONAL. Handbook of Thermal Spray Technology. Ohio: J.R. Davis - ASM International, 2004
- BALAGURU, S.; MURALI, Vela; CHELLAPANDI, P.; GUPTA, Manoj. **Effect of dilution on micro hardness of Ni–Cr–B–Si alloy hardfaced on austenitic stainless steel plate for sodium-cooled fast reactor applications**. Nuclear Engineering and Technology, n. 52, p. 589–596, 2020. ISSN 17385733.
- BALASUBRAMANIAN, V.; VARAHAMOORTHY, R.; RAMACHANDRAN, C. S.; MURALIDHARAN, C. **Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 40, n. 9-10, p. 887–897, feb 2009. ISSN 0268-3768. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-008-1406-8>.
- BERNS, H.; FISCHER, A. **Microstructure of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with Additions of Nb, Ti and, B**. *Materials Characterization* **1997**, 39, 499–527, doi:10.1016/S1044-5803(97)00142-3.

BERTOLLO, A.M.; LEVIEN, R. **Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha**. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha* **2019**, 25, 208–218, doi:10.36812/pag.2019253208-218.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. Ohio: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-119-94453-9.

BOTH, G. B. **Caracterização e Avaliação Tribológica de Superfícies Resistentes ao Desgaste para Aplicação em Ferramentas de Conformação a Frio**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia dos materiais do PPGEM 3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2011.

BOLELLI, G. *et al.* **Tribological behavior of HVOF- and HVAF-sprayed composite coatings based on Fe-Alloy + WC-12% Co**. *Surface and Coatings Technology*, Modena, v. 248, p. 104–112, 2014. a.

BOLELLI, G. *et al.* **Comparative study of the dry sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC-(W,Cr)2C-Ni and WC-CoCr hardmetal coatings**. *Wear*, Modena, v. 309, n. 1–2, p. 96– 111, 2014. b.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. **Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico**. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.6, n.2, p.331-336, 2011.

BUCHELY, M. F., GUTIERREZ, J. C., LEÓN, L. M. ,“**The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys**”, *Wear*, v. 259, n. 1, pp. 52-61, 2005

BUDINSKI, K.G . **Surface engineering for wear resistance**. Prentice Hall 1988.

CABRAL, André Bittencourt. **Avaliação Da Influência De Adições De Molibdênio, Ferro E Cromo No Comportamento De Sinterização E Nas Propriedades Mecânicas Do Metal Duro À Base De Níquel**. 2014. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Considerações para manejo do solo**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_3/C7/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/C7/Index.htm)>. Acesso em: 20/03/2021.

CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Efeitos da compactação em atributos do solo**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>>. Acesso em: 20/03/2021.

CANARIM, R. C. **Influência da composição na mistura de pós de alumínio e ferro na formação de revestimentos de alumineto de ferro depositados por aspersão térmica a chama**. Faculdade de Engenharia de Bauru. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista.2013

CALLISTER, William. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2020.

CASTRO, I.B. **Comportamento ao desgaste microabrasivo de ligas NiTi**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais. Universidade de Brasília, Brasília. 2014

C.H. Lee, K.O. Min, **Effects of heat treatment on the microstructure and properties of HVOF-sprayed Ni–Cr–W–Mo–B alloy coatings**, *Surface and Coatings Technology*, Volume 132, Issue 1, 2000, Pages 49-57, ISSN 0257-8972, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00740-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00740-4).

CHAIDEMENOPOULOS, N.G.; Psyllaki, P.P.; Pavlidou, E.; Vourlias, G. **Aspects on Carbides Transformations of Fe-Based Hardfacing Deposits**. *Surface and Coatings Technology* 2019, 357, 651–661, doi:10.1016/j.surfcoat.2018.10.061.

Chen, J.-H.; Hsieh, C.-C.; Hua, P.-S.; Chang, C.-M.; Lin, C.-M.; Wu, P.T.-Y.; Wu, W. **Microstructure and Abrasive Wear Properties of Fe-Cr-C Hardfacing Alloy Cladding Manufactured by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)**. *Met. Mater. Int.* 2013, 19, 93–98, doi:10.1007/s12540-013-1015-4.

COLAÇO, Fernando Henrique Gruber. **Estudo do comportamento à abrasão e formação de revestimentos aplicados por gtaw com dupla alimentação de arames tubulares**. 2021. 258 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

CORONADO, J.J., CAICEDO, H.F., GOMEZ, A.L., “**The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits**”, *Tribology International*, v. 42, n. 5, pp. 745-749, 2009.

CZICHOS, H., 1992, “**Design of friction and wear experiments.**” In: *ASM Handbook, Vol.18: Friction, Lubrication and Wear Technology*, ASM International, pp.481.

DAVIS, J R. **Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining**. In: *ASM Handbook V. 6. Welding, Brazing, and Soldering*: ASM International p. 1967-2000, 1993.

DA SILVA, R. P.; BARICELO, L. G.; VIAN, C. E. de F. **Estoque brasileiro de tratores agrícolas: evolução e estimativas de 1960 a 2016**. *Revista de Economia Agrícola*, São Paulo, v. 62, n. 2, p. 21-34, 2015.

DENARDINI, J. E.; SANTI, A.; FAGANELLO, A.; D’AGOSTINI, L.R. **Conservação do solo e da água no Brasil: Preceitos e ações no ensino, pesquisa e extensão**. *Boletim Informativo da SBCS*, Maio – Agosto, 2014.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. SI metric ed. Singapore: MecGraw-Hill Bool Company, 1988

D. Joslin Vijaya, D.S. Robinson Smart, **Experiments to find the corrosion and wear resistances and hardness of Al7075 metal matrix and NbC/Ti nanoparticles**

**reinforcements composite**, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.171>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323027955>)

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009

FERNANDES, C.M.; ROCHA, A.; CARDOSO, J.P.; BASTOS, A.C.; SOARES, E.; SACRAMENTO, J.; FERREIRA, M.G.s.; SENOS, A.M.R.. **WC-stainless steel hardmetals**. *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, [S.L.], v. 72, p. 21-26, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.11.046>.

FRANCESCHINI, Joel. **Avaliação Do Fenômeno De Stick-Slip Em Materiais De Fricção Com Utilização De Um Tribômetro**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FRANCECHINI, M. H. D. **Correlação da condutividade elétrica com atributos físico-químicos do solo**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” -Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2007

FREITAS, B. F. D. **Projeto de máquina de preparo de solo com “paraplow rotativo” para modernização da agricultura familiar**. Relatório final de iniciação científica. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 20p., Julho, 2014.

FURINI, L.A. **Desempenho operacional de hastes e ponteiros na descompactação de solo**. *Operational performance of rods and tips in soil decompression* 2018.

GAMERO, C.A. **Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvature lateral (“PARAPLOW”), em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidade de trabalho**. 2008. 72 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

GAONA, M.; LIMA, R. S.; MARPLE, B. R. **Influence of particle temperature and velocity on the microstructure and mechanical behaviour of high velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed nanostructured titania coatings**. *Journal of Materials Processing Technology*, Boucherville, v. 198, n. 1–3, p. 426–435, 2008.

GATES, J.D. **Two-body and Three-body abrasion: A critical discussion**. *Wear*, n. 214, p. 139-146, 1998.

GHOLIPOUR, A.; Shamanian, M.; Ashrafizadeh, F. **Microstructure and Wear Behavior of Stellite 6 Cladding on 17-4 PH Stainless Steel**. *Journal of Alloys and Compounds* 2011, 509, 4905–4909, doi:10.1016/j.jallcom.2010.09.216.

GIRARDELLO, V.; AMADO, T.; ERTEL, C.; GARLET, L. **Benefícios do tráfego controlado de máquinas**. A Granja, Edição 785, p. 34-37, Maio, 2014.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; MIZIEWICZ, P.; SMITH, E. K. **Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no Sul do Brasil**. *Revista Plantio Direto*, Edição 137-138, p. 42-50, Setembro – Dezembro de 2013.

GOMES, Leila Maria Ferreira. **Estudo da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão e à Corrosão – Fadiga do Aço API X65 Aspergido Termicamente Utilizado em Componente OFFSHORE**. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003

H. Czichos, “**Basic Tribological Parameters**”, ASTM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, vol. 18, p.473, ASM Metals Park, OH, 1992.

H.-J. Yu e S.D. Bhole – **Wear tester for tillage tool materials**. TRIBOLOGY INTERNATIONAL. Butterworth-Heinemann Ltd. 1990

HEINZ, K.; GAHR, Z. **Microstructure and Wear of Materials - 1st Edition**; 1987; ISBN 978-0-08-087574-3.

HRABĚ, P.; Müller, M.; Hadač, V. **Evaluation of Techniques for Ploughshare Lifetime Increase**. *Research in Agricultural Engineering* 2015, 61, 72–79, doi:10.17221/73/2013-RAE.

HUANG, S.G.; Liu, R.L.; Li, L.; Van der Biest, O.; Vleugels, J. **NbC as Grain Growth Inhibitor and Carbide in WC–Co Hardmetals**. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2008, 26, 389–395, doi:10.1016/j.ijrmhm.2007.09.003.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Arnold, 1992.

JENG, S.L.; Lee, H.T.; Weirich, T.E.; Rebach, W.P. **Microstructural Study of the Dissimilar Joints of Alloy 690 and SUS 304L Stainless Steel**. *Mater. Trans.* 2007, 48, 481–489, doi:10.2320/matertrans.48.481.

JHA, A.K.; Prasad, B.K.; Modi, O.P.; Das, S.; Yegneswaran, A.H. **Correlating Microstructural Features and Mechanical Properties with Abrasion Resistance of a High Strength Low Alloy Steel**. *Wear* 2003, 254, 120–128, doi:10.1016/S0043-1648(02)00309-5.

Jijie Yang, Chenglei Wang, LaiChang Zhang, Zhijun Wang, Mulin Liang, Chong Liu, Weijie Liu, Xin Li, Shengfeng Zhou, Hong Tan, **Microstructure evolution and properties of Fe-Ni-Cr-Co-Mo-W high-entropy alloy coatings by plasma surface alloying technology**, *Surface and Coatings Technology*, Volume 467, 2023, 129732, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129732>.

JONDA, E.; Łatka, L.; Tomiczek, A.; Godzierz, M.; Pakieła, W.; Nuckowski, P. **Microstructure Investigation of WC-Based Coatings Prepared by HVOF onto AZ31 Substrate**. *Materials* 2022, 15, 40, doi:10.3390/ma15010040.

JONDA, Ewa; ŁATKA, Leszek; PAKIEŁA, Wojciech. **Comparison of Different Cermet Coatings Sprayed on Magnesium Alloy by HVOF**. *Materials*, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1594, 24 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14071594>.

KALACSKA, G. **Laboratory modelling of abrasive wear effects of soils**, *Cereal Res. Commun.* 36 (2008) 907-910.

KALÁCSKA, Á.; De Baets, P.; Fauconnier, D.; Schramm, F.; Frerichs, L.; Sukumaran, J. **Abrasive Wear Behaviour of 27MnB5 Steel Used in Agricultural Tines.** *Wear* 2020, 442–443, 203107, doi:10.1016/j.wear.2019.203107.

KAYABA, T.; Hokkirigawa, K.; Kato, K. **Analysis of the Abrasive Wear Mechanism by Successive Observations of Wear Processes in a Scanning Electron Microscope.** *Wear* 1986, 110, 419–430, doi:10.1016/0043-1648(86)90115-8.

KEN-HICKEN, G. **Fusion welding processes – gas tungsten arc welding.** Metals Park: ASM Metals Handbook, 1993. 6v.

KIRCHGABNER, M., BADISCH, E., FRANEK, F., “**Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact**”, *Wear*, v. 265, n. 5, pp. 772-779, 2008.

KLEIN, V. A. **Física do Solo. 3ª Edição.** UPF Editora. 263p., 2014.

KLEIN, V. A.; BASSEGIO, M.; MADALOSSO, T. **Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água.** *Engenharia Agrícola*, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998

KRÓLICKA, A.; Szczepański, Ł.; Konat, Ł.; Stawicki, T.; Kostencki, P. **The Influence of Microstructure on Abrasive Wear Micro-Mechanisms of the Claddings Produced by Welding Used in Agricultural Soil.** *Materials* 2020, 13, 1920, doi:10.3390/ma13081920.

LANÇAS, K. P. **Subsolagem ou escarificação.** *Revista Cultivar Máquinas*. Setembro-Outubro, 2002, p. 34-37.

LEECH, Patrick W.; LI, Xing S.; ALAM, Nazmul. **Comparison of abrasive wear of a complex high alloy hardfacing deposit and WC–Ni based metal matrix composite.** *Wear*, [S.L.], v. 294-295, p. 380-386, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.015>.

LI, D.; Liu, Z.; Su, Y. **Effect of TiN on Microstructure and Wear Resistance of Fe–Cr–C Hardfacing Alloy: Experimental Research and First-Principles Calculation.** *Mater. Res. Express* 2018, 5, 116513, doi:10.1088/2053-1591/aadcc3.

LI, J.; Kannan, R.; Shi, M.; Li, L. **Solidified Microstructure of Wear-Resistant Fe-Cr-C-B Overlays.** *Metall Mater Trans B* 2020, 51, 1291–1300, doi:10.1007/s11663-020-01863-3.

LI, Q.; Lei, Y.; Fu, H. **Growth Characteristics and Reinforcing Behavior of In-Situ NbCp in Laser Cladded Fe-Based Composite Coating.** *Journal of Materials Science & Technology* 2015, 31, 766–772, doi:10.1016/j.jmst.2014.06.012.

LI, Q.; Lei, Y.; Fu, H. **Laser Cladding In-Situ NbC Particle Reinforced Fe-Based Composite Coatings with Rare Earth Oxide Addition.** *Surface and Coatings Technology* 2014, 239, 102–107, doi:10.1016/j.surfcoat.2013.11.026.

LIU, Jun; YANG, Shuai; XIA, Weisheng; JIANG, Xin; GUI, Chibin. **Microstructure and wear resistance performance of Cu–Ni–Mn alloy based hardfacing coatings reinforced by**

**WC particles.** Journal Of Alloys And Compounds, [S.L.], v. 654, p. 63-70, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.130>

LIU, Qicong; LI, Xiaoxia; REN, Yanan; YAN, Yudong; MA, Zhen; ZHUANG, Minghui; YUAN, Shidan. Effect of different chromium contents on microstructure and two-body abrasive wear behavior of Fe-Mn-B surfacing alloys. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 36, p. 106707, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106707>.

LIU, Sha; SHI, Zhijun; XING, Xiaolei; REN, Xuejun; ZHOU, Yefei; YANG, Qingxiang. Effect of Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 24, p. 101232, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101232>.

MACEDO, D. X. S.; MONTEIRO, L. D. A.; V. C. D. **Compactação, esçarificador e subsolador.** LIMA, Universidade Federal do Ceará. Maio, 2016.

MACHADO, T. M.; LANÇAS, K. P.; FIORESE, D. A.; FERNANDES, B. B.; TESTA, J. V. P. **Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades variáveis.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V.19, n 11, p.1121-1125, Paraíba, 2015.

MANHOBOSCO, T. M. **Tribocorrosão da Liga Ti6Al4V, Liga Nitretada, Ti6Al4V Revestida por Filmes Diamond-Like Carbon (DLC) e Obtenção Eletroquímica de Filmes DLC.** Teste para Obtenção do título de Doutor em Engenharia. UFRGS. Porto Alegre. 2009

MARQUES, A. S. **Caracterização e Avaliação Tribológica de Revestimentos Depositados Via HVOF em Ferramentas de Aço SAE H13 Utilizadas Na Extrusão a Quente.** Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019

MELO, R.V. **Estudo Comparativo Entre Ligas Resistentes ao Desgaste Abrasivo, Aplicadas por Soldagem, Em Chapas Metálicas Para Fabricação de Placas Anti Desgaste.** Belo Horizonte. 2008.

MENEZES, P. L. *et al.* **Tribology for Scientists and Engineers.** [S.l.]: Springer, 2013.

MIELEZARSKI, Rafael Gomes. **Estudo Do Comportamento Tribológico E Em Tribocorrosão Do Aço Inoxidável Martensítico Din 1.4110.** 2015. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MONTANA, G. K. **Avaliação de um esçarificador em função dos tipos de haste e profundidade de trabalho.** UNESP – Botucatu (Tese de Doutorado). Botucatu – SP. 2013

MOREIRA, Fátima M. S.; CARES, Juvenil E.; ZANETTI, Ronald; STURMER, Sidney L.. **O Ecossistema Solo:** componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. Lavras: Ufla, 2013. 352 p.

MOREIRA, Aida B.; RIBEIRO, Laura M. M.; LACERDA, Pedro; PINTO, Ana M. P.; VIEIRA, Manuel F. **A Study on a Cast Steel Reinforced with WC–Metal Matrix Composite.** *Materials*, [S.L.], v. 15, n. 18, p. 6199, 6 set. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15186199>

NAVARINI, L. L. **Manejo do solo e utilização de bioestimulantes na cultura do trigo (*triticum aestivum* L.).** Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Medicina Veterinária e Agronomia da Universidade de Passo Fundo (UPF) – RS, 96 p., Março, 2010.

NORTON, R. L. (2013) **Machine Design: An Integrated approach.** 4. ed. Worcester, Massachusetts: Pearson Prentice Hall.

N.P. Suh, H. C. Sin, “**The genesis of friction**”, *Wear* 69, p.91, 1981.

OKETOLA, Adeola; JAMIRU, Tamba; ADEGBOLA, Adesola T.; OGUNBIYI, Olugbenga; ROMINIYI, Azeez Lawan; SMITH, Salifu. **Spark plasma sintering of ceramic-reinforced binary/ternary nickel and titanium metal matrix composites: mechanical properties, microstructure, and densification ⚡: a review.** *Journal Of Alloys And Metallurgical Systems*, [S.L.], v. 3, p. 100031, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jalmes.2023.100031>.

OLIVEIRA, Tatiane Gabi de; COSTA, Adilson Rodrigues da. **Influência da microestrutura na resistência ao desgaste microabrasivo de ligas de F-Cr-C e Fe-Cr-C-Nb.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, n. 1, 2019.

OWSIK, Z. **Wear of Symmetrical Wedge-Shaped Tillage Tools.** *Soil and Tillage Research* 1997, 43, 295–308, doi:10.1016/S0167-1987(97)00020-2.

PATEL, Dhaval; BHATT, Pina; BATERIWALA, Ragesh. **Development of FeV-WC Ni Cr B Si coating on Stainless steel using HVOF process.** *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 66, p. 2008-2011, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.444>.

Pawlowski, L. (2008) **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings.** Wiley, England. <https://doi.org/10.1002/9780470754085>

PAZ, Vinícius de Freitas. **Estudo E Caracterização Metalográfica Da Resistência Ao Desgaste Em Aços Ferramentas Sinterizados, Temperados A Vácuo, Utilizados Em Matrizes De Estampagem.** 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PELINSON, Natália de Souza; DIAS, Camila Schwartz; CHAVES, Sigleia Sanna de Freitas; MÜLLER, Francihele Cardoso; PEDROSO, Rafael Munhoz; GONÇALVES, Ricardo Marcelo; ALBERTIN, Ricardo Massulo; STEIN, Ronei Tiago. **Morfologia e Gênese do Solo.** Porto Alegre: Sagah, 2021.

PELTZ, J. S. **Efeito do Processo de SHOT PEENING na Morfologia da Superfície, Resistência à Corrosão e Resistência à Oxidação do Aço Inoxidável Ferrítica AISI 430.** Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia dos materiais do PPGEM 3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2013.

RADI, P. A. *et al.* **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA. 2007

RAPER, R. L. **Agricultural traffic impacts on soil**. *Journal of Terramechanics*. V. 42. P. 259-280, Julho/Outubro, 2005.

RAPER, R. L. **Subsoiling**. *Encyclopedia of soils in the environment*. P. 69-76, 2005.

RAPER, R. L.; REEVES, D. W.; SHAW, J. N.; SANTEN, E. V.; MASK, P. L. **Using Site-Specific Subsoiling to Minimize Draft and Optimize Corn Yields**. American Society of Agriculture and Biological Engineers. Transactions of the ASAE, Vol. 48, p. 2047-2052. Michigan, USA, 2005.

RAVISANKAR, A.; VELAGA, Satish Kumar; RAJPUT, Gaurav; VENUGOPAL, S. **Influence of welding speed and power on residual stress during gas tungsten arc welding (GTAW) of thin sections with constant heat input: A study using numerical simulation and experimental validation**. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 2, p. 200–211, apr 2014. ISSN 15266125. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612513001291>.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**, *Aleph*, p. 118, nov. 2004.

RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILO, R. F.; FERREIRA, R. **Compactação do solo: causas e efeitos**. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*. V. 26, n. 3, p. 315-338, Julho/Setembro, 2005.

S. Meir, S. Kalabukhov, N. Frage, S. Hayun, **Mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti composites fabricated by spark plasma sintering**, *Ceramics International*, Volume 41, Issue 3, Part B, 2015, Pages 4637-4643, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.008>.

SANTOS, Claudia Beatriz dos. **Desenvolvimento De Um Sistema De Medidas De Tribocorrosão**. 2006. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SANTOS, M. D. S.; ALONÇO, A. D. S.; BAUMHARDT, U. B. **Principais fatores que influenciam o desempenho de escarificadores e subsoladores. Uma revisão de literatura**. *Tecnologia & Ciência Agropecuária, João Pessoa*, v.5, n.1, p. 13-19, Março, 2011.

S. Meir, S. Kalabukhov, N. Frage, S. Hayun. **Mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti composites fabricated by spark plasma sintering**. *Ceramics International*, 41 (2015), pp. 4637-4643

SADEGHI, F.; Najafi, H.; Abbasi, A. **The Effect of Ta Substitution for Nb on the Microstructure and Wear Resistance of an Fe-Cr-C Hardfacing Alloy**. *Surface and Coatings Technology* **2017**, 324, 85–91, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.05.067.

SANTO, Amauri Cruz Espírito. **Desgaste de ponteiros de hastes sulcadoras de semeadoras de plantio direto e sua influência no esforço de tração**. 2005. 168 f. Tese (Doutorado) -

Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SELVADURAI, U. *et al.* **Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings.** *Surface & Coatings Technology*, Dortmund, v. 268, p. 30–35, 2015.

SILVA, Joelson Vieira da. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTENITIZAÇÃO SEGUIDA DE RESFRIAMENTO AO AR FORÇADO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DO FERRO FUNDIDO BRANCO ASTM A532 II D.** 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVA, Marcus Vinicius dos Santos da; SILVA, Pablo Henrique da; MARIANI, Fábio Edson; COELHO, Reginaldo Teixeira. **Caracterização de Revestimento Compósito de Ni-5Al-5Mo/TiC Produzido por Meio de Laser Cladding.** In: 30º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA USP, 30., 2022, São Paulo. São Carlos: USP, 2022.

SILVA, Rui Corrêa da. **Mecanização e manejo do solo** / Rui Corrêa da Silva. -- 1. ed. -- São Paulo: Érica, 2014.

SILVA, Bruna Antunes da; WINCK, César Augustus. **Evolução da quantidade de máquinas e implementos agrícolas nas propriedades rurais brasileiras (1960-2017).** *Revista Visão: Gestão Organizacional*, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 174-188, 26 jun. 2019. Universidade Alto Vale Do Rio Do Peixe - Uniarp. <http://dx.doi.org/10.33362/visao.v8i1.1934>.

SILVA, R. B., LANÇAS, K. P., DIAS JÚNIOR, M. S., 2003. **“O limite da terra”.** *Cultivar Máquinas*, Ano III, n.25, p.12-19.

SINGH, Jagseer; CHATHA, Sukhpal Singh; SIDHU, Buta Singh. **Abrasive wear behavior of newly developed weld overlaid tillage tools in laboratory and in actual field conditions.** *Journal Of Manufacturing Processes*, [S.L.], v. 55, p. 143-152, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.040>.

SIVALINGAM, S.; SURESHKANNAN, G.. **Effect of PCGTAW on the Inconel 690 alloy with respect to microsegregation attainment in comparison with the base metal processed with autogenous welding.** *Materiali In Tehnologije*, [S.L.], v. 53, n. 1, p. 9-15, 19 fev. 2019. Institute of Metals and Technology. <http://dx.doi.org/10.17222/mit.2018.114>

SIVALINGAM, S.; SURESHKANNAN, G.; BALAJI, D.; RAJESHKUMAR, L. **Influence of filler wire on mechanical and metallurgical behaviour of inconel 690 alloy welded by pulsed current gas tungsten arc welding.** *Tierärztliche Praxis* 2020, 40.

SOBRAL, G. R. **Evolução da indústria de tratores agrícolas no Brasil: estrutura de mercado e competitividade no período 1994-2008.** 2010. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Departamento de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: . Acesso em: 4 jul. 2022.

SOUZA, C. J. **Desgaste Abrasivo em Compósitos Metal/Cerâmicos: Estudo Aplicado ao Desenvolvimento de Coroas de Perfuração**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Ouro Preto. 2011

SOUZA, Thales Sardinha Garcia. **Efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SOUZA, Vanessa Moura de. **AVALIAÇÃO DO ATRITO E DO COMPORTAMENTO DO DESGASTE DE UM AÇO H13 REVESTIDO COM Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25(nicr) E WC-10Co-4Cr ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA OXICOMBUSTÍVEL DE ALTA VELOCIDADE (HVOF)**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHERLOR, A.W. **Engineering Tribology**. 4th ed. Elsevier, 2013.

SUH, Nam P.; SIN, H.-C.. **The genesis of friction**. Wear, [S.L.], v. 69, n. 1, p. 91-114, jun. 1981. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90315-x](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90315-x).

TREZONA, R.; ALLSOPP, D.; HUTCHINGS, I. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: Influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**. Wear, n. 225, p. 205-214, 1999.

TORMENA, C. A., SILVA, A. P., & Libardi, P. L. (1998). **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa - MG, 22, 573-581.

UCGUL, Mustafa; CHANG, Chung-Liang. **Design and Application of Agricultural Equipment in Tillage Systems**. Agriculture, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 790, 30 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13040790>.

UPADHYAYA, S.K.; SANCHEZ, P; A; SAKAI, K.; CHANCELLOR, W.J.; GODWIN, R. J.; **Published in Advances in Soil Dynamics**, Volume 3, Chapter 3, Parts I & II, p. 273-359 (Copyright 2009 American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2009.

Vilhena L, Domingues B, Fernandes C, Senos A, Ramalho A. **Mechanical and Tribological Characterization of WC-Co and WC-AISI 304 Composites by a Newly Developed Equipment**. Materials (Basel). 2022 Feb 4;15(3):1187. doi: 10.3390/ma15031187.

VEGRO, C. L. R.; FERREIRA, C. R. P. T.; CARVALHO, F. C. **Indústria brasileira de máquinas agrícolas: evolução e mercado**, 1985-95. Informações Econômicas. São Paulo, v. 27, n. 1, p. 1- 26, 1997.

WANG, J.; Lu, J.; XING, X.; ZHOU, Y.; LIU, S.; QI, X.; YANG, Q. **Effects of B Contents on the Microstructure and Wear Resistance of Hypereutectic Fe-Cr-C Hardfacing Alloy Coating**. Mater. Res. Express 2019, 6, 1065h2, doi:10.1088/2053-1591/ab430f.

XU, Liujie; WEI, Shizhong; XIAO, Fangnao; ZHOU, He; ZHANG, Guoshang; LI, Jiwen. **Effects of carbides on abrasive wear properties and failure behaviours of high speed steels with different alloy element content.** *Wear*, [S.L.], v. 376-377, p. 968-974, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.021>.

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

ZHAO, Changchun; ZHOU, Yefei; XING, Xiaolei; LIU, Sha; REN, Xuejun; YANG, Qingxiang. **Investigation on the relationship between NbC and wear-resistance of Fe matrix composite coatings with different C contents.** *Applied Surface Science*, [S.L.], v. 439, p. 468-474, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.034>..

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials.** New York: Elsevier, 1987.