



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

ISADORA ALMEIDA REZENDE

**Estudo da viabilidade de substituição de materiais de desgaste utilizados no preparo
do solo para plantio de cana-de-açúcar**

Guaratinguetá
2023

Isadora Almeida Rezende

Estudo da viabilidade de substituição de materiais de desgaste utilizados no preparo do solo para plantio de cana-de-açúcar

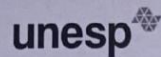
Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá
2023

R467e	<p>Rezende, Isadora Almeida</p> <p>Estudo da viabilidade de substituição de materiais de desgaste utilizados no preparo do solo para plantio de cana-de-açúcar / Isadora Almeida Rezende – Guaratinguetá, 2023.</p> <p>44 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 43-44</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Implementos agrícolas. 2. Aço-carbono. 3. Aço de alta resistência. 4. Materiais - Fadiga. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.178.3</p>
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

ISADORA ALMEIDA REZENDE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO(A) EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Orientador UNESP-FEG

Prof. Me. Geraldo César Rosário de Oliveira
UNESP-FEG

Prof.ª Me. Sofia Glyniadakis
UNESP-FEG

Fevereiro 2023

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente minha mãe, Simony Gomes de Almeida, e minha avó, Suely Maria de Almeida, por serem a minha base de tudo, por tudo que fizeram e sacrificaram para que eu pudesse estar onde eu estou hoje.

Ao meu colega de trabalho, Guilherme Lorenzon Caselatto, por todo apoio e conhecimento passado para mim para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Otávio Augusto Médola Conquista, também por todo conhecimento passado para mim, por me ouvir e estar ao meu lado, principalmente nesta etapa de grandes mudanças entre final de graduação e início de carreira.

À República Bela Espelunca, por todos os momentos compartilhados ao longo de toda a minha graduação que ficarão para sempre em minha memória.

Ao Yuri Pereira Chuves, pela parceria ao longo de toda a graduação.

Ao meu orientador, Marcelo Sampaio Martins, por estar sempre disposto a ajudar e por todo o apoio para estruturação e conclusão deste trabalho.

A todos os colaboradores da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, pela dedicação e esforço para entregar aos alunos conhecimento acadêmico de qualidade.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação
determina o que você conquista”;
Aldo Novak

RESUMO

O eliminador de soqueira é um implemento agrícola utilizado no preparo do solo para posterior plantio de cana-de-açúcar. As relhas, um dos componentes do equipamento, por entrarem em contato direto com o solo, estão sujeitas ao desgaste por abrasão, fazendo com que haja perda de material e alteração de sua geometria, afetando o desempenho a máquina. Além disso, para trocar a relha são necessárias duas horas, afetando a Disponibilidade Física do equipamento. Neste trabalho foram comparados dois materiais: aço 1045, do Fornecedor 1 (que após análise de composição química foi descoberto que trata-se, na realidade, de um aço UHSS, especificamente aço ASTM A1011/A1011M), e aço Hardox 450, do Fornecedor 2. Foi realizado ensaio de dureza, análise da microestrutura dos materiais e análise da composição química, além de teste em campo das relhas para analisar sua durabilidade. Foi possível concluir que a relha feita de aço Hardox 450 apresenta o dobro da durabilidade e também garante uma redução de 50,32% dos custos, sendo viável sua utilização, aumentando a DF do equipamento e garantindo maior segurança aos colaboradores, por intervirem menos na máquina.

PALAVRAS-CHAVE: implemento agrícola. desgaste por abrasão. aço 1045. UHSS. hardox 450.

ABSTRACT

Ratoon manager is an agricultural implement used in soil preparation for subsequent planting of sugar cane. The coulters, some of the components of the equipment, as they come into direct contact with the soil, are subjected to wear due to abrasion, causing loss of material and geometric alteration, affecting machine performance. Besides that, to change the coulters, two hours are necessary, affecting the Physical Availability of the equipment. In this work, two materials were compared: 1045 steel, from Supplier 1 (but after chemical composition analysis was found that, in reality, it's not UHSS, specifically ASTM A1011/A1011M steel), and Hardox 450 steel, from Supplier 2. Hardness test, microstructure and chemical composition analysis were realized, in addition to field testing of the coulters to analyze their durability. It was possible to conclude that the coulters made of Hardox 450 have double the durability and also guarantee a 50,32% reduction in costs, making its use feasible, increasing the DF of the equipment and ensuring greater safety for employees, as they intervene less in the machine.

KEYWORDS: agricultural implement. abrasion wear. 1045 steel. UHSS. hardox 450.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais países produtores e produção de cana-de-açúcar de 2010 a 2019.	12
Figura 2 - Eliminador de soqueira e seus componentes.	13
Figura 3 - Componentes do eliminador de soqueira.....	14
Figura 4 - Vista explodida da haste	15
Figura 5 - Especificações da relha comercial	15
Figura 6 - Relha proposta para substituição	16
Figura 7 - Larva do bicudo de cana	16
Figura 8 - Eliminador de soqueira acoplado ao trator	17
Figura 9 - Representação esquemática do ensaio de dureza Brinell.....	21
Figura 10 - Representação esquemática do princípio do método Rockwell.....	22
Figura 11 - Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers	23
Figura 12 - Principais tratamentos térmicos utilizados na prática industrial.....	25
Figura 13 - Representação esquemática do ciclo de tratamento de têmpera em diferentes meios de resfriamento.....	26
Figura 14 - Representação esquemática do ciclo térmico do tratamento de têmpera e revenimento	27
Figura 15 - Ciclo térmico do tratamento de austêmpera	28
Figura 16 - Cortadora metalográfica CM 80	31
Figura 17 - Lixadeira	32
Figura 18 - Baquelite amarelo	32
Figura 19 - Embutidora.....	33
Figura 20 - Lixadeira metalográfica	33
Figura 21 - Microscópio óptico	34
Figura 22 - Durômetro Rockwell universal.....	35
Figura 23 - Espectrômetro móvel	35
Figura 24 - Amostra da relha do Fornecedor 1.....	36
Figura 25 - Amostra da relha do Fornecedor 2.....	36
Figura 26 - Microestrutura da superfície da amostra do Fornecedor 1	37
Figura 27 - Microestrutura da superfície da amostra do Fornecedor 2	37
Figura 28 - Microestrutura do núcleo da amostra do Fornecedor 1	38
Figura 29 - Microestrutura do núcleo da amostra do Fornecedor 2	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1045	29
Tabela 2 - Principais propriedades mecânicas do aço SAE 1045.....	29
Tabela 3 - Composição química do aço hardox 450	30
Tabela 4 - Resultado do ensaio de dureza Rockwell	39
Tabela 5 - Composição química do material do Fornecedor 1	39
Tabela 6 - Composição química do material do Fornecedor 2.....	39
Tabela 7 - Composição química do aço ASTM A1011/A1011M.....	40
Tabela 8 - Comparativo da durabilidade da relha do Fornecedor 1 e 2.....	40
Tabela 9 - Comparativo do preço unitário e R\$/h da relha do Fornecedor 1 e 2	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
ASTM	American Society for Testing and Materials
DF	Disponibilidade Física
DIN	Deutsches Institut für Normung
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
NBR	Norma Brasileira Registrada
SAE	Society of Automotive Engineers
SSAB	Svenskt Stal A.B
UHSS	Ultra Hight Strength Steel

LISTA DE SÍMBOLOS

ha	hectare
HB	dureza Brinell
HBW	dureza Brinell para esfera de tungstênio
HR	dureza Rockwell
HRC	dureza Rockwell C
HV	dureza Vickers
mm ²	milímetro quadrado
MPa	megapascal
Mt	megatonelada
N	newton

SUMÁRIO

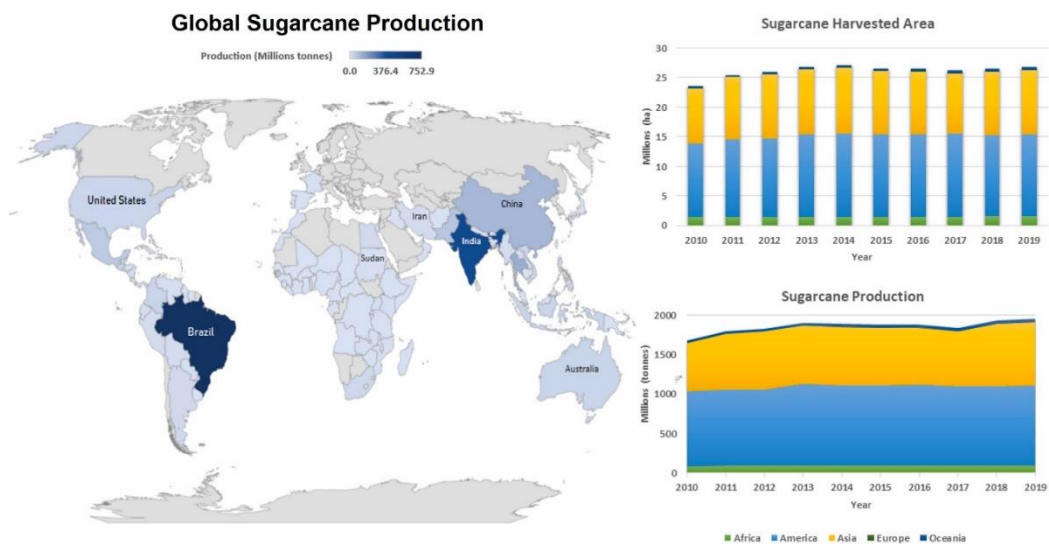
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	17
2.2	TRIBOLOGIA E TIPOS DE DESGASTE	20
2.3	DESGASTE DE COMPONENTES AGRÍCOLAS	21
2.4	CARACTERÍSTICAS DO SOLO DA REGIÃO DE PIRACICABA	22
2.5	ENSAIO DE DUREZA E TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS	23
2.5.1	Ensaio de dureza	23
2.5.2	Tratamentos térmicos em aços	26
2.5.2.1	Recozimento	28
2.5.2.2	Têmpera e revenimento	28
2.5.2.2.1	<i>Têmpera e revenimento em aços-liga</i>	30
2.5.2.3	Austêmpera	30
2.6	AÇO SAE 1045	31
2.7	HARDOX 450	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	RESULTADO DOS ENSAIOS	39
4.2	AÇOS DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA (UHSS)	42
4.3	DURABILIDADE E VIABILIDADE FINANCEIRA	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, conhecida por sua elevada produtividade, é originária da Ásia e se espalhou pelo mundo com a migração humana (VANDENBERGHE *et al*, 2022). A partir dela, é possível obter vários produtos, tais como biocombustível (etanol), açúcar, bioeletricidade, biopolímeros, entre outros. Já através de seus subprodutos, é possível estabelecer uma economia circular, ao utilizar a vinhaça e a torta de filtro para produzir biogás e fertilizante e ao utilizar o bagaço na produção do etanol de segunda geração, dobrando a produção deste combustível com a mesma área plantada.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), estima-se uma produção anual de 1,89 bilhão de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 27.000.000 ha, distribuída em mais de 100 países. A Figura 1 mostra os países líderes na produção entre 2010 e 2019. Em 2019, o Brasil ocupou a primeira posição (768 Mt), seguido pela Índia (348 Mt) em segundo lugar e China em terceiro (123 Mt).

Figura 1. Principais países produtores e produção de cana-de-açúcar de 2010 a 2019.

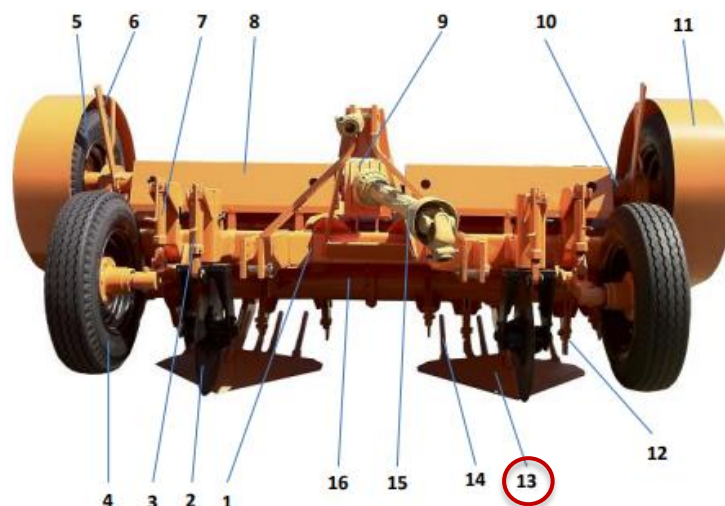


Fonte: Vandenberghe *et al* (2022)

Após a colheita da cana, as raízes que sobram na terra são chamadas de socas, soqueiras ou rebrotas. A partir delas, raízes mais velhas morrem e novas são formadas. Segundo Ali (2015), as soqueiras são importantes no processo de melhoria da economia geral da produção de cana-de-açúcar. Isso deve-se ao fato de que pragas podem atacar as socas e prejudicar a produção e qualidade da cana. Destaca-se, entre elas, a praga *Sphenophorus levis*, conhecido

como “Bicudo da cana”. Um implemento agrícola, chamado eliminador de soqueira, foi desenvolvido justamente com o intuito de eliminar duas linhas de soqueira simultaneamente em canaviais com alta incidência de pragas. A Figura 2 mostra a máquina e seus componentes. O componente no qual foi estudado a substituição do material utilizado foi a relha em V (item 13).

Figura 2. Eliminador de soqueira e seus componentes.



Fonte: DMB (2011)

1.1 OBJETIVOS

Analisar as propriedades do material atual da relha, fornecido pelo Fornecedor 1, e comparar com as propriedades do material proposto para substituição, fornecido pelo Fornecedor 2, através de ensaios mecânicos, análises químicas e de microestrutura.

Comparar a durabilidade de ambas as relhas e o preço de cada uma para, então, analisar a viabilidade financeira de substituição do material atual.

1.2 JUSTIFICATIVA

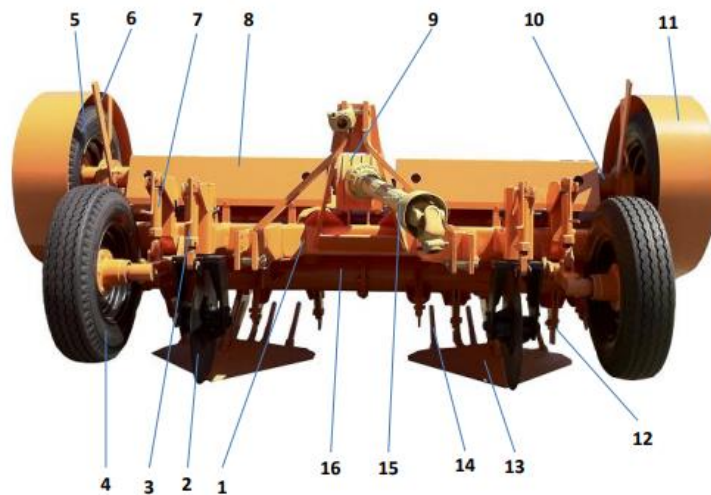
Justifica-se este trabalho em razão do elevado consumo do material de desgaste, aumentando os custos, aumento da interação homem máquina, aumentando riscos de acidente, além de prejudicar os indicadores de manutenção, como a Disponibilidade Física (DF) do equipamento ao realizar paradas na máquina para trocar a relha.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O eliminador de soqueira possui diversos componentes, descritos na Figura 3.

Figura 3. Componentes do eliminador de soqueira

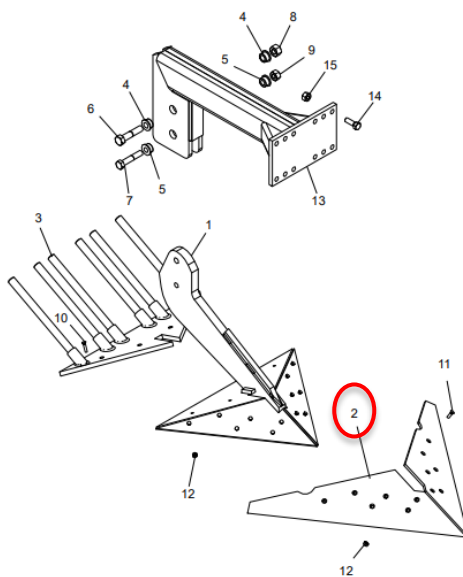


- | | |
|--|--|
| 1 - Chassi | 9 - Redutor de velocidade |
| 2 - Disco de corte | 10 - Cardan de transmissão |
| 3 - Regulador de pressão do disco de corte | 11 - Carenagem de proteção da roda de atrito |
| 4 - Roda reguladora de profundidade | 12 - Faca |
| 5 - Roda de atrito | 13 - Relha em "V" |
| 6 - Alavanca do regulador de tração | 14 - Grelha de extensão da relha |
| 7 - Regulador de pressão da roda | 15 - Cardan de acionamento |
| 8 - Carenagem de proteção do cardan | 16 - Rolo faca |

Fonte: DMB (2011).

O componente estudado foi o item 13 (relha em V). O desenho com vista explodida da haste da máquina, incluindo a relha (item 2), pode ser visualizado na Figura 4.

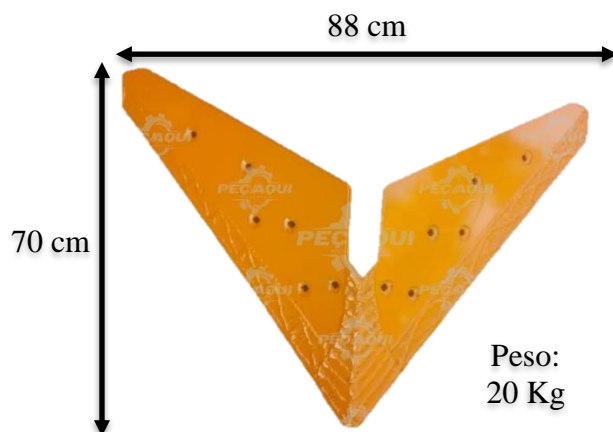
Figura 4. Vista explodida da haste



Fonte: DMB (2011).

Na Figura 5, é possível visualizar algumas especificações da relha comercial. Segundo o Fornecedor 1, o material da relha seria um aço 1045.

Figura 5. Especificações da relha comercial



Fonte: DMB (2011).

Já a Figura 6 ilustra a relha proposta para substituição, segundo o Fornecedor 2, feita de aço Hardox 450.

Figura 6. Relha proposta para substituição



Fonte: Autor (2022).

O eliminador mecânico de soqueira é utilizado apenas quando o canavial será reformado, onde é preparado o solo para plantio de novas mudas, ou seja, não é utilizado durante o ciclo da cana, no qual pode-se realizar até, em média, cinco cortes. Durante o ciclo da cana, é mais usual o tratamento de pragas, como o *Sphenophorus levis* (Bicudo de cana) através do corte de soqueira com aplicação de defensivos agrícolas. A Figura 7 ilustra o Bicudo de cana presente na soca.

Figura 7. Larva do bicudo de cana



Fonte: Autor (2022).

O eliminador mecânico de soqueira é acoplado ao engate de três pontos de um trator para seu funcionamento. A Figura 8 ilustra o implemento agrícola acoplado a um trator Magnum 260. A localização da relha está circulada em vermelho. Já os retângulos brancos presentes na figura foram adicionados para não revelar informações da empresa.

Figura 8. Eliminador de soqueira acoplado ao trator



Fonte: Autor (2022).

Durante sua aplicação, as duas relhas do eliminador de soqueira arrancam e levantam simultaneamente socas de duas linhas, sendo então trituradas e atiradas para trás através de um conjunto de facas montadas em um sistema rotativo acionado pela tomada de potência do trator (DMB, 2011). Os bicudos de cana que, mesmo com o eliminador de soqueira, continuam vivos, morrem ao ficar expostos ao sol e ao se tornar alimento de gaviões presentes na região de canavial.

Para realizar a troca das relhas, é necessário aproximadamente duas horas, ou seja, duas horas em que o equipamento fica parado.

2.2 TRIBOLOGIA E TIPOS DE DESGASTE

A tribologia é definida como o estudo do movimento relativo entre as superfícies. A palavra vem do grego “tribo” (fricção) e “lógos” (estudo). A partir dela, é estudado o atrito, desgaste e lubrificação entre as superfícies. Tal estudo é muito útil em projeto de máquinas quando há movimento relativo entre duas superfícies, visualizando seu desempenho, desgaste e eficiência (PURQUERIO;GAMBARINI, 2021).

Com relação ao desgaste, a norma DIN 50320 define o desgaste como a “perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica.” Ainda de

acordo com a norma, o desgaste pode ser classificado em desgaste adesivo ou por deslizamento, por fadiga superficial, reação triboquímica e abrasivo (DUTRA, 2005).

Desgaste adesivo ou por deslizamento: como o próprio nome sugere, é o desgaste que ocorre devido ao deslizamento entre as superfícies (DUTRA, 2005). Pode ainda ser caracterizado como o movimento relativo entre duas superfícies sólidas, lisas, em contato sob carregamento normal. Como resultado, há a formação e rompimento de ligações adesivas interfaciais (SCHUITEK, 2007).

Desgaste por fadiga superficial: ocorre quando a superfície sólida está submetida a cargas cíclicas. Normalmente, não há grandes perdas de material da superfície (RIBEIRO, 2004). Há a formação de trincas em regiões da superfície que resultam na separação de material (SCHUITEK, 2007).

Desgaste por reação triboquímica: neste tipo de desgaste ocorre a remoção ou degradação de material devido à ação química de meios agressivos ou por meios mecânicos facilitados por reações químicas (RIBEIRO, 2004). Muitas vezes é designado apenas por oxidação, por ser normalmente a condição mais influente neste mecanismo (SCHUITEK, 2007).

Desgaste abrasivo: ocorre o deslocamento do material devido ao movimento relativo de partículas duras. É o tipo de desgaste presente em aproximadamente 50% da indústria (DUTRA, 2005). Além disso, está presente nas mais diversas áreas, como na mineração, processos de fabricação, desgaste de máquinas, entre outros (SCHUITEK, 2007). A resistência ao desgaste à abrasão dos metais depende, principalmente, de seu acabamento superficial, dureza e tenacidade. O metal deve ser duro (fator mais importante), o mais plano possível e com boa tenacidade para evitar o arrancamento de material (SILVEIRA, 2016).

2.3 DESGASTE DE COMPONENTES AGRÍCOLAS

Como visto na seção 2.1, o eliminador de soqueira é um implemento agrícola utilizado no preparo do solo. Componentes de máquinas agrícolas que realizam o manejo do solo estão sujeitas a perda de material decorrentes do atrito entre os dois elementos: componente – solo. Isto gera não só o desgaste do componente, como também altera sua geometria, implicando em perda de qualidade da função do equipamento (MACHADO *et al*, 2009). Neste caso, ocorre a perda da qualidade de eliminação da soqueira.

Além disso, a alteração da geometria do componente faz com que o esforço de tração para executar a atividade seja maior. Existem vários estudos sobre o aumento na demanda de

tração, porém poucos estudos com relação ao desgaste de componentes simétricos utilizados no preparo do solo, tais como ponteiras de subsoladores e relhas de eliminador de soqueira.

O principal tipo de desgaste encontrado no preparo do solo é o desgaste por abrasão (MACHADO *et al*, 2009). Segundo Trevisan (2007), o principal problema em máquinas e implementos agrícolas que afetam o seu desempenho é o desgaste por abrasão causado pelas partículas do solo, resultando em custos adicionais para a operação.

O estudo dos mecanismos de desgaste em materiais usados em implementos agrícolas torna-se muito importante para otimização na escolha do material e também para previsão de durabilidade do componente agrícola. Tal estudo evita substituições excessivas e aumenta o tempo disponível da mão de obra para realização de outras atividades (MACHADO *et al*, 2009).

Com relação ao material utilizado no componente agrícola em contato com o solo, alguns fatores são importantes, tais como sua composição química, propriedades mecânicas e microestrutura. O desgaste desses órgãos ativos ocorre pois o material utilizado possui menor dureza do que as partículas do solo, alterando a extremidade de corte. Várias técnicas têm sido desenvolvidas para aumentar a resistência à abrasão dos materiais utilizados no preparo do solo, tais como tratamentos de superfície e escolha de novos materiais. O ferro fundido apresenta boa resistência à abrasão, porém é frágil para ser utilizado em solos com presença de pedras, onde ocorrem impactos. Já o aço apresenta como vantagem o fato de dificultar a adesão do solo na superfície da relha, além de apresentar, em geral, boa resistência ao impacto (TREVISAN, 2007).

Solos com maior teor de areia provoca um maior desgaste nos componentes agrícolas. Já quanto maior o teor de água em solos argilosos, menor a taxa de desgaste (MACHADO *et al*, 2009). Outros fatores do solo que contribuem com a taxa de desgaste são a textura, forma e tamanho das partículas. Além disso, existem fatores operacionais, tais como velocidade, profundidade e pressão exercida no componente agrícola (TREVISAN, 2007).

2.4 CARACTERÍSTICAS DO SOLO DA REGIÃO DE PIRACICABA

A empresa sucroalcooleira que utiliza o eliminador de soqueira atua na região de Piracicaba/SP. Foi encontrada informações sobre as características do solo dessa região, visto a importância deste conhecimento para entender seu potencial aumento da taxa de desgaste de componentes agrícolas.

Segundo o Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP (2004), em um estudo com 307 amostras de solo de um total de 88 pontos de coleta na região de Piracicaba, foi possível concluir que os tipos mais frequentes de solo são os nitossolos vermelhos (55% de frequência) e argissolos vermelho-amarelos (14% de frequência). Os nitossolos são constituídos por material mineral com pouco gradiente textural, apresentando grande importância agrônômica e com alto risco de erosão quando presente em relevos acidentados. Já os argissolos são caracterizados por apresentar material mineral com argila, ser moderadamente bem drenados, profundos e com alto gradiente textural. Também apresentam maior propensão à erosão e, em regiões de relevo acidentado, pode haver a presença de pedregosidade.

A presença de pedras no solo não afeta apenas os implementos utilizados no preparo do solo. Durante a colheita de cana-de-açúcar, grande parte das manutenções corretivas ocorrem devido à pedras que atingem o picador das colhedoras que, como o próprio nome sugere, são responsáveis por picar a cana. Sendo assim, em solos pedregosos, é esperado um melhor desempenho de componentes agrícolas que utilizam o aço como material ao invés do ferro fundido.

2.5 ENSAIO DE DUREZA E TRATAMENTOS TÉRMICOS EM AÇOS

Como visto na seção 2.3, a dureza do material em contato com partículas abrasivas é um dos principais fatores a ser levado em conta na seleção do material. Além disso, tratamentos térmicos podem ser feitos para melhorar as propriedades dos materiais. Por isso, nesta seção será abordado o ensaio de dureza e principais tratamentos térmicos feitos em aços.

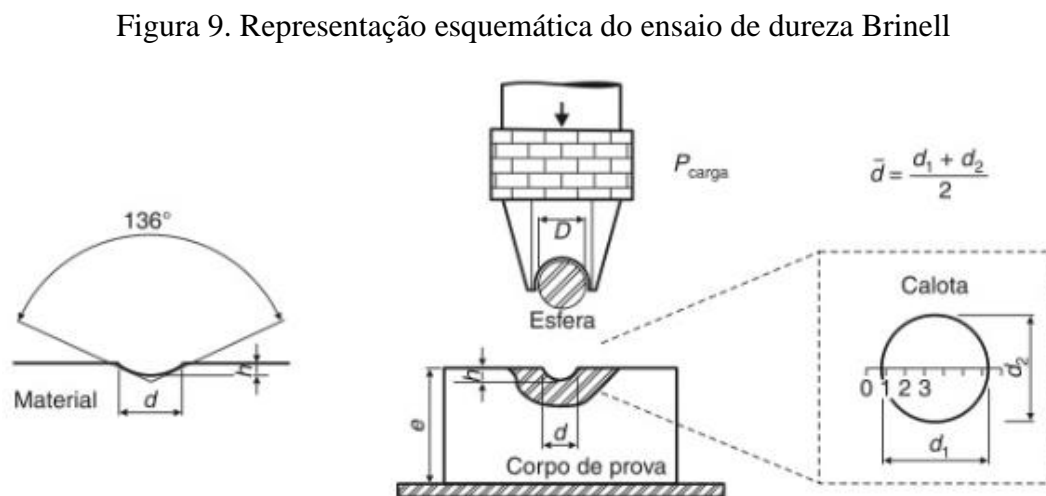
2.5.1 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica que mede a resistência do material a uma deformação plástica localizada, através da pressão contra outro material, gerando uma impressão ou risco. Os ensaios, no geral, usam penetradores com formato padronizado para pressionar a superfície do material analisado. Após o ensaio, é medido a área da marca superficial formada ou sua profundidade, e essas medidas são associadas a um valor numérico, representando a dureza do material. Essa correlação utiliza como referência a tensão que o penetrador necessita para superar a resistência superficial do material.

A dureza do material, que pode ser aumentada através de tratamentos especiais, como os tratamentos térmicos, depende diretamente da resistência mecânica. Além disso, existe uma relação bastante próxima entre o limite de escoamento dos metais e sua dureza.

Existem três métodos principais para a determinação da dureza de um material, sendo eles a impressão por risco, rebote e penetração. A dureza por risco é pouco utilizada no campo dos materiais metálicos, encontrando maior aplicação na mineralogia. A dureza Mohs é a mais popular entre a dureza por risco, utilizando uma escala de 10 minerais padrões organizados entre o mais duro (diamante, riscando todos os outros materiais) até o mais mole. Porém, essa escala não permite encontrar uma dureza precisa dos metais. No caso da dureza por rebote, um êmbolo com ponta padronizada de diamante e peso conhecido cai em queda livre, causando uma impressão superficial no material ensaiado. Um material dúctil, com baixa dureza, consome mais energia na deformação do corpo de prova, fazendo com que o êmbolo alcance uma altura menor no retorno. Por fim, os três tipos principais de dureza por penetração são:

1. Dureza Brinell: primeiro ensaio de penetração padronizado e reconhecido industrialmente. Nele, uma esfera metálica padronizada gera uma tensão de compressão no corpo de prova, gerando uma calota esférica, como mostra a Figura 9. A partir dessa calota esférica é calculado a dureza Brinell (dureza = P / S), onde P é a carga de impressão aplicada, em Newton (N), e S é a área da calota esférica, em mm^2 .

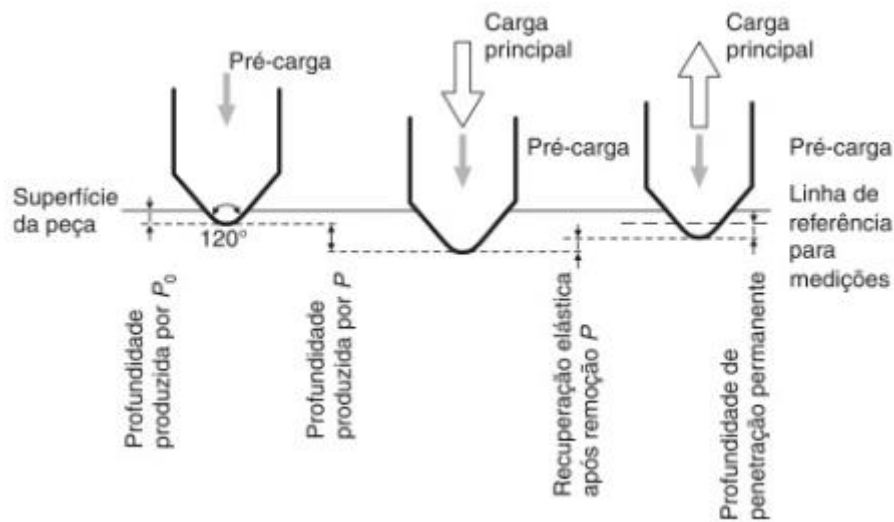


Fonte: Garcia; Spim; Santos (2017).

Calculado o diâmetro médio da impressão formada, é possível calcular o valor da dureza Brinell, em HB, a partir da consulta em tabelas. A escolha da carga a ser aplicada depende do material ensaiado. A norma brasileira para realização do ensaio é a NBR NM-187-1:1 (ABNT), e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E10:2007 (ASTM). Este ensaio não é recomendado para materiais que sofreram tratamentos superficiais, uma vez que a penetração da esfera no material pode ultrapassar a camada tratada, trazendo erros no cálculo da dureza.

2. Dureza Rockwell: método mais utilizado internacionalmente. Neste ensaio, é aplicado uma pré-carga e posteriormente uma carga suplementar no material ensaiado através de um penetrador de diamante com ponta ligeiramente arredondada como uma esfera de aço endurecida ou carboneto de tungstênio. A norma E:18:2007 só permite a utilização de esferas de aço apenas em medições em filmes finos e materiais extremamente moles. Neste ensaio, é calculado a profundidade da impressão para o cálculo da dureza Rockwell. A Figura 10 mostra o funcionamento do ensaio.

Figura 10. Representação esquemática do princípio do método Rockwell

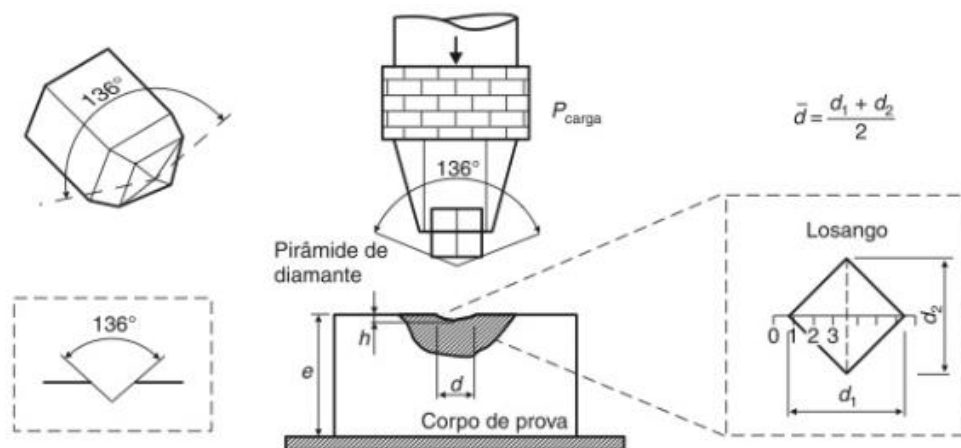


Fonte: Garcia; Spim; Santos (2017).

A pré-carga é aplicada para que defeitos superficiais não influenciem no resultado do ensaio e para ajudar na fixação do corpo de prova no suporte, além de eliminar erros causados pela recuperação do material, uma vez que a pré-carga provoca uma pequena deformação plástica. A leitura da dureza Rockwell é feita na escala do equipamento. O valor da dureza vem acompanhado pelo símbolo HR e da escala utilizada.

3. Dureza Vickers: conhecido como ensaio universal, neste ensaio é utilizado um penetrador de diamante com formato de uma pirâmide de base quadrada e com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Por isso, este ensaio também é denominado como teste de dureza de pirâmide de diamante. Similarmente ao ensaio de dureza Brinell, o valor da dureza é encontrado com base na área superficial da impressão gerada. Este ensaio é conhecido universal uma vez que ele pode ser realizado em todos os materiais metálicos com qualquer dureza, por utilizar o diamante como penetrador, além de poder ser utilizado em corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares. A Figura 11 ilustra o funcionamento do ensaio.

Figura 11. Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers



Fonte: Garcia; Spim; Santos (2017).

Também similarmente ao ensaio de dureza Brinell, existem tabelas que fornecem o valor da dureza Vickers através das medidas das diagonais da impressão formada no material ensaiado. O valor encontrado é seguido pelo símbolo HV, da carga aplicada e pelo tempo de aplicação da carga, caso este seja diferente dos previstos em norma (10 a 15 segundos para materiais duros e 30 a 60 segundos para materiais moles). Este ensaio é indicado para materiais que sofreram tratamentos térmicos, no levantamento de curvas de profundidade de têmpera e de cementação (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017) (CALLISTER, 2002).

2.5.2 Tratamentos térmicos em aços

Os aços são amplamente usados na indústria, como na construção civil, no setor automotivo, aeronáutico, aeroespacial, petróleo e gás, químico, farmacêutico, biomédico, entre outros. Essa variedade de aplicações ocorre devido ao fato de os aços serem ligas do sistema Ferro-Carbono, podendo ser obtido diferentes microestruturas após os tratamentos térmicos e, conseqüentemente, sendo possível obter diversas propriedades. Essas propriedades dependem das fases presentes no material. O ferro possui reticulado cristalino de forma cúbica e apresenta o fenômeno da alotropia ou polimorfismo, podendo apresentar diversas formas cristalinas cúbicas. A solubilidade do carbono no ferro varia com a temperatura e com a estrutura cristalina, podendo então apresentar diversas fases. Por exemplo, microestruturas compostas predominantemente da fase ferrita, possuem baixa resistência mecânica e elevada ductilidade. A perlita apresenta dureza maior que a ferrita, porém menor que a cementita. Já microestruturas compostas predominantemente por martensita, possuem elevada resistência mecânica e dureza, porém baixa ductilidade (PINEDO, 2021). Geralmente, a resistência ao desgaste aumenta quando a microestrutura muda de ferrita para perlita, desta para bainita e de bainita para martensita (SILVEIRA, 2016).

Um conceito importante é a classificação dos aços, podendo ser hipoeutetóides (ligas apresentando teores de carbono variando entre 0,02 e 0,76%, em peso), eutetóides (com 0,76% de carbono em peso, sendo exatamente a composição química do ponto eutetóide) e hipereutetóide (ligas com teores de carbono variando entre 0,76 e 2,14%, em peso).

São adicionados elementos de liga em alguns aços, como manganês, cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio, etc., uma vez que eles ampliam a variedade de propriedades mecânicas, químicas e físicas que são possíveis de obter. Normalmente, a adição do manganês como elemento de liga aumenta a resistência ao desgaste. Os principais aços comerciais são os aços-carbono, aços para construção mecânica, aços inoxidáveis e os aços ferramenta (aços utilizados para a fabricação de ferramentas).

Os tratamentos térmicos consistem em, basicamente, ciclos térmicos específicos de aquecimento e resfriamento. A Figura 12 mostra os principais tratamentos térmicos feitos em aços (PINEDO, 2021).

Figura 12. Principais tratamentos térmicos utilizados na prática industrial



Fonte: Adaptado de Pinedo (2021).

2.5.2.1 Recozimento

O objetivo do recozimento é reduzir a resistência mecânica e aumentar a ductilidade do material após etapas de fabricação anteriores, otimizando a microestrutura para processamentos posteriores, como conformação e usinagem. O recozimento pode ser de dois tipos: intermediário, quando é realizado durante o processamento, ou final, quando é feito no final do processo, ou seja, quando o produto ou peça estão prontos. (PINEDO, 2021)

O resfriamento no recozimento é feito de forma lenta, a partir da temperatura de austenitização. Vem sendo aplicado, em geral, em aços hipoeutetóides, mas também pode ser aplicado em aços hipereutetóides, como o aço SAE 52100, utilizado na fabricação de rolamentos (ALCIONE, G. *et al*, 2015).

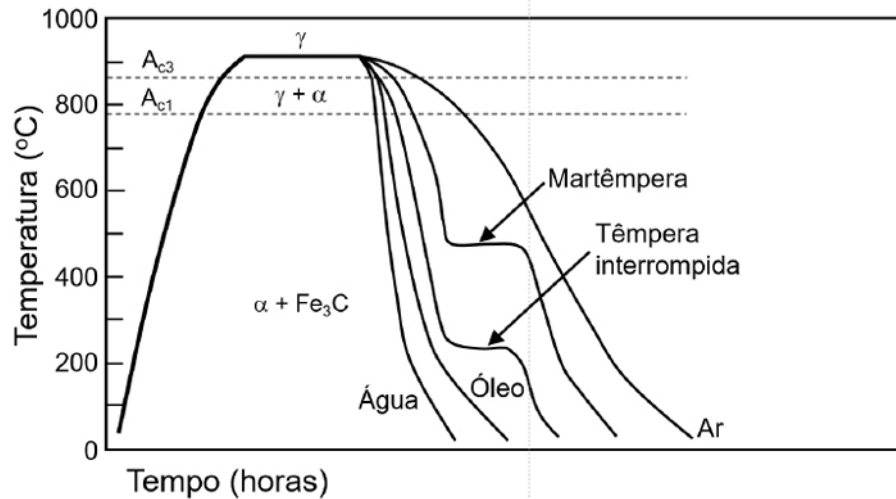
2.5.2.2 Têmpera e revenimento

O objetivo de realizar a têmpera e, em seguida, o revenimento, é obter uma peça com uma boa relação entre resistência mecânica, dureza, resistência à fratura e tenacidade. Através da têmpera, é obtido uma elevada dureza e resistência mecânica, porém uma baixa resistência à fratura e tenacidade. O aumento da dureza e resistência mecânica ocorre pois, com a têmpera, o aço apresenta a fase martensítica. Uma vez que componentes industriais feitos de aço precisam de uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura, é feito o revenimento logo em seguida, que promove o alívio das tensões. Além disso, como já visto, com o recozimento, obtém-se o extremo inferior de dureza dos aços. Já com a têmpera, obtém-se o extremo superior. Com o revenimento, é possível alcançar uma faixa de dureza mais ampla, podendo utilizar os aços em uma gama maior de serviços. Por exemplo, um aço que possui uma dureza aproximada de 20 HRC quando recozido pode chegar a uma dureza de 56 HRC quando temperado. Com a têmpera e o revenimento, é possível obter durezas entre 26 HRC e 40 HRC. Para alcançar nível de dureza desejado, é preciso determinar

a curva de revenimento de cada tipo de aço (variação da dureza para temperaturas progressivas entre 100°C e 700°C).

Como pode ser visto na Figura 13, diferentes meios de resfriamento podem ser empregados na têmpera.

Figura 13. Representação esquemática do ciclo de tratamento de têmpera em diferentes meios de resfriamento

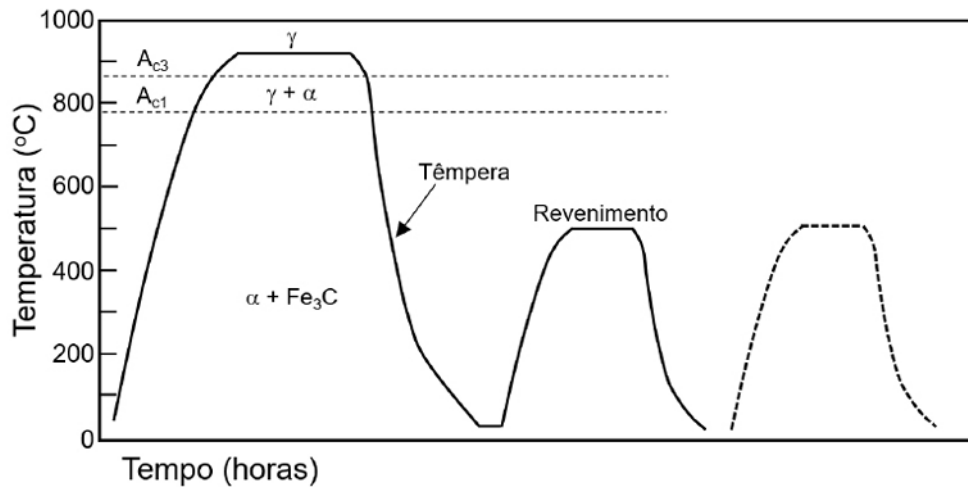


Fonte: Pinedo (2021).

O meio mais rápido de resfriamento é a água e o mais lento é o ar. A “têmpera interrompida” e “martêmpera” são utilizadas para controlar a transformação martensítica e sua expansão em aços de alta liga, evitando tensões e gerando maior estabilidade dimensional e menor probabilidade de trincas. A escolha do meio de resfriamento deve levar em conta alguns fatores, como a temperabilidade do aço, a dimensão da seção transversal da peça e a complexidade geométrica, de forma a encontrar a velocidade de resfriamento que seja rápida o suficiente para garantir a formação da martensita através da seção transversal, mas não tão rápida a ponto de gerar trincas, fraturas e distorções do material.

O revenimento consiste em reaquecer o material, porém a temperaturas inferiores, fornecendo energia térmica o suficiente para difundir carbono na matriz martensítica. Em aços de baixa e média ligas, o revenimento tem duração mínima de uma hora. Já em aços de alta liga, são realizados no mínimo dois revenimentos por duas horas em cada revenimento. O ciclo térmico do tratamento de têmpera e revenimento é mostrado na Figura 14 (PINEDO, 2021).

Figura 14. Representação esquemática do ciclo térmico do tratamento de têmpera e revenimento



Fonte: Pinedo (2021).

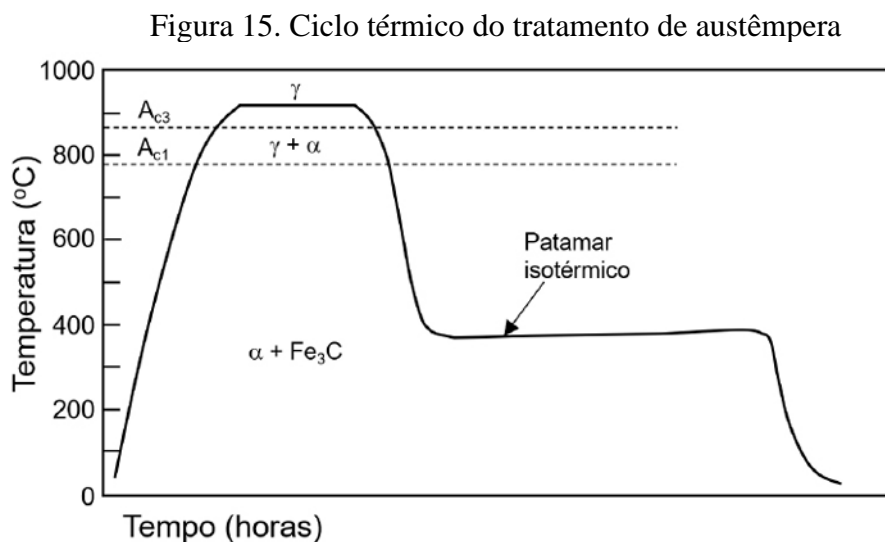
2.5.2.2.1 Têmpera e revenimento em aço-liga

Os aços carbono, em geral, não são capazes de atender as demandas dos diversos segmentos industriais, apresentando propriedades mecânicas elevadas, tais como elevadas resistências à fratura, ao desgaste e à corrosão. Por isso, são adicionados elementos de liga nos aços, como o cromo, molibdênio, manganês, entre outros. Para conferir boas propriedades mecânicas, dureza e resistência ao desgaste dos aços temperáveis, os principais elementos de liga adicionados são os formadores de carbonetos complexos, criando uma barreira para a movimentação de discordâncias, aumentando a resistência do material e alternando a curva de dureza em função da temperatura durante o revenimento. Quanto maior o teor do elemento de liga, maior o endurecimento secundário (aumento da dureza em temperaturas de revenimento em torno de 500°C). Já em temperaturas de revenimento na faixa entre 200 e 400°C, pode ocorrer uma queda na resistência à fratura (conhecido como fragilidade ao revenido). Os aços com teor de carbono abaixo de 0,5% não apresentam essa fragilidade, porém a adição de níquel, cromo e manganês aumentam a probabilidade desse fenômeno ocorrer, ao mesmo tempo que a adição de tungstênio e molibdênio podem atuar como um redutor dessa tendência. A fragilização ao revenido também pode ser revertida através de um reaquecimento a temperaturas acima de 600°C, com posterior resfriamento rápido até 300°C, seguido de resfriamento ao ar (PINEDO, 2021).

2.5.2.3 Austêmpera

O objetivo da austêmpera é obter uma boa combinação entre resistência mecânica e resistência à fratura. Isso é feito, por exemplo, através de um resfriamento em meio líquido, como banhos de sais fundidos, obtendo microestruturas constituídas predominantemente de bainita. Além disso, a austêmpera é um tratamento do tipo isotérmico.

A austêmpera possui uma vantagem com relação à tempera e revenimento, por alcançar níveis de resistência elevados através de apenas duas etapas (austenitização e resfriamento isotérmico), apresentando um custo menor. Ademais, a bainita possui uma expansão menor do que a martensita, apresentando uma menor variação dimensional e, conseqüentemente, menor distorção do material. O ciclo térmico da austêmpera está representado na Figura 15. (PINEDO, 2021).



Fonte: Pinedo (2021).

2.6 AÇO SAE 1045

Segundo o Fornecedor 1, a relha é fabricada a partir de aço SAE 1045. Este material pertence à classe de aços de médio teor de carbono, apresentando 0,45% de carbono em sua composição. Apresenta boa usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente e normalizado, além de boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É aplicado principalmente em eixos, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, virabrequim, entre outros. Na Tabela 1 é possível visualizar a composição química típica de um aço SAE 1045. Já a Tabela 2 mostra valores de algumas propriedades mecânicas.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1045

C	Si	Mn	P	S
0,43 – 0,50%	-	0,60-0,90%	0,03%	0,05%

Fonte: Adaptado de Silveira (2016).

Tabela 2. Principais propriedades mecânicas do aço SAE 1045

Dureza	Limite de escoamento mínimo	Limite de resistência	Alongamento mínimo
163 HB	310 MPa	570 MPa	16%

Fonte: Adaptado de Silveira (2016).

Aços de médio carbono apresentam maior resistência mecânica e dureza, porém menor tenacidade e ductilidade quando comparado com os aços de baixo carbono. Além disso, com a aplicação de tratamentos térmicos, é possível obter melhores valores de resistência e tenacidade (GAVA, MARCELLO, PERUCH, 2019). Em um estudo da influência do tempo de têmpera em um aço 1045, onde todas as amostras foram temperadas e revenidas a mesma temperatura, foi constatado que quanto maior o tempo de têmpera, maiores as durezas alcançadas (JÚNIOR; PIMENTA, 2017).

2.7 HARDOX 450

Segundo o Fornecedor 2, a relha é fabricada a partir de aço Hardox 450. Tal aço apresenta alta resistência à abrasão, com uma dureza nominal de 450 HBW, boa capacidade de dobra e soldabilidade, sendo aplicado em ambientes sujeitos ao desgaste, como em equipamentos utilizados na mineração (escavadoras, betoneiras), implementos agrícolas, equipamentos basculantes, entre outros. Além disso, o Hardox é temperado em toda a espessura, revenido e sua dureza no núcleo é aproximadamente 90% da dureza da superfície. A Tabela 3 apresenta sua composição química. Vale ressaltar que as propriedades mecânicas originais podem ser alteradas em temperaturas acima de 250°C, comprometendo sua usinabilidade (SSAB, 2019).

Tabela 3. Composição química do aço hardox 450

Tipo de produto	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Tiras a frio	0,19%	0,30%	1,50%	0,020%	0,005%	0,10%	0,10%	0,05%	0,004%
Chapa grossa e tiras	0,26%	0,70%	1,60%	0,025%	0,010%	1,40%	1,50%	0,60%	0,005%

Fonte: SSAB (2019).

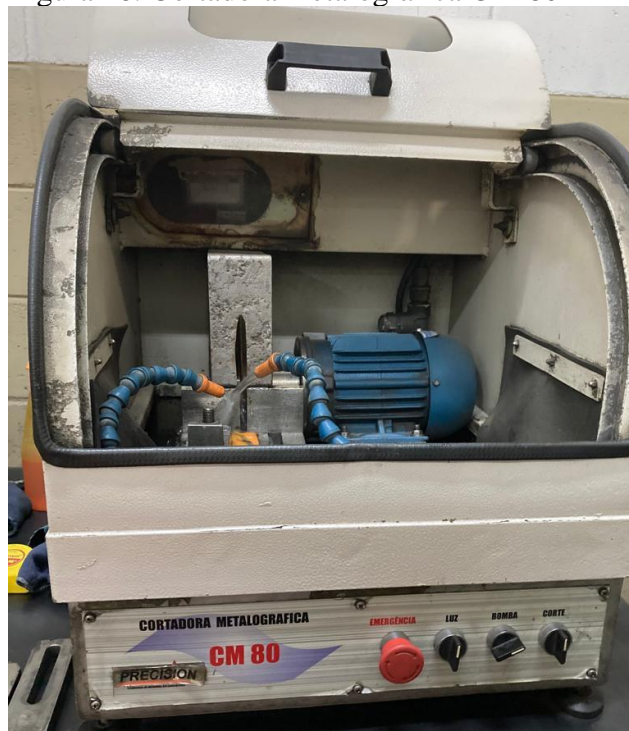
De acordo com a SSAB (2020), a empresa Indutar, ao utilizar o aço Hardox 450 para fabricar navalhas do rolo de faca KATRINA, até então fabricado com aço 1045, conseguiu reduzir em 20% o peso dos rolos, além de aumentar sua vida útil em 300%. Segundo a empresa Indutar, o material anterior sofria desgaste precoce e, ao tentar temperá-lo, sua fragilização fazia com que o mesmo fraturasse mais rápido.

O aço Hardox é um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) que passou a ser fabricado comercialmente em 1974 pela empresa sueca Swedish Steel SA (SSAB). Sua microestrutura é totalmente martensítica (MILDENBERGER, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaio de dureza Rockwell, análise da composição química e caracterização microestrutural em um laboratório de Piracicaba/SP. Primeiramente, as peças foram preparadas, sendo cortadas por uma cortadora metalográfica CM 80, mostrado na Figura 16.

Figura 16. Cortadora metalográfica CM 80



Fonte: Autor (2022).

As peças já cortadas foram então lixadas para eliminar rebarbas, mostrado na Figura 17.

Figura 17. Lixadeira



Fonte: Autor (2022).

Em seguida, as peças foram embutidas em baquelite amarelo a 170°C por 25 minutos.

Figura 18. Baquelite amarelo



Fonte: Autor (2022).

Figura 19. Embutidora



Fonte: Autor (2022).

Para finalizar a etapa de preparação das amostras, foi feito ataque químico com nital 2% em uma lixadeira metalográfica, mostrado na Figura 20.

Figura 20. Lixadeira metalográfica



Fonte: Autor (2022).

Para realizar a análise microestrutural, foi utilizado um microscópio óptico com ampliação de 500x, mostrado na Figura 21.

Figura 21. Microscópio óptico



Fonte: Autor (2022).

Para realizar o ensaio de dureza, foi utilizado um durômetro Rockwell universal, mostrado na Figura 22. Para cada amostra (uma amostra da relha do Fornecedor 1 e uma amostra da relha do Fornecedor 2), foram feitas 3 medições na superfície e 3 medições no núcleo. Os resultados obtidos em HR foram convertidos para HB através de uma tabela de conversão.

Figura 22. Durômetro Rockwell universal



Fonte: Autor (2022).

Por fim, para realizar a análise de composição química das amostras, foi utilizado um espectrômetro móvel, mostrado na Figura 23.

Figura 23. Espectrômetro móvel



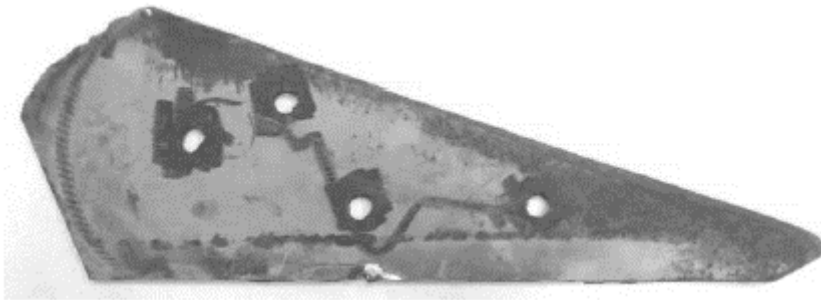
Fonte: Autor (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADO DOS ENSAIOS

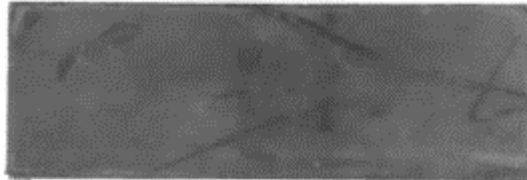
A seguir, na Figura 24 pode ser visualizado a amostra da relha do Fornecedor 1, utilizada atualmente, e na Figura 25 a amostra da relha do Fornecedor 2, proposta para substituição.

Figura 24. Amostra da relha do Fornecedor 1



Fonte: Autor (2022).

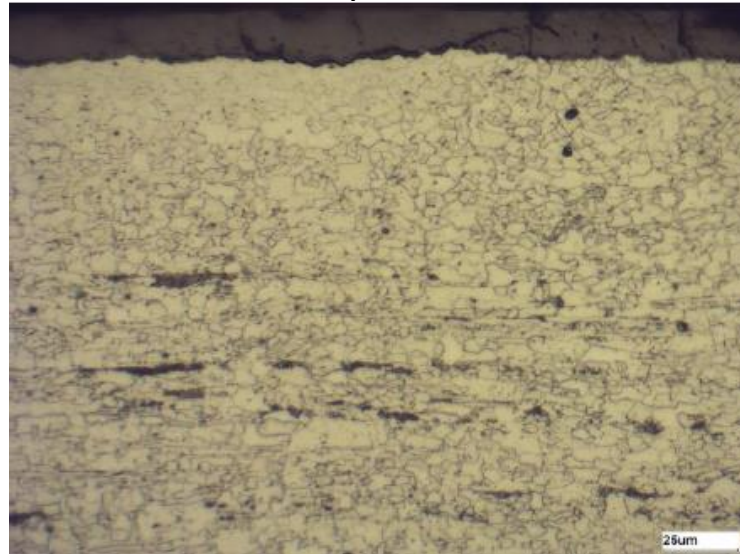
Figura 25. Amostra da relha do Fornecedor 2



Fonte: Autor (2022).

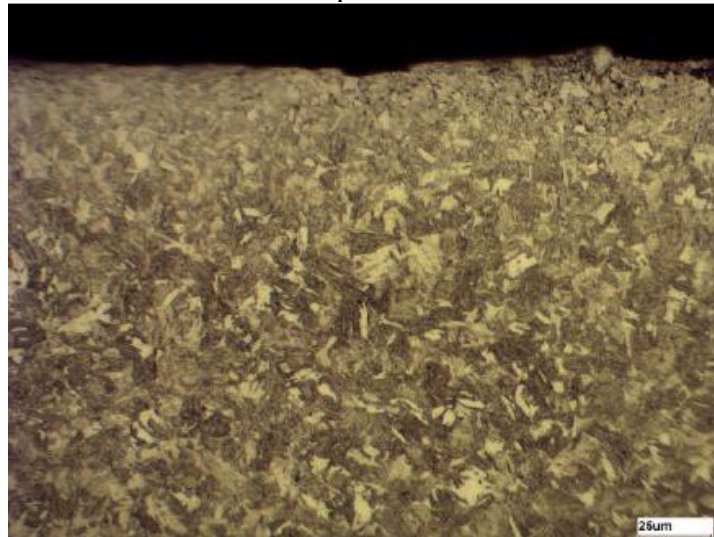
As Figuras 26 e 27 mostram a microestrutura da superfície das amostras analisadas.

Figura 26. Microestrutura da superfície da amostra do Fornecedor 1



Fonte: Autor (2022).

Figura 27. Microestrutura da superfície da amostra do Fornecedor 2

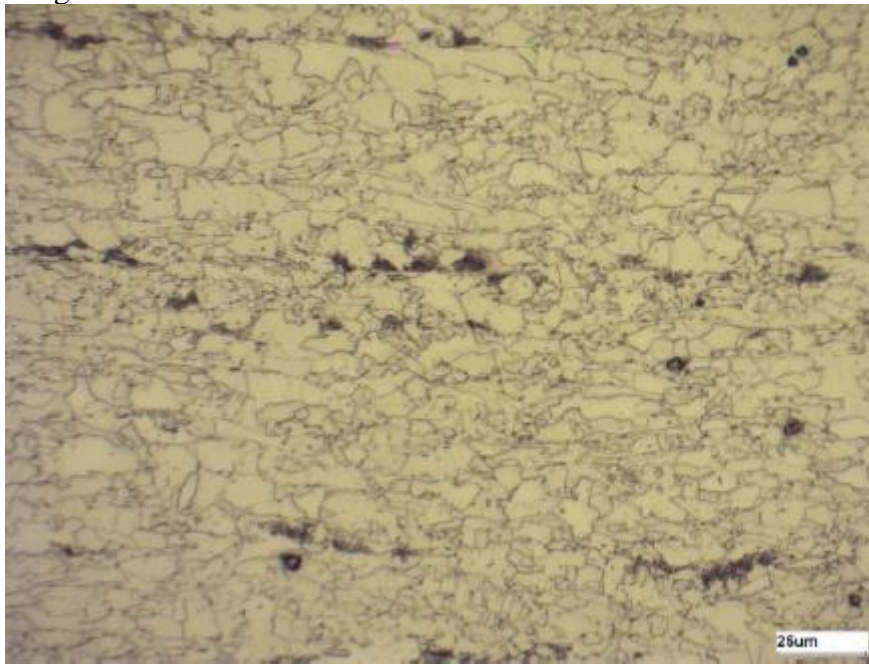


Fonte: Autor (2022).

Analisando as Figuras 26 e 27, nota-se que o material do Fornecedor apresenta uma microestrutura martensítica, característica do aço Hardox 450, obtida através do tratamento térmico de têmpera e revenimento. Essa microestrutura promove maior dureza e resistência mecânica ao material, porém menor ductilidade e tenacidade. Já com relação ao material do Fornecedor 1, nota-se uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica e com presença discreta de perlita. A ferrita é caracterizada por ser uma fase mais dúctil e tenaz, e a perlita traz um aumento na resistência mecânica do material, porém inferior quando comparado com a microestrutura martensítica (SILVEIRA, 2016).

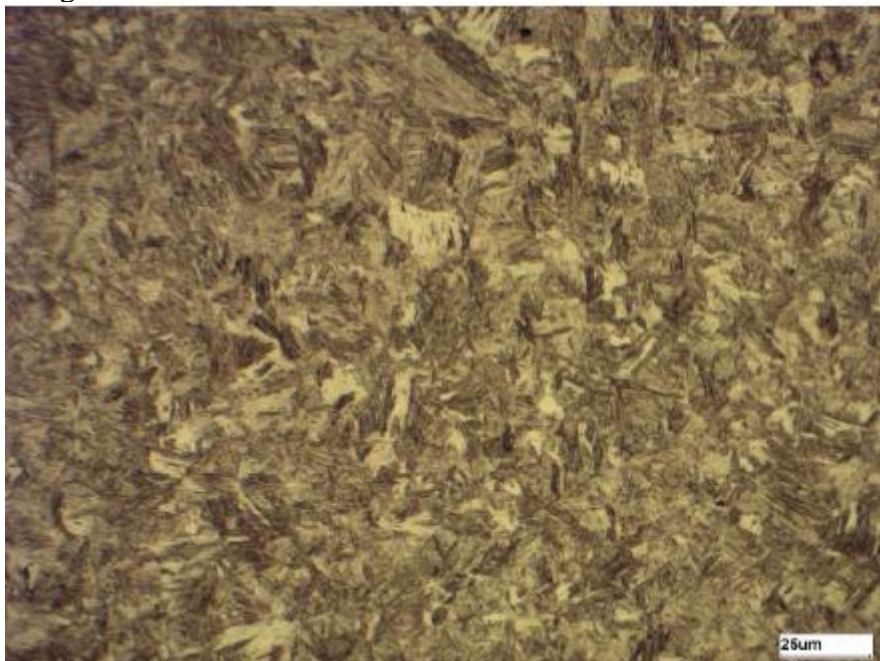
As Figuras 28 e 29 apresentam a microestrutura do núcleo das amostras analisadas.

Figura 28. Microestrutura do núcleo da amostra do Fornecedor 1



Fonte: Autor (2022).

Figura 29. Microestrutura do núcleo da amostra do Fornecedor 2



Fonte: Autor (2022).

Nota-se pelas Figuras 28 e 29 que a microestrutura no núcleo são as mesmas observadas na superfície.

A Tabela 4 mostra os resultados do ensaio de dureza.

Tabela 4. Resultado do ensaio de dureza Rockwell

Amostras	Local	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média dos pontos	Conversão
Fornecedor 1	Superfície	98	102	102	100 HRB	240 HB
Fornecedor 2	Superfície	46	45	46	46 HRC	432 HB
Fornecedor 1	Núcleo	99	99	99	99 HRB	243 HB
Fornecedor 2	Núcleo	45	45	45	45 HRC	421 HB

Fonte: Autor (2022).

Nota-se que o material do Fornecedor 2 possui uma dureza 1,8 vezes maior do que o material do Fornecedor 1, sendo esperado então uma maior durabilidade, conforme visto na seção 2.3.

As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados da análise química das amostras.

Tabela 5. Composição química do material do Fornecedor 1

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Ti	Fe
Obtido	0,09%	0,37%	1,77%	0,07%	0,15%	0,03%	0,022%	0,175%	0,081%	Base

Fonte: Autor (2022).

Tabela 6. Composição química do material do Fornecedor 2

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Pb	Fe
Obtido	0,16%	0,31%	1,40%	0,16%	0,05%	0,10%	0,073%	0,128%	0,112%	Base

Fonte: Autor (2022).

Com relação à composição do material do Fornecedor 2, os resultados realmente atendem as especificações de um aço Hardox 450, estando de acordo com a norma SSAB – Material Hardox 450.

Já com relação ao material do Fornecedor 1, a empresa informa ser um aço 1045. Porém, tal informação não condiz com o resultado da composição química, mostrando desalinhamento de informações da empresa. Entre a principal inconsistência, está o fato do material possuir um teor de carbono de 0,09%, e não na faixa entre 0,43 e 0,50%. Nota-se que o Manganês é o elemento de liga presente em maior porcentagem, utilizado para aumentar a resistência mecânica do material, conforme visto na seção 2.5.2. Com o resultado obtido, o material encontra-se dentro das especificações da norma ASTM A1011/A1011M, dentro da classe dos materiais UHSS (Ultra High Strength Steels), grau 90 e 100.

4.2 AÇOS DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA (UHSS)

De acordo com a norma ASTM A1011/A1011M, os aços de ultra alta resistência do grau 90 apresenta 620 MPa de resistência mecânica e o de grau 100, 690 MPa. Este aço é composto por grãos ferríticos finos e alguns microelementos de liga, como Nióbio, Titânio, Vanádio, Molibdênio, entre outros. Este aço pode ser aplicado em diversas situações onde é exigido elevada resistência mecânica, menor peso e melhor soldabilidade. Na Tabela 7 é possível visualizar a composição padrão do aço ASTM A1011/A1011M.

Tabela 7. Composição química do aço ASTM A1011/A1011M

UHSS	C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Ti	P	S	Cu
Grau 90 e 100 tipo 1	0,15%	2,00%	0,15%	0,40%	0,20%	0,005%	0,005%	0,020%	0,025%	0,20%
Grau 90 e 100 tipo 2	0,15%	2,00%	0,50%	0,40%	0,50%	0,005%	0,005%	0,020%	0,025%	0,60%

Fonte: ASTM A1011/A1011M (2010).

Nota-se que, na norma, não é mencionado que o aço ASTM A1011/A1011M é aplicado onde é necessário elevada resistência ao desgaste, como no caso da norma do aço hardox.

4.3 DURABILIDADE E VIABILIDADE FINANCEIRA

As relhas do Fornecedor 1 e 2 foram testadas até o fim de sua vida útil no eliminador de soqueira. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Tabela 8. Comparativo da durabilidade da relha do Fornecedor 1 e 2

Durabilidade	Fornecedor 1	Fornecedor 2
Horímetro	48	94
Dias	3	6

Fonte: Autor (2022).

Com relação à relha do Fornecedor 1, o fim de sua vida útil foi atingida após 3 dias, mais especificamente após 48 horas de operação do eliminador de soqueira. Já com relação à relha do Fornecedor 2, o fim de sua vida útil foi atingida após 6 dias, mais especificamente após 94 horas de operação do eliminador de soqueira. Nota-se que a durabilidade do material da relha do Fornecedor 2 (Hardox 450) é o dobro do material do Fornecedor 1 (ASTM A1011/A1011M). Além disso, na Tabela 9 é possível visualizar o comparativo do preço unitário da relha do Fornecedor 1 e 2 e também o comparativo de R\$/h.

Tabela 9. Comparativo do preço unitário e custo operacional da relha do Fornecedor 1 e 2

Viabilidade financeira	Fornecedor 1	Fornecedor 2
Custo	R\$ 1.570,00	R\$ 1.528,00
R\$/h	32,71	16,26

Fonte: Autor (2022).

Nota-se que o preço unitário da relha do Fornecedor 2 é menor do que a do Fornecedor 1. Ao realizar a relação entre o custo unitário e a durabilidade, em horas, das relhas, visto na Tabela 8, é possível analisar o custo por hora de operação (custo operacional - R\$/h). Nota-se que a relha do Fornecedor 2 apresenta a metade do custo operacional quando comparado com a relha do Fornecedor 1, sendo então viável sua substituição. Sendo assim, ao trocar o Fornecedor 1 pelo 2, é estimado uma redução de custo operacional de R\$ 16,45/h ou 50,30%, além de serem feitas menos intervenções na máquina uma vez que sua durabilidade é maior.

5 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível concluir que componentes de máquinas agrícolas em contato com o solo estão sujeitas à desgaste por abrasão, alterando a geometria dos componentes, prejudicando o desempenho da máquina. Para reduzir o desgaste das peças, é necessário uma boa seleção de materiais, de preferência materiais duros, o mais plano possível e com boa tenacidade.

A comparação do aço ASTM A1011/A1011M, material utilizado pelo Fornecedor 1, com o aço Hardox 450, utilizado pelo Fornecedor 2, foi possível concluir que o Hardox apresenta o dobro da durabilidade e também garante uma redução de 50,32% dos custos relacionados a relha. Isso deve-se ao fato do Hardox 450 apresentar a martensita em sua microestrutura, atingindo maiores níveis de dureza, comprovando também que, em geral, quanto maior a dureza do material, melhor sua resistência à abrasão. Dessa forma, ao utilizar o material do Fornecedor 2, é possível realizar menos intervenções na máquina para trocar a relha, aumentando a DF do equipamento e reduzindo riscos de segurança aos colaboradores ao interagir menos com a máquina.

REFERÊNCIAS

- ALCIONE, G. *et al.* **Análise do tratamento térmico de recozimento aplicado ao aço SAE 1045.** Centro Federal de educação tecnológica do RN, Natal. Disponível em: https://www.academia.edu/7914245/An%C3%A1lise_do_tratamento_t%C3%A9rmico_de_Recozimento_aplicado_ao_A%C3%A7o_SAE_1045. Acesso em: 29 set. 2022.
- ALI, J. **Mechanization of sugarcane cultivation.** Pantnagar: Govind Ballabh Pant University of Agriculture and Technology, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A1011/A1011M:** Standard Specification for light gauge Hot-Rolled Sheet and Strip Carbon(CS and DS), Structural(SS), High-Strength Low-Alloy(HSLAS), High-Strength Low-Alloy with Improved Formability(HSLAS-F), and Ultra-High Strength(UHSS) steels. In: Annual Book of ASTM Standards.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2002.
- DMB. **Eliminador mecânico de soqueiras:** manual de instruções. Disponível em: <https://docplayer.com.br/1204009-Eliminador-mecanico-de-soqueiras.html>. Acesso em: 26 ago. 2022.
- DEPARTAMENTO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. **Mapa de solos.** Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4285861/mod_folder/content/0/Relatorio.pdf?forcedownload=1. Acesso em: 24. jan. 2023.
- DUTRA, L. **Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos branco alto cromo:** ensaio abrasivo a três corpos. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2005-2_pg_-_leandro_dutra_-_ffbac_desgaste_ltm.pdf. Acesso em: 19 jan. 2023.
- GARCIA, A.; SPIM, J.; dos SANTOS, C. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017.
- GAVA, R.; MARCELLO, R.; PERUCH, F. **Análise do desgaste por abrasão em capas de dente fabricadas em aço ASTM SC 1045 após tratamento térmico.** Disponível em: https://www.academia.edu/7914245/An%C3%A1lise_do_tratamento_t%C3%A9rmico_de_Recozimento_aplicado_ao_A%C3%A7o_SAE_1045. Acesso em: 23 jan. 2023.
- SANTOS JÚNIOR, A.; PIMENTA, I. Estudo da influência do tempo no aumento da dureza nos tratamentos térmicos de têmpera do aço ABNT 1045. **Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**, v. 3, n. 2, p. 38–47, 20 dez. 2017.
- MACHADO, A. L. T. *et al.* Metodologia para avaliação do desgaste em ferramentas simétricas de mobilização do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 645–650, out. 2009.

MILDENBERGER, V. **Influência do tipo de trajetória no desgaste da ferramenta e na rugosidade da peça no fresamento do aço Hardox**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

PINEDO, C. **Tratamentos térmicos e superficiais dos aços**. São Paulo: Blucher, 2021.

PURQUERIO, B.; GAMBARINI, J. **Elementos de tribologia**: curso de especialização em engenharia de fabricação de máquinas ferramentas, parte 3. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em:
<http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/7758/Elementos%20de%20tribologia%20pt.3.pdf?sequence=3>. Acesso em: 26 jan. 2023.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SCHUITEK, A. J. **Estudo do comportamento de desgaste de materiais metálicos em riscamento circular**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVEIRA, M. **Análise comparativa de materiais resistentes à abrasão para canalizações agrícolas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2016.

SSAB. **Hardox 450**. Disponível em: <https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/hardox/programa-de-produto/450>. Acesso em: 24 jan. 2023.

TREVISAN, C. **Desgaste de órgãos ativos de máquinas e implementos agrícolas de preparo do solo: avaliação bibliográfica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

VANDENBERGHE, L. P. S. et al. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112721, 1 out. 2022.