

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno Cougo Batista

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA  
REDUÇÃO DO EFEITO DA ABRASIVIDADE EM SISTEMAS  
MECÂNICOS AGRÍCOLAS**

Cachoeira do Sul, RS  
2018

**Bruno Cougo Batista**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA REDUÇÃO DO  
EFEITO DA ABRASIVIDADE EM SISTEMAS MECÂNICOS AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. César Gabriel dos Santos

Cachoeira do Sul, RS  
2018

**Bruno Cougo Batista**

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA REDUÇÃO DO  
EFEITO DA ABRASIVIDADE EM SISTEMAS MECÂNICOS AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

**Aprovado em 12 de dezembro de 2018**

---

**Prof. Dr. César Gabriel dos Santos (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Prof<sup>a</sup>. Me. Carmem Brum Rosa (UFSM)**

---

**Eng.<sup>o</sup> Fabrício Gaspary Pereira da Silva**

Cachoeira do Sul, RS  
2018

## **DEDICATÓRIA**

*A Deus, por sempre iluminar meus passos e me guiar nas escolhas que me foram impostas ao longo de minha trajetória.*

*Aos meus pais David de Leon Batista e Claudia Luciane Cougo Batista, meu irmão Felipe Cougo Batista e minha namorada Mariana Alves Menna Barreto que, com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu pudesse realizar o sonho de me tornar um Engenheiro Mecânico.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Ao meu professor orientador César Gabriel dos Santos pelo empenho, orientação e esclarecimento de dúvidas sempre quando solicitado mesmo em seus momentos de descanso.*

*Aos meus familiares e namorada, pelo pronto entendimento quando a minha ausência devido à finalização do trabalho e da graduação.*

*A empresa Screw Indústria Metalmeccânica por sempre acreditar e apoiar o desenvolvimento do presente estudo, nas figuras dos engenheiros Fabrício Gaspary e Daniel Trojahn.*

*A todos os meus colegas e amigos envolvidos pelo apoio prestado.*

*"O segredo do sucesso é a constância  
do propósito."*

*(Benjamin Disraeli)*

## RESUMO

### IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS PARA REDUÇÃO DO EFEITO DA ABRASIVIDADE EM SISTEMAS MECÂNICOS AGRÍCOLAS

AUTOR: Bruno Cougo Batista

ORIENTADOR: Prof. Dr. César Gabriel dos Santos

A atividade agrícola no Brasil é responsável por 23% do Produto Interno Bruto, e está inserida no setor primário da economia, o qual se caracteriza pela exploração de recursos naturais, sendo o setor responsável por fornecer a matéria-prima para os diversos ramos da indústria. Neste contexto, as Máquinas Agrícolas responsáveis por colher a maior parte da produção de cereais (soja, milho, feijão, trigo e arroz) são denominadas de colhedoras que no ano de 2017 alcançaram a marca de 4537 unidades comercializadas no mercado nacional. As colhedoras possuem um alto valor agregado, utilizam os mais avançados materiais e tecnologias de produção disponíveis para o setor. O Rio Grande do Sul é o maior estado produtor de arroz, com 67% de produção nacional, sendo que sua colheita é realizada na maior parte pelas colhedoras. O arroz tem por característica ser um material com elevado nível de abrasividade quando comparada com outras culturas, como soja e milho. Neste contexto, o problema de engenharia identificado consiste no desgaste acelerado dos componentes da colhedora que estão em contato com o grão da cultura do arroz, mais especificamente nos componentes de transporte do grão. O presente trabalho teve como objetivo principal, identificar e caracterizar materiais utilizados como alternativa para redução do desgaste abrasivo presente em máquinas agrícolas. Através de dados obtidos por certificados de qualidade e pesquisas junto a fornecedores, foram identificados os materiais utilizados atualmente (SAE 1010) bem como os materiais usados como alternativas de solução para o desgaste abrasivo (Inox 304, Hardox 400 e Aço ligado ao Boro 27MnCrB5). Os resultados obtidos foram apresentados em forma de comparação objetiva através de tabelas e breves discussões. Comparando custos, processos e o índice de resistência ao desgaste abrasivo, concluiu-se que o material mais adequado, dentre os selecionados para o problema descrito, é o Aço ligado ao Boro 27MnCrB5.

**Palavras-chave:** Colhedoras. Desgaste. Arroz. Alternativas. Abrasão. Materiais.

## **ABSTRACT**

### **IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF MATERIALS TO REDUCE THE EFFECT OF ABRASIVITY IN AGRICULTURAL MECHANICAL SYSTEMS**

**AUTHOR:** Bruno Cougo Batista

**ADVISOR:** Prof. Dr. César Gabriel dos Santos

Agricultural activity in Brazil is responsible for 23% of the Gross Domestic Product, and is inserted in the primary sector of the economy, which is characterized by the exploitation of natural resources, and the sector is responsible for supplying the raw material for the various branches of industry. In this context, the Agricultural Machines responsible for harvesting most of the grain production (soybean, corn, beans, wheat and rice) are called harvesters who in 2017 reached the mark of 4537 units sold in the national market. Harvesters have high added value, use the most advanced materials and production technologies available to the industry. Rio Grande do Sul is the largest rice producing state, with 67% of national production, most of which is harvested by the harvesters. Rice is characterized by being a material with a high level of abrasiveness when compared to other crops, such as soy and corn. In this context, the identified engineering problem consists of the accelerated wear of the components of the harvester which are in contact with the grain of the rice crop, more specifically in the grain transport components. The main objective of this work was to identify and characterize materials used as an alternative to reduce abrasive wear present in agricultural machines. Through data obtained by quality certificates and researches with suppliers, the materials currently used (SAE 1010) as well as the materials used as solution alternatives for abrasive wear were identified (Inox 304, Hardox 400 and Steel bound to Boro 27MnCrB5). The results were presented in the form of objective comparison through tables and brief discussions. Comparing costs, processes and the index of resistance to abrasive wear, it was concluded that the most suitable material, among those selected for the described problem, is the 27MnCrB5 boron-bound steel.

**Keywords:** Harvesters. Wear. Rice. Alternatives. Abrasion. Materials.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de participação das culturas no PIB, em porcentagem. ....	12
Figura 2 - Evolução do rendimento médio das culturas agrícola no Brasil. ....	13
Figura 3 - Colhedora SLC modelo 65-A. ....	14
Figura 4 - Mecanismo de transporte desgastado devido à abrasão. ....	15
Figura 5 - Mecanismo de transporte helicoidal após aproximadamente 300 horas de uso. ....	16
Figura 6 - Colhedora New Holland TC5090. ....	19
Figura 7 - Fluxo da cultura em uma colhedora tangencial. ....	21
Figura 8 - Mecanismos de uma colhedora do tipo axial. ....	21
Figura 9 - Representação de mecanismos de uma colhedora híbrida. ....	22
Figura 10 - Principais operações de uma colhedora. ....	23
Figura 11 - Principais tipos de desgastes. ....	26
Figura 12 - Desgastes em porcentagem. ....	26
Figura 13 - Abrasômetro do tipo roda de borracha. ....	27
Figura 14 - Exemplo de processo de desenvolvimento de produtos. ....	30
Figura 15 - Modelo de carta de Asbhy para seleção de materiais. ....	32
Figura 16 - Fluxograma de representação da metodologia de pesquisa. ....	34
Figura 17 - Corpos de prova para testes – SAE1010 e Inox AISI 304. ....	36
Figura 18 - Corpos de prova para testes – 27MnCrB5 e Hardox 400. ....	36
Figura 19 - Durômetro Rockwell Pantec. ....	38
Figura 20 - Abrasômetro roda de borracha. ....	46
Figura 21 - Antes e depois do aço ao Boro temperado. ....	47
Figura 22 - Antes e depois do aço Hardox 400. ....	47
Figura 23 - Antes e depois do aço SAE 1010. ....	48
Figura 24 - Antes e depois do aço ao Boro sem tratamento térmico. ....	48
Figura 25 - Antes e depois do aço Inox 304. ....	48
Figura 26 - Distribuição de dureza ao longo da espessura do corpo de prova. ....	51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos desgastes. ....	24
Quadro 2 - Escalas Rockwell. ....	38
Quadro 3 - Composição química das ligas metálicas. ....	40
Quadro 4 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1010.....	41
Quadro 5 - Propriedades mecânicas do aço Inox AISI 304. ....	42
Quadro 6 - Propriedades mecânicas do aço Hardox 400. ....	42
Quadro 7 - Propriedades mecânicas do aço ligado ao Boro.....	43
Quadro 8 - Resultados de dureza. ....	44
Quadro 9 - Desvio padrão da dureza.....	44
Quadro 10 - Resultados do ensaio de desgaste por abrasão. ....	46
Quadro 11 - Comparação econômica entre materiais. ....	49
Quadro 12 - Ranking comparativo.....	53

## SUMÁRIO

	<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>3</b>
	<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>4</b>
	<b>RESUMO .....</b>	<b>6</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....	11
1.2	PROBLEMA DE ENGENHARIA .....	15
1.3	QUESTÃO DE PESQUISA.....	16
1.4	OBJETIVO GERAL .....	16
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.6	JUSTIFICATIVA .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	MÁQUINAS COLHEDORAS DE GRÃOS.....	19
2.1.1	Classificação das colhedoras.....	20
2.1.2	Mecanismos de uma colhedora.....	22
2.2	DESGASTE.....	24
2.2.1	Classificação dos desgastes .....	24
2.2.2	Tipos de desgaste.....	25
2.2.3	Dispositivos para medição de desgaste.....	27
2.3	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO .....	29
2.4	SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ENGENHARIA.....	30
2.4.1	Método das cartas de Asbhy .....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
4.1	IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS .....	39
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	39
4.2.1	Caracterização quanto à composição química.....	39
4.2.2	Caracterização quanto às propriedades mecânicas.....	40
4.2.3	Caracterização quanto à dureza superficial .....	43
4.2.4	Caracterização quanto ao desgaste por abrasão.....	45
4.2.5	Comparação quanto à análise econômica .....	49
4.2.6	Comparação quanto ao processamento dos materiais.....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE.....</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXO B – PROPRIEDADES MECÂNICAS .....</b>	<b>60</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O Brasil é um país com excelentes características naturais para o agronegócio devido à sua biodiversidade, clima favorável, solos férteis, abundância de água, alta luminosidade, dentre outros fatores. É o país mais extenso da América do Sul com 8,5 milhões de quilômetros, e o quinto país no mundo com potencial de expansão de sua atividade agrícola sem a necessidade de intervir no meio ambiente (CONAB, 2016).

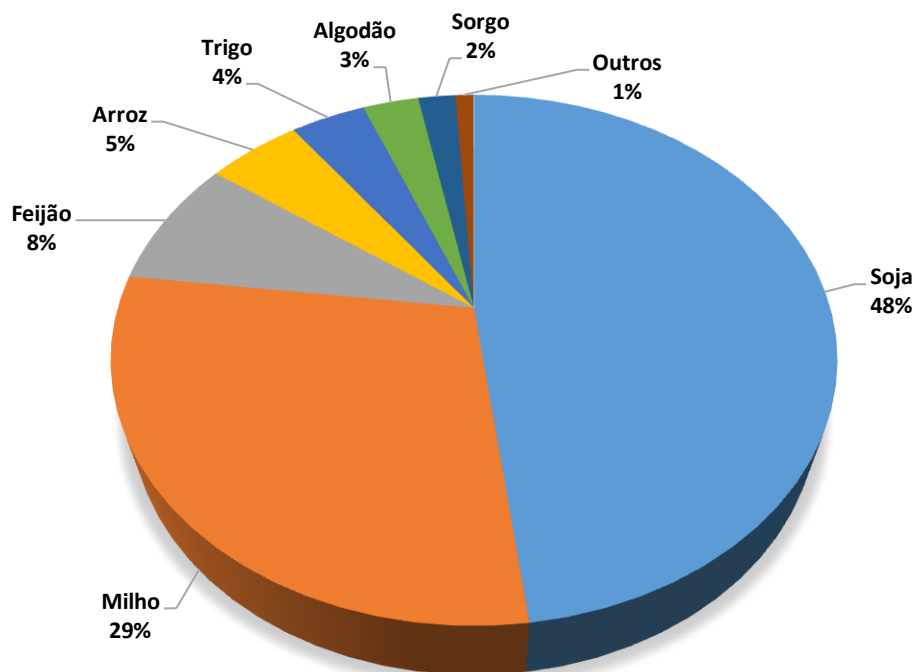
O ramo do agronegócio tem uma expressiva participação na economia do país, com aproximadamente 50% das exportações e 23% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro. Atualmente o Brasil ocupa a 4ª posição no ranking mundial de produção de alimentos. A atividade agrícola está inserida no setor primário da economia, a qual se caracteriza pela exploração de recursos naturais, sendo o setor responsável por fornecer a matéria-prima para os diversos ramos da indústria (EMBRAPA, 2017).

Dados estatísticos do PIB do terceiro trimestre do ano de 2017 indicam que o crescimento acumulado no ano de 2017 no setor agropecuário foi de 14,5%, somando um valor aproximado de R\$ 70,29 bilhões de reais. O PIB do agronegócio compreende, além das atividades primárias de plantio e extração, as atividades de transformação e distribuição da matéria prima, o que ocasiona uma participação do setor de aproximadamente 23% do PIB brasileiro (CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária, 2017).

Nos últimos 40 anos, o Brasil saiu da condição de importador de alimentos para se tornar um grande provedor para o mundo. Foram conquistados aumentos significativos na produção e na produtividade agropecuária e atualmente se produz mais em cada hectare de terra, aspecto importante para a preservação dos recursos naturais (EMBRAPA, 2018).

Segundo o IBGE (2017), as principais culturas agrícolas do Brasil são demonstradas junto a Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Gráfico de participação das culturas no PIB, em porcentagem.



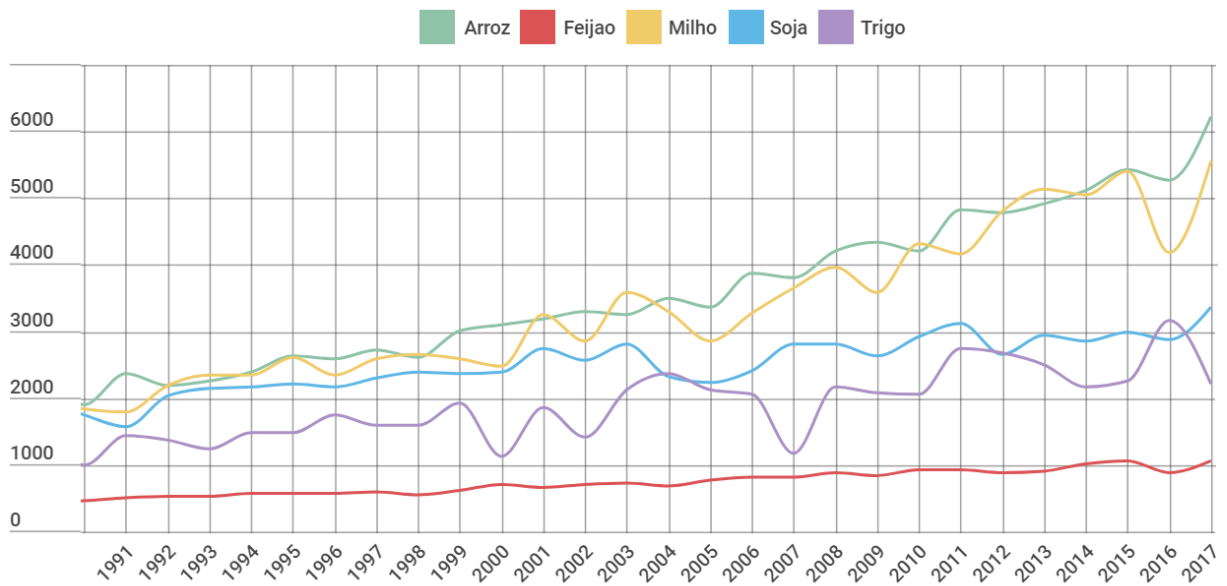
Fonte: Adaptado de IBGE (2017).

A agricultura brasileira em meados do século passado era rudimentar, prevalecendo o trabalho braçal na produção agropecuária onde menos de 2% das propriedades rurais contavam com máquinas agrícolas para o plantio e escoamento da produção. Como resultado obtiam baixos rendimentos por hectare e pouca produção, sendo que o crescimento da agricultura tornava-se restrito a extensas áreas naturais convertidas em lavouras e pastagens. O crescimento da produção em comparação à área pode ser visto por meio da evolução do rendimento médio (quilos produzidos por hectare) das lavouras de arroz, feijão, milho, soja e trigo, no período de 1975 a 2017 (EMBRAPA, 2018).

A mecanização da produção e a modernização das atividades agrícolas, a partir do século XX vêm sendo amplamente difundidas através da tecnologia empregada no maquinário utilizado para a colheita dos cereais para facilitar o escoamento da produção e aumentar a produtividade rural existente em solo brasileiro. (DEERE&COMPANY, 1991).

A evolução do rendimento médio brasileiro é apresentada junto a Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Evolução do rendimento médio das culturas agrícola no Brasil.



Fonte: Adaptado de Conab (2018).

As máquinas responsáveis por executar a função de colher as culturas agrícolas são denominadas de colhedoras (SANTOS, 2014). Segundo Rural News (2018), as colhedoras são equipamentos agrícolas destinados à colheita de lavouras, tais como de cana-de-açúcar, algodão ou de grãos (trigo, arroz, soja, milho, dentre outros diversos). As primeiras máquinas destinadas a este tipo de serviço eram chamadas ceifeiras mecânicas, e foram desenvolvidas inicialmente para a colheita de milho e trigo devido à dificuldade da colheita manual e grande demanda produtiva.

A primeira máquina motorizada do gênero foi inventada por Obed Hussey (1792 – 1860), um inventor e fabricante de equipamentos mecânicos de uso agrícola estadunidense nascido no Maine. Hussey ficou famoso ao inventar o ceifeiro, a primeira máquina colheitadeira primária de sucesso, e que funcionava à tração animal, e que atingiu grande êxito comercial depois de ser patenteada em 1833, nos estados de Illinois, Maryland, Nova Iorque e Pensilvânia (OHIO HISTORY CENTRAL, 2018).

No Brasil, a primeira colhedora automotriz foi produzida há aproximadamente 40 anos atrás, contando com o lançamento da colheitadeira SLC modelo 65-A (Figura 3), fabricada em Horizontina – Rio Grande do Sul, no dia 5 de novembro de 1965 (DEERE&COMPANY, 1991).

Figura 3 - Colhedora SLC modelo 65-A.



Fonte: Lexicar Brasil (2014).

As colhedoras possuem um alto valor agregado, pois utilizam os mais avançados materiais e tecnologias de produção disponíveis para o setor (DEERE&COMPANY, 1991). A venda de máquinas colhedoras o ano de 2017 alcançou a marca de 4537 unidades comercializadas somente no Brasil (ANFAVEA, 2017).

O Rio Grande do Sul é o maior estado produtor de arroz, correspondendo a 67% da produção nacional (IBGE, 2017). O arroz tem por característica ser envolto por uma casca que contém um elevado nível de abrasividade, isto ocorre porque a casca do arroz em seu formato *in natura* possui aproximadamente 22% de sílica<sup>1</sup> (SiO<sub>2</sub>) em sua composição, material que acarreta um desgaste prematuro dos componentes internos da colhedora que estão em contato direto com a cultura (SANTOS; BATISTA; KIECKOW, 2014).

Para Stachowiak (2001), o desgaste em máquinas agrícolas causado por partículas abrasivas é um grande problema industrial, e um completo entendimento dos efeitos e das variáveis do sistema se faz necessário para o entendimento das medidas necessárias no projeto de máquinas.

Segundo Gregolin (1990), o desgaste por abrasão influi nos custos diretos de produção devido às necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas e também influi nos custos indiretos de produção pela necessidade de superdimensionamento de componentes e pelas limitações na produção devido a equipamentos deteriorados.

---

<sup>1</sup> Denominação dada a um grupo de minerais que constituem o grupo das sílicas: quartzo, tridimita, cristobalita e opala. São sólidos cristalinos constituídos de moléculas gigantes com célula unitária em formato de tetraedro que contém no centro um átomo de silício.

Diante de tal contexto, a identificação e caracterização de materiais passíveis a aplicação para redução do desgaste excessivo de alguns componentes metálicos de máquinas agrícolas que estão em contato direto com a cultura do arroz nos possibilita minimizar os problemas pertinentes a custos por desgaste por abrasão.

## 1.2 PROBLEMA DE ENGENHARIA

A partir do cenário apresentado anteriormente, o problema de engenharia identificado consiste no desgaste acelerado e prematuro de alguns componentes metálicos internos dispostos em uma máquina colhedora de grãos (com foco nos componentes responsáveis pelo transporte e armazenamento do grão no interior do maquinário) que estão em contato direto com o grão da cultura do arroz.

As figuras 4 e 5 a seguir, demonstram as condições finais dos mecanismos responsáveis pelo transporte de máquinas colhedoras na colheita da cultura de arroz por aproximadamente 300 horas de trabalho.

Figura 4 - Mecanismo de transporte desgastado devido à abrasão.



Fonte: Autor.



Figura 5 - Mecanismo de transporte helicoidal após aproximadamente 300 horas de uso.



Fonte: Autor.

### 1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

Diante da contextualização do tema apresentado e apresentação do problema de engenharia, a questão de pesquisa que orienta o presente estudo é: Como reduzir o efeito da abrasividade da cultura do arroz em máquinas agrícolas durante o processo de colheita mecanizada?

### 1.4 OBJETIVO GERAL

A elaboração do presente trabalho tem como objetivo geral a identificação e caracterização de materiais passíveis a aplicação para redução do desgaste excessivo de alguns componentes metálicos de máquinas agrícolas que estão em contato direto com a cultura do arroz.

## 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem realizados neste trabalho são:

- Realizar o estudo bibliográfico sobre o assunto abordado;
- Identificar e caracterizar os materiais utilizados atualmente em máquinas agrícolas colhedoras híbridas, nos mecanismos de transporte e movimentação de grãos;
- Identificar e caracterizar materiais passíveis de substituição dos materiais utilizados atualmente em máquinas colhedoras;
- Quantificar o desgaste abrasivo, a dureza, a composição química e propriedades mecânicas das amostras dos materiais identificados;
- Elaborar um ranking comparativo com as soluções encontradas.

## 1.6 JUSTIFICATIVA

Uma constante preocupação na indústria de equipamentos agrícolas é o desgaste prematuro de equipamentos devido ao grande atrito provocado pelas culturas que são colhidas, pois tais desgastes acabam provocando paradas inesperadas e consequente perda de produtividade na etapa de colheita das culturas.

Dentre os diversos tipos de desgastes que podem ocorrer, o desgaste abrasivo é o principal responsável por quebras de componentes das máquinas colhedoras, bem como é um grande responsável por paradas para manutenções ou reposições das peças desgastadas, pois o referido desgaste causa perda progressiva de material das partes móveis em contato principalmente com os grãos das culturas que estão sendo colhidas (devido à alta abrasividade dos grãos, principalmente em componentes de transporte dos grãos).

Um dos principais fatores de depreciação de capital e uma importante fonte de despesas para proprietários e concessionárias é, sem dúvidas, a manutenção. Para redução de tal fato, é de extrema importância o estudo dos processos de desgaste que atuam em condições adversas, para que as soluções mais precisas sejam mensuradas e aplicadas à prática para resolução dos problemas existentes em determinados eventos.

Tendo como base o referido problema recorrente no setor de máquinas agrícolas (com foco nas colhedoras), este trabalho contribui para uma análise do desgaste abrasivo provocado pelos grãos em contato com os componentes metálicos de máquinas colhedoras de grãos, bem como a análise e caracterização de possíveis materiais substitutos dos atualmente utilizados na

fabricação dos componentes de transporte das máquinas colhedoras de grãos e uma análise econômica quanto às possibilidades encontradas.

Estudos realizados por empresas do setor de máquinas agrícolas colhedoras mostram que alguns componentes de colhedoras de arroz não suportam o término de uma safra, tornando-se um problema para agricultores e fabricantes. Esse problema atinge diretamente dois sistemas mecânicos nas colheitadeiras, o sistema de trilha e o elevador de grãos. No sistema de trilha, além do arroz em casca, há também um contato direto com a palha, e no elevador apenas com o grão (SANTOS; BATISTA; KIECKOW, 2014).

Além das referidas contribuições, o estudo contribuirá para aumentar a bibliografia disponível referente ao tema, colaborando para o estudo de novas soluções perante o problema mencionado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MÁQUINAS COLHEDORAS DE GRÃOS

A etapa final do processo de plantio de alimentos é a colheita dos grãos da cultura, nesta fase todos os investimentos e esforços para que um bom rendimento seja alcançado foram executados, faltando apenas à retirada do produto do solo. A mecanização desse processo se tornou relevante, pois com o aumento das populações e o crescimento da necessidade de produção enxuta dos alimentos, fez com que as operações sobre a colheita fossem mecanizadas. (MACHADO, 2003).

Segundo Balastreire (1987), o início do processo de colheita de grãos era realizado manualmente. As etapas de colheita começaram a ser mecanizadas através da primeira máquina colhedora construída em Michigan, EUA, em 1836, por Moore e Hascaii, a qual foi utilizada com sucesso no estado da Califórnia somente em 1854. Neste mesmo estado, a produção de colhedoras atingiu a escala comercial no ano de 1880.

Atualmente as colhedoras (Figura 6) são responsáveis pela colheita de aproximadamente 85% da produção mundial de grãos, sendo máquinas dotadas de alta tecnologia, guiadas ou não por sistema GPS (Global Position System) e com computadores de bordo capazes de determinar a qualidade do grão colhido, além de demarcar as áreas onde a cultura é mais bem desenvolvida (ANFAVEA, 2017).

Figura 6 - Colhedora New Holland TC5090.



Fonte: Adaptado de New Holland (2017).

Produtores rurais com lavouras de diferentes portes encontram em máquinas colhedoras importantes aliadas para garantir mecanização, reduzir perdas e agregar eficiência

às suas atividades de colheita. Nos últimos anos esses equipamentos passaram por importantes transformações, incorporando tecnologias embarcadas e digitais, incluindo aplicações *off-board*<sup>2</sup>, responsáveis por processar os dados que são gerados pelas máquinas (AEC WEB, 2015).

### 2.1.1 Classificação das colhedoras

Segundo Santo Filho (2001), as máquinas colhedoras classificam-se em três tipos básicos segundo a forma pela qual recebem potência de acionamento: colhedoras automotrizes (combinadas), montadas e de arrasto. As colhedoras automotrizes são máquinas autopropulsadas que realizam todas suas operações necessárias à colheita de forma autônoma. As colhedoras montadas são as acopladas a um trator agrícola para que a realização de suas funções seja concluída. Por fim, as colhedoras de arrasto possuem um motor auxiliar independente dos tratores, ou são acionadas por tomadas de força disponíveis em tratores e tracionadas por uma barra de tração também disponível junto ao trator agrícola.

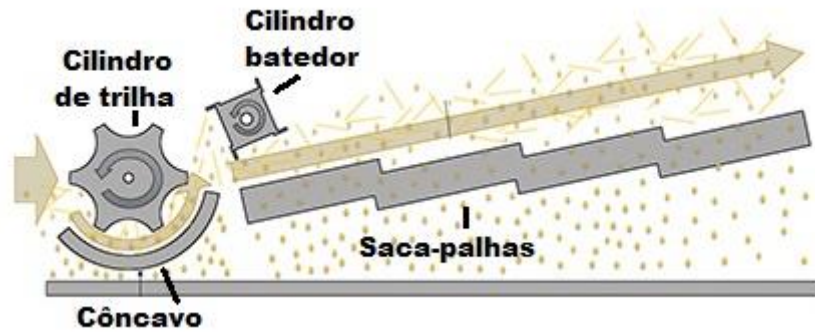
Segundo Dallmeyer (2014), o mercado nacional comercializa três diferentes sistemas responsáveis pela trilha e separação do grão da palhada: tangencial ou convencional, axial e híbrido.

Nas colhedoras tangenciais ou convencionais (Figura 7) a cultura é conduzida até o sistema de alimentação por um caracol ou por uma esteira. A esteira alimentadora transporta a cultura até o cilindro de trilha que pode ser constituído por barras ou hastes, as quais são montadas transversalmente ao corpo da colhedora. Nessa etapa, o grão e a palhada sofrem o processo de trilha tangente ao cilindro e ao côncavo. O cilindro batedor tem a função de diminuir a aceleração da cultura e distribuir de forma homogênea o grão e a palhada no saca-palhas. O saca-palhas continua a separação do grão da palha através da ação da gravidade e com o movimento rotativo alternado. Nesse sistema, o grão tende a sofrer maiores impactos, sendo que o grão e a palhada são lançados repetitivamente para cima e com a ação da gravidade colidem com o saca-palha, podendo danificar os grãos (SANTOS, 2014).

---

<sup>2</sup> Termo em inglês que remete a veículos que transitam “fora de estrada”, em qualquer terreno.

Figura 7 - Fluxo da cultura em uma colhedora tangencial.



Fonte: Adaptado de SANTOS (2014).

Segundo Hoher (2011), o sistema axial (Figura 8) é muito semelhante ao sistema convencional, diferenciando apenas o sistema de trilha e separação dos grãos. No sistema de colheita axial, os componentes que são responsáveis pela trilha e separação da cultura se encontram no sentido longitudinal da máquina, tendo como principal vantagem a distribuição do peso e a capacidade de trilhar o material mesmo em terrenos acidentados. O sistema de colheita axial possui com característica distinta o pequeno espaço utilizado na máquina se comparado o sistema de saca palhas. Como vantagem, a aceleração imposta, pela rotação ao material a ser separado pode ser até 15 vezes maior do que o sistema saca palhas, devido a ação da força centrífuga imposta pela velocidade angular do rotor. A desvantagem do sistema está em quando a palha é verde ou úmida, pois em situações de muito material, o coeficiente de atrito pode chegar a níveis altíssimos, gerando um déficit de potência, sendo assim necessária a redução no avanço da colhedora para que a mesma não sofra com o desgaste.

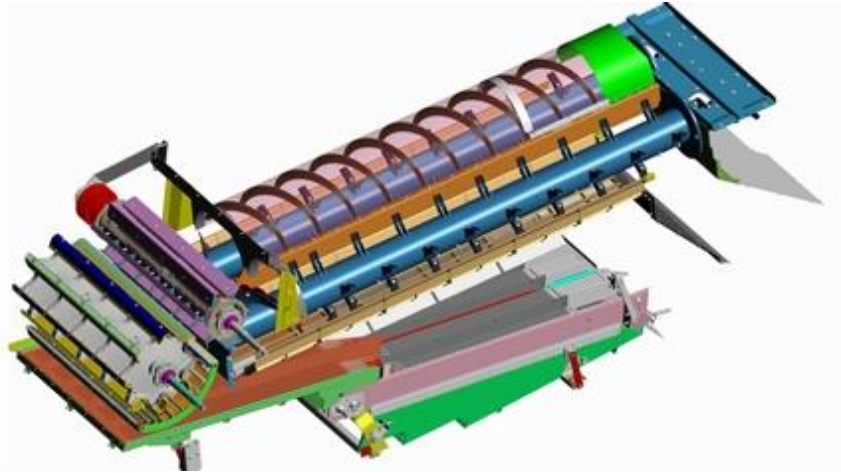
Figura 8 - Mecanismos de uma colhedora do tipo axial.



Fonte: Adaptado de DEERE&COMPANY (1991).

Segundo Santos (2014), as colhedoras com o sistema híbrido (Figura 9) foram apresentadas ao mercado brasileiro por fabricantes independentes, fornecedores de componentes para colhedoras. Por seu bom funcionamento na separação da cultura do arroz, popularizou-se como sistema adequado para essa cultura, aumentando sensivelmente o rendimento das colhedoras em tal cultura.

Figura 9 - Representação de mecanismos de uma colhedora híbrida.



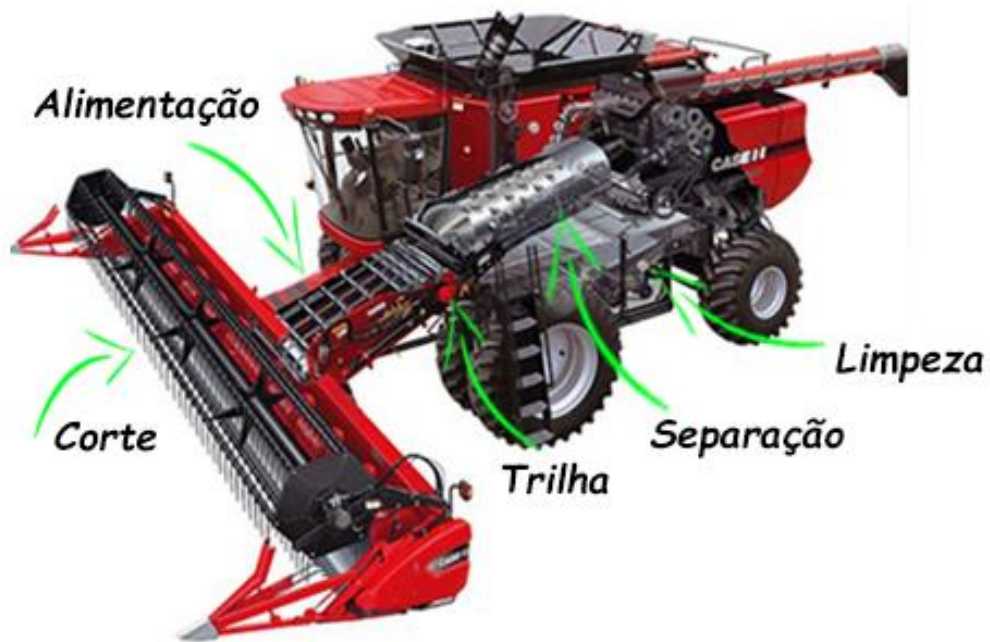
Fonte: Massey Ferguson (2015).

O sistema híbrido apresenta características do sistema tangencial e do sistema axial. O mecanismo de trilha corresponde ao sistema tangencial, onde a cultura passa tangenciando o cilindro de trilha e o côncavo, resultando no processo de trilha, e após o cilindro batedor auxilia na distribuição homogênea do grão e da palhada nos rotores. Devido ao processo de trilha ser executado pelo cilindro de trilha, o rotor é de projeto simplificado, sendo que ele apresenta a função de separação do grão da palhada pela ação da força centrífuga. O sistema híbrido possibilita a colheita de grandes volumes de palhada com alto teor de umidade, sendo utilizado principalmente na cultura do arroz (SANTOS, 2014).

### 2.1.2 Mecanismos de uma colhedora

Basicamente, a colheita dos grãos, feita através de máquinas colhedoras, envolve cinco etapas: corte, alimentação, trilha, separação e limpeza. Seus mecanismos podem ser regulados conforme a cultura a ser colhida (BALASTREIRE, 1987). A figura 10 abaixo apresenta esquematicamente a disponibilidade dos mecanismos junto a uma máquina colhedora quanto a suas operações básicas.

Figura 10 - Principais operações de uma colhedora.



Fonte: Adaptado de Case (2017).

Os mecanismos de corte se diferem de acordo com a cultura a ser colhida. Estão inseridos em uma plataforma de corte cujo seus elementos principais são os separadores, molinete, barra de corte e condutor helicoidal. O mecanismo de alimentação consiste em uma esteira transportadora formada de correntes longitudinais, com elementos transversais (talistas), as quais conduzem o material para o mecanismo de trilha. Para os mecanismos constituintes da trilha, classificamos em três: cilindro de dentes e côncavo (colhedoras de arroz), cilindro de barras (demais culturas) e côncavo e cilindro axial. Os mecanismos de separação agem na separação do grão debulhado, palha triturada e grãos não debulhados, podendo ser feita em três locais distintos: grelha formada pelas barras do côncavo, grelha do cilindro batedor e no saca-palhas. Por fim, os principais mecanismos de limpeza são a peneira superior, peneira inferior e o ventilador (SANTOS FILHO, 2001).

Segundo Bragachini & Bonetto (1990), a capacidade de trabalho de uma colhedora é dada pela largura do cilindro trilhador, que é o parâmetro que condiciona os demais mecanismos da máquina. Quanto mais largo o cilindro for, maiores serão seus mecanismos internos (saca-palhas, rotores, peneiras, sem-fins) permitindo também uma maior largura de corte. Do mesmo modo o autor define que quanto maior o cilindro e mais potente o motor do maquinário, maior será a quantidade de material (grãos, palha e plantas colhidas) que a colhedora pode processar por unidade de tempo, expressa em tonelada/hora (ton/h).



## 2.2 DESGASTE

O desgaste é um dano em uma superfície sólida normalmente com perda de material, envolvendo o movimento relativo entre uma superfície e alguma substância onde ocorre o contato (MORAES, 1996). O desgaste abrasivo pode ser definido também como a perda de massa resultante da interação entre as partículas ou asperezas duras que são forçadas contra a superfície, ao longo de onde se movimentam (ASTM, 2001).

Segundo Stachowiak (2001), o desgaste em máquinas agrícolas causado por partículas abrasivas é um problema industrial, além de que o completo entendimento dos efeitos e das variáveis do sistema é necessário para entender as medidas necessárias a serem aplicadas no projeto de máquinas agrícolas. O conhecimento das propriedades físicas dos componentes agrícolas não tem uso restrito à engenharia, podendo contribuir para a ciência e tecnologia relacionada a processamento de vegetais e frutos.

Ainda tratando de desgaste, Kotecki e Ogborn (1995) afirmam que uma tendência de maior resistência ao desgaste abrasivo é notada em materiais que possuem uma maior dureza. Afirmam ainda que embora o aumento da dureza possa resultar em aumento da resistência ao desgaste, particularmente quando se compara revestimento duro aplicado sobre substrato de aço médio carbono, diferentes revestimentos com durezas similares podem ter diferentes resistências ao desgaste. Apesar da importância da dureza, não é esta que governa as propriedades de resistência ao desgaste, especialmente o abrasivo de baixa tensão, mas sim, a microestrutura presente no material base.

### 2.2.1 Classificação dos desgastes

Segundo Stoeterau (2004), a classificação pura e simples dos desgastes é de extrema complexidade, não sendo relacionada a valores numéricos e sim dividida em leves e severos. Diante disso o autor definiu a classificação para os desgastes conforme ao Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos desgastes.

<i>DESGASTE LEVE</i>	<i>DESGASTE SEVERO</i>
Resulta em superfícies extremamente suaves, geralmente mais suaves que a original.	Resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, em geral muito mais rugosas do que a original.
Produz partículas extremamente pequenas, na ordem de 0,01 mm de diâmetro.	Produz partículas grandes, tipicamente com diâmetro médio acima de 0,1 mm.

Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004).

Stoeterau (2004) afirma ainda que, todas as superfícies sólidas possuem irregularidades, mesmo as que parecem espelhadas possuem irregularidades em escala nanométrica. As rugosidades são um conjunto de irregularidades da superfície de um material e o aumento dessas rugosidades causa o aumento do desgaste. Quanto mais rugoso o material maior será o atrito e maior a perda de material quando existir movimento relativo entre dois corpos.

### **2.2.2 Tipos de desgaste**

De acordo com Buckley (1981), os tipos de desgaste são classificados de acordo com as ocorrências mais comuns, como desgaste abrasivo, adesivo, erosivo e corrosivo.

O desgaste abrasivo é o tipo de desgaste ocasionado por partículas e protuberâncias localizadas nas superfícies dos materiais, que são forçadas umas contra as outras ao longo da superfície de contato. A perda de material se dá devido ao contato das partículas com os materiais atritados, que desgastam as superfícies dos mesmos (BLAU, 1995).

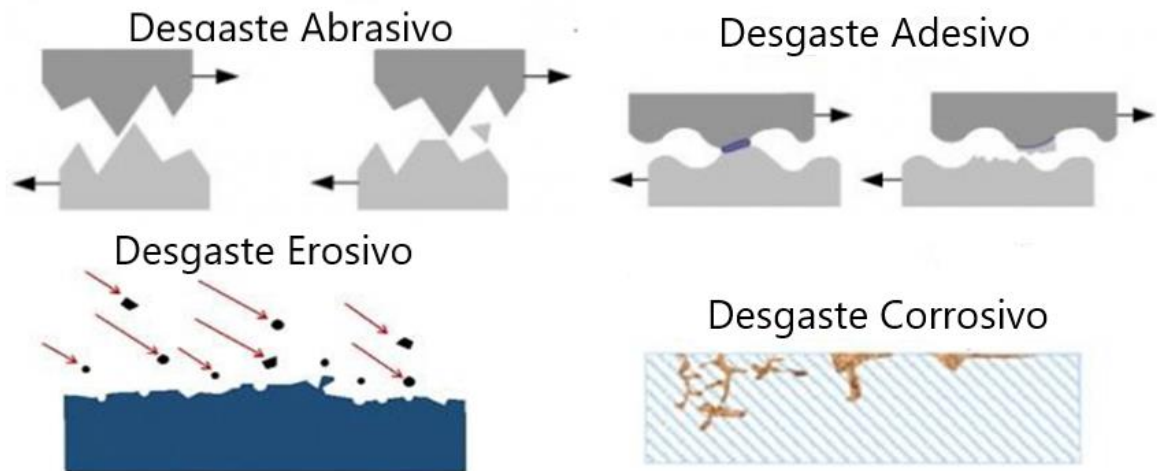
Em sua maioria, o desgaste por adesão acontece quando um sólido irá aderir ao entrar em contato com outro sólido. A adesão entre dois objetos casualmente colocados juntos não é observada porque há uma interação entre as camadas contaminantes de oxigênio, água e óleo, que estão geralmente presentes (STACHOWIAK, 2005).

Segundo Bayer (2004), no desgaste erosivo as partículas não são pressionadas contra a superfície como no desgaste abrasivo, porém sofrem choque mecânico contra as superfícies. Os principais parâmetros deste fenômeno de desgaste são o ângulo de incidência da partícula na superfície do material, a velocidade da partícula, o tamanho da partícula e a dureza da superfície.

O desgaste corrosivo ocorrerá quando a superfície do material reagir com o meio em que se encontrar, podendo ser o oxigênio do ar, gás, lubrificante ou até mesmo outro material sólido (BUCKLEY, 1981).

A figura esquemática dos principais desgastes está representada na Figura 11 a seguir.

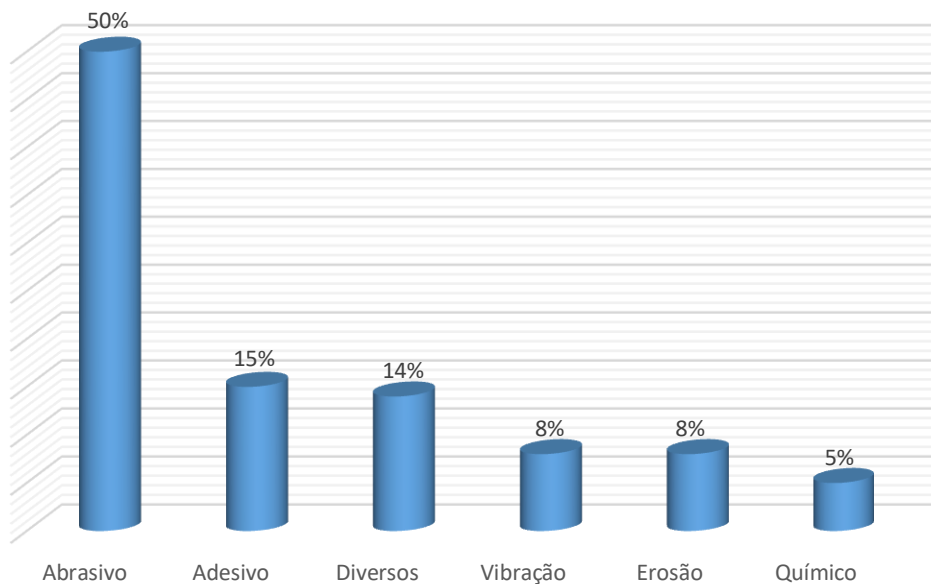
Figura 11 - Principais tipos de desgastes.



Fonte: Adaptado de Mundo mecânico (2017).

Para Albertin (2003), o desgaste abrasivo é o mais prejudicial dentre os demais, como ilustrado junto a Figura 12, sendo correspondente a metade dos desgastes ocorridos em sistemas mecânicos.

Figura 12 - Desgastes em porcentagem.



Fonte: Adaptado de Albertin (2003).

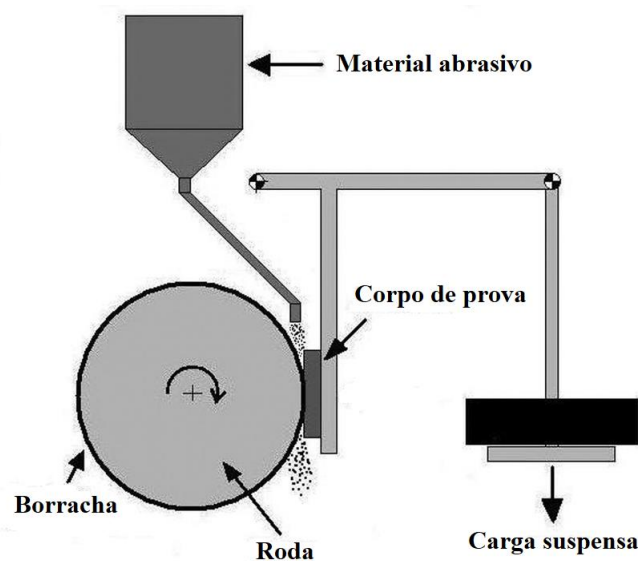
### 2.2.3 Dispositivos para medição de desgaste

Devido à complexidade dos fenômenos de desgaste não foi possível, ainda, a criação de um dispositivo universal para os estudos pertinentes ao desgaste. Diante do fato, vários dispositivos de ensaio foram criados para reproduzir configurações particulares de desgaste, que no geral proporcionam resultados de caráter estimativo da resistência ao desgaste dos materiais testados (NORMANN, 1948).

Para o desenvolvimento de estudos do maior causador de desgaste abrasivo em equipamentos mecânicos, foram desenvolvidas máquinas de ensaios específicos com métodos capazes de realizar, com boa reprodutibilidade, análises satisfatórias. Os equipamentos mais utilizados recentemente são: Abrasômetro do tipo roda de borracha; ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa e máquina de ensaio abrasivo de pino sobre disco. A máquina do tipo abrasômetro roda-de-borracha é um dos dispositivos mais antigos para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório (BORIK 1972).

Segundo os autores Villabón e Sinatora (2006), o abrasômetro do tipo roda de borracha (Figura 13) foi apresentado primeiramente por Haworth em 1948 e consistia em uma roda de borracha giratória que entra em contato com a superfície de um corpo de prova que contém um material abrasivo em sua interface. O equipamento permite obtermos resultados com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado mais comumente na indústria de mineração, agrícola e de transporte. É utilizado principalmente para classificação de materiais quanto a sua resistência ao desgaste devido a perda de massa.

Figura 13 - Abrasômetro do tipo roda de borracha.



Fonte: Adaptado de Marques (2009).

O abrasômetro roda de borracha foi padronizado pela norma internacional ASTM (*American Society for Testing and Materials*). A normativa que define os parâmetros de ensaios do abrasômetro do tipo roda de borracha é norma ASTM G65 (*Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*). A sigla G é do comitê técnico para assuntos correlacionados a Corrosão, deterioração e degradação de materiais. O ensaio de abrasão do tipo roda de borracha (de acordo com a norma ASTM) realiza uma simulação de desgaste abrasivo a corpos a baixa tensão (ASTM, 2015).

Ainda segundo a norma ASTM G65 (2015), o ensaio em abrasômetro de borracha consiste em uma amostra com superfície plana ser posicionada de modo a ser pressionada com uma carga constante a uma superfície de um disco recoberto de borracha, que ao girar desgasta a amostra junto a um material abrasivo que é depositado.

Os parâmetros para realização do teste, conforme a norma ASTM G65 são:

- Aro de borracha, com dureza definida, moldado sobre a superfície curva de um disco de aço com largura de 12,7 mm e diâmetro total de 228,6 mm, com dureza de 60 Shore A ( $\pm 2$ );
- Rotação do disco constante de 200 RPM ( $\pm 10$  RPM);
- Fluxo de abrasivo direcionado entre a face da amostra e o disco, com vazão definida entre 300 e 400 g/min;
- Revoluções durante o ensaio de 100 a 6000;
- Carga aplicada de 45 a 130 N ( $\pm 3\%$ );
- Abrasivo de areia de sílica de classificação AFS 50/70 (recomendação) e
- Os corpos de prova devem ter rugosidade superficial inferior a 0,8  $\mu\text{m}$ .

Antes de cada ensaio, as amostras devem ser pesadas, utilizando-se uma balança com precisão de 0,001 gramas. Ao final do ensaio sua superfície deve ser limpa e novamente pesada. A diferença entre as massas final e inicial serve para calcular o volume de material perdido pela amostra durante o ensaio, utilizando a Equação (1). (ASTM G65, 2015).

$$Volume\ perdido\ [cm^3] = \frac{massa\ perdida\ [g]}{densidade\ [\frac{g}{cm^3}]} \quad (1)$$

Depois de realizado o ensaio com as devidas condições, a norma ASTM G65 (2015) estabelece parâmetros para que a análise do volume perdido das amostras testadas nos possibilite realizar a comparação de desgaste dos corpos de prova, a fim de definir qual material melhor se enquadra nos parâmetros necessários a aplicação.

### 2.3 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

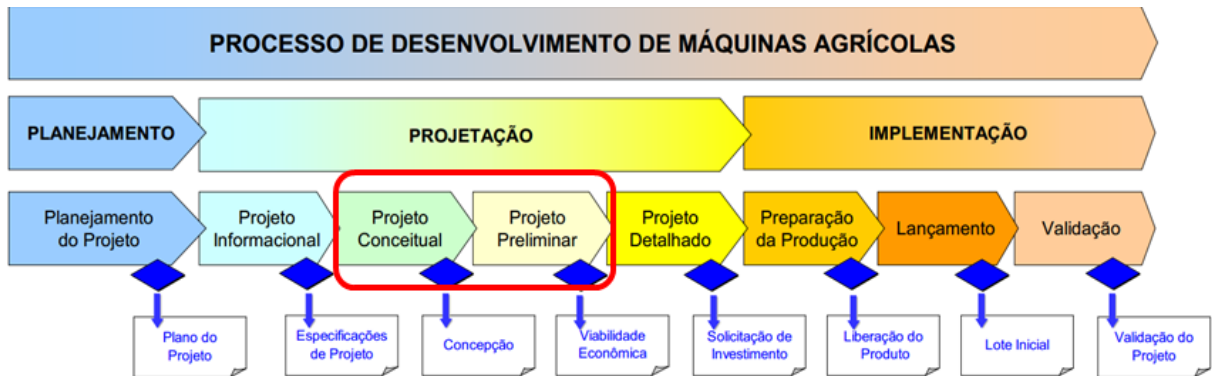
Segundo o PMI (2013) um projeto é um esforço temporário que tem início, meio e fim bem determinados e empreendidos para se alcançar um objetivo exclusivo. O gerenciamento de um projeto é a aplicação de habilidades, conhecimentos, ferramentas e técnicas nas atividades, com o objetivo de satisfazer os requisitos do cliente. Pode ser mais bem compreendido por meio dos processos que o compõem, divididos basicamente em cinco grupos: Iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle; e encerramento.

A norma ISO 9001:2008 define que o desenvolvimento e gerenciamento de projeto deve contemplar uma fase de validação do produto a fim de assegurar que o produto atenda aos requisitos de projeto. A validação deve ser concluída antes da entrega ou implementação do produto, mantendo-se os registros dos resultados de validação e quaisquer ações necessárias.

De acordo com Romano (2003), a modelagem do processo de desenvolvimento de produtos resulta na sua formalização, com a descrição das fases, atividades, responsáveis, recursos disponíveis e informações necessárias, permitindo desta forma a construção de uma visão única e compartilhada entre os envolvidos no processo.

O processo de desenvolvimento de produtos (Figura 14) envolve diversas atividades que são originadas a partir das necessidades identificadas em um grupo de clientes em potencial e objetivam a identificação das especificações do produto de modo a suprir tais necessidades. Há necessidade de haver uma gestão de desenvolvimento de produto nas empresas, para fazer avaliações contínuas do ambiente em que a empresa está inserida bem como monitorar a eficácia de seu programa, propor ajustes e melhorias (AMARAL, 2006).

Figura 14 - Exemplo de processo de desenvolvimento de produtos.



Fonte: Adaptado Romano (2003).

A fase de projeto conceitual corresponde à fase onde ocorre o desenvolvimento da concepção e corresponde ao desenvolvimento de um fluxo de atividades que permite a elaboração da estrutura funcional do produto, o desenvolvimento de concepções alternativas, definição de processos de fabricação, definição de fornecedores, estudos iniciais de segurança e avaliação da concepção selecionada (ROMANO, 2003).

O desenvolvimento da concepção do produto é de grande importância visto que nele são tomadas as decisões que influenciam fortemente sobre os resultados das fases subsequentes, busca o atendimento das especificações do projeto, ocorrem limitações de recursos e restrições de projeto. O nível de detalhamento de uma concepção vai permitir elaborar a representação dos princípios de solução para as funções do produto que está sendo desenvolvida, a análise de sua viabilidade (técnica e econômico-financeira) e a continuidade do projeto na próxima fase (Projeto Preliminar) (BLANCHARD; FABRICKY, 1981).

Segundo Romano (2003), a fase do projeto preliminar tem por objetivo o estabelecimento do leiaute final do produto e a determinação da viabilidade econômica do mesmo. Nesta fase são definidas atividades como definição de leiaute, material, segurança, ergonomia, definição de componentes, considerações gerais sobre aspectos legais e de segurança, processos de fabricação, entre outros.

## 2.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ENGENHARIA

Para Scheleski (2015), a tarefa de selecionar materiais é parte de todas as etapas do processo de projeto, geralmente com início junto aos primeiros esboços e tendo seu fim junto à definição das especificações do produto. Muitas vezes novos materiais geram oportunidades de inovação e possibilitam a satisfação de necessidades que antes não podiam ser atendidas.

Os responsáveis pela seleção de materiais devem ficar atentos a essas oportunidades que são a chave para o desenvolvimento de novos produtos de sucesso. Assim, como qualquer outra tarefa do projeto, a seleção de materiais deve ser executada de forma ágil, eficaz e sistêmica para que os resultados no produto sejam de excelência.

#### **2.4.1 Método das cartas de Ashby**

Segundo Ashby (2011), cada uma das etapas do projeto exige decisões sobre os materiais e sobre os processos de fabricação. As ferramentas de seleção de materiais desempenham um papel importante em cada etapa, variando ao passar das etapas a natureza dos dados sobre os materiais. Inicialmente os dados podem ser superficiais, no entanto à medida que as fases do projeto avançam estes dados precisam ser refinados. Ao passar das fases do projeto, a quantidade de materiais diminui através da utilização de critérios de eliminação, até se chegar ao material escolhido.

A evolução da seleção de materiais de tarefa empírica para metodologia estruturada deve-se principalmente a Michael Farries Ashby, da Universidade de Cambridge. Tal metodologia começou a ser desenvolvida no fim da década de 1980 e tem como base os mapas de propriedades dos materiais, que permitem comparar qualquer conjunto de materiais a partir de suas propriedades (FERRANTE E WALTER, 2010).

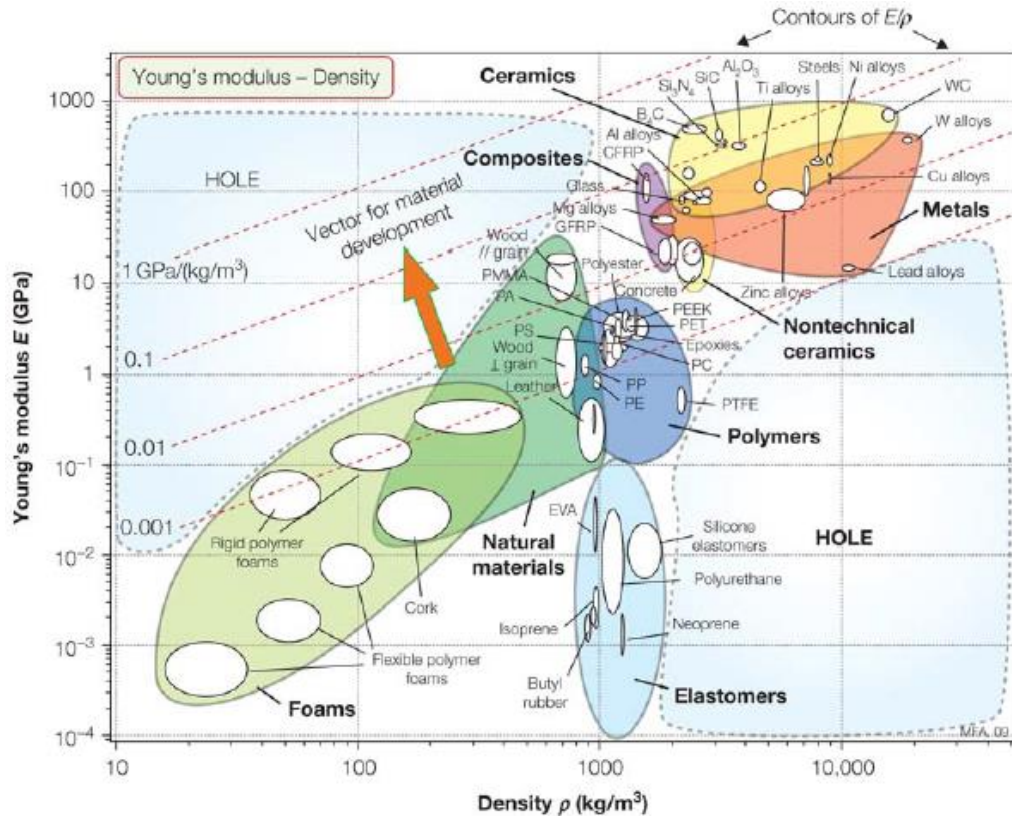
Para a seleção de materiais, baseada a metodologia de Ashby (2011), o processo envolve algumas etapas: traduzir os requisitos de projeto em uma especificação para o processo e materiais; eliminação dos materiais que não poderão ser usados no projeto; classificação dos materiais restantes, identificando aqueles que têm o maior potencial. Para tal processo, existem ferramentas e procedimentos a fim de auxiliar na tarefa de escolha. Além disso, segundo o autor é necessário citar que a seleção de materiais deve ser sempre efetuada em conjunto com a seleção do processo de fabricação.

O processo de seleção de materiais pode ser abordado de duas formas: Macro e microscopicamente. A prática mostra que as duas formas se completam; a primeira aceita um grande número de opções e, por processo de seleção e eliminação, prepara o terreno para uma segunda abordagem microscópica. A essência do conceito de seleção de materiais encontra-se nos mapas das propriedades dos materiais (ou cartas de Ashby). As cartas procuram agrupar todas as famílias de materiais em gráficos (Figura 15) cujas coordenadas compõem, sempre que possível índice de méritos (fórmulas algébricas que combinam propriedades dos materiais



e que quando maximizadas aperfeiçoam algum aspecto de desempenho) utilizados em cálculos de dimensionamento de seleção de materiais.

Figura 15 - Modelo de carta de Ashby para seleção de materiais.



Fonte: M.F. Ashby (2011).

Assim, de acordo com Ashby (2011) para sair do ponto de partida, com todos os materiais, e chegar a um único material é necessária à concretização das etapas de tradução, triagem, classificação e documentação. Para esse caminho ser percorrido da melhor forma existem procedimentos e ferramentas de auxílio. Além disso, segundo o autor é necessário citar que a seleção de materiais deve ser sempre efetuada em conjunto com a seleção do processo de fabricação para que o melhor processo seja escolhido sem prejudicar o desenvolvimento do produto.

### 3 METODOLOGIA

O capítulo da Metodologia apresenta os principais instrumentos e processos utilizados para a identificação e caracterização de materiais disponíveis em mercado para redução do efeito da abrasividade em sistemas mecânicos agrícolas, tendo foco no sistema de transporte de grãos de máquinas colhedoras de grãos.

As razões que levam à realização de uma pesquisa científica podem ser agrupadas em razões intelectuais, como o desejo de conhecer pela própria satisfação de conhecer, e razões práticas, por exemplo, o desejo de conhecer com vistas a fazer algo de maneira mais eficaz. A presente pesquisa se caracteriza por ser uma pesquisa prática e exploratória, tendo como característica principal a abordagem relacionada ao estudo de caso (GIL, 2007).

A elaboração do trabalho surgiu de uma necessidade encontrada em campo, onde produtores rurais não estavam satisfeitos com constantes manutenções em seus maquinários provocadas pelo excesso de desgaste de alguns componentes das colhedoras, principalmente naqueles componentes em contato direto com grãos de arroz, pois a casca do mesmo possui um elevado índice de abrasão devido a sua composição.

Através do problema de engenharia identificado, surgiu a questão de pesquisa a qual deveria ser quantificada e solucionada. A partir do contexto apresentado, foi confeccionado um fluxograma da metodologia (Figura 16) utilizada na pesquisa contendo os objetivos específicos, suas respectivas metodologias e seus principais resultados esperados.

Figura 16 - Fluxograma de representação da metodologia de pesquisa.



Fonte: Autor.

I. Para o desenvolvimento da revisão bibliográfica sobre o tema a pesquisa realizada abrangeu artigos científicos, dissertações e teses, livros base da área e materiais cedidos por fornecedores de matéria prima e maquinário (como certificados de qualidade e catálogos de produtos), os quais contem os temas abordados junto à temática principal do trabalho e algumas características importantes a serem definidas (como informações técnicas de maquinários).

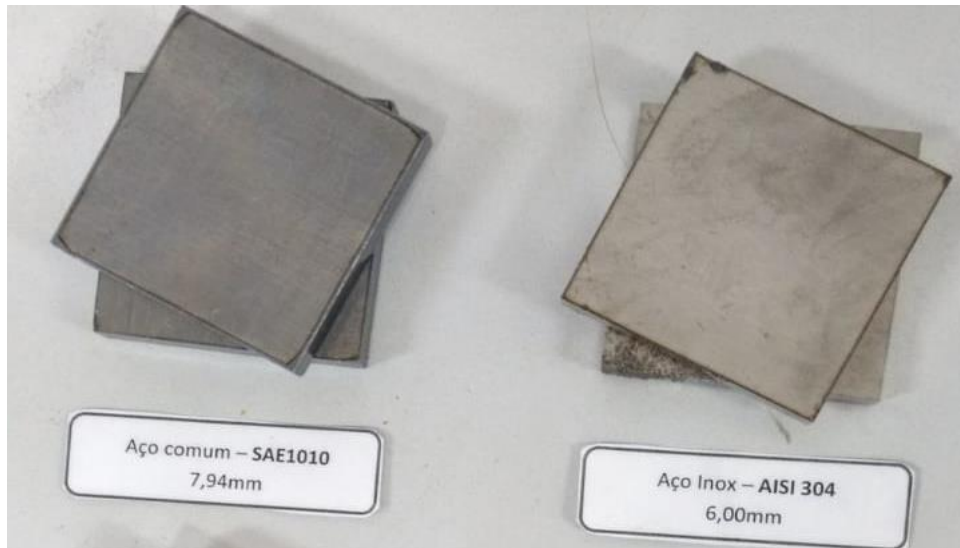
II. A identificação do material mais comum utilizado em mecanismos responsáveis pelo transporte de grãos em colhedoras foi possível através de pesquisas feitas em repositores de peças de máquinas agrícolas (onde especificações técnicas e características como materiais utilizados foram obtidas). Após a identificação do material, foi possível então a realização da caracterização do material quanto à composição química, análise de dureza, resistência ao desgaste por abrasão, viabilidade econômica e de processo.

III. Por sua vez, a identificação das alternativas de materiais resistentes ao desgaste foi realizada através de pesquisa em fornecedores de matérias primas. As siderúrgicas SSAB, Aperam, ArcelorMittal, CSN e Usiminas foram consultadas através de internet (site e e-mail) e telefone sobre as soluções que as mesmas possuíam para o problema de resistência ao desgaste, onde os possíveis materiais foram levantados como pela mesmas como soluções fornecidas para o problema pela empresa contatada.

IV. Depois de realizada a identificação dos materiais, foram realizados testes de dureza, tratamento térmico e resistência ao desgaste, além de levantamentos de dados a fim de quantificar as propriedades dos mesmos. As composições químicas dos aços mencionados foram obtidas através de certificação fornecida pelos fornecedores, conforme exemplos dos Anexos A e B, bem como as propriedades mecânicas como resistência mecânica e limites de escoamento.

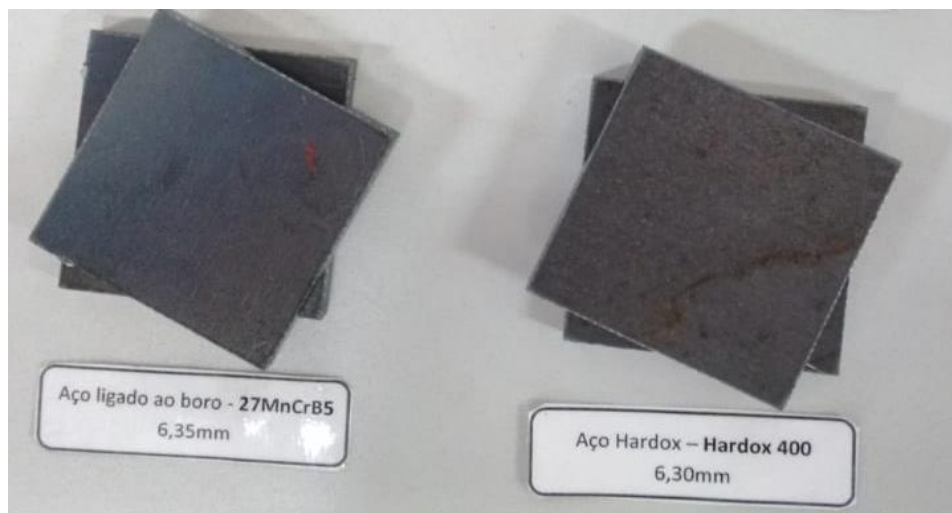
Após a definição inicial de algumas propriedades, foram confeccionados corpos de prova (Figura 17 e 18) para que os testes de desgaste abrasivo e dureza fossem realizados, onde chapas dos materiais selecionados foram submetidas ao processo de corte laser para que suas dimensões e propriedades fossem iguais nos corpos de prova.

Figura 17 - Corpos de prova para testes – SAE1010 e Inox AISI 304.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Corpos de prova para testes – 27MnCrB5 e Hardox 400.



Fonte: Autor.

De cada chapa foram retiradas oito amostras (corpos de prova) da região mais central, nas dimensões de 50,8 x 50,8 mm (variando as espessuras, conforme demonstrado nas figuras 17 e 18) para que fosse mantida a uniformidade da superfície, conforme determina a norma ASTM G65.

Para a obtenção de uma confiabilidade de 95% no teste de desgaste abrasivo, estimou-se através da Equação (2) o número mínimo de corpos de prova necessários para um coeficiente de variação ( $v$ ) de 5% e um erro permitido de amostras ( $e$ ) de 5% conforme

sugerido nos textos da ASTM G65, obtendo o número mínimo de 3,8416 corpos de prova (arredondados para quatro) para que o teste obtivesse um resultado confiável.

$$n = (1,96 \times v/e)^2 \quad (2)$$

De oito amostras confeccionadas para cada material selecionado, 4 foram submetidas ao teste de desgaste abrasivo (devido ao cálculo estatístico anterior) e o restante foram submetidas ao teste de dureza superficial.

A dimensão padronizada foi definida para que o ensaio de resistência ao desgaste abrasivo pudesse ser realizado, visto que no teste de abrasão utilizou-se um abrasômetro tipo roda de borracha que é recomendado para simulação de desgaste abrasivo a baixas tensões, utilizando areia seca como partícula abrasiva, obedecendo a todos os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM G65 (descrita junto ao item 2.3.4).

A dureza superficial dos materiais foi obtida através de ensaio de dureza superficial realizado com um Durômetro Rockwell Pantec (Figura 19). O método Rockwell é um dos métodos mais utilizados em indústrias e é o método mais simples e que não requer grandes treinamentos quanto a operadores, sendo de excelente precisão. Pode ser medido em diversas escalas (Quadro 2) variando apenas as combinações de penetradores e cargas, o que permite que o teste de dureza seja replicado para qualquer tipo de liga metálica. Os resultados obtidos foram quantificados na escala HRC<sup>3</sup> por terem a característica de penetrador de diamante, carga principal de 150 kgf e por apresentar o resultado na escala mais usual (HRC). Os procedimentos para obtenção dos resultados foram:

- Limpeza da superfície dos corpos de prova;
- Aplicação de uma pré-carga de 10 kgf;
- Aplicação da carga nominal (150 kgf);
- Espera de aproximadamente 1 minuto (para o ajuste de escala) e
- Realização da leitura da escala diretamente na máquina com as devidas conversões realizadas.

---

<sup>3</sup> A letra C se refere ao penetrador com cone de diamante e uma carga principal de 150 kgf.

Figura 19 - Durômetro Rockwell Pantec.



Fonte: Autor.

Quadro 2 - Escalas Rockwell.

Escala	Penetrador	Carga principal (kgf)
Rockwell A (HRA)	Cone de diamante	60
Rockwell B (HRB)	Esfera de 1/16"	100
Rockwell C (HRC)	Cone de diamante	150
Rockwell D (HRD)	Cone de diamante	100
Rockwell E (HRE)	Esfera de 1/8"	100
Rockwell F (HRF)	Esfera de 1/16"	60
Rockwell G (HRG)	Esfera de 1/16"	150
Rockwell H (HRH)	Esfera de 1/8"	60
Rockwell K (HRK)	Esfera de 1/8"	150

Fonte: Pantec (2015).

O durômetro utilizado para medição da dureza é calibrado mensalmente com padrão de dureza calibrado em laboratório, o que torna os resultados confiáveis.

V. Por fim, de posse de todas as informações mencionadas pelos procedimentos anteriores (identificação e caracterização de materiais quanto à composição química, propriedades mecânicas, valores de compra, testes de resistência à abrasão e dureza superficial) a comparação entre os materiais foi feita através de tabelas as quais são demonstradas em mais detalhes junto ao capítulo 4 (resultados e discussões) a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no presente estudo, onde estes são divididos da seguinte forma: Identificação dos materiais, caracterização dos materiais identificados quando a composição química e as propriedades mecânicas, ensaio de dureza superficial, ensaio de desgaste por abrasão, comparação econômica devido ao desgaste apresentado e uma comparação referente aos processos de manufatura existente para os materiais abordados.

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

Através de pesquisas realizadas em repositores de peças de máquinas agrícolas (onde especificações técnicas foram obtidas por catálogos de produtos) foi possível a identificação do material comumente utilizado no sistema de transporte de grãos de máquinas colhedoras como sendo o Aço Carbono SAE 1010.

A pesquisa de soluções de materiais para redução do desgaste abrasivo foi realizada nas principais indústrias siderúrgicas brasileiras fornecedoras de matérias primas, através de certificações de qualidade, catálogos de produtos, meios digitais (e-mails e *web sites*) e via contato telefônico. Os materiais identificados foram o Aço Inox AISI 304 (através da siderúrgica Aperam), Aço Hardox 400 (através da siderúrgica SSAB) e o Aço ligado ao Boro 27MnCrB5 (através da siderúrgica ArcelorMittal).

### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais encontrados deu-se através da composição química, das propriedades mecânicas de todas as ligas metálicas abordadas, dureza superficial, desgaste por abrasão, análise econômica e análise de processamento dos materiais, conforme demonstram os resultados a seguir.

#### 4.2.1 Caracterização quanto à composição química

O aço é constituído de ferro e outros elementos, como carbono, manganês, fósforo, enxofre, níquel, cromo e muito mais. Variações na composição do aço são responsáveis por uma grande variedade de classes e propriedades do aço. O ferro é o componente básico do



aço. Quando o carbono, um não metal, é adicionado ao ferro em quantidade de até 2,1%, o resultado é uma liga conhecida como o aço carbono (CALLISTER, 2002).

Segundo Vicente (1977) cada elemento que é adicionado à composição do aço base tem algum efeito sobre as propriedades do aço e como que o aço reage a processos de fabricação. Além de elementos de liga, a composição de aço inclui quase sempre pequenas quantidades de impurezas que estão presentes em matérias-primas siderúrgicas, tais como sucata ou de metal quente. Geralmente, o teor de impureza é mantido tão baixo que sua presença não é prejudicial para as propriedades do aço.

A composição química dos aços obtida através de fornecedores de matérias primas está apresentada junto ao Quadro 3 a seguir:

Quadro 3 - Composição química das ligas metálicas.

Ligas Metálicas	Composição química (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	B
SAE 1010	0,101	0,006	0,387	0,015	0,005	0,055	-	-	-	-
Inox AISI 304	0,049	0,370	1,150	0,030	0,002	-	17,72	8,10	0,026	-
Hardox 400	0,142	0,170	1,300	0,010	0,001	0,039	0,260	0,07	0,060	0,001
27MnCrB5	0,269	0,300	1,130	0,011	0,0001	0,016	0,320	0,02	0,011	0,003

Fonte: Autor.

A maior resistência ao desgaste abrasivo está associada, além das presenças de carbono e cromo nas quantidades encontradas, a presença de elementos como Nióbio (Nb – não encontrado nas amostras) e Boro (B) na estrutura que quando associados a microestrutura do material, incrementam características específicas na resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões (GREGORY, 1980).

#### 4.2.2 Caracterização quanto às propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos metais definem o comportamento do material quando o mesmo está sujeito a esforços mecânicos, pois estes estão relacionados à capacidade do material de resistir ou transmitir esforços aplicados sem romper e sem se deformar de forma incontrolável (CALLISTER, 2002).

Através de certificados de matérias primas (contendo ensaios realizados em corpos de prova padronizados por normativas das próprias empresas cedentes das informações) e

materiais cedidos das siderúrgicas (catálogos e folders), podemos identificar as propriedades mecânicas referentes aos materiais selecionados conforme descrito abaixo.

- **Aço SAE 1010**

É um aço carbono com baixa resistência mecânica (devido à baixa presença de carbono [0,1%]), podendo ser endurecido através de tratamento térmico ou por trabalho a frio, sendo necessário após, um tratamento de revenimento para alívio das tensões residuais.

Outras propriedades mecânicas do referido aço são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1010.

Limite de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Condutividade térmica ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )
307	362	210	12,2

Fonte: Usiminas.

Possui excelente conformabilidade, pois a liga possui uma característica de ductilidade elevada, sendo possível manipular o aço usando qualquer método convencional. Quanto à soldabilidade, pode ser soldado através de qualquer processo tradicional com grande facilidade. É forjado entre 980°C e 1260°C. Tem boas características para ser utilizado tanto a trabalhos a quente quanto a trabalhos a frio.

É um aço de uso geral, com destaque para estruturas e fixadores (parafusos).

As informações apresentadas foram retiradas do fornecedor da matéria prima Usiminas, podendo ter variações em suas propriedades devido a diferentes tratamentos do aço em questão por diferentes fornecedores da matéria prima.

- **Aço Inox AISI 304**

Os aços inoxidáveis apresentam um conjunto de características que outros materiais não conseguem mostrar: Elevada resistência à corrosão; Excelentes propriedades mecânicas; Excelente soldabilidade; Facilidade de conformação; Baixa rugosidade (permitindo limpeza mais eficiente); Inércia biológica (não favorece o desenvolvimento de colônias de microrganismos ou, caso existam, são facilmente removidas); Possibilitam elevado grau de higiene e uma maior resistência ao desgaste, principalmente em meio úmido.

Outras propriedades mecânicas do referido aço são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Propriedades mecânicas do aço Inox AISI 304.

Limite de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Condutividade térmica (W/mK)
320	720	193	16,2

Fonte: Aperam.

É um aço de estrutura austenítica (o que caracteriza a excelente resistência à corrosão) e é usado na construção civil e arquitetura; equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química, utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, destilaria de etanol, fotografias, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.

As informações apresentadas foram retiradas do fornecedor da matéria prima Aperam, podendo ter variações em suas propriedades devido a diferentes tratamentos do aço em questão por diferentes fornecedores da matéria prima.

- **Aço Hardox 400**

A chapa antidesgaste Hardox® é o melhor aço resistente à abrasão (AR) do mundo. O Hardox® é duro do começo ao fim, desde a superfície até o seu núcleo, lhe proporcionando uma maior vida útil e alta produtividade, mesmo nos ambientes mais difíceis (SSAB, 2018).

Possui uma elevada resistência ao desgaste abrasivo, extrema dureza e uma boa tenacidade. Possui uma capacidade de carga elevada e uma vida útil mais longa em aplicações de desgaste severo.

Outras propriedades mecânicas do referido aço são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Propriedades mecânicas do aço Hardox 400.

Limite de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)
1000	1250

Fonte: SSAB.

Por ser um aço de exclusividade e produção da siderúrgica SSAB, algumas informações são ocultadas a fim de não haver tentativas de cópias de desenvolvimentos de ligas semelhantes à Hardox.

As informações apresentadas foram retiradas do fornecedor da matéria prima SSAB, podendo ter variações em suas propriedades devido a diferentes tratamentos do aço em questão por diferentes fornecedores da matéria prima.

- **Aço ligado ao Boro 27MnCrB5**

As propriedades mecânicas do aço ligado ao boro endurecido o tornam extremamente resistente ao desgaste abrasivo e particularmente útil em aplicações estruturais de alta resistência, estendendo a durabilidade das estruturas e economizando custos relacionados à abrasão e ao ambiente. Entregue na condição de laminado a quente como chapa tendo como pré-trabalhos disponíveis o corte, dobra e chanfragem para soldagem.

Quadro 7 - Propriedades mecânicas do aço ligado ao Boro.

Limite de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)
373	570

Fonte: ArcelorMittal.

Possui aplicações em revestimentos e partes desgastáveis de máquinas e equipamentos agrícolas, chapas de bordas, ferramentas, transportadores em parafuso, dentre outras aplicações.

As instruções normais para a soldagem de aços de alta resistência também se aplicam na soldagem de aços ao boro na condição de laminados a quente. O melhor resultado é obtido usando consumíveis e métodos de soldagem de baixo hidrogênio. Graças à sua composição química específica, os aços a boro possuem uma variedade de propriedades metalúrgicas que podem ser utilizadas no endurecimento.

As informações apresentadas foram retiradas do fornecedor da matéria prima ArcelorMittal, podendo ter variações em suas propriedades devido a diferentes tratamentos do aço em questão por diferentes fornecedores da matéria prima.

#### 4.2.3 Caracterização quanto à dureza superficial

Uma maneira de avaliar a dureza do material é através da capacidade de um material penetrar o outro. O ensaio Rockwell superficial é uma maneira de obter diretamente a dureza

da superfície, através da diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pequena carga (10 kgf), seguida por outra de maior intensidade (150 kgf).

Para a obtenção dos resultados de dureza, o procedimento realizado foi descrito detalhadamente no tópico IV da metodologia do presente estudo e os resultados foram demonstrados no Quadro 8 a seguir, bem como a obtenção dos desvios padrões no Quadro 9.

Quadro 8 - Resultados de dureza.

Ordem	Materiais	Dureza média (HRC)	Dureza média (HRB)	Desvio padrão
1	Boro 27MnCrB5 TT*	46	-	0,375
2	Hardox 400	36	109	0,500
3	Boro 27MnCrB5	6	87.8	0,375
4	Inox AISI 304	5	86.8	0,750
5	SAE 1010	0	70	0,000

\*Tratamento térmico de têmpera por indução.

Fonte: Autor.

Quadro 9 - Desvio padrão da dureza.

Amostra	SAE 1010	Inox 304	Hardox 400	Aço Boro	Aço Boro TT*
<b>1</b>	0	6	36	6	46
<b>2</b>	0	4	37	6	47
<b>3</b>	0	5	36	6	46
<b>4</b>	0	6	35	5	46
<b>Média</b>	<b>0</b>	<b>5,25</b>	<b>36</b>	<b>5,75</b>	<b>46,25</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0</b>	<b>0,750</b>	<b>0,500</b>	<b>0,375</b>	<b>0,375</b>

\*Tratamento térmico de têmpera por indução.

Fonte: Autor.

Conforme observado junto ao Quadro 8, o material que possui mais dureza superficial pelo método Rockwell é o aço ligado ao Boro 27MnCrB5. O mesmo foi submetido ao tratamento térmico de têmpera por indução devido à orientação do fornecedor, que afirmou que o material poderia ser solução para o problema apresentado passando pelo processo de tratamento térmico para aumentar sua dureza superficial.

Como a dureza superficial do material pode ser avaliada como a capacidade do material de “riscar” o outro, pode-se associar a dureza diretamente a resistência ao desgaste, onde quanto maior a escala de dureza teoricamente maior a resistência ao desgaste por abrasão.

Através dos resultados, podemos estabelecer uma classificação ordenada dos materiais quanto à resistência ao desgaste avaliando a dureza superficial (Quadro 8).

#### **4.2.4 Caracterização quanto ao desgaste por abrasão**

Através do abrasômetro de roda de borracha, descrito detalhadamente no item 2.3.4 e padronizado seu procedimento através da norma ASTM G65, foi possível obter a classificação de materiais quanto a sua resistência ao desgaste devido à perda de massa. O teste é comparativo entre dois ou mais materiais, o que valida o estudo realizado no presente trabalho.

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado em São Paulo – SP, na empresa TAK Soldas especiais com o seguinte procedimento: Os corpos de prova foram pesados (P1) e depois submetidos ao teste, que consiste basicamente em prender o corpo de prova a uma alavanca com um peso, onde o mesmo está em contato com uma roda de borracha com areia seca e classificada entre as malhas 50 e 70 mesh<sup>4</sup>. A areia cai entre o corpo de prova e a roda de borracha, com uma vazão entre 300 e 400 g/min. Após 6000 ciclos a uma rotação de 200 RPM o corpo de prova foi retirado do abrasômetro (Figura 20) e pesado (P2) para que o volume perdido possa ser calculado.

---

<sup>4</sup> Malha de filtro mesh é utilizada em todo e qualquer processo de peneiração, separação por granulometria, filtragem, entre outros processos. Toda granulometria, que é a descrição do tamanho de partículas, é feita a partir das malhas de filtro mesh, dando assim sua determinação, através das aberturas das malhas.

Figura 20 - Abrasômetro roda de borracha.



Fonte: Autor.

O teste consistiu em colocar as amostras sob as mesmas condições de desgaste, verificando ao final os volumes perdidos de cada corpo de prova e realizando a comparação entre os mesmos.

Os resultados obtidos são mostrados e ordenados junto ao Quadro 10.

Quadro 10 - Resultados do ensaio de desgaste por abrasão.

Ord	Materiais	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Peso inicial (P1 – g)	Peso final (P2 – g)	Variações		Índice de comparação
					g	cm <sup>3</sup>	
1	Boro 27MnCrB5 TT*	7,74	1043,6	1039,4	4,2	0,54	2,48
2	Hardox 400	7,80	1044,1	1039,6	4,5	0,58	2,31
3	SAE 1010	7,86	1033,3	1027,3	6,0	0,76	1,73
4	Boro 27MnCrB5	7,81	1040,4	1032,7	7,7	0,99	1,35
5	Inox AISI 304	7,86	1038,7	1028,3	10,4	1,32	1,00

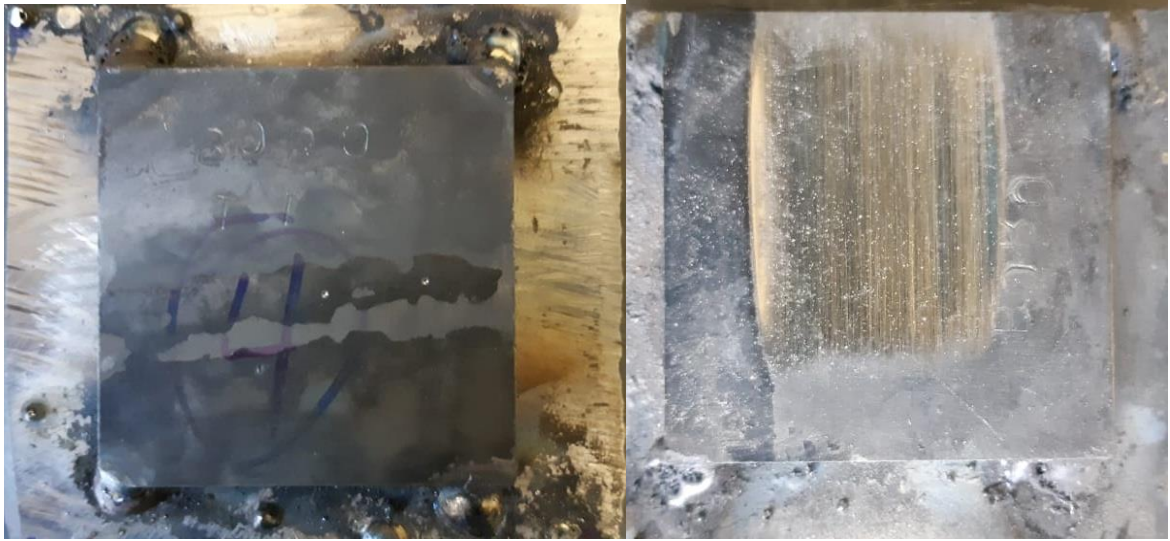
\*Tratamento térmico de têmpera por indução.

Fonte: Autor.

Os valores de densidade foram baseados nas densidades reais dos materiais submetidos aos testes. Os valores obtidos para densidade e volume foram todos obtidos através da Equação 1 normatizada pela ASTM G65 e descrita no item 2.3.4.

As Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 mostram os corpos de prova antes e depois do ensaio realizado.

Figura 21 - Antes e depois do aço ao Boro temperado.



Fonte: Autor.

Figura 22 - Antes e depois do aço Hardox 400.



Fonte: Autor.

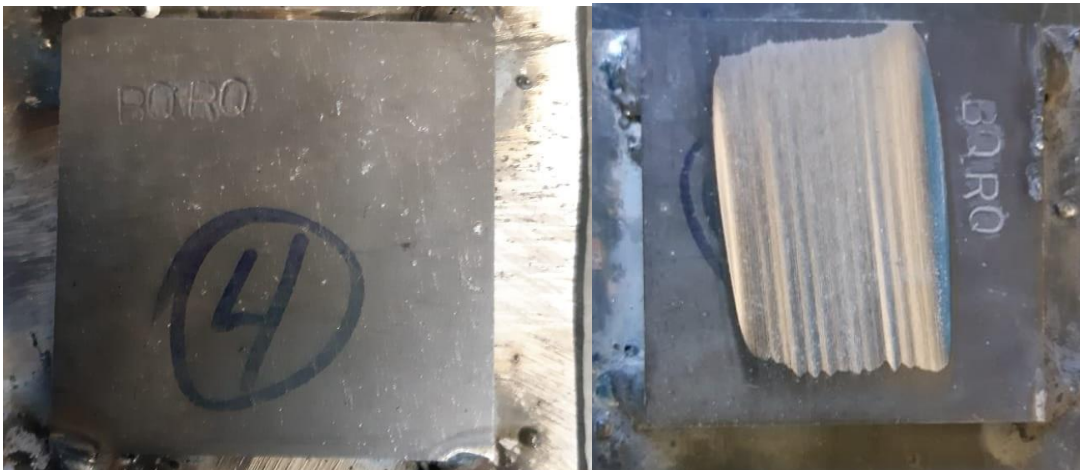


Figura 23 - Antes e depois do aço SAE 1010.



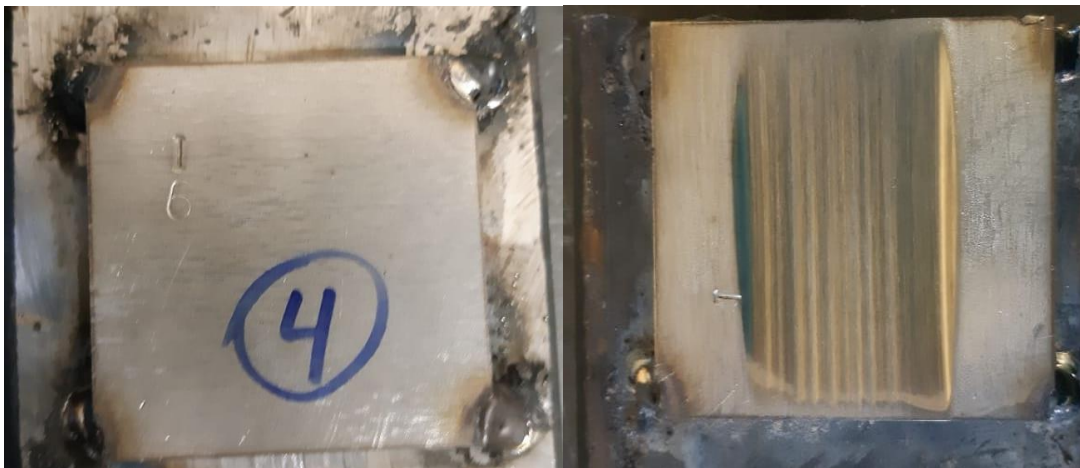
Fonte: Autor.

Figura 24 - Antes e depois do aço ao Boro sem tratamento térmico.



Fonte: Autor.

Figura 25 - Antes e depois do aço Inox 304.



Fonte: Autor.

O índice de comparação apresentado junto ao Quadro 10 nos possibilita a realização de uma leitura direta quanto aos resultados obtidos, onde o aço ligado ao Boro com tratamento térmico de têmpera por indução pode assumir um índice de até 2,48 vezes mais resistência ao desgaste por abrasão quando comparado ao aço Inox 304. Este índice foi calculado de acordo com as perdas de massa obtidas no ensaio de desgaste, tendo como ponto inicial o resultado de maior perda dos testes realizados.

#### 4.2.5 Comparação quanto à análise econômica

A comparação econômica dos materiais permite uma tomada de decisões baseada no fator custo x benefício a favor de uma alternativa com relação às outras. Permite ainda que possamos realizar uma ordem prioritária dos custos de forma crescente priorizando os materiais de custo mais reduzido por apresentarem economias à indústria.

Conforme grande parte das informações mencionadas no decorrer de todo o estudo, os custos foram obtidos através das mesmas pesquisas á fornecedores de matérias primas. Os custos dos materiais selecionados estão demonstrados e ordenados no Quadro 11.

Quadro 11 - Comparação econômica entre materiais.

Ord	Materiais	Espessura (mm)	Processo de fabricação	Fornecedor	Valores (R\$)			Índice de comp.
					Kg	TT*	Total	
1	SAE 1010	7,94	Laminado a quente	Usiminas	3,40	-	<b>3,40</b>	1,00
2	Boro 27MnCrB5	6,35	Laminado a quente	ArcelorMittal	6,44	-	<b>6,44</b>	1,89
3	Hardox 400	6,30	Laminado a quente	SSAB	6,86	-	<b>6,86</b>	2,02
4	Boro 27MnCrB5 TT*	6,35	Laminado a quente	ArcelorMittal	6,44	6,00	<b>12,44</b>	3,66
5	Inox AISI 304	6,00	-	Aperam	16,15	-	<b>16,15</b>	4,75

\*Tratamento térmico de têmpera por indução.

Fonte: Autor.

Um fato importante a ser considerado é de que a análise econômica aqui apresentada foi realizada com base em valores vigentes no mercado do ano de 2018.

Através do índice de comparação para a análise econômica podemos realizar uma leitura de resultados direta, onde o aço SAE 1010 seria a opção mais vantajosa financeiramente enquanto o aço Inox 304 pode alcançar valores 4,75 vezes superiores ao aço de menor valor agregado.

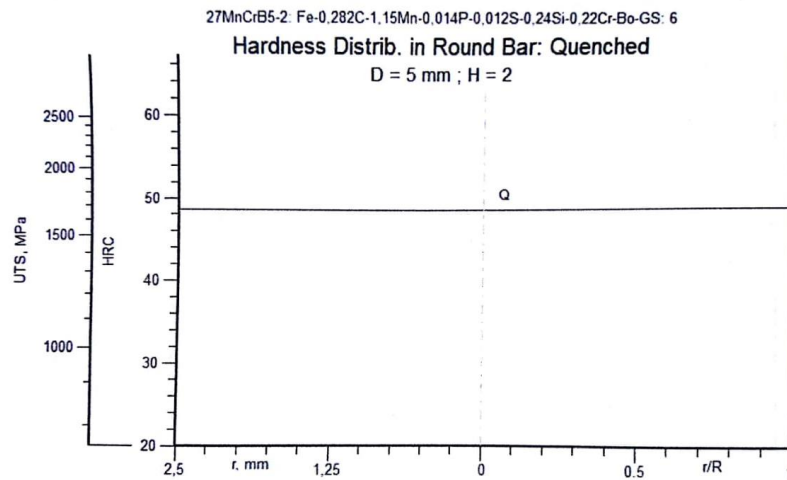
#### **4.2.6 Comparação quanto ao processamento dos materiais**

Os processos aos quais os materiais são submetidos tornam-se de igual importância quanto à comparação. Cada material selecionado (Aço SAE 1010, Inox 304, Hardox 400 e Aço ao Boro) possuem características próprias quanto aos processos aos quais são submetidos.

O Aço SAE 1010 possuiu pontos positivos a serem mencionados: é um material de boa ductilidade (o que torna seu processamento em qualquer condição simples, pois pode ser moldado praticamente em qualquer condição) e possui ótima soldabilidade. Como pontos negativos podem destacar: é um material que possui baixa (ou nula) temperabilidade devido a seu baixo teor de carbono (máximo de 0,1%) fazendo com que seja submetido a tratamentos térmicos caros (como a carbonitreção) para seja possível atingir altas resistências mecânicas.

O Aço ao Boro (27MnCrB5) possui alguns pontos em comum ao aço SAE 1010, como a boa ductilidade e uma ótima soldabilidade. Porém, diferentemente do aço SAE 1010, possuiu uma característica excelente quanto a temperabilidade, pois o mesmo quando submetido a tratamentos térmicos, possuiu uma baixa tendência a quebra devido a formar a microestrutura austenítica em faixas de temperatura próximas a 832°C. Possuiu também, uma excelente distribuição de camada de dureza ao longo de todo o tratamento térmico, conforme Figura 26.

Figura 26 - Distribuição de dureza ao longo da espessura do corpo de prova.



Fonte: Autor.

O Aço Hardox 400 produzido pela indústria siderúrgica SSAB é de difícil processamento, pois possui uma baixa ductilidade. Tal característica deve-se ao fato de sua dureza ser obtida através de processos de laminação intercalados a processos de tratamentos térmicos em fornos, característica a qual adere propriedades no material que prejudicam seu processamento nas indústrias por causarem trincas e rupturas no material. Em espessuras maiores, o processamento do material se torna igualmente mais dificultado. Outro fator prejudicial ao uso do Aço Hardox 400 é o fato de ser produzido exclusivamente pela siderúrgica SSAB em sua matriz na Suécia, o que gera por algumas vezes indisponibilidade de matéria prima junto ao Brasil.

Por fim, o Aço Inox 304 possui propriedades antioxidantes excelentes, não possuindo as mesmas características quanto à resistência ao desgaste conforme comprovado nos ensaios realizados no presente estudo. O Aço Inox tende a se destacar como material resistente a condições severas assim que for desenvolvido um tratamento de superfície para aumentar a resistência do mesmo ao desgaste excessivo.

## 5 CONCLUSÕES

Foram selecionadas, no decorrer do trabalho, quatro matérias primas com as características necessárias para a aplicação na solicitação de desgaste por abrasão em máquinas colhedoras de grãos. O material utilizado atualmente na produção de peças das colhedoras foi o Aço SAE 1010 e as alternativas selecionadas para a diminuição do desgaste abrasivo foram o Aço Inox AISI 304, Aço Hardox 400 e o Aço ligado ao Boro 27MnCrB5 submetido ao tratamento térmico de têmpera por indução.

Os testes realizados no decorrer do estudo, nos possibilitaram criar escalas ordinais dos materiais quanto a cada resultado obtido, os quais foram detalhadamente descritos junto aos resultados e discussões.

Referente às composições químicas e propriedades mecânicas, todos os materiais possuem suas características específicas, não sendo possível estabelecer uma classificação ordinária dos materiais, cabendo um estudo específico sobre cada propriedade levando em consideração a aplicação exata do material.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de dureza superficial normatizado pela ASTM G65, através do índice de comparação elaborado foi possível à realização de uma leitura direta do resultado, destacando o Aço ligado ao Boro com tratamento térmico de têmpera por indução que apresentou desgaste inferior aos demais materiais, podendo ser até 2,48 vezes mais resistente a abrasão do que o Aço Inox 304.

Economicamente, através do índice de comparação apresentado, o Aço SAE 1010 possui vantagem quanto às comparações, sendo até 4,75 vezes mais vantajoso em relação a custos do que as demais alternativas de materiais.

Em termos de processamento dos materiais, o que se destacou positivamente quanto as propriedades mais adequadas aos processos foi novamente o Aço ligado ao Boro, por ter uma uniformidade quanto a sua dureza superficial, boa ductilidade (favorecendo o processamento do mesmo) e uma excelente resistência a abrasão comprovada através do ensaio de desgaste por abrasão.

Diante de todas as informações e comparações levantadas no presente estudo, foi concluído que o material que possui as melhores características para a utilização na redução do efeito da abrasividade em sistemas mecânicos agrícolas foi o Aço ligado ao Boro, por se destacar positivamente quanto a propriedades mecânicas, composição química, dureza superficial, desgaste por abrasão e processamento, tendo ainda uma excelente relação de custos quando comparado aos demais materiais.

Por fim, uma comparação geral foi realizada apresentando um ranking comparativo obtido com base nos estudos e comparações apresentados conforme o Quadro 12 a seguir.

Quadro 12 - Ranking comparativo

	Boro 27MnCrB5 TT*			Hardox 400			Boro 27MnCrB5			SAE 1010			Inox AISI 304		
	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Dureza	X				X				X			X			X
Resistência ao Desgaste por abrasão	X			X					X		X				X
Custos			X		X			X		X					X
Processamento	X				X		X				X			X	
	Alto			Médio			Baixo			Médio			Baixo		
	1º			2º			4º			3º			5º		

Fonte: Autor.

O quadro 12 apresenta todas as informações obtidas no presente estudo em forma de um quadro comparativo. Através do mesmo podemos estabelecer uma breve comparação entre as características dos materiais selecionados como possíveis soluções para redução do desgaste abrasivo.

O Aço ligado ao boro se destaca por altos índices de dureza superficial, resistência ao desgaste por abrasão e por um excelente processamento quando submetido ao tratamento térmico de têmpera por indução, porém o mesmo possui boas propriedades quanto não submetido ao referido tratamento térmico.

O aço Hardox 400 possui uma alta resistência mecânica, sendo um material alternativo atrativo para a solução proposta, porém o mesmo possuiu uma manufatura que adere algumas características indesejáveis no material o que o torna com um difícil processamento na indústria.

Um ponto importante a mencionar são os resultados obtidos perante o aço SAE 1010. O mesmo apresentou resultados inferiores aos demais comparados, porém ainda possui uma excelente competitividade frente ao mercado por, em condições não severas, possuir uma resistência ao desgaste satisfatória e um baixo custo de compra e processamento.

Por fim, o aço Inox 304 obteve o pior rendimento quando comparado às outras soluções encontradas, não servindo de parâmetro final quanto a caracterização do material. O presente resultado indica que o mesmo não possui boas características quanto a essa específica aplicação, podendo ser uma excelente opção para diversas outras soluções necessitadas no mercado de máquinas agrícolas.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, temos os seguintes tópicos:

- Construção de um abrasômetro do tipo roda de borracha a fim de realizar novos testes em materiais alternativos;
- Elaboração de projetos conceito para aplicação das soluções encontradas no presente estudo;
- Confecção de protótipos com os conceitos projetados;
- Teste dos protótipos projetados em campo para validação dos resultados obtidos.
- Realização do método de teste de abrasão de areia úmida em abrasômetro de roda de borracha - ASTM G105.

## 7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA (AGEITEC). **Colheita**. 2015. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fx8sgdup02wyiv80u5vcsvp8n72au.html>>. Acessado em: 10 Jun. 2018.
- ALBERTIN E. **Desgaste abrasivo** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. In: 58º Congresso Anual da ABM: Rio de Janeiro: ABM, 2003.
- AMARAL, D. C. ET AL. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. Ed. Saraiva. 1ª Edição: São Paulo, 2006.
- AMERI, ALEXANDRE; **Utilização de protótipos para redução de riscos durante o desenvolvimento do produto na indústria automobilística**. São Paulo, 2014. 94p. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
- ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 4ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Estatísticas, máquinas agrícolas e rodoviárias**. 2017. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas.html>>. Acessado em: 16 Maio. 2018.
- ASTM G40, **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Annual book of standards**, Volume 03.02: Wear and Erosion Metal, Corrosion, United States, 2001.
- ASTM G65, 2015. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Annual Book of ASTM Standards** Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. Ed. Manole: São Paulo, 1987. Cap. 8.
- BAYER, Raymond G; **Mechanical Wear: Fundamentals and Testing**. Marcel Dekker: New York, 395 p., 2004.
- BENJAMIN S. BLANCHARD, WOLTER J. FABRYCKY. **Systems engineering and analysis**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 1981 xii, p.703
- BLAU, J. P. (1995). **Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM Handbook**. v.18, p. 20.
- BORIK, F., **Using test to define the influence of metallurgical variables on abrasion**, Metal Engineering Quarterly, 1972, p. 33-39
- BRAGACHINI, M.; BONETTO, L.A. **Cosecha de Trigo: Equipamiento, regulación y puestas a punto de la cosechadora – evaluación de perdidas**. Manfredi: INTA – EEAManfredi, 1990. 60p.
- BUCKLEY, Donald H; **Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrification**. Elsevier: Amsterdam, 623 p., 1981.



CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CANAVELIS, R. Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation des les turbomachines hydrauliques. **Bulletin de la Direction des Études et Recherches**, n.2, supl., 1967.

CASEIII. **Catálogos de peças**. 2017. Disponível em: < <https://www.caseih.com/latam/pt-br/products/tratores>>. Acessado em 12 de junho de 2018.

CLASS. **Agricultura e Máquinas**. 2002. Disponível em: < <http://www.agriculturaemaquinas.com/class.asp>>. Acessado em 12 de junho de 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Informações agropecuárias**. 2016. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro>>. Acessado em: 17 Maio. 2018.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **Cereais, fibras e oleaginosas**. 2017. Disponível em: <<http://www.cnabrazil.org.br/central-comunicacao/comissoes-nacionais/cereais-fibras-e-oleaginosas>>. Acessado em: 5 Jun. 2018.

DEERE&COMPANY. **Fundamentals of Machine Operation**. Ed. Deere&Company Service Publications: Moline, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Notícias**. 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/noticias>>. Acessado em: 16 Maio. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Trajetória da agricultura brasileira**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>>. Acessado em: 14 Nov 2018.

FERRANTE, M; Walter, Y. **A materialização da ideia: noções de materiais para design do produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GARCIA, A. M. **Cosechadoras de cereales: cosechas de granos y semillas**. Santiago, FAO, 1989, 31 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GREGORY, E. N. - **Selection of Materials for Hardfacing. Welding Surfacing and Hardfacing**. The Welding Institute. 88p, December 1980.

HENN, A, L, Érico; **Máquinas de fluido**. 3ª edição. Editora UFSM. 2012. Santa Maria, p.136.

HOHER, Junior Alberto, **Design de uma peneira rotativa para colhedora de grãos**,2011. 134f. Dissertação (mestrado) Universidade do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2010, Produção agrícola**. 2010. Disponível em:

<<https://censo2010.ibge.gov.br/noticiascenso.html?busca=1&id=1&idnoticia=1736&t=valor-producao-agricola-cai-5-3-2008-2009&view=noticia>>. Acessado em: 10 Jun. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e>>. Acessado em: 1 Jun. 2018.

KOTECKI D. J. e OGBORN, J. S. **Abrasion Resistance of Iron Based Hardfacing Alloy**. Welding Journal. p. 269s – 278s. (8) aug. 1995.

LEXICAR BRASIL. **Máquinas agrícolas e florestais - SLC 65-A**. 2018. Disponível em: <<http://www.lexicarbrasil.com.br/slc/>>. Acessado em: 5 Set 2018.

MACHADO, A. L. T. **Colhedoras de fluxo axial**. Pelotas, jul./ago. 2003. Disponível em: <<http://www.seednews.inf.br/portugues/seed74/artigocapa74.shtml>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

MARQUES, Paulo Villani; DE MELO LEITE, Ricardo Vinicius. **Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares**. 2009. 4 p. . (Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2009.

MASSEY FERGUSON. **Catálogo de produtos**. 2015. Disponível em: <<http://www.masseyferguson.com.br/>> . Acessado em: 11 de junho de 2018.

MORAES, Luiz Brenner et al. **Máquinas para colheita e processamento de grãos**. Ed única. Editora universitária UFPEL, p.33, 1996.

MUNDO MECÂNICO. **Mecanismos de desgaste dos metais**. 2017. Disponível em: <<http://mundomecanico.com.br/mecanismos-de-desgaste-dos-metais/>>. Acessado em: 10 Nov 2018.

NORMANN, T. W., LOEB, C. M., **Wear tests on grinding balls, Transactions of the metallurgical society of AIME**, 1948, Vol. 176, PAG. 490-526

OHIO HISTORY CENTRAL. **Bibliography of Obed Hussey**. 2018. Disponível em: <[http://www.ohiohistorycentral.org/w/Obed\\_Hussey](http://www.ohiohistorycentral.org/w/Obed_Hussey)>. Acessado em: 10 Set 2018.

PESKE, S.T.; ROSENTHAL, M.D.; ROTA, G.R.M. **Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos**. 3ª edição. Pelotas: Editora rua Pelotas, 2012. 573p.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (PMBOK Guide – 5ª Edição)**. Pennsylvania: Project management Institute, 2013. 595p.

REVISTA DIGITAL AEC WEB. **Tratores e colheitadeiras tornam-se mais tecnológicos**. 2015. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/tratores-e-colheitadeiras-tornamse-mais-tecnologicos-saiba-especificar\\_16934\\_39\\_0.pdf](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/tratores-e-colheitadeiras-tornamse-mais-tecnologicos-saiba-especificar_16934_39_0.pdf)>. Acessado em: 12 Ago 2018.

ROMANO, L. N.; **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. Florianópolis Ago. 2003. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0724.pdf> > Acesso em: 12 de junho 2018.

RURAL NEWS. **A importâncias das máquinas colhedoras para a agricultura brasileira.** 2018. Disponível em: < <http://www.ruralnews.com.br/visualiza.php?id=534>>. Acessado em: 10 Jun 2018.

SANTOS FILHO, A. G, DOS SANTOS, J. E. G. G.. **Apostila de máquinas agrícolas – UNESP.** Bauru/SP, 2001.

SANTOS, C. G. dos; DALLMEYER, A. U. **Colhedoras: Diferentes Sistemas de Trilha e Separação.** Revista a Granja. Porto Alegre, v. 792, p. 40-42, 2014.

SANTOS, J. de V.; BATISTA, P. B.; KIECKOW, F.. **Avaliação do desgaste do polietileno uhmw em meio abrasivo de arroz em casca.** Cuiabá: Cbecimat, 2014.

SANTOS, VANICE DOS; CANDELORO, ROSANA SANTOS - **Metodologia da pesquisa e do trabalho científico.** Edição única. Editora IESDE, 2006, p.43.

SCHELESKI, S. **Seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas.** Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil. 2015.

STACHOWIAK G.B.; Stachowiak G.W. **The Effects of Particle Characteristics on Three-body Abrasive Wear.** Elsevier Science B.V. v.249, p. 201-207, 2001.

STACHOWIAK, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. **Engineering Tribology.** 3.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 832 p., 2005.

STOETERAU. R. L. **Tribologia – EMC 5315 –** Universidade Federal De Santa Catarina, 2004.

VICENTE, CHAVERINI. **"Aços e Ferros Fundidos", Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos,** 4 Edição São Paulo, Associação Brasileira de Metais. 1977.

VILLÁBON, L; SINATORA. A. **Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha Para o Estudo do Comportamento Tribológico de Aços.** Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Lisboa, v. 13, p. 1-11, 2006

## ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE



Page 1 (1)

SSAB EMEA AB, SE-781 84 BORLÄNGE, Sweden

Inspection certificate EN 10 204 - 3.1	A02	Issuing department Quality inspection	A05	Purchaser order no 875	A07	Our order no 831491-1	A08	Invoice no 2668367	A19	Certificate no and date 15351591 2015-04-09	A03						
<b>Purchaser</b> SSAB SWEDISH STEEL LTDA R: CÉLIO JOSÉ FRANCESCHI,73 CHAPADA ARAUCARIA BRASILIEN 83707-748		<b>Product</b> HR wide strip sheets		<b>Marking</b> Manufacturer: MATERIAL ID		<b>Standard/rules</b> SSAB Steel grade HARDOX 400		<b>Deliv. Cond.</b> B04		<b>Internal code</b> B02							
<b>Quantity</b> B08 30		<b>Dimensions [mm]</b> T 6,3 W 1200 L 3000		<b>Weight [kg]</b> 5440		<b>Deliv. Cond.</b> B12		<b>Internal code</b> B16		<b>Internal code</b> B15							
<b>Consignee</b> SSAB SWEDISH STEEL LTDA R: CÉLIO JOSÉ FRANCESCHI,73 CHAPADA ARAUCARIA BRASILIEN 83707-748		<b>Consignee</b> SSAB SWEDISH STEEL LTDA R: CÉLIO JOSÉ FRANCESCHI,73 CHAPADA ARAUCARIA BRASILIEN 83707-748		<b>Customer marks</b> A06		<b>Customer marks</b> A06		<b>Customer marks</b> A06		<b>Customer marks</b> A06							
<b>MATERIAL ID</b> 60-8242-639899-01 , 60-8242-639899-02																	
Chemical composition <b>Heat no</b> 60-8242																	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Cokv	C95-C99	
.142	.17	1.30	.010	.001	.26	.07	.06	.01	.02	.01	.039	.001	.0016	.002	.43	C71-C92 Carbon equivalent etc Cokv = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5	
<b>Testtype</b> Hardness test		<b>Millicode</b> BQQ844		<b>Specimen position</b> C01 Longitudinal		<b>Direction</b> C02 Longitudinal		<b>Treat-ment</b> B05 Delivery condition		<b>Specimen type</b> C10		<b>Temp [degr C]</b> C03		<b>Test results</b> C32 HB Ave 419			
Production time: 2015-03-30																	
Customer article no: ITM01999																	
It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.		Z02		This certificate is produced with EDP and valid without signature Material Testing/ L Smedh/ M Eriksson/ L Söderqvist		Z01		A22		A04 <b>HARDOX®</b> WEAR PLATE www.hardox.com							

Fonte: SSAB.

## ANEXO B – PROPRIEDADES MECÂNICAS

**HARDOX®**  
WEAR PLATE

Data sheet 151br Hardox® 400 2018-02-12

**Hardox® 400**

### Descrição geral do produto

O aço versátil que resiste ao desgaste e à abrasão.

O Hardox® 400 é um aço de alta resistência à abrasão, com uma dureza nominal de 400 HBW. O Hardox® 400 é um versátil aço resistente ao desgaste. Graças à sua alta tenacidade, boa capacidade de dobra e soldabilidade, este aço pode ser usado em estruturas com desgaste moderado.

### Faixa de dimensões

O Hardox® encontra-se disponível como chapa grossa em espessuras de 4,0 – 130 mm e como tiras com espessuras de 2,0- 8,0 mm. A chapa Hardox® 400 está disponível em larguras de até 3350 mm e comprimentos de até 14630 mm. A chapa Hardox® 400 está disponível em larguras de até 1650 mm e comprimentos de até 16000 mm. Informações mais detalhadas sobre as dimensões são fornecidas no programa de dimensões.

### Propriedades mecânicas

Grau	Espessura (mm)	Dureza <sup>1)</sup> (HBW)	Limite de escoamento típico (MPa), não garantido
Hardox® 400 tiras	2,0- 8,0	370- 430	1100
Hardox® 400 chapa grossa	4,0- 130,0	370- 430	1100

<sup>1)</sup> Dureza Brinell, HBW, de acordo com a norma EN ISO 6506-1, em uma superfície usinada de 0,5 – 3 mm abaixo da superfície. No mínimo um corpo de prova por corrida e 40 toneladas.

A espessura nominal das chapas fornecidas não se desviará mais de +/- 15 mm da espessura do corpo de prova utilizado para o teste de dureza.

O Hardox® é temperado em toda a espessura. A dureza mínima do núcleo é de 90 % da dureza mínima garantida da superfície.

### Propriedades de impacto

Grau	Teste longitudinal, energia típica de impacto, Charpy do tipo V em corpo de prova de 10 x 10 mm
Hardox® 400 sheet & plate <sup>1)</sup>	45 J /-40 °C

<sup>1)</sup> Resistência ao impacto medida mediante acordo. No caso de espessuras entre 6- 11,9 mm, são utilizadas corpos de prova de Charpy tipo V de tamanho inferior. Testes de impacto de acordo com a norma ISO EN 148, por corrida e grupo de espessura. Média de três testes.

### Composição química (análise térmica)

Grau	C <sup>1)</sup> (max %)	Si <sup>1)</sup> (max %)	Mn <sup>1)</sup> (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr <sup>1)</sup> (max %)	Ni <sup>1)</sup> (max %)	Mo <sup>1)</sup> (max %)	B <sup>1)</sup> (max %)
Chapa grossa e tiras	0.32	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.004

O aço apresenta grãos refinados.<sup>1)</sup> Elementos de liga intencionais.

### Carbono equivalente CET(CEV)

Espessura (mm)	tiras 2,0 - 8,0	chapa grossa 4,0 - 7,9	chapa grossa 8,0 - 20,0	chapa grossa 20,1 - 32,0	chapa grossa 32,1 - 45,0	chapa grossa 45,1 - 51,0	chapa grossa 51,1 - 80,0	chapa grossa 80,1 - 130
Máx	0,28 (0,41)	0,26 (0,41)	0,31 (0,47)	0,32 (0,52)	0,33 (0,60)	0,40 (0,59)	0,43 (0,82)	0,50 (0,82)
Típico	0,26 (0,39)	0,24 (0,39)	0,28 (0,44)	0,29 (0,48)	0,31 (0,58)	0,38 (0,57)	0,41 (0,65)	0,48 (0,73)

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

**SSAB**