

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ISADORA VALADARES CASTELO BRANCO**

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DOS AÇOS FERRAMENTA VP20TS, VP20ISO,  
VPATLAS E HARDMAX 500.**

**ALEGRETE**

**2019**

**ISADORA VALADARES CASTELO BRANCO**

**Estudo tribológico dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX  
500**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Thiago da Silveira

**ALEGRETE**

**2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B816e Branco, Isadora Valadares Castelo  
Estudo tribológico dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO,  
VPATLAS e HARDMAX 500 / Isadora Valadares Castelo Branco.  
41 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.  
"Orientação: Thiago da Silveira ".

1. Aço ferramenta. 2. Ensaio de desgaste. 3. Ensaio de  
Dureza. I. Título.

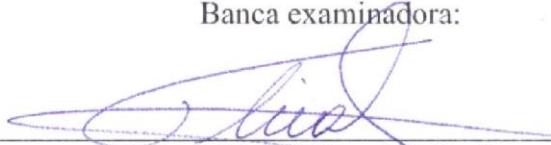
**ISADORA VALADARES CASTELO BRANCO**

**ESTUDO TRIBOLÓGICO DOS AÇOS FERRAMENTA VP20TS, VP20ISO,  
VPATLAS E HARDMAX 500.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

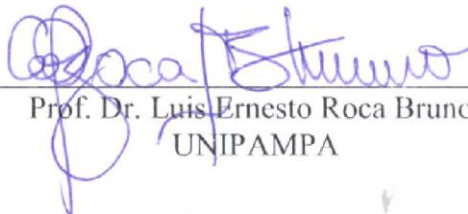
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de Novembro de 2019.

Banca examinadora:



---

Prof. Me. Thiago da Silveira  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno  
UNIPAMPA



---

Prof. Eng. Mecânica Hortencia Noronha dos Santos  
UNOPAR

Dedico este trabalho àqueles que me  
inspiram a ser quem sou hoje, minha mãe  
Adélia e meu pai Manoel.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido saúde, foco e persistência, sempre colocando pessoas boas no meu caminho.

Ao Professor Thiago da Silveira por ter me orientado, transmitindo seus conhecimentos com muito empenho.

A Professora Dr. Ana Claudia Costa de Oliveira por ter me auxiliado ao longo de todos os testes e ensaios, sempre buscando o aprimoramento.

A Hortência pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho, estando sempre presente e solícita.

A empresa Villares Metals pela confecção e doação dos corpos de provas utilizados durante os ensaios.

A empresa Rijeza Metalurgia, por realizar os ensaios de desgaste.

Aos meus pais Manoel e Adélia, aos meus irmãos Jorge e Laíssa, e ao Joe Lennon, por sempre estarem ao meu lado, apoiando-me em minhas decisões.

## RESUMO

A partir do estudo dos materiais ao longo da história descobriu-se que os metais poderiam ter suas propriedades mecânicas melhoradas através de tratamentos térmicos ou pela adição de outros elementos de ligas metálicas. Entre os materiais metálicos, os aços ferramenta se destacam, sendo empregados na confecção de ferramentais industriais, os quais estão sujeitos a esforços repetitivos elevados. Com o constante avanço tecnológico e exigência de durabilidade de componentes, cada vez mais são buscados materiais que tenham uma alta resistência ao desgaste. Desta forma, faz-se necessário o estudo da tribologia dos materiais, definida como a ciência e tecnologia das superfícies, que possuem interação através de movimento relativo, e das práticas que são relacionadas às mesmas. O presente trabalho objetiva o estudo tribológico dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX500, fornecidos pela empresa Villares Metals, visando compará-los quanto à sua dureza e resistência ao desgaste, por meio de ensaio de dureza e ensaio abrasivo ASTM G65-16, realizando também ensaios metalográficos e microscopia eletrônica de varredura, para análise da interface dos aços ferramenta. Os ensaios mostram que a perda de volume do material no ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65-16 está ligada à dureza do material bem como à sua microestrutura e tratamentos térmicos sofridos, sendo o aço ferramenta HARDMAX500 o material que obteve resultados à resistência ao desgaste mais satisfatórios.

Palavras-Chave: Aço ferramenta, Tribologia, Resistência ao desgaste.

## **ABSTRACT**

From the study of materials throughout history it was discovered that metals could have their mechanical properties improved by heat treatments or by the addition of other alloy elements. Among the metallic materials, the tool steels stand out, being used in the manufacture of industrial tools, which are subjected to high repetitive forces. With constant technological advancement and component durability requirements, materials that have a high wear resistance are increasingly sought. Thus, it is necessary to study the tribology of materials, defined as the science and technology of surfaces, which have interaction through relative movement, and the practices that are related to them. The present work aims the tribological study of the tool steels VP20TS, VP20ISO, VPATLAS and HARDMAX 500, supplied by the company Villares Metals, in order to compare them for their hardness and wear resistance by hardness test and ASTM G65 abrasive test. Also performing metallographic tests and scanning electron microscopy for analysis of the interface of the tool steels. The tests show that the material loss in ASTM G65 abrasive wear test is linked to the hardness of the material as well as its microstructure and heat treatments, with HARDMAX 500 tool steel being the material with the most satisfactory wear resistance results.

Keywords: Tool steel, Tribology, Wear resistance.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - *American Iron and Steel Institute*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

Al - Alumínio

B - Boro

C - Carbono

CCC - Cúbica de corpo centrado

CFC - Cúbica de face centrada

cm<sup>3</sup>- Centímetro cúbico

Cr - Cromo

Cu - Cobre

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

g - Grama

HRC - Dureza Rockwell

HV - *Hardness Vickers*

kg - Quilograma

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

mm – Milímetro

mm<sup>3</sup> - Milímetro cúbico

Min - Minuto

Mn - Manganês

Mo - Molibidênio

Ni - Níquel

P - Fósforo

rpm - Rotações por minuto

S - Enxofre

Si - Silício

TC – Tetragonal de corpo centrado

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

V - Vanádio

µm - micrometro

°C - Graus Celsius

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de Desempenho VPATLAS em teste de vida ferramenta. ....	7
Figura 2- Representação do tratamento térmico de têmpera, temperatura versus tempo. ....	9
Figura 3 – Curva TTT, Temperatura de transformação isotérmica versus Tempo. ....	10
Figura 4- Dureza versus Teor de carbono de aços carbono comuns. ....	10
Figura 5 - Tratamento térmico de revenido, Dureza versus Temperatura. ....	11
Figura 6 - Curva TTT, Temperatura de transformação isotérmica versus Tempo, tratamento térmico de austêmpera. ....	12
Figura 7– Desgaste abrasivo como função da relação entre a dureza das partículas. ....	15
Figura 8- Processo de desgaste abrasivo: (a) e (b) abrasão por 2 corpos e (c) abrasão por 3. .	15
Figura 9- Micromecanismos de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento, (b) microcorte, (c) microfadiga e (d) microtrinca. ....	16
Figura 10 - Esquema simplificado da máquina utilizada. ....	18
Figura 11- Sistemas que possuem risco de desgaste por fadiga superficial. ....	20
Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas. ....	22
Figura 13 - Representação esquemática das etapas metalográficas. ....	23
Figura 14 - Corpo de prova. ....	23
Figura 15 – a) Máquina Policorte; b) Embutidora Digital Fortel. ....	24
Figura 16 – Imagem microscópio ótico. ....	25
Figura 17 – MEV. a) Câmara de vácuo do MEV. ....	26
Figura 18- Durômetro. ....	26
Figura 19 - Equipamento utilizado para ensaio de desgaste. Empresa Rijeza. (A) Foto equipamento (B) ASTM G65-16. ....	28
Figura 20 - Microscopia ótica VPATLAS com ampliação (a) 200x (b) 400x. ....	29
Figura 21- Microscopia ótica VP20ISO com ampliação (a) 200x (b) 400x. ....	30
Figura 22 - Microscopia VP20TS com ampliação (a) 200x (b) 400x. ....	30
Figura 23 - Microscopia ótica HARDMAX 500 com ampliação (a) 200x (b) 400x. ....	31
Figura 24 – Gráfico referente ao ensaio de dureza. ....	32
Figura 25 - Amostras após ensaio de abrasão ASTM G65-16. (a) VPATLAS; (b) HARDMAX500; (c) VP20ISO; (d) VP20TS. ....	32
Figura 26- Gráfico do ensaio de desgaste em aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS, HARDMAX500. ....	33
Figura 27 - Gráfico de dureza versus perda média de volume por amostra em 20 min. ....	35
Figura 28 – Superfície desgastada do aço VPATLAS - MEV. ....	36
Figura 29 - Superfície de desgaste do aço VP20ISO - MEV. ....	36
Figura 30 - Superfície de desgaste do aço HARDMAX 500 - MEV. ....	37
Figura 31 – Superfície de desgaste do aço VP20TS – MEV. ....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos Aços conforme AISI.....	4
Tabela 2- Composição química VP20TS. ....	6
Tabela 3- Composição química VP20ISO.....	6
Tabela 4- Composição química VPATLAS. ....	7
Tabela 5- Propriedades mecânicas VPATLAS. ....	7
Tabela 6 - Composição química Hardmax 500. ....	8
Tabela 7 - Influência das características dos materiais no desgaste abrasivo. ....	14
Tabela 8 - Valores de dureza obtidos. ....	31
Tabela 9 - Perda de volume a cada 5 minutos (média dos 2 testes) após ensaio de abrasão ASTM G65-16.....	33
Tabela 10 - Perda de volume após 20min de ensaio de abrasão ASTM G65-16. ....	34

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1.</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2.</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Revisão bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.</b>	<b>Aço Ferramenta.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2.</b>	<b>Influência dos elementos de liga no aço ferramenta.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.</b>	<b>Aços ferramenta Villares Metals.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.</b>	<b>Tratamentos térmicos.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>Têmpera.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Revenido.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>Austêmpera.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.</b>	<b>Classificações e Mecanismos de Desgaste.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.1.</b>	<b>Desgaste Abrasivo.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.1.1.</b>	<b>Ensaio abrasivo ASTM G65-16.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2.</b>	<b>Desgaste Adesivo.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.3.</b>	<b>Desgaste por fadiga superficial.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.4.</b>	<b>Desgaste por oxidação.....</b>	<b>20</b>
<b>3.</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.</b>	<b>Metalografia dos Corpos de Prova.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>Microscopia Ótica.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.</b>	<b>Ensaio de Dureza.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.</b>	<b>Ensaio de Desgaste.....</b>	<b>27</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.</b>	<b>Análises microestruturais.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.1.</b>	<b>Microscopia Ótica.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2.</b>	<b>Ensaio de dureza.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.</b>	<b>Ensaio de Desgaste.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>Relação entre Desgaste e Dureza.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Mecanismos de desgaste.....</b>	<b>35</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>38</b>
<b>5.1.</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## 1. Introdução

Na História é possível observar que o desenvolvimento e o avanço da sociedade estão diretamente atrelados às habilidades dos indivíduos de produzirem e manipularem materiais, para satisfazerem as exigências impostas pelo meio. As civilizações antigas foram definidas e caracterizadas pelo nível de seu desenvolvimento em relação aos materiais, como: Idade da Pedra e Idade do Bronze. Conhecer e desenvolver novos materiais, bem como promover a melhora de suas propriedades, contribui para o crescimento e consolidação de um grupo social [1].

Com o estudo dos materiais ao longo da história, descobriu-se que os metais poderiam ter suas propriedades mecânicas melhoradas através de tratamentos térmicos ou pela adição de outros elementos de ligas metálicas. Entre os materiais metálicos, o aço se destaca, pois possui uma alta utilização na construção de bens duráveis. Fatores determinantes para o maior ou menor uso de um material é a sua facilidade de obtenção e a satisfação dos requisitos necessários para o trabalho a que serão submetidos.

Aços ferramenta são empregados na confecção de ferramentas industriais, os quais estão sujeitos a esforços repetitivos elevados, sendo assim, possuem vida útil sob condições extremas. A vida útil de uma ferramenta varia de acordo com diferentes fatores, que são definidos desde o projeto das ferramentas, sua aplicação e o aço mais apropriado para a mesma, processo de manufatura e condições de operação [2].

Os aços ferramenta representam uma parcela importante do segmento de aços especiais, isto devido às suas características, como elevada dureza e resistência à abrasão, boa tenacidade e, em algumas ligas, a capacidade de manter as propriedades de resistência mecânica mesmo que expostos a temperaturas elevadas, permitindo assim que sejam utilizados em segmentos variados [2].

Vista a importância do aço ferramenta para a engenharia, o estudo da resistência ao desgaste em tal material faz-se necessário. Uma vez que amenizado o nível de desgaste, são também reduzidos custos diretos, troca de peças, ou indiretos, como manutenções excessivas.

O desgaste é notado em situações em que superfícies que interagem entre si, produzindo movimento relativo, e pode ser considerado benéfico ou não, dependendo da situação de análise, se a remoção ou perda de material, é desejada ou não.

O trabalho proposto aborda a resistência ao desgaste abrasivo (remoção de material através do contato com um corpo mais duro) em aços ferramenta fornecidos pela empresa

Villares Metals, que atua no ramo de aços e ligas especiais e está localizada em Sumaré, São Paulo. Seu portfólio inclui: aços rápidos, aços-ferramenta (para trabalho a quente, trabalho a frio e moldes plásticos), aços inoxidáveis, aços-válvula, ligas especiais e peças forjadas.

O tema é tratado com base em informações já existentes na literatura, bem como testes laboratoriais.

## **1.1. Justificativa**

Com o constante avanço tecnológico e exigência de durabilidade de componentes, cada vez mais são buscados materiais que tenham uma alta resistência ao desgaste.

Nos setores industriais o desgaste é um grande causador de perdas econômicas, uma vez que ocasiona paradas, diminuição de produção ou gastos com manutenção. Os processos mecânicos são caracterizados por suas ações dinâmicas envolvendo força, velocidade e movimento. Desta forma, faz-se necessário o estudo da tribologia dos materiais, definida como a ciência e tecnologia das superfícies, que possuem interação através de movimento relativo, e das práticas que são relacionadas às mesmas.

O presente estudo, faz-se importante também, por analisar um aço ferramenta desenvolvido pela empresa Villares Metals, que ainda não foi comercializado, o HARDMAX 500, trazendo resultados relevantes acerca do mesmo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um estudo tribológico dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX 500, visando compará-los quanto à sua dureza e resistência ao desgaste.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar ensaios metalográficos e Microscopia eletrônica de varredura, para análise da interface dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX 500.
- Realizar ensaios de desgaste conforme a norma ASTM G65-16 e perfil de dureza segundo a norma ASTM E18.

## 2. Revisão bibliográfica

Este capítulo abordará partes fundamentais no entendimento e desenvolvimento do estudo em questão, sendo que o conhecimento a seguir está dividido em subseções da revisão bibliográfica.

### 2.1. Aço Ferramenta

Os aços ferramenta são ligas com alto teor de carbono, contendo em sua composição elementos como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio. Esses elementos de liga são combinados ao carbono a fim de se obter compostos à base de carbeto (carbonetos), possuindo elevada dureza e resistência ao desgaste e à abrasão. Esse aço é de extrema importância na indústria e na engenharia mecânica, uma vez que o mesmo é empregado na fabricação de matrizes, moldes, ferramentas de corte e para conformação de chapas, e componentes de máquinas. São também responsáveis por abastecer segmentos como o de autopeças, automobilístico, eletroeletrônico e extrusão de alumínio [1,3].

Se estabelece a nomenclatura dos aços ferramenta de acordo com sua composição, aplicação ou meio de resfriamento. A cada família de aços ferramenta, adota-se uma letra maiúscula, após a designação da letra, para diferenciar aços de uma mesma família, é realizada a adoção de números escritos logo após a letra que representa a família. A Tabela 1, apresenta a classificação de acordo com a *American Iron and Steel Institute (AISI)* [3].

Tabela 1- Classificação dos Aços conforme AISI.

	CLASSE	CARACTERÍSTICA
	W	Temperáveis em água (Water)
	S	Resistentes ao choque (Shock)
Aços para trabalho à frio	O	Temperáveis em óleo (Oil)
	A	Temperáveis ao ar (Air)
	D	Alto teor de Carbono e Cromo
Aços para trabalho à quente	H1-H19	À base de Cromo
	H20-39	À base de Tungstênio
	H40-59	À base de Molibdênio
Aços para moldes	P1-P19	Baixo teor de Carbono
	P20-P39	Outros tipos
Aços para fins especiais	L	De baixa liga
	F	Carbono-Tungstênio
Aços rápidos	T	À base de Tungstênio
	M	À base de Molibdênio

Fonte: Autoria própria.

### 2.1.2. Influência dos elementos de liga no aço ferramenta

A introdução de elementos de liga em aços-carbono é realizada quando deseja-se a melhoria de suas propriedades mecânicas, por meio de mudanças na microestrutura do material [4,5]. A influência de alguns elementos é descrita a seguir:

➤ Silício: Seu teor é normalmente entre 0,10 e 0,30%, uma vez que porcentagens elevadas podem favorecer a grafitação do material. Nos aços resistentes ao choque a quantidade de silício presente é superior, entre 1 à 2%, isto para que se favoreça a têmpera e revenido. Tal elemento também é responsável pelo aumento de resistência à oxidação em temperaturas elevadas.

➤ Manganês: É adicionado em quantidades inferiores à 5%. Esse elemento possui forte influência no favorecimento da têmpera e aumento de dureza do material, todavia, em quantidades superiores à 1,5% forma carbonetos menos estáveis que o Ferro, o que não contribui para a resistência ao revenido. Atua como desoxidante, assim como o silício.

➤ Enxofre: Este elemento é encontrado em quase todos os aços como uma impureza, seu teor normalmente está abaixo de 0,05%, em grandes quantidades forma Sulfeto de Manganês, que é um composto plástico, favorecendo assim a usinabilidade do aço.



➤ Cromo: É responsável pelo aumento de resistência à corrosão e oxidação, também contribui para a resistência ao desgaste e dureza. Uma de suas principais funções é aumentar a temperabilidade. O favorecimento da têmpera pelo Cromo se dá para teores próximos a 4%, sendo este valor empregado em ferramentas para trabalho a quente e em aços rápidos, já em trabalho a frio, a porcentagem adequada está em torno de 12%.

➤ Molibdênio: Possui influência na estabilização do carboneto, aumenta a temperabilidade do aço, a resistência à quente e ao desgaste. Na presença de Níquel e Cromo há aumento da resistência à tração e limite de escoamento.

➤ Níquel: É responsável pelo refino do grão, como também por diminuir a velocidade de transformação na estrutura do aço. Proporciona aumento da resistência à tração e alta ductilidade.

➤ Vanádio: Embora possua efeito sobre a temperabilidade, sua principal função é refinar o grão, uma vez que seu carboneto é de difícil solubilização na austenita na têmpera, acima de 1% confere alta resistência ao desgaste. Também atua como desoxidante e proporciona maior resistência à fadiga e à abrasão.

➤ Cobre: A adição desse elemento tem efeito deletério na ductilidade e tenacidade, quando em teores altos. Em quantidade abaixo de 0,8% aumenta a temperabilidade.

➤ Alumínio: Utilizado em pequenas quantidades, possui funções desoxidantes e de refino de grão. Quando usado em aços objetivando a nitretação, forma com o Nitrogênio o Nitreto de Alumínio, aumentando assim a dureza e resistência à abrasão.

➤ Tungstênio: Atua como formador de carbonetos, favorecendo o revenido. Em quantidades inferiores a 1,5% possui leve influência sob a dureza, em valores acima de 4% proporciona um aumento significativo na resistência ao desgaste, o que dificulta a têmpera, já entre 12% a 20% eleva a dureza a quente, sendo assim empregado comumente em aços rápidos (grupos W e T).

➤ Fósforo: Proporciona aumento da resistência em aços de baixo teor de Carbono, aumento da dureza, como também aumento da resistência à corrosão, conferindo assim uma boa usinabilidade.

## 2.2. Aços ferramenta Villares Metals

Os aços ferramenta fornecidos pela empresa Villares Metals possuem nomenclatura própria, não seguindo a padronização da Tabela 1.

### ➤ VP20TS:

O aço ferramenta fornecido pela empresa Villares Metals, VP20TS corresponde ao aço P20 modificado. O ajuste nos teores dos elementos Cromo, Manganês, Molibdênio e Níquel, como também a redução de Carbono na composição química, atribui ao material em questão uma microestrutura bainítica, de forma que seja garantida uma melhor uniformidade microestrutural, dureza homogênea por toda a seção dos blocos produzidos e melhor polibibilidade [6].

A Tabela 2 a seguir representa a composição química do VP20TS.

Tabela 2- Composição química VP20TS.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>
<b>%</b>	0,150	0,280	1,600	0,012	0,004	1,870	0,680	0,650	0,080	0,150

Fonte: Villares Metals

O VP20TS oferece melhor soldabilidade, uma vez que possui o valor de Carbono reduzido, pois a zona afetada pelo calor tende a ser menor e assim com menor variação de dureza quando comparada ao P20 tradicional. O aço é fornecido com tratamentos térmicos de têmpera e revenido, chegando assim a durezas elevadas.

### ➤ VP20ISO:

É um aço elaborado através de degaseificação a vácuo, com usinabilidade melhorada por tratamento com cálcio. Este material possui boa soldabilidade, polibibilidade e usinabilidade, também apresenta boa uniformidade de dureza [7]. O aço em questão é fornecido com tratamentos térmicos de têmpera e revenido.

É utilizado em moldes para injeção de plásticos não clorados, em especial moldes de grandes dimensões. Sua composição química é apresentada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3- Composição química VP20ISO.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>
<b>%</b>	0,350	0,320	1,600	0,011	0,007	1,88	0,230	0,750	0,014	0,150

Fonte: Villares Metals.

➤ VPATLAS:

Esse material não pertence a nenhuma classe padronizada de aços, todavia é uma alternativa de substituição aos aços pré-endurecidos para 40 HRC. Apresenta alta resistência mecânica, boa usinabilidade e excelente polibilidade [8]. Sua composição química é apresentada na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4- Composição química VPATLAS.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
%	0,270	0,270	1,600	0,010	0,006	1,850	0,690	0,620	0,080	0,150

Fonte: Villares Metals.

O VPATLAS é indicado para a manufatura de moldes e componentes que demandem superior resistência, tanto mecânica quanto ao desgaste, em relação àqueles fabricados em P20. A Tabela 5 a seguir especifica as propriedades mecânicas do aço ferramenta.

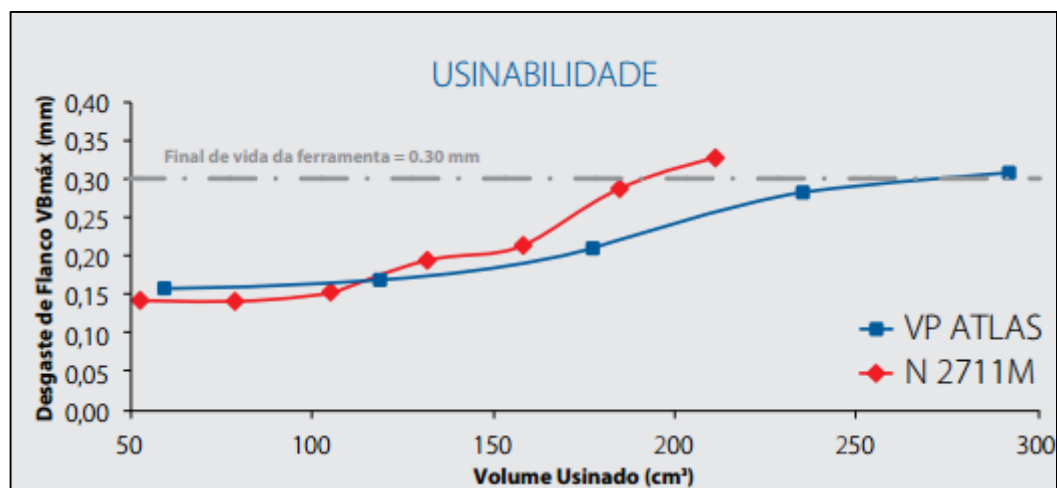
Tabela 5- Propriedades mecânicas VPATLAS.

PROPRIEDADES MECÂNICAS				
DUREZA (HRC)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)	REDUÇÃO EM ÁREA (%)
41	1087	1246	10	31

Fonte: Villares Metals.

A Figura 1 a seguir, fornecida pela empresa Villares Metals, demonstra o melhor desempenho do VP ATLAS com nitretação em teste de vida de ferramenta em fresamento, comparado com o aço N2711M.

Figura 1 - Gráfico de Desempenho VPATLAS em teste de vida ferramenta.



Fonte: Villares Metals.

A Figura 1 retrata um menor desgaste de flanco do VPATLAS para um mesmo volume de material usinado em comparação com o aço N 2711M (pertencente à família P20, dureza próxima a 40 HRC), tal resultado é proveniente da homogeneidade do aço em questão, com a minimização de pontos duros.

➤ **HARDMAX 500:**

O aço ferramenta HARDMAX 500, é um aço de alta resistência a abrasão, o mesmo pode ser dobrado ou soldado. É desenvolvido a fim de que seja aplicado em situações onde exista uma alta exigência do material em relação ao desgaste. O aço HARDMAX 500 possui também alta dureza e boa resistência a impactos. Tal material ainda não é comercializado pela empresa, a mesma vem estudando a melhor maneira de fazê-lo.

A Tabela 6 a seguir indica a composição química do aço ferramenta HARDMAX 500.

Tabela 6 - Composição química Hardmax 500.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>
%	0,260	0,230	1,000	0,012	0,001	0,850
	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>B</b>
%	0,030	0,060	0,010	0,100	0,059	0,001

Fonte: Autoria própria.

### 2.3. Tratamentos térmicos

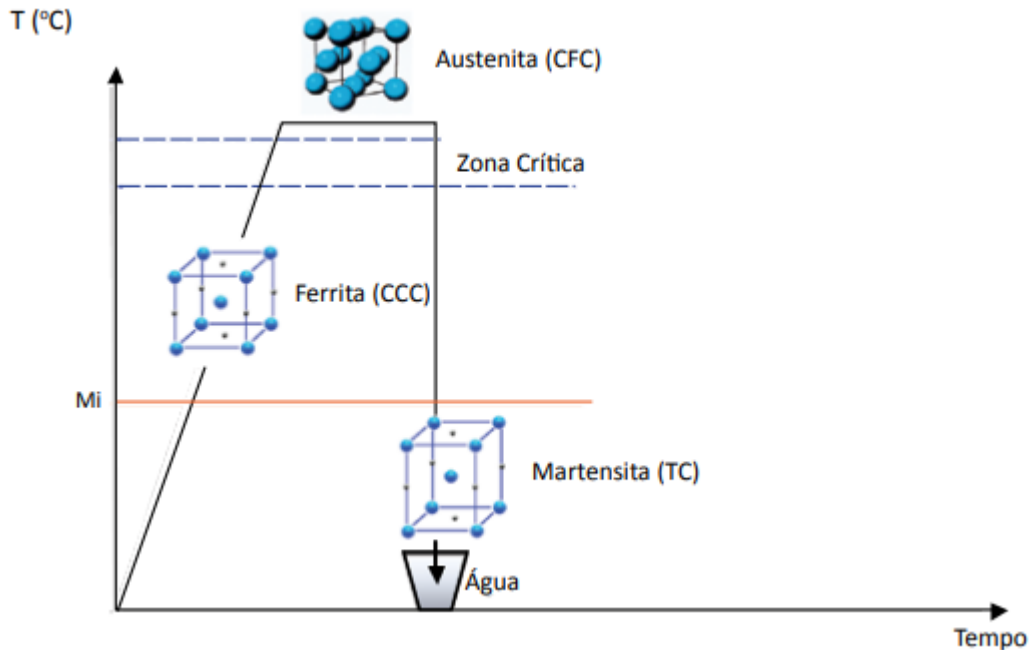
O método mais eficaz para se alterar microestruturas é através de tratamentos térmicos, cada qual objetiva produzir uma estrutura específica.

#### 2.3.1. Têmpera

O tratamento térmico de têmpera é considerado dentre os demais tratamentos o mais importante, visto que promove um elevado aumento da resistência mecânica e da dureza do aço. Todavia, ocorre uma queda considerável da ductilidade e principalmente da tenacidade [9,10].

No tratamento de têmpera o aço é aquecido até uma temperatura acima da zona crítica (austenitização), e essa temperatura é mantida por um certo tempo e em seguida é resfriado bruscamente, como é representado pela Figura 2.

Figura 2- Representação do tratamento térmico de têmpera, temperatura *versus* tempo.



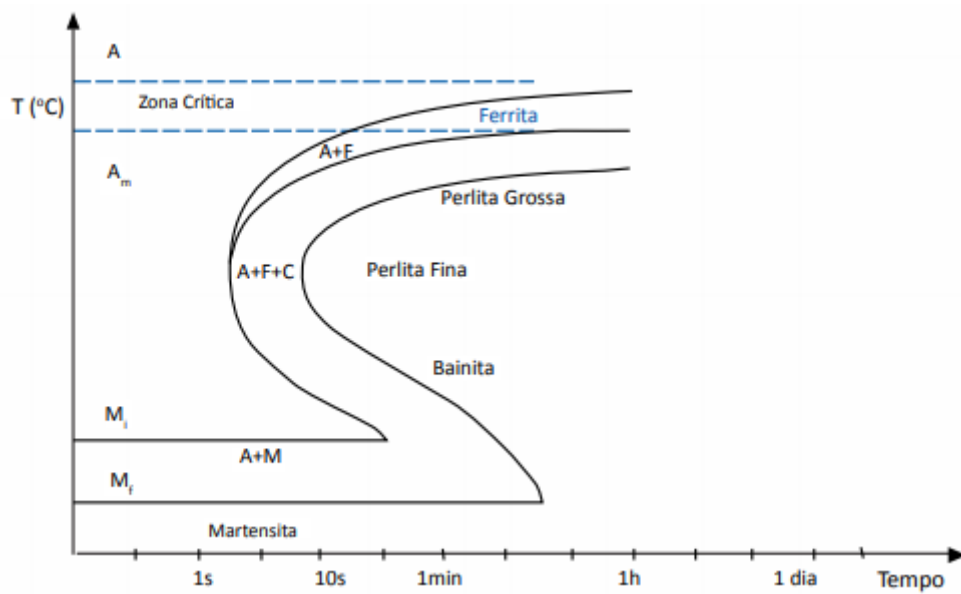
Fonte: AÇOS GERDAU, 2012.

Abaixo de uma certa temperatura ( $M_i$ ) de início de formação de martensita, é formada a martensita com reticulado TC (tetragonal compacto), uma estrutura muito dura e frágil.

O carbono e os elementos de liga estão diretamente ligados ao desempenho deste tratamento, pois influenciam tanto na temperatura de austenitização quanto na velocidade de resfriamento. Em decorrência da variação no teor de carbono e dos elementos de liga, a temperatura de austenitização varia para cada aço. Conforme o teor de carbono do aço é possível obter durezas que vão de 20 HRC até aproximadamente 67 HRC. Em aços que possuem um elevado teor de carbono não é possível obter durezas muito altas, isto devido à retenção de austenita, que é o fato de nem toda austenita ser transformada em martensita [9,10,11].

A temperatura de austenitização e a velocidade de resfriamento são dois fatores primordiais para que seja realizada a têmpera. A velocidade de resfriamento deve ser rápida, tal que impeça a formação de qualquer outro produto que não seja a martensita. Quando os aços são resfriados com velocidades intermediárias outras microestruturas se formam, como a ferrita, perlita e bainita [9,10]. Para descrever o que ocorre durante o resfriamento dos aços submetido a tratamentos térmicos, utilizam-se as curvas TTT – Temperatura, Tempo, Transformação, como indicado na Figura 3.

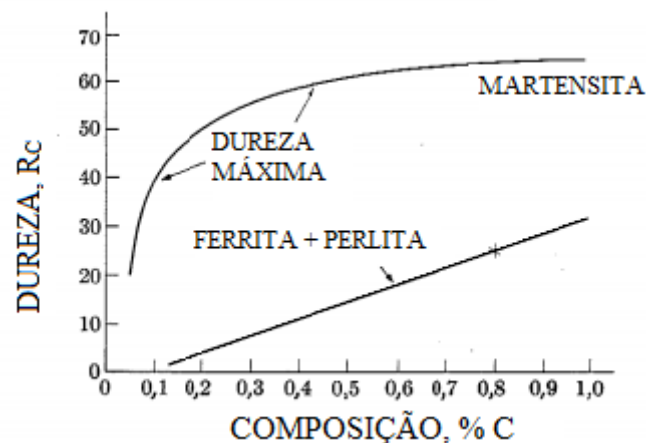
Figura 3 – Curva TTT, Temperatura de transformação isotérmica *versus* Tempo.



Fonte: AÇOS GERDAU, 2012.

A martensita é uma solução sólida supersaturada em carbono, possui estrutura tetragonal de corpo centrado, uma vez que um de seus eixos fica expandido pela presença de carbono aprisionado. Tal distorção do reticulado cristalino é a principal razão pela qual a martensita possui elevada dureza. A Figura 4 mostra a máxima dureza possível em aços, em função de seu teor de carbono, tal valor só é obtido com 100% da estrutura martensítica [9,11].

Figura 4- Dureza *versus* Teor de carbono de aços carbono comuns.



Fonte: VAN VLACK, 1984.

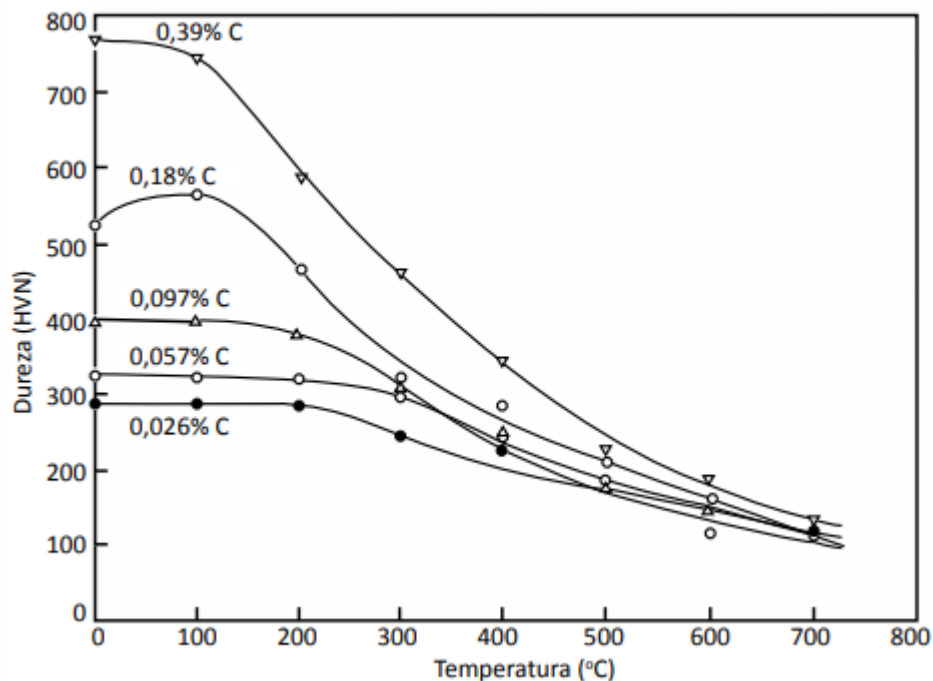
### 2.3.2. Revenido

Devido à queda da ductilidade e tenacidade, ocasionada pelo tratamento térmico de têmpera, é aconselhável que seja realizado o revenido, para correção de tais propriedades, pois as mesmas mostram-se de suma importância quando se quer reduzir o peso da peça ou evitar o desgaste superficial [10].

No revenido faz-se o reaquecimento da peça temperada, usualmente entre uma faixa de temperatura de 150°C à 600°C. O reaquecimento ocorre durante um intervalo de tempo suficiente para que à recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas aconteça, o resfriamento se dá à temperatura ambiente. Durante o tratamento, a martensita perde o seu excesso de carbono em solução, assim seu reticulado cristalino vai se tornando mais semelhante ao da ferrita, sem distorção ou acúmulo de tensões mecânicas [9].

Geralmente em aços a dureza cai continuamente com o aumento da temperatura de revenido, como mostra a Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Tratamento térmico de revenido, Dureza *versus* Temperatura.



Fonte: AÇOS GERDAU, 2012.

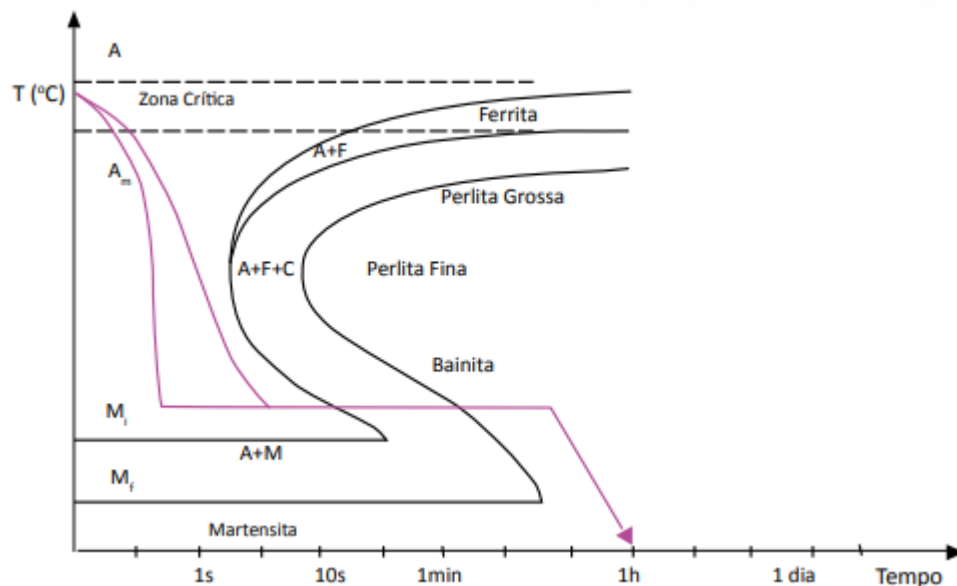
### 2.3.3. Austêmpera

Na austêmpera, a austenitização é realizada de forma semelhante à têmpera convencional, em seguida mergulha-se o aço em um banho constituído de uma mistura de sais fundidos, mantêm-se a temperatura constante, entre 250 e 450 °C. O resfriamento é realizado em banho de sais, deve ser suficientemente rápido para evitar a formação de ferrita e perlita e induzir a formação de bainita. A austêmpera é também, um tratamento térmico para endurecimento de aços [9,11].

A bainita e a martensita de revenido possuem estruturas bastante parecidas, todavia, a bainita possui maior tenacidade. A microestrutura e as propriedades de ambas fases, variam com a temperatura de transformação [9,11].

Esse processo possui a vantagem de não possibilitar o desenvolvimento de martensita frágil em aços de alto teor de carbono. A Figura 6 a seguir apresenta a curva TTT do processo de austêmpera.

Figura 6 - Curva TTT, Temperatura de transformação isotérmica versus Tempo, tratamento térmico de austêmpera.



Fonte: AÇOS GERDAU, 2012.



## **2.4. Classificações e Mecanismos de Desgaste**

Desgaste é classificado como o dano produzido sobre uma superfície por interação com outra. Envolve perda progressiva de material devido a carga e o deslocamento entre as mesmas. Superfícies sólidas não são lisas em escala microscópica, mas sim cobertas por asperezas, assim, quando estão superpostas a interação ocorre no topo de algumas asperezas e à medida que a carga aumenta é causada deformação, de forma a aumentar a área de contato ao mesmo tempo que novas asperezas começam a interagir [12, 13].

O comportamento do material quando está sob desgaste depende do tipo de contato a que estão submetidas as superfícies, como também do nível de tensão, temperatura resultante e características do ambiente. Sendo assim é possível controlar o desgaste, por meio do monitoramento de força e energia. Cada mecanismo de desgaste envolve diferentes fenômenos que o caracterizam e em muitas situações, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros. Segundo a norma DIN 50320, há quatro mecanismos diferentes de desgaste, ou uma combinação entre eles: abrasão, erosão, adesão, fadiga superficial e ainda reação triboquímica [12,13,14].

### **2.4.1. Desgaste Abrasivo**

O desgaste por abrasão ocorre quando uma superfície dura e rugosa desliza sobre outra mais macia. O que acontece quando há interação de duas asperezas é que, ao invés delas se aderirem ou deformarem, a mais dura corta ou risca a mais macia, o que implica na perda de material na superfície macia. Abrasão é o desgaste que ocorre devido a partículas duras ou forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida. A resistência ao desgaste está associada a deformação que o material resiste de forma não permanente [12,13].

As características dos materiais submetidos à ação do desgaste abrasivo possuem um efeito significativo sobre a magnitude do estrago causado ao mesmo [15]. A influência de algumas dessas características é apresentada na Tabela 7.

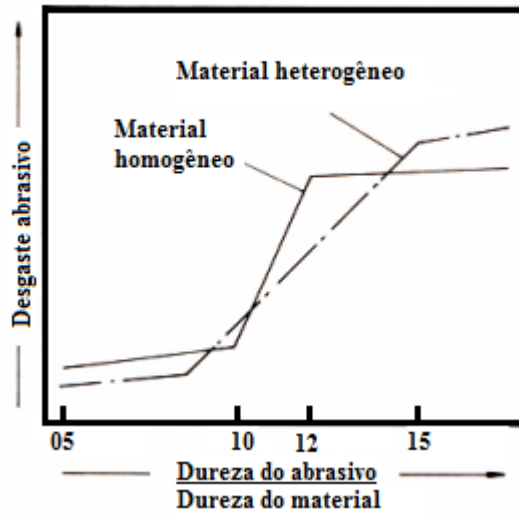
Tabela 7 - Influência das características dos materiais no desgaste abrasivo.

<b>CARACTERÍSTICA DO MATERIAL</b>	<b>EFEITO SOBRE O DESGASTE ABRASIVO</b>
Dureza	Relação linear entre a dureza da superfície desgastada e a resistência ao desgaste. Materiais puros e ligas possuem diferentes graus de correlação.
Módulo de elasticidade	Existem dúvidas na correlação entre a resistência ao desgaste e o módulo de elasticidade. Um alto módulo de elasticidade proporcionaria altas tensões de contato que, por sua vez, promoveria a redução na resistência ao desgaste. Entretanto, como o módulo de elasticidade está conectado a muitas outras propriedades do material, esta correlação ainda é difícil.
Estrutura cristalina	Os cristais cúbicos desgastam-se a taxas duas vezes maior que os cristais hexagonais.
Microestrutura	Quanto maior for a ductilidade e o encruamento do material, maior será a resistência ao desgaste. A introdução de uma segunda fase é um método utilizado para aumentar a resistência ao desgaste.
Tenacidade à fratura	Quanto maior a tenacidade, maior é a resistência ao desgaste, principalmente em materiais frágeis.
Temperatura de fusão	Quanto maior a temperatura de fusão, maior é a resistência ao desgaste, devido a menor tendência ao amolecimento.
Composição química	A adição de elementos de liga é comumente utilizada para aumentar a resistência ao desgaste.

Fonte: EKBERG, 1997.

Em materiais homogêneos, a mudança do nível mais baixo de desgaste ocorre quando a razão entre as durezas entre material abrasivo e desgastado é igual a 1. Nos materiais heterogêneos, considera-se a transição do nível de intensidade de desgaste quando a dureza do abrasivo ultrapassa a do material, tal fato se dá devido a matriz ser mais dúctil do que à matriz dos materiais homogêneos para o mesmo nível de dureza, como pode ser observado na Figura 7 [15].

Figura 7– Desgaste abrasivo como função da relação entre a dureza das partículas.



Fonte: Adaptado de ZUM GHAR, 1987.

Segundo a forma com que as partículas duras e / ou protuberâncias duras se apresentam, o desgaste pode ser classificado em:

- Abrasão a dois corpos

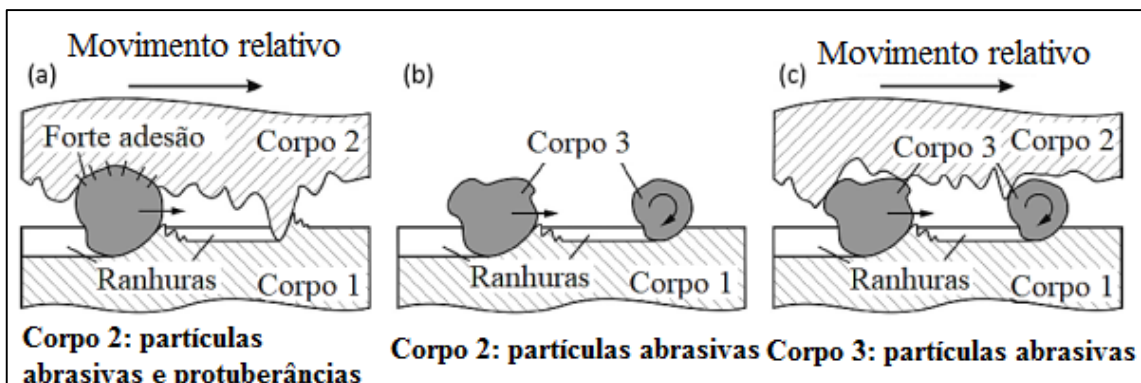
Quando é causado por protuberâncias duras ou partículas duras embebidas na superfície de dois corpos.

- Abrasão a três corpos

Quando as partículas podem se mover livremente (rolar ou deslizar) entre as superfícies de contato.

A classificação do desgaste de abrasão a dois ou três corpos pode ser vista na Figura 8.

Figura 8- Processo de desgaste abrasivo: (a) e (b) abrasão por 2 corpos e (c) abrasão por 3.



Fonte: Adaptado de KANDEVA-IVANOVA, M; VENCL, A; KARASTOYANOV, D, 2016.

Conforme a classificação dos modos de desgaste, o desgaste abrasivo pode ser dividido conforme os tópicos a seguir:

➤ Desgaste por moagem ou a alta tensão

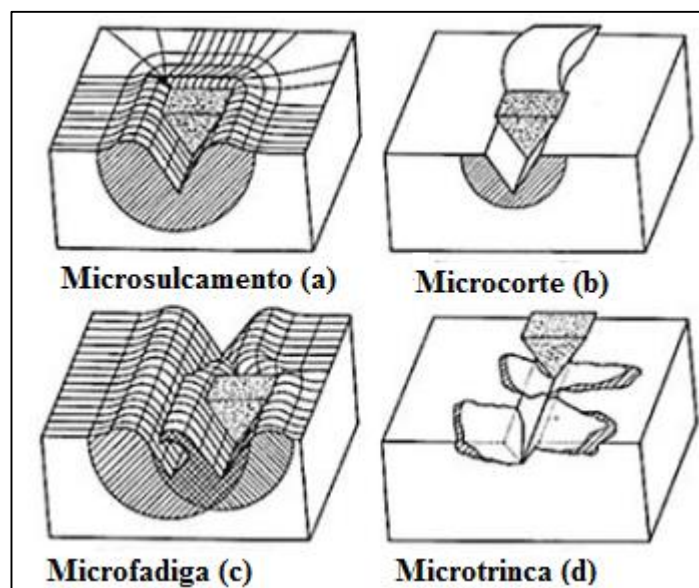
Ocorre entre partículas abrasivas e metal, podendo haver ou não o esmagamento do abrasivo. Este esmagamento pode acontecer por tensões fortes ou médias, provocando superfícies de pequenos fragmento. As partículas abrasivas são normalmente de dimensões médias entre 1 e 5cm. As partículas maiores causam desprendimento de fragmentos do metal, enquanto as de menores dimensões provocam o desgaste superficial, pelo deslocamento de pequenos fragmentos do metal [12,13].

➤ Desgaste por riscamento ou baixa tensão

Nesse caso materiais abrasivos deslizam sobre uma superfície com cargas baixas, de forma que não haja impacto significativo. A região danificada apresenta riscos, mas se a granulometria do abrasivo for fina, resulta em acabamento polido. A principal propriedade necessária ao material para resistir a esse tipo de desgaste abrasivo é a dureza, uma vez que devido à ausência de impactos, não há influência da tenacidade. Ainda neste mecanismo quatro micromecanismos básicos são possíveis: o microsulcamento, o microcorte, o microsulcamento repetido e o microtrincamento [12,13].

A Figura 9 a seguir ilustra os micromecanismos citados anteriormente.

Figura 9- Micromecanismos de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento, (b) microcorte, (c) microfadiga e (d) microtrinca.



Fonte: Adaptado de ZUM GAHR, 1987.

➤ Abrasão por Goivagem

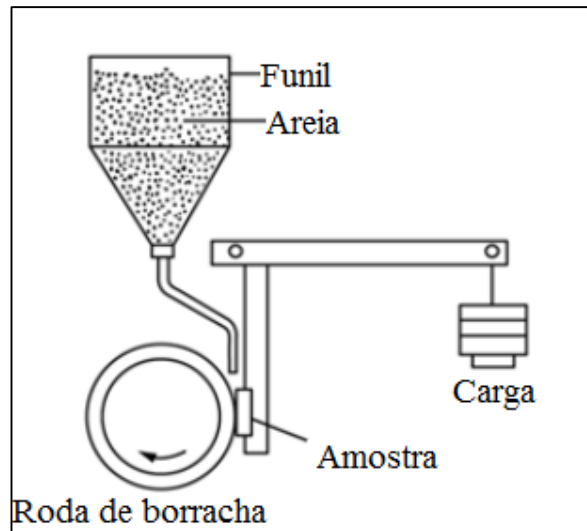
Ocorre quando partículas relativamente grandes deslizam sob uma superfície, de forma a ocasionar goivagem do material, o processo pode ser acompanhado de forte impacto. Devido a tais impactos, para que o material resista ao desgaste é necessária uma combinação de dureza e tenacidade.

#### **2.4.1.1. Ensaio abrasivo ASTM G65-16**

O ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65-16 possui como finalidade determinar a resistência de materiais metálicos à abrasão, por meio de procedimentos laboratoriais, do ensaio de areia seca / roda de borracha. A intenção deste método de ensaio é produzir dados que classifiquem os materiais em sua resistência à abrasão por raspagem sob um conjunto específico de condições. Os resultados do mesmo são obtidos por meio de perda de volume em milímetros cúbicos. Materiais de maior resistência à abrasão terão menor perda de volume. Segundo a norma ASTM G65-16, o disco de contato consiste em um aro de borracha de largura e espessura de 12,7 mm (1/2") posicionado sobre um disco de aço com diâmetro de 228,6 mm. O disco (ou a roda) gira com uma rotação constante de 200 RPM com variação permitida de  $\pm 10$  RPM, e o fluxo de abrasivo é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão compreendida numa faixa entre 300 e 400 g/min. Os corpos de prova devem apresentar o formato retangular com dimensões de 25 x 75 x 12,7 mm [17].

A Figura 10 representa os componentes da máquina de ensaio de desgaste, segundo a norma ASTM G65-16, de forma simplificada.

Figura 10 - Esquema simplificado da máquina utilizada.



Fonte: Adaptado de ASTM G65-16, 2016.

#### 2.4.2. Desgaste Adesivo

É caracterizado pelo deslizamento de um corpo sobre outro, de forma que haja remoção de fragmentos de uma das superfícies, aderindo assim mecanicamente a outra. É marcado pela ruptura ou arrancamento de material, possuindo um cavaco descontínuo.

A adesão é observada quando dois corpos são colocados em contato sob carregamento, de forma que a pressão de contato seja elevada. Uma vez que existe movimento entre as superfícies, a junção adesiva irá se romper. Se a resistência adesiva da junção se mostra menor do que a resistência coesiva do material, a junção se rompe no ponto original de contato, não ocorrendo perda de material nas superfícies. Todavia, se a resistência adesiva é maior, então a junção se rompe na aspereza mais fraca, de forma que o material é transferido de uma superfície para outra. Uma união normalmente se rompe próximo ao contato original, com a transferência de um pequeno número átomos entre as superfícies. Após produzida esta interação primária, o próximo contato acontece entre materiais similares, sendo assim a adesão é mais intensa e consequentemente o fluxo de material é maior, crescendo por transferências repetidas até sua remoção, originando o desgaste [12,13].

Os tipos de desgaste adesivo são classificados como:

- Desgaste por oxidação

Em condições atmosféricas normais, as superfícies metálicas são cobertas por camadas de gases, vapores ou produtos de reações químicas, geralmente óxidos, o que diminui a resistência das uniões formadas. O desgaste por oxidação é observado quando as condições a

que o material está submetido não são suficientemente severas a ponto de impedir ou remover a camada de óxido, sendo assim é formada uma fina camada de partículas oxidadas, não permitindo que haja adesão. Tal mecanismo ocorre com cargas moderadas em materiais que apresentam baixa adesão independente da formação de filmes superficiais [12,13].

➤ **Desgaste metálico**

Com alta velocidade de deslizamento, temperatura ou carga, é alcançado um cenário no qual o filme de óxido é removido mais rapidamente do que é recomposto e o mecanismo passa a ser de desgaste severo. As partículas desprendidas são em sua grande maioria metálicas e as superfícies possuem aspecto rugoso e rasgado, devido ao cisalhamento. A taxa de destruição da película superficial varia de acordo com a carga e velocidade de deslizamento, de forma que os fatores de segurança de operação são em sua essência dinâmicos [12,13].

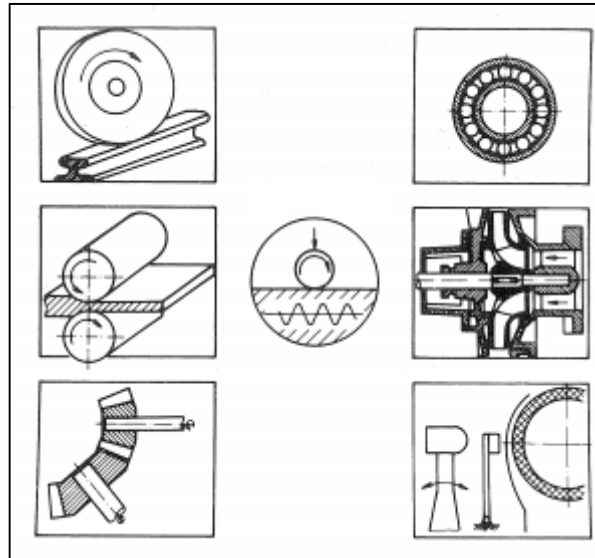
### **2.4.3. Desgaste por fadiga superficial**

O desgaste devido à fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e lascamento do material, causada por cargas alternadas repetidas de superfícies sólidas. A falha por fadiga superficial apresenta a seguinte sequência: deformação elástica, deformação plástica, encruamento e formação e propagação de trincas [10,11].

O contato rolante e/ou deslizante de sólidos ou o contato de impacto de sólidos e/ou líquidos, podem resultar em tensões cíclicas superficiais. A fadiga pode ocorrer em escala microscópica, devido ao contato deslizante repetido de asperezas nas superfícies de sólidos em movimento relativo [12,13].

A Figura 11 a seguir mostra sistemas tribológicos que podem sofrer desgaste devido à fadiga superficial. Danos severos podem ocorrer nos sistemas de trilhos e rodas, cilindros, engrenagens, rolos para laminação a frio ou a quente, bombas que possuem partículas impactantes no fluido ou cavitação e em dispositivos de impressão mecânica.

Figura 11- Sistemas que possuem risco de desgaste por fadiga superficial.



Fonte: ZUM GAHR [1987].

Durante o contato, o carregamento e descarregamento cíclicos, podem produzir trincas na superfície ou abaixo da mesma, ocorrendo trincamento e destacamento de fragmentos de material.

#### 2.4.4. Desgaste por oxidação

Há formação de produtos de reações químicas resultante da interação química entre os elementos de um tribosistema, iniciada por ação tribológica. Normalmente é caracterizado apenas pela oxidação, uma vez que é o maior agente influenciador para tal mecanismo. O ambiente corrosivo pode ser gasoso ou líquido. O processo de desgaste ocorre por remoção contínua de material, seguida de nova formação de camadas oxidadas nas superfícies de contato [12,13]. Na presença de oxigênio atmosférico, os detritos consistem em grande parte de óxidos, que se formaram nas superfícies e foram removidos por fricção. Os mecanismos de desgaste por corrosão são divididos em quatro categorias:

1. Contato metálico entre asperezas superficiais que levam à remoção do metal devido à adesão. Pequenos restos de desgaste metálico produzidos podem ser oxidados.
2. Reação química dos metais com o ambiente resulta em camadas superficiais de proteção que reduzem o contato metálico.
3. Trincamento de camadas superficiais devido à altas pressões de contato, ou a micro fadiga, resulta em detritos de desgaste não metálicos.



4. Detritos de desgaste metálico e não metálico podem agir de forma abrasiva, tornando ásperas as superfícies de contato. A nova formação de camadas de proteção pode ocasionar superfícies mais lisas novamente.

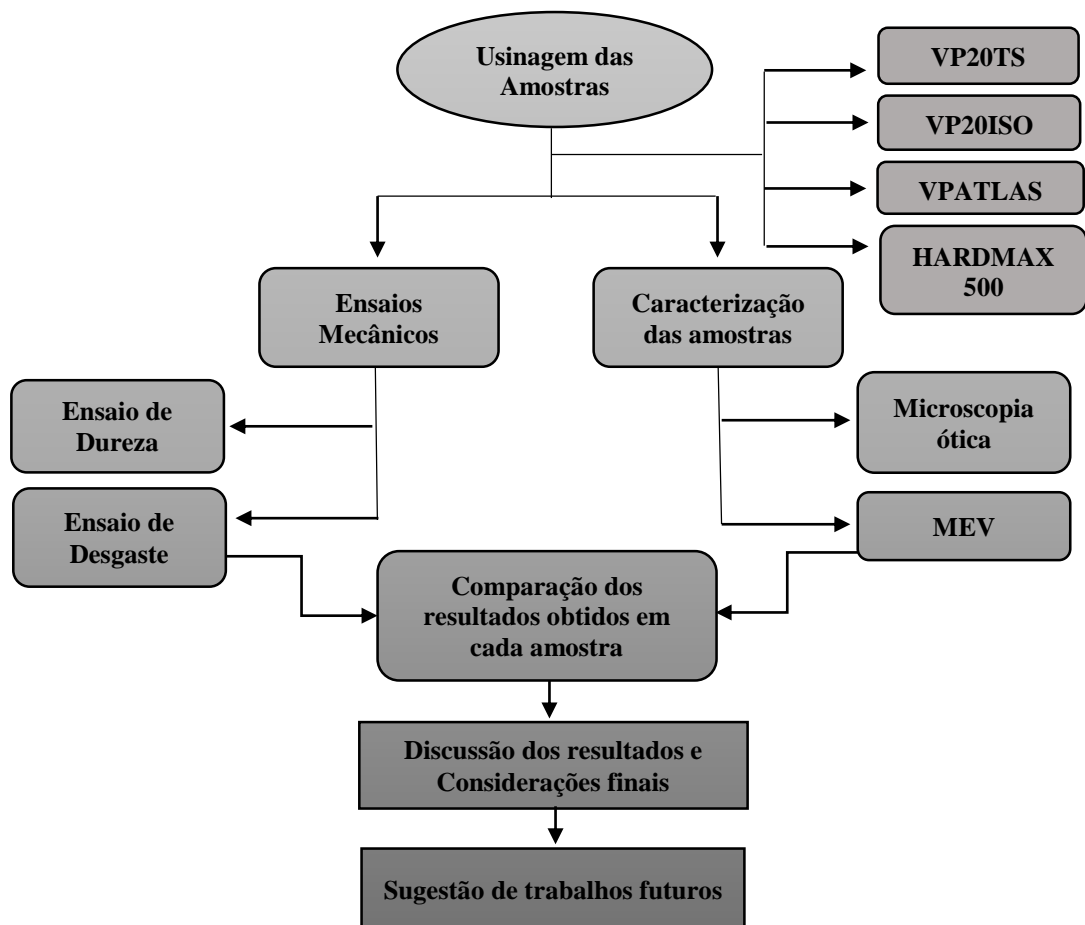
O dano nas superfícies atritadas e a perda de massa são causados pela ocorrência repetida desses diferentes processos. O desgaste por corrosão é fortemente influenciado pela cinética de formação de camadas superficiais e propriedades que determinam sua resistência à remoção, ductilidade, dureza e adesão ao substrato [12,13].

### 3. Metodologia

Esta seção possui como finalidade apresentar de forma mais clara possível, e em sequência cronológica, as etapas e materiais necessários para a realização dos processos aos quais os aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX500 serão submetidos, visando assim o estudo e análise completa de suas propriedades.

São apresentadas as etapas realizadas na elaboração deste trabalho, conforme fluxograma mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas.

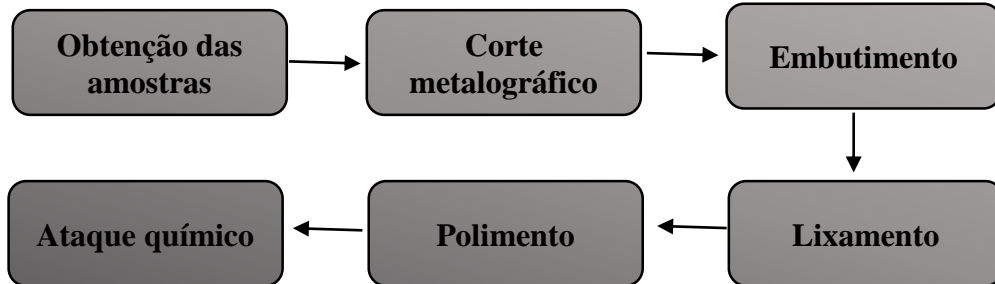


Fonte: Autoria própria.

### 3.1. Metalografia dos Corpos de Prova

A metalografia das amostras ocorre como representado na Figura 13 a seguir.

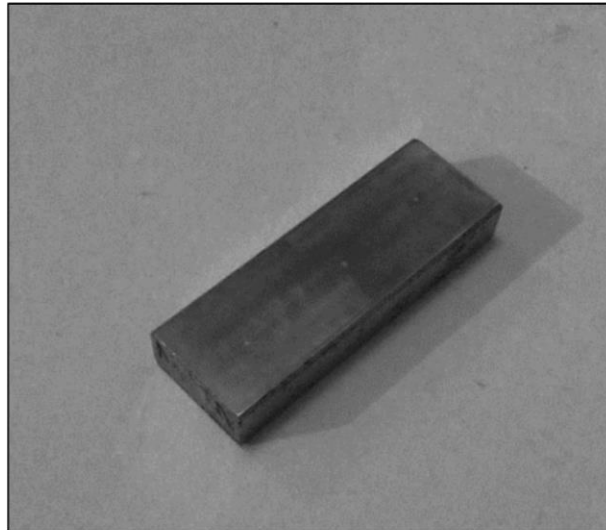
Figura 13 - Representação esquemática das etapas metalográficas.



Fonte: Autoria própria.

A primeira etapa, conforme a Figura 13 é a obtenção das amostras (oito corpos de prova), que foram fornecidos pela empresa Villares Metals, em dimensões retangulares de 25x76 mm, com espessura de 10 mm, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Corpo de prova.

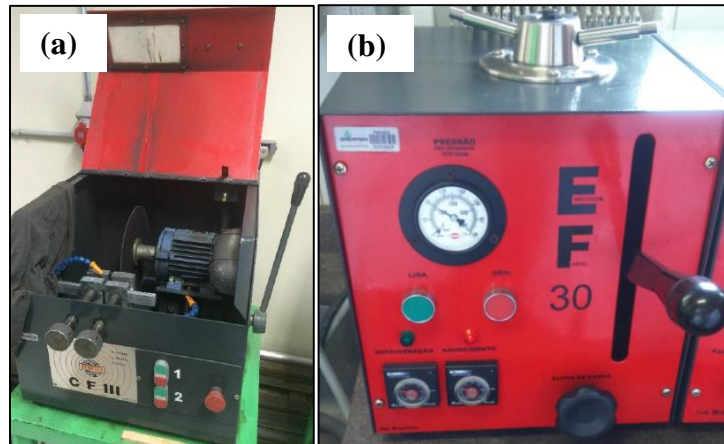


Fonte: Autoria própria.

Em seguida, faz-se o corte metalográfico, utilizando um disco de corte abrasivo, com a finalidade de definir o plano que será submetido à análise. Neste plano objetiva-se visualizar a microestrutura do material. Tal procedimento é realizado com o auxílio de uma máquina policorte, mostrada na Figura 15(a).

Após o corte, realiza-se o embutimento do aço, para facilitar seu manuseio nos processos subsequentes. Utiliza-se como resina o baquelite, e uma Embutidora Digital Fortel, vista na Figura 15(b).

Figura 15 – a) Máquina Policorte; b) Embutidora Digital Fortel



Fonte: Autoria própria.

Após o embutimento em baquelite lixam-se manualmente as amostras em uma sequência de lixas com granulometrias de 80, 120, 220, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 com o auxílio de lixadeiras manuais, a fim de remover qualquer possível defeito pré-existente.

Posteriormente ao lixamento, as superfícies das amostras serão polidas utilizando um veludo para polimento com alumina ( $Al_2O_3$ ) de  $1 \mu m$  para acabamento final. O ataque químico é realizado com Nital 3%, durante 15 segundos.

### 3.1.2. Microscopia Ótica

Com o auxílio de um microscópio ótico é observada e fotografada a superfície desejada, entretanto, este tem um aumento reduzido impedindo uma visualização tão aprofundada quanto o MEV, que será abordado mais adiante no trabalho.

A Figura 16, a seguir, traz um microscópio ótico da marca Fortel, que será utilizado na análise microscópica das amostras deste trabalho:

Figura 16 – Imagem microscópio ótico



Fonte: Autoria própria.

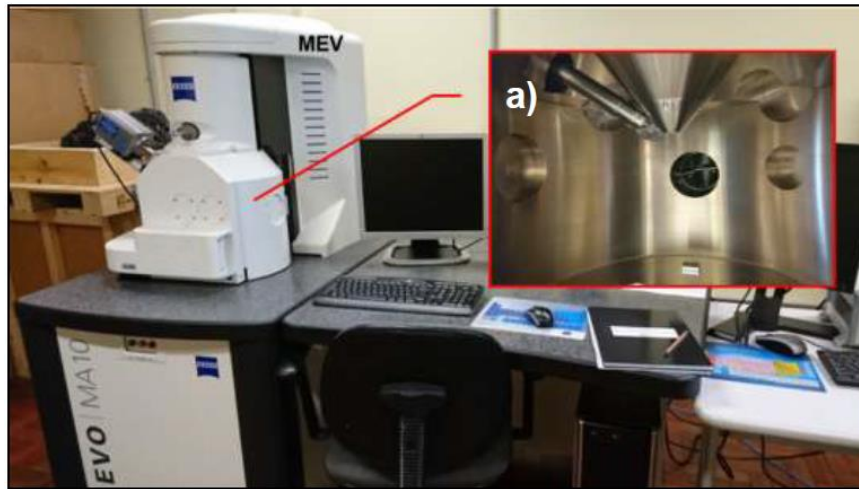
### 3.1.3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

O MEV possui como princípio de funcionamento a emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), por meio da aplicação de uma diferença de potencial, variando de 0,5 a 30 kV. Dentro da coluna de alto vácuo, os elétrons gerados a partir de um filamento de tungstênio, são acelerados por uma diferença de potencial entre cátodo e ânodo entre 0,3 kV a 30 kV. O feixe produzido incide por lentes condensadoras que reduzem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra de trabalho. Logo acima da lente objetiva há dois estágios de bobinas eletromagnéticas, que são responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra a ser analisada [18].

O equipamento em questão é usado para auxílio na quantificação e caracterização (morfologia e tipo) de um material. O MEV combina alta resolução (100 - 200 Å) com profundidade de foco, 1000 vezes maior que as obtidas em um microscópio ótico.

O aparelho apresentado é parte do patrimônio laboratorial da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete e é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – MEV. a) Câmara de vácuo do MEV.



Fonte: RONZANI, 2017.

### 3.2. Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado no durômetro marca TIME modelo TH500 conforme ilustrado na Figura 18. O equipamento está localizado na sala 105 da Unipampa – Campus Alegrete.

Figura 18- Durômetro.



Fonte: Autoria própria.

A escala utilizada foi a Rockwell [HRC], que faz uso de um cone penetrador de diamante com carga inicial de 10kg passando a 150kg como valor de carga principal. A medida da dureza

então é realizada pelo aparelho de acordo com a diferença de profundidade de penetração do penetrador, conforme a norma ASTM E18.

A Equação 1 é utilizada para obtenção dos valores de dureza, e é dada por:

$$\text{Dureza Rockwell} = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (1)$$

Onde, h é a profundidade entre os pontos de carga inicial e principal, e os outros valores são determinados pela norma.

Foram realizadas dez medições nas amostras, para cálculos de média aritmética e desvio padrão, é utilizada a Equação 2.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum(X_i - X)^2}{n}} \quad (2)$$

Onde:

Dp – desvio padrão;

X<sub>i</sub> – valor individual;

X – Média dos valores;

n – Número de valores.

### 3.3. Ensaio de Desgaste

No ensaio previsto na norma ASTM G65-16, como mostra a Figura 19, que apresenta os componentes da máquina de forma simplificada, a carga imposta exerce uma força normal à superfície no contato entre a amostra e a roda de borracha, e uma cortina uniforme de material abrasivo (areia) é formada e passa através da amostra e a roda de borracha garantindo o ensaio à três corpos. A rotação da roda de borracha faz com que a sua face de contato se mova no mesmo sentido do fluxo de material abrasivo. O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado pela empresa Rijeza Metalurgia.

A rotação utilizada para o ensaio de desgaste ASTM G65-16 foi de 200 rpm, com velocidade de 22.860 (mm/min), e carga 130 N. O tempo de teste possui intervalo de 5 minutos, sendo iniciado em 10min e finalizando 20min, de tal forma que foram realizados três testes para cada amostra, de 10 min, 15 min e 20 min, totalizando um total de 24 testes.

Os corpos de prova foram pesados antes de fazer os testes e a cada 5 minutos de ensaio.

Figura 19 - Equipamento utilizado para ensaio de desgaste. Empresa Rijeza. (A) Foto equipamento (B) ASTM G65-16.



Fonte: PANZIERA, 2019.

Faz-se necessário antes de cada ensaio, que as amostras sejam pesadas, utilizando-se uma balança com precisão de 0,001 gramas. Ao final do ensaio sua superfície deve ser limpa e novamente pesada. A diferença entre as massas final e inicial serve para calcular o volume de material perdido pela amostra durante o ensaio, utilizando a Equação 3.

$$\text{Volume perdido [mm}^3\text{]} = \frac{\text{massa perdida [g]}}{\text{densidade [g/cm}^3\text{]}} \times 1000 \quad (3)$$

#### 4. Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados da análise ótica, microscopia eletrônica de varredura, perfil de dureza e desgaste, comparando as amostras conforme descrito na metodologia do Capítulo 3.

##### 4.1. Análises microestruturais

Nesta seção serão expostos os resultados obtidos na análise qualitativa da microestrutura do material, ou seja, na observação da estrutura para identificação das fases presentes.



#### 4.1.1. Microscopia Ótica

Dos oito corpos de prova recebidos, dois de cada aço ferramenta, a análise microestrutural foi realizada em apenas quatro, sendo uma amostra de cada material.

O ataque químico foi realizado com nital 3%, que normalmente é utilizado para revelação de microestruturas de aços ao carbono, o mesmo apresenta certa limitação na identificação de determinadas fases, principalmente se existirem simultaneamente. As amostras atacadas com nital tendem a diferenciar basicamente duas tonalidades: a mais clara corresponde a ferrita e austenita retida, e a mais escura corresponde a martensita, bainita e perlita. O ataque químico foi realizado com nital 3% por ser o reagente disponível no laboratório da UNIPAMPA.

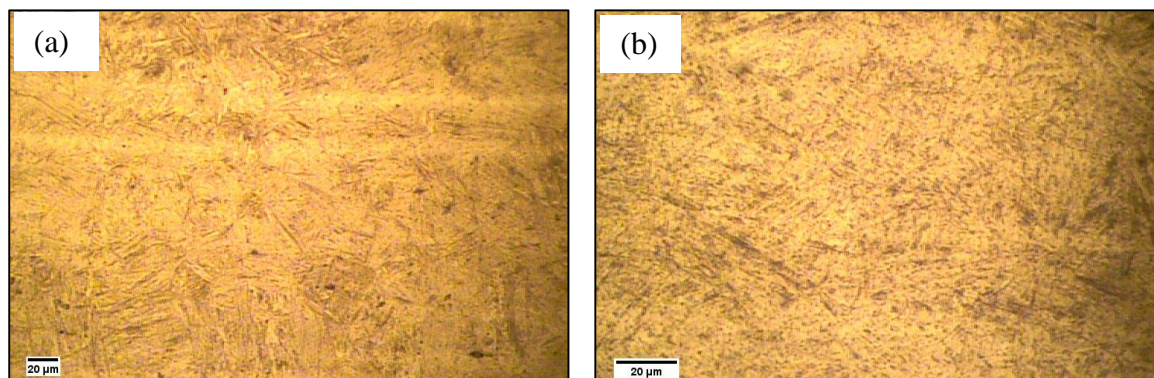
Após a preparação metalográfica das amostras, de acordo com o passo a passo indicado no Capítulo 3, foram obtidas imagens da microestrutura dos materiais pelo microscópio ótico. A partir das mesmas, são apresentadas as análises macroestruturais de cada material em estudo.

##### •VPATLAS

Observa-se que a microestrutura das Figuras 20 (a) e (b), apresentam fase bainítica, em que os carbonetos se precipitam como partículas alongadas.

A partir de sua microestrutura bainítica, é possível afirmar que o VPATLAS passou por tratamento térmico de austêmpera, o que além de lhe proporcionar elevada dureza, apresenta uma boa ductilidade.

Figura 20 - Microscopia ótica VPATLAS com ampliação (a) 200x (b) 400x.

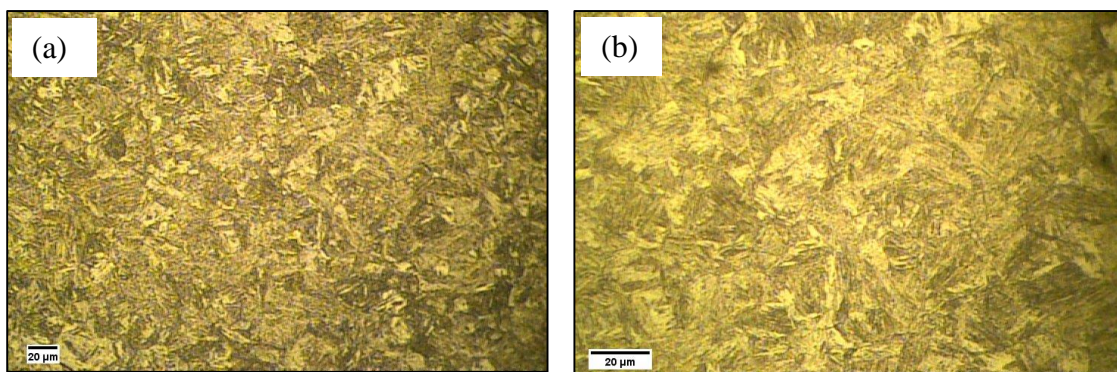


Fonte: Autoria própria.

### • VP20ISO

As Figuras 21 (a) e (b), do aço VP20ISO, indicam uma fase martensítica, como esperado, pois o material é fornecido temperado e revenido. A fase martensítica é caracterizada por ser uma fase metaestável composta por ferro e supersaturada com carbono, o que constitui elevada dureza ao material. As partes brancas nas Figuras 21 (a) e (b), indicam austenita retida, o que acarreta em algumas regiões de menor dureza, pois a austenita é mais macia do que a martensita.

Figura 21- Microscopia ótica VP20ISO com ampliação (a) 200x (b) 400x.

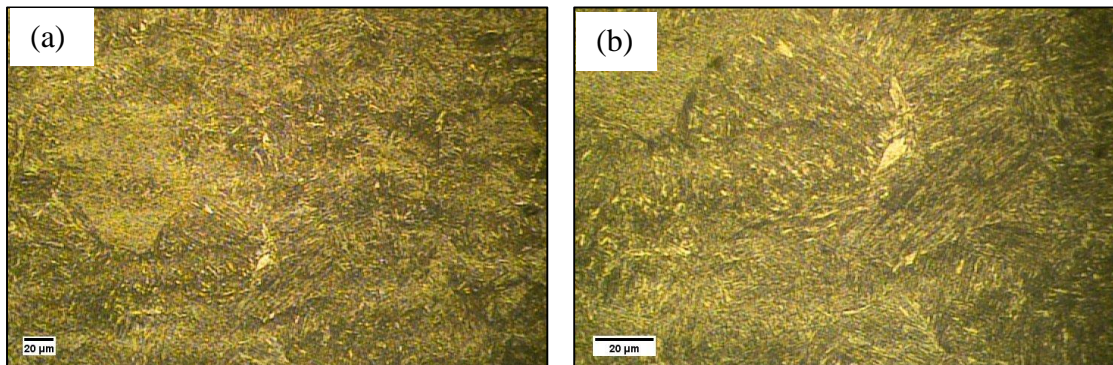


Fonte: Autoria própria.

### • VP20TS

Como pode ser observado nas Figuras 22 (a) e (b), assim como o VPATLAS, o aço VP20TS apresenta fase bainítica, mesmo que tenha passado pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, cuja microestrutura esperada é martensita, isto ocorre devido à adequação dos teores de Cr, Mn, Mo e Ni, bem como a redução do teor de C em sua composição química.

Figura 22 - Microscopia VP20TS com ampliação (a) 200x (b) 400x.

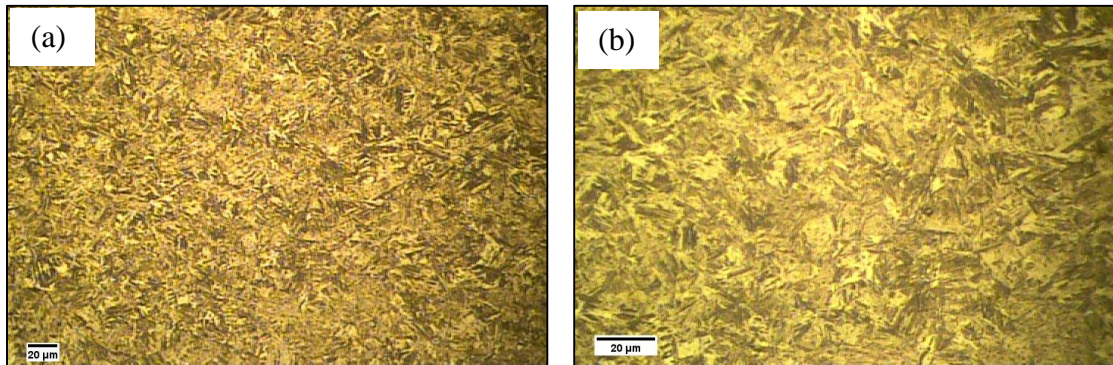


Fonte: Autoria própria.

### • HARDMAX 500

A partir das Figuras 23 (a) e (b), observa-se que, assim como o VP20ISO, o material em questão possui microestrutura constituinte de fase martensítica, todavia, possui menos austenita retida, ou seja, o aço HARDMAX 500 é mais homogêneo.

Figura 23 - Microscopia ótica HARDMAX 500 com ampliação (a) 200x (b) 400x.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2. Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza foram selecionadas quatro amostras, uma de cada material sendo realizadas 10 medições em cada amostra, totalizando 40 medições. A Tabela 8 apresenta os valores médios e desvio padrão.

Tabela 8 - Valores de dureza obtidos.

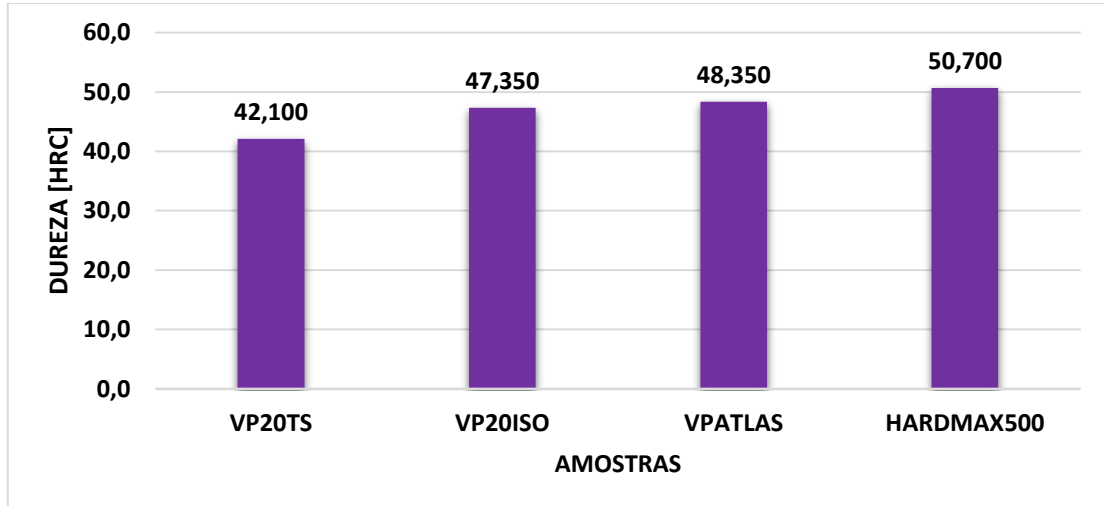
AMOSTRAS	MÉDIA [HRC]	DESVIO PADRÃO
VPATLAS	48,350	0,337
HARDMAX 500	50,700	1,531
VP20TS	42,100	0,699
VP20ISO	47,350	0,669

Fonte: Autoria própria.

Com base na Tabela 8, constata-se que ambos aços possuem elevada dureza, isso ocorre pelo fato da presença de elementos de liga, como: Alumínio, Manganês, Fósforo e Cromo, que conferem aos aços ferramenta aumento de dureza. O material com maior dureza é o HARDMAX 500 seguido pelo VPATLAS, VP20ISO e VP20TS, de forma decrescente.

A seguir, a Figura 24 indica os dados da Tabela 8 para uma melhor visualização dos resultados obtidos.

Figura 24 – Gráfico referente ao ensaio de dureza.



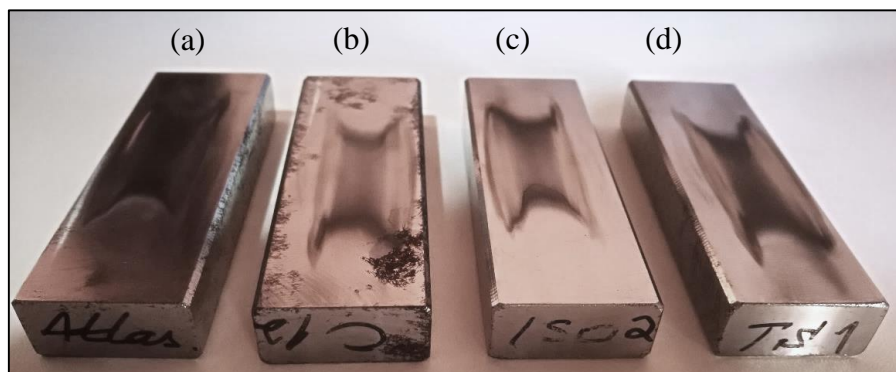
Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 assim como a Tabela 8, possibilita a visualização dos resultados obtidos no ensaio de dureza, variando de valores de 42,1 HRC à 50,7 HRC.

### 4.3. Ensaio de Desgaste

O ensaio de desgaste foi realizado a fim de se comparar os quatro corpos de prova, sendo eles amostras dos aços ferramenta VPATLAS, HARDMAX500, VP20ISO e VP20TS, conforme a Figura 25, que ilustra os corpos de prova após ensaio de abrasão realizado segundo a norma ASTM G65-16.

Figura 25 - Amostras após ensaio de abrasão ASTM G65-16. (a) VPATLAS; (b) HARDMAX500; (c) VP20ISO; (d) VP20TS.



Fonte: Autoria própria.

A perda de volume das amostras VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX500, após ensaio de abrasão ASTM G65-16, está representada na Tabela 9 a seguir.

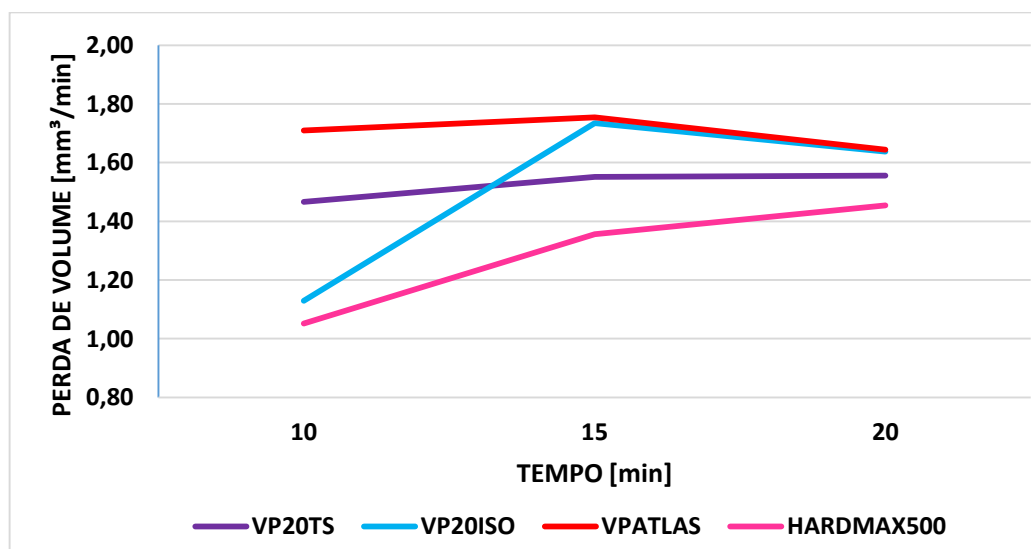
Tabela 9 - Perda de volume a cada 5 minutos (média dos 2 testes) após ensaio de abrasão ASTM G65-16.

AMOSTRAS	PERDA DE VOLUME [mm <sup>3</sup> /min]		
	10 min	15 min	20 min
1.VP20TS	1,360	1,490	1,540
2.VP20TS	1,572	1,611	1,567
<b>Média</b>	<b>1,466</b>	<b>1,550</b>	<b>1,553</b>
1.VP20ISO	0,986	1,630	1,810
2.VP 0ISO	1,273	1,835	1,465
<b>Média</b>	<b>1,129</b>	<b>1,732</b>	<b>1,637</b>
1.VPATLAS	1,811	1,880	1,770
2.VPATLAS	1,607	1,628	1,516
<b>Média</b>	<b>1,709</b>	<b>1,754</b>	<b>1,643</b>
1.HARDMAX500	0,924	1,600	1,480
2.HARDMAX500	1,180	1,114	1,430
<b>Média</b>	<b>1,052</b>	<b>1,357</b>	<b>1,455</b>

Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor visualização dos resultados é apresentada a Figura 26 a seguir.

Figura 26- Gráfico do ensaio de desgaste em aço ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS, HARDMAX500.



Fonte: Autoria própria.

Apesar da norma ASTM G65-16 determinar o tempo de teste de até 30 min, o ensaio de desgaste foi parado com 20 minutos, uma vez que após esse tempo a perda de volume ou massa passa a ser constante. Analisando a Tabela 9 e a Figura 26, tomando como base o ensaio de 20 min, podemos observar que o aço ferramenta VPATLAS possui a menor resistência ao desgaste quando comparado aos demais.

A amostra de VP20ISO, mostra-se um pouco mais resistente do que o VPATLAS, todavia, ainda está abaixo dos aços VP20TS e HARDMAX 500.

O aço HARDMAX 500 foi o que apresentou melhor resultado, possuindo a menor perda de volume, 1,455 mm<sup>3</sup>/min.

#### 4.3.1. Relação entre Desgaste e Dureza

Normalmente a relação é linear entre a dureza da superfície desgastada e a resistência ao desgaste, todavia, como explicitado a seguir, existem outros fatores que influenciam na resistência ao desgaste de um aço ferramenta, como sua microestrutura.

A Tabela 10 relaciona os dados obtidos no ensaio de desgaste, ensaio de dureza e micrografia.

Tabela 10 - Perda de volume após 20min de ensaio de abrasão ASTM G65-16.

AMOSTRAS	PERDA DE VOLUME MÉDIA EM 20 min [mm <sup>3</sup> /min]	DUREZA [HRC]	ESTRUTURA
VP 20TS	1,553	42,100	Bainita
VP 20ISO	1,637	47,350	Martensita
VP ATLAS	1,643	48,350	Bainita
HARDMAX 500	1,455	50,700	Martensita

Fonte: Autoria própria.

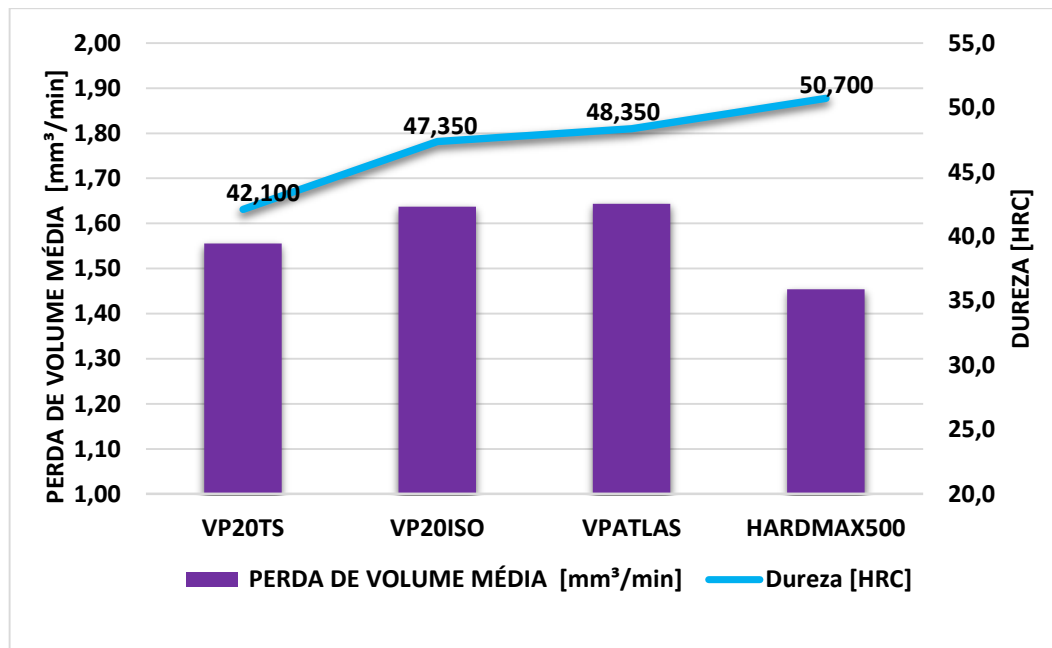
Analisando a Tabela 10, pode-se observar que o aço ferramenta VPATLAS possui a menor resistência ao desgaste quando comparado aos demais, perdendo após 20 minutos de teste 1,643 mm<sup>3</sup>/min, o que é justificado por sua estrutura bainítica não homogênea, o que lhe proporciona uma dureza mais baixa e menor resistência ao desgaste. A amostra VP20ISO possui uma perda de volume próxima à VPATLAS, 1,637mm<sup>3</sup>/min, isto se deve à esse material apresentar bastante austenita retida na sua estrutura.

O aço VP20TS comparado ao aço HARDMAX 500 tem um desgaste um pouco mais elevado. O aço VP20TS apresenta uma estrutura bainítica mais homogênea podendo se

comparar com o aço HARDMAX500, que possui estrutura martensítica com muito pouco de austenita retida, conferindo assim ao aço uma alta dureza e uma menor perda de volume.

Para uma melhor visualização da relação da perda de volume e dureza das amostras, é apresentada a Figura 27 a seguir.

Figura 27 - Gráfico de dureza *versus* perda média de volume por amostra em 20 min.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.2. Mecanismos de desgaste

Através da microscopia eletrônica de varredura pode-se verificar também o mecanismo de desgaste abrasivo atuante com aspecto de microcorte de material.

Para melhor compreensão do mecanismo de desgaste gerado pelo abrasivo durante o ensaio, segundo a norma ASTM G65-16, as superfícies dos aços ferramenta desgastados foram analisadas através do MEV. Os resultados são mostrados a seguir, como na Figura 28, que retrata o desgaste sofrido pela amostra VPATLAS.

Figura 28 – Superfície desgastada do aço VPATLAS - MEV.

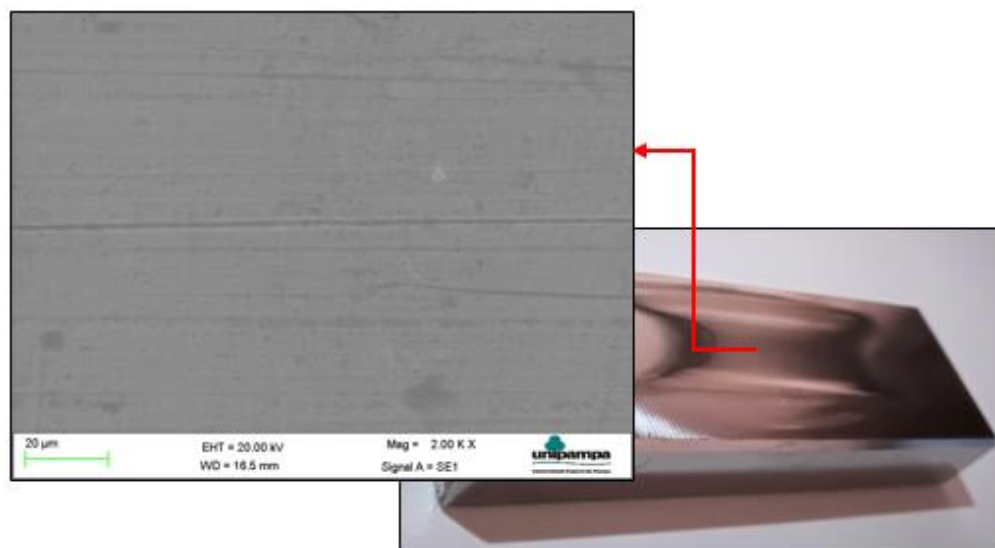


Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a Figura 28, é possível verificar que houve remoção de material por um mecanismo de abrasão. A interação do abrasivo com a superfície do aço ferramenta ocasionou o riscamento da amostra VPATLAS, o que é típico do ensaio de abrasão ASTM G65-16.

Assim como a imagem anterior, a Figura 29 retrata o desgaste na superfície do aço ferramenta VP20ISO.

Figura 29 - Superfície de desgaste do aço VP20ISO - MEV.



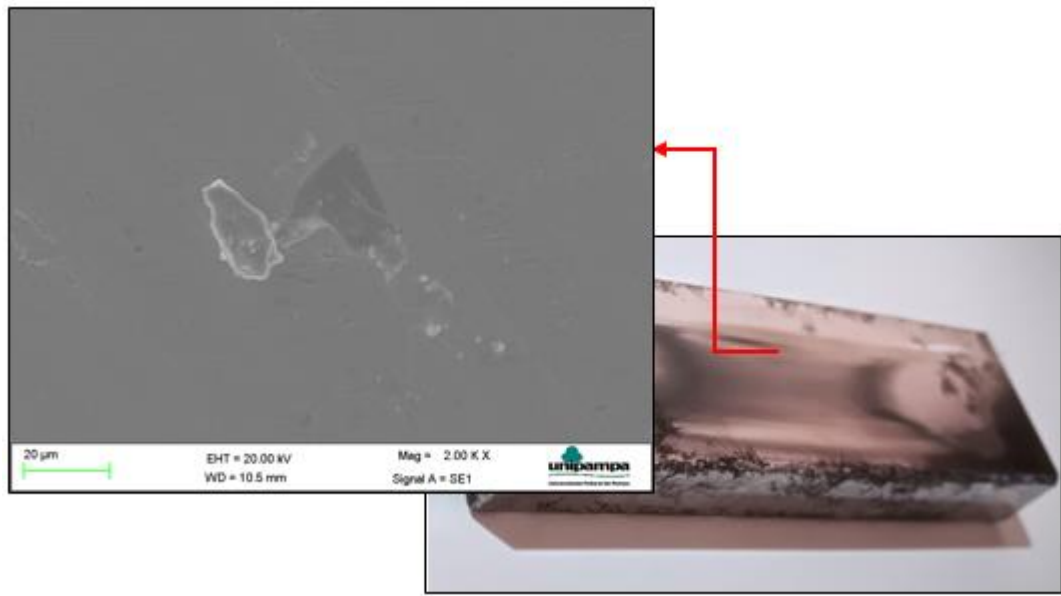
Fonte: Autoria própria.



Ao analisar a Figura 29, o riscamento ocasionado pelo ensaio desgaste abrasivo ASTM G65-16, na superfície da amostra VP20ISO, é mais evidente do que na imagem anterior, pois o aço VPATLAS tem um desgaste menor.

A Figura 30 a seguir é referente a análise do desgaste do aço HARDMAX 500.

Figura 30 - Superfície de desgaste do aço HARDMAX 500 - MEV.

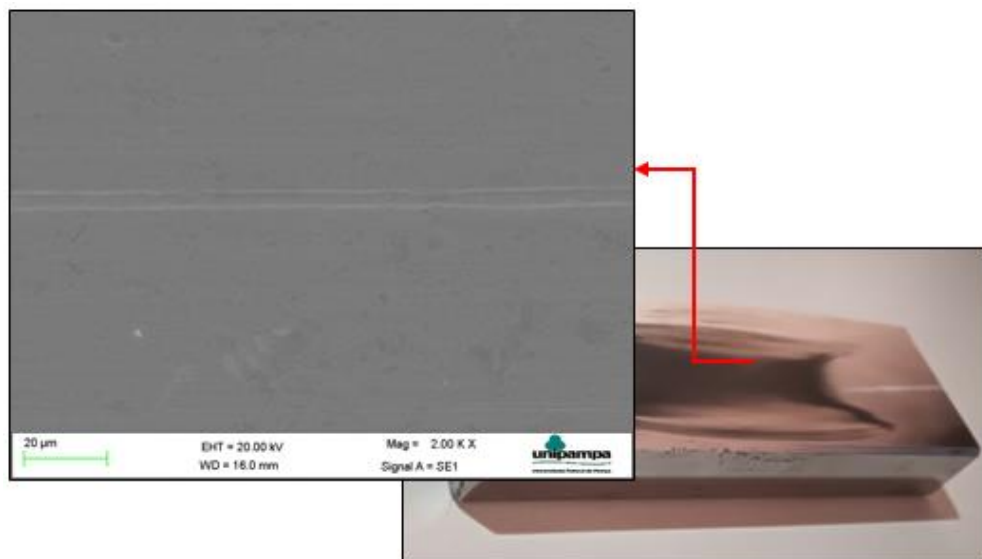


Fonte: Autoria própria.

Este é o material que sofreu o menor desgaste e tem a maior dureza comparada aos outros materiais em estudo. Apresenta uma estrutura martensítica homogênea.

A Figura 31 a seguir refere-se à análise do desgaste do aço VP20TS.

Figura 31 – Superfície de desgaste do aço VP20TS – MEV.



Fonte: Autoria própria.

Assim como as demais amostras, o aço VP20TS também apresenta riscamento em sua superfície que passou pelo ensaio abrasivo, como retratado pela Figura 31.

As imagens de ambas amostras trazem evidências de extrusão e deformação plástica na superfície de desgaste, o que significa perda de volume, corroborando os resultados obtidos no item 4.3.

## 5. Conclusão

O objetivo geral deste trabalho propõe desenvolver um estudo tribológico dos aços ferramenta VP20TS, VP20ISO, VPATLAS e HARDMAX 500, visando compará-los quanto à sua dureza e resistência ao desgaste, o mesmo foi completamente alcançado. A seguir, são apresentadas as seguintes conclusões:

1. As imagens obtidas a partir da microscopia ótica contribuíram para a verificação das microestruturas dos corpos de prova, relacionando-as assim com o tratamento térmico por qual cada aço ferramenta foi submetido.
2. A análise do ensaio de dureza e seus respectivos dados, apresentados por meio de tabela e gráfico, permitiu observar que ambos aços possuem elevada dureza, sendo o aço ferramenta de maior dureza o HARDMAX 500 seguido pelo VPATLAS, VP20ISO e VP20TS, de forma decrescente.
3. O ensaio de desgaste trouxe resultados satisfatórios, mostrando que a perda de volume do material no ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65-16 está ligada à dureza do material bem como à sua microestrutura e tratamentos térmicos sofridos. O aço ferramenta VPATLAS apresentou a menor resistência ao desgaste, devido à sua microestrutura bainítica pouco homogênea. A amostra VP20ISO possui uma perda de volume semelhante à VPATLAS por apresentar bastante austenita retida na sua estrutura. O aço VP20TS apresenta uma estrutura bainítica mais homogênea do que a do VPATLAS, podendo se comparar com o aço HARDMAX 500, que possui estrutura martensítica com muito pouca austenita retida, conferindo assim ao aço uma alta dureza e uma menor perda de volume. HARDMAX 500 foi o aço de maior dureza e maior resistência ao desgaste.
4. As imagens capturadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostram evidências de extrusão e deformação plástica na superfície de desgaste de ambas amostras, o que significa perda de volume em todos os aços

ferramenta, o que corrobora os resultados obtidos no ensaio de desgaste por abrasão ASTM G65-16.

### **5.1. Sugestões para trabalhos futuros**

1. Para trabalhos futuros, sugere-se realizar ensaio de corrosão nos aços ferramenta HARDMAX500, VPATLAS, VP20ISO e VP20TS, a fim de se verificar a resistência à corrosão de cada aço, visto que, assim como o desgaste, tal fenômeno é responsável por prejuízos nas mais variadas atividades industriais. Os ensaios a serem realizados se referem a um estudo do processo de corrosão acelerado, por meio de um potenciostato Autolab, de maneira a visualizar as melhores alternativas para solucionar tal fator ou diminuir sua intensidade.
2. Realizar ensaio de desgaste abrasivo utilizando casca de arroz como material abrasivo, nas superfícies dos aços ferramenta HARDMAX500, VPATLAS, VP20ISO e VP20TS.
3. Refazer a microscopia ótica dos aços ferramenta, realizando o ataque químico com reagente Vilella, que é indicado como reativo em aços de alta liga, para melhor visualização da microestrutura.

## REFERÊNCIAS

- [1] ZOLIN, I. **Materiais de construção mecânica**. UFSM: Apostila, 2011.
- [2] **Aços ferramenta – Villares Metals**. Acesso à internet <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta>. Acesso em agosto/2019.
- [3] SCHEID, A. **Curso básico de aços**. UFPR, 2010.
- [4] GOBBI, V. **Influência da nitretação à plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2**. Dissertação de mestrado. Brasília, 2009.
- [5] CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc. 7ed.
- [6] **VP20TS – Villares Metals**. Acesso à internet <http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20TS>. Acesso em agosto/2019.
- [7] **VP20ISO – Villares Metals**. Acesso à internet <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20ISO>. Acesso em agosto/2019.
- [8] **VPATLAS – Villares Metals**. Acesso à internet <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VPATLAS>. Acesso em agosto/2019.
- [9] AÇOS GERDAU. **Tratamentos térmicos**. Apostila, 2012.
- [10] STROHAECKER, T.R; FRAINER, V.F; TIER, M. D. **Princípios de Tratamentos Térmicos em Aços e Ferros Fundidos**. Apostila UFRGS, FURG, Unipampa.
- [11] VAN VLACK, L.H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 8<sup>a</sup> Ed, 1984.
- [12] TIER, M.A.D. **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma**, Tese de Doutorado, PPGEM, UFRGS, 1998.
- [13] ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series 10, Elsevier, Science Publishers B. V, 1987.
- [14] DIN 50320: Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.
- [15] EKBERG, A. **Wear: some notes**. Chalmers University of Technology. [S.I.: s.n.], 1997.

[16] KANDEVA-IVANOVA, M; VENCL, A; KARASTOYANOV, D. **Advanced tribological coatings for Heavy-duty applications: Case studies**. Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Information and Communication Technologies; Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2016

[17] ASTM G65, 2016. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. American Society for Testing and Materials.

[18] DEP. DE GEOLOGIA - UFOP. **Microscopia Eletrônica - JEOL 5510**. Degeo, 2017. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em agosto/ 2019.

[19] RONZANI, Antonio Guilherme. **Resistência à Cavitação do Revestimento de Carbetto de Tungstênio Refundido via Laser de CO<sub>2</sub> Aplicado em Aço AISI 1020**. 2017. 121f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

[20] PANZIERA, R. C. **Estudo Tribológico Dos Revestimentos De Fe-29cr-4b-1,75si E Wc10c<sub>o</sub>-4cr Por Aspersão Térmica Para Redução Do Desgaste Abrasivo E Erosivo Resultante Da Ação Do Grão De Arroz**. Dissertação Programa de PósGraduação – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.