

Análise Comparativa do Desempenho e das Propriedades Mecânicas de Diferentes Materiais Utilizados em Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto

Gabriella A. Martins, Mikael H. Morais,
Rosemberg F. N. Rodrigues, Márcio J. Dias,
Sérgio M. Brandão & Aline A. Monteiro.

O setor agrícola é uma das áreas que mais crescem no Brasil, e como forma de atender à demanda, o cultivo utilizado ocorre por Plantio Direto, com o uso de hastes sulcadoras para abertura dos sulcos. O objetivo deste trabalho é analisar de forma comparativa três materiais utilizados na produção desta ferramenta e determinar o de melhor custo e eficiência mecânica, sendo eles: aço ASTM A36, aço SAE 1045 e aço Quard 450 de alta resistência. Foram realizados quatro ensaios práticos e uma análise de custo. Os ensaios comprovaram que o Quard 450 apresenta melhor performance, alta dureza e tenacidade, sendo também o mais viável economicamente, ficando em segunda posição o ASTM A36.

Palavras-chave: *haste sulcadora; desempenho; propriedades mecânicas.*

The agricultural sector is one of the fastest growing areas in Brazil, and as a way to meet the demand the cultivation used occurs by no-tillage, with the use of furrow stems to open the furrows. The objective of this work is to comparatively analyze three materials used in the production of this tool and determine the best cost and mechanical efficiency, namely: ASTM A36 steel, SAE 1045 steel and high strength Quard 450 steel. Four practical tests and one cost analysis were performed. The tests proved that Quard 450 has better performance, high hardness and toughness, being also the most economically viable, being in second position the ASTM A36.

Keywords: *furrow stem; performance; mechanical properties.*

Introdução

O trabalho com o solo, como fonte de geração alimentar, sempre existiu desde os primeiros milênios da história. Com a formação das primeiras sociedades de conjunto familiar, as técnicas de cultivo pararam de ser rudimentar e foram se inovando e diversificando com o tempo, um exemplo está nos registros da agricultura do Egito Antigo, os quais criaram sistema de armazenamento de água, grandes poços, para a distribuição a longa distância principalmente em épocas de estiagem que compreendia a mais de 70% do ano^{1,2}.

Entretanto, em 2000 a.C., a cultura produzida viabilizava as pequenas regiões, quatro milênios depois a comercialização dos produtos primários se tornou global, o que pede novas técnicas de plantio que acompanhem as vendas junto a alta produção com qualidade. A produção de cana-de-açúcar, produto primário, apresentou nas duas últimas décadas um crescimento exorbitante, sendo alguns dos motivos o alto consumo do açúcar, produto secundário, e o foco no aumento do uso do etanol pelos países norte-americanos, europeus e Japão. Segundo a International Sugar Organization (ISO) entre os anos de 2011 e 2013, somente nos Estados Unidos, houve um crescimento no consumo médio per capita de açúcar de 1,5 Kg, ficando atrás somente da Europa com um aumento de 2Kg por pessoa, em outro levantamento o IBGE apontou que, somente em 2019, o Brasil irá fornecer ao mercado 688,6 milhões de toneladas de cana, revelando que para esta demanda haverá crescimento da safra nas lavouras³⁻⁵.

Os grandes latifúndios visam à alta produtividade, diminuição dos custos com maquinários e operações com um maior aproveitamento da água e do solo. Contudo, antes da colheita há o preparo da safra e para uma correta germinação, é necessário conhecer os vários fatores internos e externos que influenciam o processo, sendo o principal deles a água. O abastecimento de água ajuda na reidratação dos tecidos o que garante o fornecimento dos nutrientes, desta forma é extremamente importante o contato das raízes com o maior volume de solo, gerando uma cultura radicular. Para que as raízes atinjam o

volume de solo que garanta sobrevivência das plântulas é necessário que durante o processo da formação dos sulcos, esses atinjam profundidades que contribuam com retenção dos nutrientes garantindo a germinação e diminuindo falhas nas linhas de plantio^{1,6}.

Com a alta demanda, os grandes produtores de cereais, grãos e canaviais têm em vista tecnologias que contribuam com um processo de baixo custo e alta qualidade assim as semeadoras adubadoras foram desenvolvidas para o cultivo conservacionista, este se baseia em um sistema no qual há mínima mobilização do solo antes da semeadura, desta forma garante mínimos custos de operação sem a utilização de grades, arados, enxadas rotativas e maquinários para movimentação. Além da diminuição do custo final, diferindo da agricultura convencional, a mínima mobilização diminui futuros transtornos ambientais devido ao uso de equipamentos e maquinário pesado, pois como não há tamanhas alterações tornasse possível diminuir as erosões e os casos de compactação subsuperficial, permitindo o maior aproveitamento da umidade do solo. Este tipo de cultura, chamada de Plantio Direto, chegou ao Brasil somente em meados da década de 70, sendo bastante utilizada principalmente devido a diminuição do tempo gasto com o preparo do solo, a mecanização e o controle do processo^{1,7}.

As primeiras máquinas semeadoras adubadoras são formadas por discos de corte para abertura dos sulcos, por pares de sulcadores em formato de discos que possuem a função de fertilizar o solo, para que posteriores discos depositem as sementes nos sulcos, o que garante múltiplas funções em um só maquinário. Este modelo de “cultivo conjugado” traz a versatilidade para o campo combinada com a economia, entretanto os sulcadores em formato de disco não garantem penetrações profundas em solos compactados e de baixa umidade, alarmando futuros problemas nas linhas. Com o foco de minimizar os transtornos as semeadoras foram equipadas por hastes sulcadoras, ferramentas em formato de “facas” semiparabólicas, que resistem a maiores esforços de tração, atingindo profundidades de 12-15 cm nos rasgos do solo¹.

O desempenho dos sulcadores depende de diversos fatores dentre eles o tipo de solo trabalhado, velocidade do maquinário, condições adversas de projeto (como geométrica das hastes e ponteiras, material de fabricação das duas ferramentas). Vários fatores influenciam na vida útil destas ferramentas, na literatura há registros de que dentro das usinas sucroalcooleiras as hastes sulcadoras são um dos equipamentos que mais sofrem paradas não programadas, por não poderem ser substituídas durante a entressafra. As ponteiras podem ser recuperadas através da soldagem com eletrodo revestido, contudo as hastes sofrem pelo desgaste abrasivo causado nas ponteiras durante o processo, pois com a alteração da geometria das ponteiras ocorre sobrecarga de tração. Materiais de menor ductilidade não resistem e acabam fraturando em meio ao processo, entretendo baixa dureza também compromete o desempenho causando encargos e paradas corretivas^{1,5}.

As tecnologias e inovações na área agrária tem se alavancado, principalmente para atender ao agricultor cada vez mais atualizado, que busca acatar o processo a baixo custo. Quebra das hastes sulcadoras precocemente afeta grandes lavouras principalmente na área econômica, por isso seu projeto deve ser analisado criteriosamente. O material mais utilizado para produção deste modelo de haste é o aço-carbono comercial SAE 1045, seguindo as especificações da norma SAE J403, ou com procedimentos térmicos adicionais como têmpera, revenido ou cementação. O aço, em seu conceito básico, condiz a uma liga composta da união de dois componentes matriz, o ferro e o carbono, sendo que em seu processo são aderidos elementos secundários. Com base na literatura, devido à complexidade do material, eles podem ser classificados de diversas formas, seja pela composição, ou o procedimento de acabamento ou formato do produto já terminado, neste trabalho foi considerado para estudo a primeira classificação, sendo esta, dividida em duas categorias: a primeira, constituídas por aço-carbono são os que contêm de 0,008 a 2,11% de carbono em sua composição, a segunda, constituídas por aço-liga que são aços-carbono especiais, os quais apresentam vários elementos de liga ou elementos residuais a sua composição, sendo o teor acima do padrão, desconsiderando os elementos

adicionais para melhora da usinabilidade. Os aços-carbono são subdivididos em^{8,9}:

- A. Aços de baixo carbono, teor inferior à 0,2%;
- B. Aços de médio carbono, teor entre 0,2 e 0,5%;
- C. Aços de alto carbono, teor acima de 0,5%.

Novos aços vêm sendo desenvolvidos para atuar com estas ferramentas e permitir maior variabilidade de solos e desempenho, contribuindo com a vida útil da ferramenta. Para tal exemplo há o aço Quard, por que está classificado como açosmartensítico de alta resistência ao impacto e dureza, o que permite o uso em ambientes abrasivos e garante versatilidade à sua aplicação, devido a estes fatores ele é usualmente utilizado nos setores agrícola e de mineração. Outros materiais também apresentam a mesma porcentagem de carbono que o Quard, entretanto não apresenta as mesmas propriedades mecânicas, para tal exemplo há o aço ASTM A-36, o mesmo em sua forma base garante média resistência e baixa dureza, não sendo recomendado para trabalhos que exerçam desgaste excessivo, sendo assim utilizados para perfis estruturais, seu uso para mineração somente é viável com tratamentos superficiais no aço¹⁰⁻¹².

As propriedades mecânicas são diretamente ligadas à estrutura metalúrgica do aço, à adição de carbono na composição aumenta relativamente à dureza do material analisado, sendo de conhecimento que essa afeta pontualmente a resistência a erosão. Entretanto tal característica nesta ferramenta agrega substancial importância a sua função, pois a dureza é inversamente proporcional a tensão limite de escoamento, a qual garante resistência a tração sem romper^{13,14}.

Viabilizando um maior desempenho operacional, este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente as propriedades mecânicas e desempenho em campo de três diferentes materiais sendo eles aço ASTM A36, aço SAE 1045 e aço QUARD 450, com têmpera e revenimentado processo de formação, que podem ser utilizados em hastes sulcadoras de semeadoras de plantio direto.

Metodologia

MATERIAIS

Para início dos testes, a usina sucroalcooleira Jalles Machado forneceu amostras de hastes sulcadoras, todas com mesma geometria e dimensão como demonstrada no modelo da Figura 1, na qual a diferença está na constituição do material, grupos compostos por ferramentas: de aço ASTM A36, de aço SAE 1045 e de aço Quard 450.

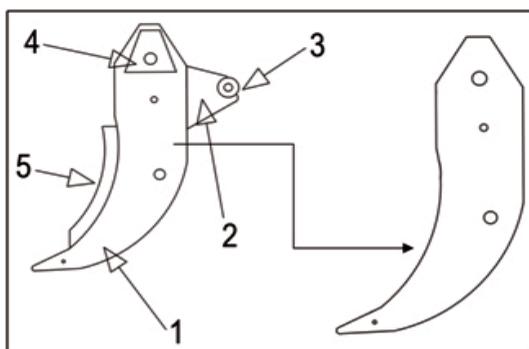


Figura 1: À esquerda, componentes do conjunto, à direita, haste sulcadora estudada (1). **Fonte:**¹⁵

Todas foram instaladas no maquinário em pares, como demonstrado na Figura 2.



Figura 2: Hastes instaladas em Semeadora Adubadora. **Fonte:** Autor

Dentre os fatores que influenciam as propriedades das ligas ferrosas, a composição química é considerada o fator principal, pois esta contribui para alterar a estrutura microscópica afetando as características mecânicas do material^{9,13}. Abaixo, na Tabela 1, é possível verificar a porcentagem dos principais elementos de liga presentes em materiais ferrosos, considerando as informações contidas nos relatórios técnicos de manufatura^{16,18}:

Tabela 1: Composição química dos materiais analisados. **Fonte:** Autor

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% Peso)	Aço ASTM A36	Aço SAE 1045	Aço QUARD 450
Mn	0,66	0,72	1,205
P	0,022	0,018	0,017
S	0,009	0,006	0,001
C	0,15	0,49	0,2
Si	0,23	0,172	0,284
Al	0,05	0,027	0,034
Cu	0,01	0,007	0,015
Nb	0,001	-	0,014
Ni	0,01	0,011	0,012
Cr	0,02	0,02	0,078
V	0,001	0,001	0,002
Mo	-	0,003	0,002
Ti	0,001	0,001	0,019
N	0,0041	0,0064	0,0027
B	0,0001	-	0,0019

Segundo a norma 6006, da ABNT, para que o aço seja considerado aço-liga, esse deve apresentar um aporte de outros compostos superior a 6%, incluindo na soma elementos como carbono, silício, enxofre, fósforo e manganês, contudo caso os elementos alumínio, manganês e silício sejam superior a 0,1%, 1,65 e 0,6% respectivamente, já serão considerados ligados. O aço ASTM A36 apresenta baixos teores de elementos de liga e de carbono em sua composição (% em peso), o que faz dele um aço de baixo carbono, o aço SAE 1045 possui uma maior concentração de carbono, 0,45% C, mas não o suficiente para ser classificado como aço de alto carbono e o aço Quard450 apresenta aproximadamente a mesma porcentagem de carbono do aço ASTM A36 em sua composição, 0,2% C, com maior concentração de manganês. Entretanto este não

segue os parâmetros da AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotive Engineers), desta forma não é classificado como aço-carbono⁹.

Métodos

Para cunho de análise comparativa, dividiu-se os métodos em duas categorias: os ensaios práticos, divididos em quatro etapas, e a análise do custo-benefício de cada material, por meio do desempenho. Para o ensaio prático, a primeira etapa foi a avaliação do desempenho das ferramentas em campo. Para critério avaliativo, foi realizado o registro do tempo de funcionamento em campo, por meio de horímetro, até o fim de sua eficiência, seja ele por meio de fratura ou alteração da geometria. Todas foram colocadas em datas específicas, formando pares, somando três maquinários no total. Os tipos de solos trabalhados foram: o latossolo, solo presente em maior parte do território brasileiro por ser encontrado em regiões equatoriais e tropicais, sua composição é predominante de argila com presença de óxido de ferro, silício e alumínio, sendo característico por sua acidez, é classificado como fortemente à bem drenado, apresenta baixa resistência ao arado; o cambissolo, apresenta significativa presença de fragmentos rochosos, desta forma sua composição base consiste em material mineral e, devido à heterogeneidade de sua origem, apresenta variâncias como comportamento de alta ou baixa drenagem e profundidade, a sua pedregosidade na superfície e no centro apresenta alta resistência ao arado, entretanto, devido ao alto teor de minerais primários, é um solo bastante utilizado para cultivo, e o plintossolo, são típicos de zonas quentes e úmidas, constituídos por material mineral e são fortemente ácidos, apresentam baixa capacidade de drenagem gerando períodos de excesso de umidade, desta forma oferece média resistência ao arado¹⁹.

Após a avaliação do desempenho, as ferramentas foram recolhidas para posteriores testes e avaliação das propriedades mecânicas e subsequentes etapas. A segunda etapa baseia-se na preparação e análise microestrutural dos três materiais. Estes foram preparados em formatos de barras com face retangular (10X12 mm²) utilizando uma

máquina serra de fita horizontal da marca Ronemak modelo SR-250 VF. Posteriormente, as amostras passaram por uma embutidora metalográfica utilizando baquelite, processo de 16 minutos realizado por pressão hidráulica à temperatura de 150 °C. Todas as amostras, após embutidas, passaram pelo processo de lixamento e polimento padrão com sequência de seis lixas de granulometrias distintas (240, 320, 400, 600, 1200 e 2500) e alumina de 1 µm respectivamente. As amostras foram lavadas com álcool etílico e secados em sentido horizontal a face20. Em seguida a tais processos as amostras sofreram ataque químico por Nital 2%, passo importante, pois a escolha do ataque e o intervalo da amostra com o reagente são cruciais para cada tipo de material²¹, na sequência foram avaliadas no microscópio óptico.

A terceira etapa consistiu na avaliação da dureza dos materiais. Esta foi realizada através do ensaio Rockwell, onde foram fabricadas três amostras de cada material, todas retiradas de cada uma das regiões indicadas da Figura 3, o teste foi realizado próximo a superfície (em azul) e núcleo (em vermelho) de cada amostra como indicado na Figura 4, desta forma os possíveis processos de tratamento térmico do processo de produção e as propriedades do material base foram indicados nos resultados.

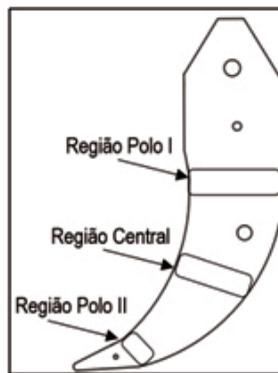


Figura 3: Regiões de retirada das amostras para ensaio de dureza e impacto Charpy-V. **Fonte:** Autor

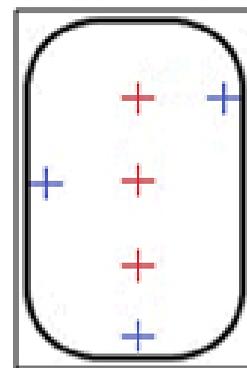


Figura 4: Regiões do ensaio de dureza. **Fonte:** Autor

Os ensaios foram realizados de duas formas com mesmo equipamento, um durômetro de bancada analógico da marca Digimess, ref. 400.005. Para os aços ASTM A36 e SAE 1045 foi usado escala de dureza Rockwell B, carga maior de 100 kgf, penetrador de esfera de aço temperado com diâmetro de 1/16", sendo a leitura realizada na escala vermelha do relógio e o valor da pré-carga de 10 kgf, para garantir o contato entre o penetrador e o material, para o aço Quard 450, por ser de alta resistência, foi usado escala de dureza Rockwell C, carga maior de 150 kgf, penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade, sendo a leitura realizada na escala preta do relógio e o valor da pré-carga de 10 kgf. Após os testes os resultados foram convertidos para escala Brinell, para que fosse realizado uma melhor comparação com o material de maior dureza. Foram realizados seis ensaios em cada amostra, três para superfície e três para o núcleo, com distanciamento superior a 3 mm, totalizando dezoito testes para cada material, considerando como valor final a média dos valores do centro e superfície²².

A quarta etapa analisou a resistência ao impacto de cada material, sendo para isso realizados ensaios de impacto Charpy. Os corpos de prova foram usinados em amostras conforme a norma ASTM E23 – 07a, representado na Figura 5, todos segundo a geometria e dimensionamento tipo A (entalhe em V)²³.

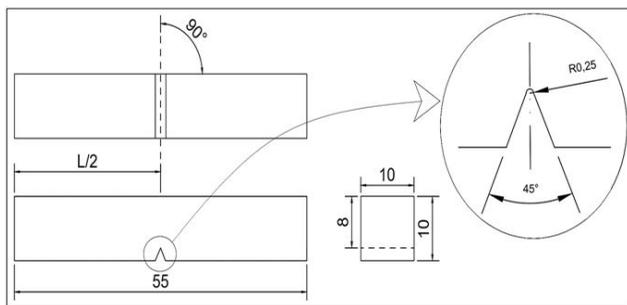


Figura 5: Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy (em mm). **Fonte:** referência [23].

No total foram fabricadas seis amostras de cada material, dois para a região central e dois para cada um dos polos (Polo I e II), conforme Figuras 3 e 6, para assim verificar se não há heterogeneidade no material e gerar valores intrínsecos.

As amostras foram todas retiradas sentido horizontal da região, como indicado na Figura 6.

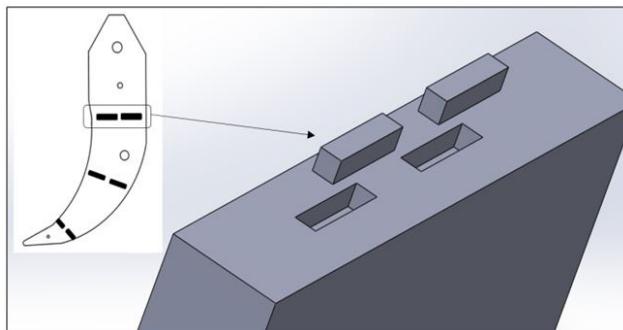


Figura 6: Sentido de retirada das amostras para Charpy-V. **Fonte:** Autor

Para avaliação final dos materiais, baseou-se na relação custo benefício (um modelo parecido ao Payback, tempo de retorno do investimento inicial²⁴) entre as três ferramentas. A diferença do estudo realizado ao modelo citado (Payback), está em que esse não baseou se no retorno financeiro de uma para outra em um mesmo período de atuação, mas sim no valor inicial aplicado para cada material, avaliando qual é mais econômico. Também foi considerado qual gerou menor e maior quantidade de resíduos e, qual solicita maior demanda de equipes para as paradas.

Resultados e Discussão

ENSAIOS PRÁTICOS

O teste em campo permitiu identificar que o melhor material para tal funcionalidade é o Quard 450, considerando que não sofreu fratura e nem perda da eficiência até o recolhimento dos dados. A Tabela 2 aborda o tempo que cada amostra suportou até a perda de sua função e o gráfico 1 apresenta a média das horas registradas para cada material.

Tabela 2: Desempenho de cada amostra pelo horímetro. **Fonte:** Autor

Material da ferramenta	Tempo (h)	
	Amostra 1	Amostra 2
	Aço ASTM A36	73,7
Aço SAE 1045	42,9	62
Aço QUARD 450	321,7	437,6

* Não foi possível o teste com a segunda amostra

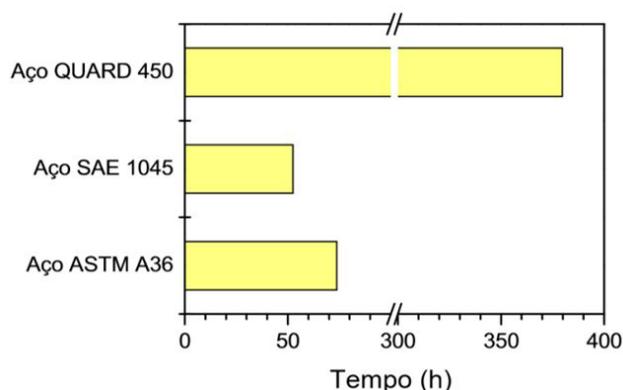


Gráfico 1: Desempenho médio de cada material pelo horímetro. **Fonte:** Autor

Considerando a eficiência apresentada por cada material em horas no Gráfico 1, os aços SAE 1045 e A36 supriram 14% e 19%, respectivamente, do resultado apresentado pelo material Quard 450, desta maneira caso viesse a escolher o material baseado em sua eficiência somente, a melhor ferramenta é a produzida por Quard 450.

A presença de carbono, substância que contribui para o aumento da dureza e resistência ao desgaste, foi analisada por meio da microscopia ótica. Na Figura 7, realizada no núcleo do aço ASTM A36 com ampliação de 200X, devido à porcentagem de carbono é possível notar a presença da ferrita+perlita, compatível com o diagrama ferro-carbono considerando um componente com no máximo 0,25% de C. Desta forma, são aços mais dúcteis, com menor presença de perlita (região escura) e menor dureza^{25,26}. Na Figura 8, é perceptível a maior concentração de carbono

próximo a superfície, como tal material não passou por nenhum tratamento termoquímico, esta reação se deve a um processo de encruamento durante sua fabricação.

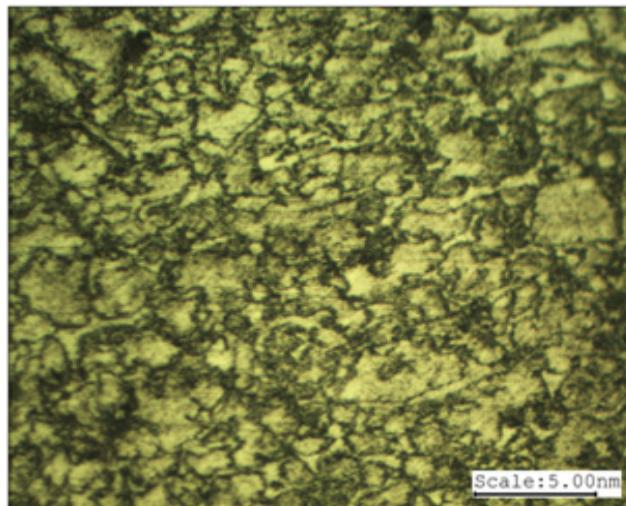


Figura 7: Microscopia do núcleo do aço ASTM A36 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

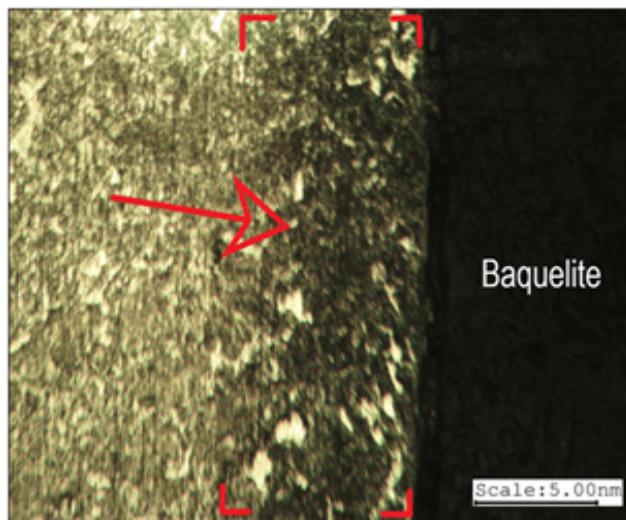


Figura 8: Microscopia da superfície do aço ASTM A36 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

O aço SAE 1045 é indicado nas Figuras 9 e 10, neste é possível notar a maior concentração de carbono em toda região o que justifica o fato de sua maior dureza, quando comparado a região do núcleo do ASTM A36.

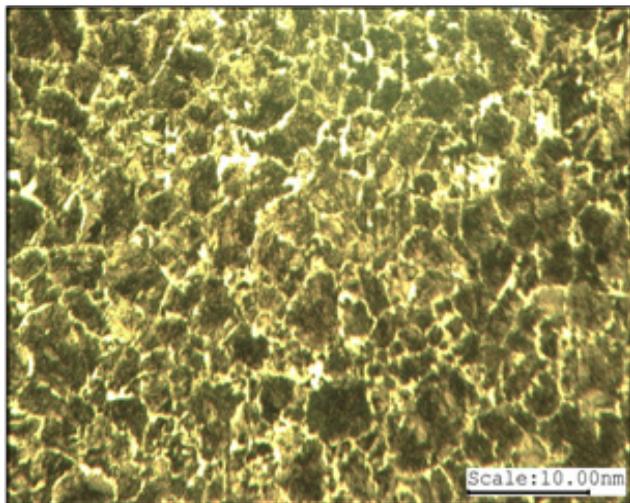


Figura 9: Microscopia do aço SAE 1045 – Ampliação 100. **Fonte:** Autor

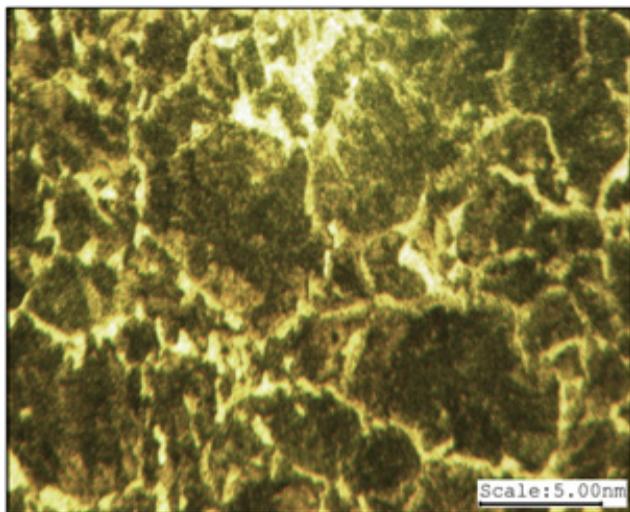


Figura 10: Microscopia do aço SAE 1045 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

O mesmo apresentou semelhança à granulação apresentada na literatura para o aço SAE 1045 sem tratamento algum, nota-se também a ausência de martensita, demonstrando que este não sofreu tratamento térmico de têmpera. Observa-se portanto a presença de ferrita (tonalidades claras) e perlita (tonalidades escuras)^{25,27}. Por meio das Figuras 7 e 10, de mesma ampliação, é notável a maior concentração de carbono no SAE 1045.

O Quard 450 apresentou baixa concentração de carbono em sua composição, entretanto, passou pelos processos de têmpera e posterior revenimento, formando a fase martensita, para um melhor reconhecimento da fase foi realizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentada na Figura 11, que destaca-se a fase martensítica de aço temperado presente na literatura^{9,28}.

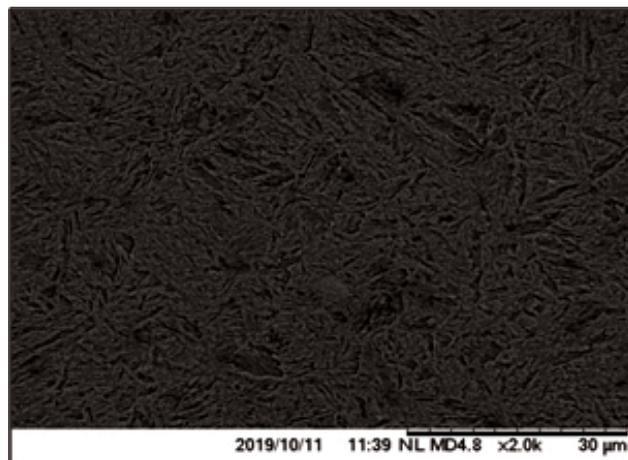


Figura 11: Microscopia eletrônica de varredura do aço Quard 450 – Ampliação 2.0k X. **Fonte:** Autor

Como indicado pelo fabricante e na literatura tal microestrutura é martensítica, para obter este tipo de estrutura interna uma das formas de processo é através do resfriamento rápido, o que justifica o processo de têmpera. É natural dos materiais martensíticos apresentarem alta dureza e fragilidade, gerando risco de quebra, exceto quando apresenta baixo teor de carbono, justificado

no relatório de manufatura (0,2% C) deste material. E se tratando de um aço liga especial, o mesmo permite a obtenção de tal microestrutura. Contudo, para que a dureza não afete a tenacidade, estes materiais passam pelo processo de revenimento à temperatura abaixo da linha de transformação, como é abordado por seu fabricante e comprovado por seu alto desempenho, através da resistência ao impacto e dureza^{9,16,21,28}.

Considerando a fase presente em sua microscopia e comparando à literatura, os materiais que apresentam estrutura martensítica Fe-C, com baixo teor de carbono como o Quard 450, apresentam elevada resistência mecânica devido à alta presença de discordâncias e ao endurecimento através de solução sólida intersticial sendo sua vantagem em comparação aos demais, bem como é comprovado na Tabela 3 por meio da dureza^{10,21,29,30}.

Tabela 3: Dureza do Quard 450. **Fonte:** Autor

Aço Quard 450	Aferições (HRC)					
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Amostra 01	49	42	53	43	55	44
Amostra 02	49	45	55	38	55	48
Amostra 03	39	46	44	47	55	47

Em comparação ao Quard, os demais materiais foram testados em escala HRB, segue na Tabela 4.

Tabela 4: Dureza do ASTM A36 e SAE 1045. **Fonte:** Autor

Aferições (HRB)	Aço ASTM A36		Aço SAE 1045	
	Núcleo	Superfície	Núcleo	Superfície
Polo I - Superior	88	92	91	95
	84	97	92	94
	89	93	92	95
Centro - Meio	84	82	84	95
	89	85	91	92
	86	93	92	92
Polo II - Inferior	88	93	92	94
	89	93	95	96
	87	93	91	93

Devido à baixa disponibilidade de material para o Quard as amostras, como representado na Tabela 3, foram mensuradas em pontos variados sem diferenciar superfície e centro. Observa-se que dentre os três materiais, o Quard 450 apresentou maior dureza, desta forma compreende-se que somente a concentração de carbono não garante sozinha a eficiência deste componente, dependendo de outros elementos e dos tratamentos térmicos o qual sofreu, devido o aço ASTM A36 ficou abaixo da faixa de performance do Quard 450, como indicado em escala Brinell no Gráfico 2. Outra relevância, está em que o material SAE 1045, ainda com seu maior percentual de carbono diante dos demais, Tabela 1, permaneceu na mesma faixa que a superfície do ASTM 36, este fato pode ser justificado por algum processo de conformação sofrida pela ferramenta durante o uso ou fabricação ocasionando uma recristalização dinâmica, como apresentado na Figura 8, sendo que tal região pode apresentar efeito de aumento da resistência mecânica e dureza, induzindo uma resistência ao desgaste superficial com núcleo tenaz, representado no Gráfico 2^{1,25}.

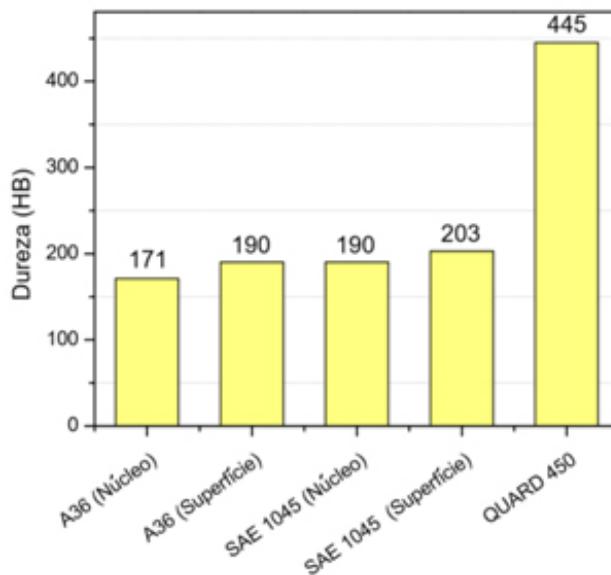


Gráfico 2: Dureza média dos materiais – Escala Brinell (HB). **Fonte:** Autor

O A36 permaneceu na mesma faixa de dureza do aço SAE 1020, devido à quantidade de carbono. O SAE 1045 apresentou-se na mesma faixa indicada na literatura, entre 179 – 229 HB 9. A dureza do Quard correspondeu ao informado pelo fabricante que garantiu entre 420 – 480 HBW, de acordo com EN ISO 6506-1²⁸.

A resistência ao impacto, descrita por tenacidade, possibilitou melhor compreender o desempenho dos três materiais, principalmente, quando os mesmos são submetidos à solo com maior concentração de rochas, o cambissolo. Esta foi mensurada em joules sendo representada na Tabela 5 a tenacidade do A36 e 1045.

Tabela 5: Tenacidade do ASTM A36 e SAE 1045. **Fonte:** Autor

Aferições (J)	Aço ASTM A36	Aço SAE 1045
Polo I - Superior	18 23,5	7,5 16
Centro - Meio	16 22	11,5 15
Polo II - Inferior	15 19	14,5 12

As amostras do A36 e 1045 foram recolhidas das mesmas regiões da ferramenta como do ensaio de dureza, contudo para analisar o Quard os dados foram obtidos do fabricante e comparados por meio da média dos demais no Gráfico 3.

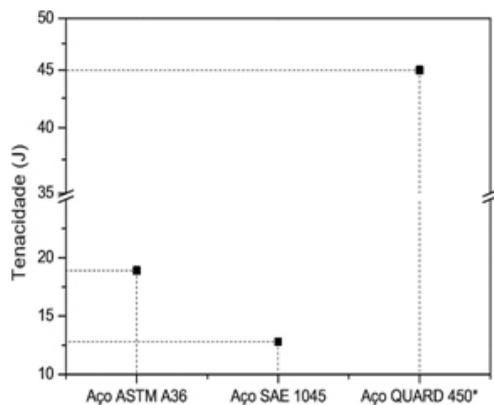


Gráfico 3: Tenacidade média dos materiais – (Joule). **Fonte:** Autor²⁸

É possível verificar que o aumento da dureza do SAE 1045 em relação ao ASTM A36 fez com que perdesse gradativamente sua resistência ao impacto, justificando sua quebra precoce. Como abordado na literatura, sua maior concentração de carbono permitiu resistir ao desgaste, este fato somente foi possível no A36 devido à camada superficial gerada do encruamento que elevou sua dureza à mesma faixa unitária do núcleo do SAE 1045. Desta forma o segundo material permaneceu tenaz em seu interior, mas com uma camada dura capaz de diminuir o risco à quebra^{13,21}.

Quanto ao Quard 450, este apresentou a mais elevada dureza, em resultado de sua estrutura martensita gerada do processo de têmpera, e alta tenacidade, advindo do processo de revenido que aliviou as tensões internas e originou um material dúctil. Estes fatores foram determinantes para que apresentasse o melhor desempenho confrontado aos demais²¹.

Como a ductilidade representa o grau de deformação plástica (visível) que o material sofre antes da ocorrência de sua ruptura, é possível avaliar através da fratura em qual categoria o material é classificado. Considerando como categorização geral dois tipos de fratura, tipo frágil, aquele material o que sofre mínima ou nenhuma deformação plástica antes da ruptura, e tipo dúctil, o que exibe uma considerável deformação plástica antes de sofrer ruptura, segue Figura 12 macroscópicas referentes as fraturas do aço ASTM A36 e SAE 1045^{21,25}.



Figura 12: Fraturas do Polo I. **Fonte:** Autor

Analisando visualmente os dois materiais é perceptível que o A36 apresentou fratura mista (entre frágil e dúctil) devido às laterais abauladas em sua amostra, enquanto o SAE 1045 apresentou rápida propagação de fissuras, o que indica que a fratura ocorreu em planos cristalográficos característicos, ou planos de clivagem, o que indica ser frágil²¹.

Meditando que para um material ser mais tenaz ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade, os dados obtidos com as análises do A36 e SAE 1045 correspondem com o descrito na literatura, pois o primeiro apresentou maior tenacidade e ductilidade, respectivamente o segundo apresentou baixa tenacidade e fratura correspondente a material frágil²⁵.

CUSTO-BENEFÍCIO

O custo-benefício desenvolvido foi elaborado nos fatores justificáveis para a escolha do material, considerando: 1) Custo Total dos Gastos, 2) Geração de Resíduos e 3) Gestão do Processo. Para análise foi considerado o tempo médio em horas abordado no Gráfico 1 e o tempo de parada, para troca da ferramenta, como 1 h, os valores das ferramentas e o valor da hora produtiva foram abordados como variáveis de mercado.

Para analisar as duas variáveis foram considerados: *Valor da ferramenta* = x , ponderando a de menor custo no cenário atual como a A36, os valores não foram abordados, mas acrescidos de estimativa para as demais, e *Valor da hora produtiva* = y , a qual será avaliada pelo custo gerado da quantidade de paradas ocorridas. Para melhor analisar a contagem de paradas sucedidas dentro de um mesmo intervalo de tempo, foi baseado no período do material com maior tempo de atuação, sendo este o Quard 450 com 379,65 h (média) de trabalho. O total de unidades gastas abrange desde a primeira montagem até a última parada sucedida, considerando como paradas somente números inteiros (falhas realmente registradas), sendo somado para a criação da equação geral indicada na Tabela 6.

Tabela 6: Avaliação do custo total. **Fonte:** Autor

Material da ferramenta	Custo de mercado	Quant. de paradas	Custo c/ paradas	Total de unid.	CUSTO TOTAL
Aço ASTM A36	x	5,15	$5y$	06	$x * 6 + 5y$
Aço SAE 1045	$1,02x$	7,24	$7y$	08	$1,02x * 8 + 7y$
Aço QUARD 450	$2,89x$	1	y	02	$2,89x * 2 + y$

Nota-se que o custo final realmente é dependente do valor de venda comercial da ferramenta, representado por x , que varia com o mercado, e pelo custo da hora produtiva afetada pelas manutenções corretivas, representado por y , a qual varia de tipo de safra e estação. Sem estes dois valores não há possibilidade de avaliação, desta forma foram recolhidos dados de mercado, inseridos nas equações e avaliado os resultados. Acolhendo como um investimento de 100% para o material mais caro segue o Gráfico 4, o qual representa quanto cada material necessita do valor de um mesmo investimento.

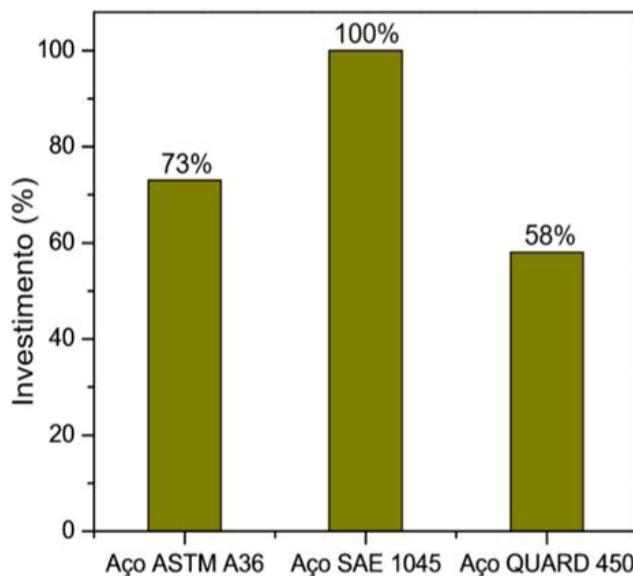


Gráfico 4: Investimento (%) para cada material. **Fonte:** Autor

Por meio do gráfico é possível verificar que para um mesmo valor inicial aplicado a cada um dos materiais o aço A36 conservaria 27% do investimento em reserva, diante de 42% do Quard 450. Esta análise demonstra que no cenário atual, justificando o primeiro tópico do Custo Total dos Gastos, a ferramenta mais cara é o aço SAE 1045, sendo o mais viável o Quard 450.

Destacando que o material A36 obteve resultado somente de uma amostra, deve-se considerar que mesmo que a segunda amostra tivesse passado pelo teste de desempenho em campo e seu resultado fosse 1,5 vezes mais que o da primeira, como ocorreu com os outros dois materiais o 1045 e Quard, ainda sim o Quard apresentaria o melhor custo benefício. Já analisando um cenário que o A36 obtivesse na amostra 2 um desempenho 2 vezes maior que o da amostra 1, o que seria irreal pois sua tenacidade é menor que a do Quard o que justifica seu menor desempenho, somente assim seu custo benefício seria melhor diante dos três, conservando 52% do investimento maior, enquanto o Quard somente 42%.

Para o tópico 2) Geração de Resíduos, o material mais favorável quanto a menor quantidade de descarte é o Quard 450, compreendendo que o SAE 1045 apresentou rejeite quatro vezes maior que seu concorrente. Desta maneira, o aço SAE 1045 não supri as duas primeiras exigências solicitadas, sendo descartado de uso.

Concluindo a comparação, tópico 3) Gestão do Processo, para uma melhor administração devem-se garantir os custos da manutenção, o controle de pessoas, gestão de estoque e avaliação de indicadores preventivos/corretivos. Necessita-se verificar o mais viável entre A36 e Quard, considerando que o segundo já apresentou: 1º menor quantidade de falhas em um mesmo período e 2º menor custo inicial.

O A36, caso tivesse uma segunda amostra com o desempenho 2 vezes maior, como abordado anteriormente, iria trazer um processo de menor custo, mas com exigência de uma equipe de manutenção presente durante um maior tempo para a correção das anomalias, diminuindo o controle de pessoas para relocação em outras atividades, aumentando o estoque devido à demanda constante e criando foco

nos indicadores corretivos. Entretanto, considerando um caso real em que a amostra 2 apresenta um desempenho 1,5 vezes maior que a primeira, o material A36 além de apresentar maior estoque reserva para manutenção que o Quard, demandará mais equipe para as correções, irá gerar mais resíduos e terá um custo maior. Desta forma, por meio da terceira análise, o melhor material para tal ferramenta é o Quard 450, com baixo custo, menor estoque, menos resíduos e maior confiabilidade solicitando uma equipe menos presente^{31,32}.

Conclusão

Fundamentando que o foco do trabalho está em avaliar o desempenho dos materiais para tal ferramenta, o que melhor reagiu ao trabalho e como esperado, foi o Quard 450, por ser de alta resistência, apresentou o melhor desempenho diante dos demais, garantindo mais de 6 vezes as horas trabalhadas do SAE 1045, sobressaindo tanto em dureza como tenacidade.

Por meio da análise microscópica foi possível analisar como a estrutura interna altera significativamente as propriedades mecânicas, e como tal revela os tipos de processos no qual o material passou. Com a análise do ASTM A36, foi possível observar a baixa presença de perlita, justificando a alta tenacidade e baixa dureza do núcleo. Esta observação é crucial, pois mostra a diferença do A36 para o SAE 1045, justificando como o primeiro resistiu mais tempo que o segundo, pois mesmo o segundo apresentando maior dureza, seu núcleo expôs desvantagem devido a dureza ser inversamente proporcional a ductilidade, levando à ruptura.

Os ensaios de dureza, tenacidade e estudo da ductilidade vieram a completar a análise comparativa do desempenho de cada ferramenta em campo e comprovar como a microscopia está interligada diretamente às propriedades de cada. Como esperado, o material mais resistente foi o Quard 450, em segundo plano o A36, que combinou um núcleo macio e uma superfície dura, sendo possível notar a camada de encruamento próxima a sua superfície, o SAE 1045 destacou pela alta dureza e fragilidade. Esta

análise comprova que para esta ferramenta o material deve ser composto pela combinação de alta dureza e alta ductilidade, resistindo à abrasão devido o contato com o solo e ao impacto devido a composição.

Por fim, analisando os materiais pela viabilidade, considerando os gastos quanto a manutenção e aos insumos, os três variaram dependendoda demanda do mercado financeiro. Entretanto que sobressaiu em economia, menor descarte e gestão do processo foi o Quard 450, o de melhor desempenho e mais viável para uso. O SAE 1045 não apresentou vantagem em nenhuma das categorias e o A36 somente poderia ser viável em casos esporádico, no qual sua segunda amostra apresentasse o desempenho 2 vezes maior que a primeira, o que não ocorreu com os outros dois materiais.

Referências

1. Santo, A. C. E. Desgaste de Ponteiros de Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto e sua Influência no Esforço de Tração.168 p. Porto Alegre: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **2005**.
2. Doberstein, A. W. O Egito Antigo. Porto Alegre: EDIPUCRS. PUC-RS, p. 27–28, **2010**.
3. Brasil deve colher 688,6 milhões de toneladas de cana em **2019**, diz IBGE.O Estado de S. Paulo, disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/brasil-deve-colher-688-6-milhoes-toneladas-cana-2019-ibge-20190509>>. Acesso em: 19 maio. **2019**.
4. M.P.; L.A. J.; G.F. O mundo, inundado de açúcar. El País, disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2015/03/24/economia/1427187838_040365.html>. Acesso em: 9 maio. **2019**.
5. Lima, A. C.; Ferraresi, V. A. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. Soldagem e Inspeção, v. 14, n. 2, p. 140–150, **2009**.
6. Chattha, M. U.; Ali, A.; Bilal, M. Influence of Planting Techniques on Growth and Yield of Spring Planted Sugarcane (*Saccharum Officinarum* L.). Pak. J. Agri. Sci., v. 44, n. 3, p. 3–7, **2007**.
7. Filho, N. C. N. *et al.* Propriedades Mecânicas e Características de Desgaste de Ponteiros de Hastes Sulcadoras em Semeadora Adubadora. XLII CONBEA - Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - 04 a 08 de agosto de **2013** - Fortaleza, CE, Brasil, p. 4, **2013**.
8. Rodrigues, L. M. *et al.* Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. CadernosUniFOA, v. 17, p. 89–94, **2007**.
9. Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed.ampl ed. São Paulo: **2015**.
10. Pereira, V. P.; Câmara, M. A. Estudo da Taxa de Desgaste e do Coeficiente de Atrito dos Aços Hardox 450 e Quard 400 Deslizando Contra Aço Rápido por Meio de Ensaio de Pino Sobre Disco.VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - 05 a 07 de dezembro de 2018 - Ponta Grossa, PR, Brasil, **2018**.
11. Allgayer, A. A. Caracterização das Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas de uma Junta de Aço ASTM A36 Soldado pelo Processo de Arco Submerso (SAW) com Diferentes Aportes Térmicos. 72 p. Lajeado: UNIVATES, **2017**.
12. Imianowsky, G. W.; Walendowsky, M. A. Os Principais Aços Carbono Utilizados na Construção Civil.21 p. Brusque: UNIFEBE, **2015**.
13. Colpaert, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.4a Edição ed. São Paulo: Edgard Blucher, **2008**.
14. Levy, A. V. The solid particle erosion behavior of steel as a function of microstructure. Wear, v. 68, n. 3, p. 269–287, **1981**.
15. GSV. Projeto Haste semi-parab. 01008, **2019**.
16. NLMK CLABECQ. CERTIFICAT DE RECEPTION 3 . 1 N° 198743 selon EN 10204 (2004) / QUARD 450, **2018**.
17. USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. Certificado de Inspeção N° 57056 do SAE-J403-09-1045, **2012**.
18. USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. Certificado de Inspeção N° 4217644 do ASTM-A36-14, **2018**.
19. Santos, H. G. dos *et al.* Sistema brasileiro de classificação de solos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2013. 3a Edição, Brasília: **2013**.
20. ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, **1995**.
21. Smith, W. F.; Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais. 5a edição. Porto Alegre: AMGH, **2012**.
22. ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-1:2019: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, **2019**.
23. AMERICAN, A.; STANDARD, N. Norma E23-07a: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken Pennsylvania, **2015**.
24. GITMAN, L. J. Princípios de Administração Financeira. 8ª Edição ed. São Paulo: **2002**.
25. Pandolfo, D. Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 submetido a Tratamentos Térmicos.98 p. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, **2009**.

26. Callister Jr., W. D.; Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. São Paulo: **2014**.
27. García, J. D. A.; Martínez, D. L. C. *Análisis de la Evolución Microestructural de un Acero AISI/SAE 1045 al ser Sometido a un Tratamiento Isotérmico*. 18 p. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **2016**.
28. NLMK. *Relatório - Aço de alta resistência ao desgaste QUARD 450, Vol. 02*. **2018**.
29. Hernaut, P. *et al.* *Development of High-Performance Steel Plates at NLMK Clabecq. The 2nd International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels*, June, **2018**.
30. Bohórquez, C. A. *Influencia del Tratamiento Térmico desde Temperaturas Intercríticas en las Propiedades Mecánicas del Acero SAE 1045*. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, v. XXXI, p. 13–16, **2012**.
31. Teles, J. *Apostila Gestão de Estoque para Manutenção*. ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos.
32. Teles, J. *Apostila 10 Maneiras de alcançar a Confiabilidade com custo baixo*. ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos.

Gabriella A. Martins^{* 1}, Mikael H. Morais¹, Sérgio M. Brandão¹ & Aline A. Monteiro²

¹Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

²Ciências Exatas & Tecnológicas, UEG. BR 153, Km 98, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: gabriella.a.martins@hotmail.com