

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL CRISCUOLO

Avaliação do desgaste das facas de corte basal em colhedoras de cana-de-açúcar

São Carlos

2019

GABRIEL CRISCUOLO

Avaliação do desgaste das facas de corte basal em colhedoras de cana-de-açúcar

Monografia apresentada ao Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Fraga Farah

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C932a Criscuolo, Gabriel
Avaliação do desgaste das facas de corte basal em
colhedoras de cana-de-açúcar / Gabriel Criscuolo;
orientador José Benedito Marcomini; coorientador
Alessandro Fraga Farah. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais
e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Facas de corte basal. 2. Colheita mecanizada. 3.
Desgaste a três corpos. 4. Tratamento superficial. I.
Título.

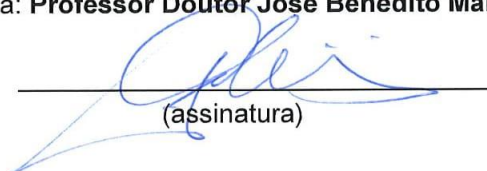
Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Gabriel Criscuolo
Título do TCC: Avaliação do desgaste das facas de corte basal em colhedoras de cana-de-açúcar
Data de defesa: 14/06/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor José Benedito Marcomini (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Alessandro Fraga Farah	Aprovado
Instituição: Fatec Sertãozinho -	
Pesquisador Luís Henrique Pizetta Zordão	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor José Benedito Marcomini**


(assinatura)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

Aos meus pais, José Eduardo e Claudete, pelo apoio, suporte e carinho.

À minha noiva Andréa, pelo amor, carinho e ajuda.

À professora Dra. Luralice de Campos F. Canale, pela orientação inicial.

Ao professor Dr. Alessandro Fraga Farah, pelo auxílio prestado nos ensaios laboratoriais e orientação nos ensaios de campo.

Ao professor Dr. José Benedito Marcomini, pela ajuda, orientação e amizade.

Aos operários da empresa Agrícola Criscuolo, pelo cuidado com o material de pesquisa e por mudar sua rotina de trabalho para a realização dos ensaios de campo.

À empresa Agricorte, por ter fornecido as amostras de SAE 5160 e explicado seus processos de fabricação.

Aos técnicos da Fatec de Sertãozinho e ao técnico Alberto Cury Nassour, responsável pelo Laboratório de Microscopia Óptica e Preparação Metalográfica de Pesquisa (EESC-USP), pela ajuda com as análises realizadas.

Ao departamento de Engenharia de Materiais, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, por todo auxílio prestado.

Agradeço a todos que participaram da elaboração deste trabalho.

RESUMO

CRISCUOLO, G. **Avaliação do desgaste das facas de corte basal em colhedoras de cana-de-açúcar**. 2019. 77 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

A mecanização do corte da cana-de-açúcar crua traz grandes benefícios, visto que o trabalho manual necessita de um grande número de pessoas como mão de obra e depende da queima da cana-de-açúcar para otimizar o processo. As máquinas colhedoras de cana-de-açúcar têm gerado grandes perdas quantitativas e qualitativas no produto final. Estas perdas são provenientes do erro humano de manuseio e por não atingir todo o potencial de utilização do maquinário, o qual se desgasta muito rapidamente, perdendo seu rendimento e aumentando os custos de produção. Um dos motivos da é a seleção dos materiais utilizados para desempenhar determinadas funções na colhedora. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo testar os seguintes aços comerciais que constituem as facas de corte basal utilizadas nas colhedoras de cana-de-açúcar: SAE 5160, SAE 1045, SAE 15B30 tratada termicamente e SAE 15B30 com (tratamento superficial DURMAT WC), produto composto de partículas de Carboneto de Tungstênio Sinterizado (50%) e uma matriz à base de NiCrBSi (50%). As peças foram testadas em campo e em laboratório, os resultados foram comparados para determinação do material e do processo de fabricação mais adequado para a peça. A peça fabricada com o aço SAE 5160 apresentou melhor resultado em campo, apresentando uma vida útil de mais de 44 horas de serviço e mantendo as condições ideais de corte, porém obteve o pior resultado no teste de desgaste a três corpos no laboratório.

Palavras-chave: Facas de corte basal 1. Colheita mecanizada 2. Desgaste a três corpos 3.

Tratamento superficial 4.

ABSTRACT

CRISCUOLO, G. **Evaluation of the wear of the basal cutting knives in sugarcane harvesters**. 2019. 77 p. Monograph (Course Completion Work) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The mechanization of cutting raw sugarcane brings great benefits, since manual labor requires many people as labor and depends on the burning of sugarcane to optimize the process. Sugar cane harvesters have generated large quantitative and qualitative losses in the final product. These losses are due to the human error of handling and not to reach the full potential of use of the machinery, which wears out very quickly, losing its yield and increasing the costs of production. One of the reasons for this poor design is in the selection of materials used to perform certain functions in the harvester. In this context, this work aims to test the following commercial steels that constitute the basal cutting knives used in sugarcane harvesters: SAE 5160, SAE 1045, SAE 15B30 heat treated and SAE 15B30 with (surface treatment DURMAT WC), a product composed of Sintered Tungsten Carbide particles (50%) and a NiCrBSi-based matrix (50%). The parts were tested in the field and in the laboratory, the results were compared for determination of the material and the manufacturing process more suitable for the part. The part manufactured with SAE 5160 steel presented better results in the field, with a service life of more than 44 hours of service and maintaining the ideal conditions of cutting, but obtained the worst result in the test of wear to three bodies in the laboratory.

Keywords: Basal cutting knives 1. Mechanized harvesting 2. Three body desorption 3. Surface treatment 4.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estágios de revenimento.	27
Figura 2 - Aumento na espessura do fio de corte na faca de corte basal.	28
Figura 3 - Touceira sobre o camalhão (a); sulco fundo e impacto das facas no solo (b).	31
Figura 4 - Condições ideais de corte (a) e (b); dilaceramento dos colmos (c).	31
Figura 5 - Principais componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar combinada.	33
Figura 6 - Facas ilustradas são respectivamente: SAE-5160 (a), SAE-15B30 tratada termicamente (b), SAE-1045 (c) e SAE-15B30 revestida (d).	36
Figura 7 - Espectrômetro Modelo. SPECTROMAX x Fatec Sertãozinho.	38
Figura 8 - Durômetro Analógico pertencente à Fatec de Sertãozinho.	38
Figura 9 - Amostras preparadas e embutidas em baquelite.	39
Figura 10 - Embutidora Arotec Pre-30 (a); Cortador Arotec Arocor 60 (b); Politriz Arotec Aropol E (c).	40
Figura 11 - Esquema de funcionamento do equipamento de ensaio abrasômetro.	41
Figura 12 - Amostras para o teste de desgaste a três corpos. SAE 1045 (a); SAE 15B30 com revestimento superficial (b); SAE 5160 (c); SAE 15B30 tratado termicamente.	42
Figura 13 - Colhedora John Deere modelo 3522.	43
Figura 14 - Amostras fixadas no disco do cortador de base.	44
Figura 15 - Desenho da faca com as referências usadas para as medidas no teste de campo. Feito no Solidedge ST9.	44
Figura 16 - Molde em cartolina com base em uma faca virgem (a); Amostra posicionada sobre a cartolina utilizando um paquímetro como referência (b).	46
Figura 17 - Cálculo das áreas desgastadas, fazendo uso do software ImageJ.	46
Figura 18 - Análise de inclusões fazendo uso do software ImageJ. Imagem da amostra antes da aplicação de filtros que ressaltam as inclusões em (A). Imagem da amostra após a aplicação de filtros em (B).	48
Figura 26 - Análise de inclusões da amostra SAE-5135.	50
Figura 27 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-1530.	51
Figura 28 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-61B50 revestida.	52
Figura 29 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-61B50 tratada termicamente. ...	53

Figura 30 - Análise de inclusões fazendo uso do software ImageJ. Imagens das amostras antes da aplicação de filtros que ressaltam as inclusões, do lado esquerdo, em contraste com imagens das amostras após a aplicação de filtros, do lado direito.	54
Figura 31 - Gráfico do número de partículas por unidade de área.	56
Figura 32 - Gráfico do tamanho médio de partícula em μm	56
Figura 19 - Dureza das peças em HRc.	59
Figura 20 - Perda de Massa em função do tempo de ensaio.	60
Figura 21 - Aspecto visual das peças após aproximadamente 7 horas de trabalho.	62
Figura 22 - Peça tida como SAE-61B50 revestida, com aproximadamente 21 horas de trabalho, indicado o lascamento do revestimento arrastando o metal base (A). Revestimento a base de WC/Co, com aumento de 10x visto no microscópio óptico, com trincas indicadas (B).	62
Figura 23 - Peça tida como SAE-5135 com aproximadamente 21 horas de trabalho, em destaque ponta entortada (A). Mesma peça 3,5 horas depois, com destaque a correção devido a abrasão (B).	63
Figura 24 - Gráfico das médias das larguras das amostras.	67
Figura 25 - Gráfico das médias ponderadas das áreas desgastadas no teste de campo em mm^2	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 15B30.	23
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 15B30.....	23
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 5160.	24
Tabela 4 - Composição química dos aços AISI 1045 (SAE J403) (% massa), ¹	24
Tabela 5 - Parâmetros de largura e diâmetro de inclusão (métodos A à D).	48
Tabela 6 - Composição química da peça tida como SAE-1045 (SAE-1530).....	49
Tabela 7 - Composição química da peça tida como SAE-5160 (SAE-5135).....	49
Tabela 8 - Composição química da peça tida como SAE-15B30 (SAE-61B50).	50
Tabela 9 - Análise de partículas calculadas com auxílio do ImageJ.	55
Tabela 10 – Resultado médio das durezas das peças analisadas.	59
Tabela 11 - Variação das larguras, em milímetros, frente ao desgaste gerado pelo tempo de serviço.....	64
Tabela 12 - Variação média das larguras frente ao desgaste gerado pelo tempo de serviço (excluindo as últimas três medidas).	66
Tabela 13 - Áreas desgastada no teste de campo calculadas com auxílio do ImageJ.	68
Tabela 14 -Médias ponderadas das áreas desgastadas no teste de campo em mm ²	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVO.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar	21
3.2. Facas de corte de base.....	22
3.3. Aços das facas.....	22
3.3.1. Aço SAE 15B30	23
3.3.2. Aço SAE 5160.....	24
3.3.3. Aço AISI 1045	24
3.4. Tratamento térmico dos aços das facas.....	24
3.4.1. Têmpera.....	25
3.4.2. Revenimento.....	26
3.4.3. Recozimento.....	27
3.5. Desgaste	28
3.6. Soldagem de Revestimento Duro	29
3.8. Influência do sistema de preparo do solo e plantio no desgaste das facas de corte basal	30
3.9. Desenvolvimento da colhedora.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1. Materiais utilizados.....	35
4.2. Ensaios	37
4.3. Espectrometria de Emissão Óptica (OES)	37
4.5. Ensaio de Dureza	38
4.6. Ensaio Metalográfico	39
4.7. Ensaio de Desgaste	40
4.8. Teste de Campo	42
4.9. Determinação da Área de Material Desgastado.....	45
4.10. Análise de inclusões.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1. Espectrometria de Emissão Óptica (OES)	49

5.2. Análise de Inclusões	50
5.2.1. Análise de Inclusões via software	54
5.3. Análise Metalográfica.....	57
5.4. Ensaio de Dureza	59
5.5. Ensaio de Desgaste	60
5.6. Teste de Campo	61
5.7. Determinação da Área de Material Desgastado.....	67
6. CONCLUSÃO.....	71
7. REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

As máquinas colhedoras de cana-de-açúcar crua têm apresentado níveis de perdas elevados tanto na qualidade do serviço final, quanto em termos quantitativos na produção. Tais perdas podem ser geradas por erro humano, condições irregulares do terreno, variedades não adaptadas ao sistema de produção, velocidade linear da colhedora, desgaste dos componentes que realizam o corte, umidade excessiva do solo, porte do canavial, manobras sobre a soqueira, dentre outros fatores (NEVES et al., 2006).

Os problemas com a colheita mecanizada de cana-de-açúcar, gerados pelas interações solo-máquina-planta, como a redução da vida útil das soqueiras e as perdas de cana no campo, são alvos de estudos que visam à otimização do processo. Um dos componentes que precisam frequentemente de manutenção, e por vezes é o causador destes problemas, é o cortador de base, que devido à imprecisão do controle de sua altura em relação ao solo para que seja efetuado o corte da planta, danifica a soqueira, refletindo em perdas significativas na safra seguinte devido à diminuição da população de colmos (VOLPATO, 2001).

Além das soqueiras, que são destruídas ou removidas mecanicamente, a deterioração causada devido aos danos por cisalhamento dos tocos provoca perdas consideráveis ao facilitar o ataque de pragas e doenças. No processamento da matéria-prima, os riscos com o cortador de base são por fragmentos metálicos sujeitos à contaminação e à incorporação na terra, caso as lâminas dos discos dos cortadores trabalhem em contato ou abaixo da superfície do solo, gerando danos a outros equipamentos que venham a trabalhar no processamento da cana-de-açúcar e no preparo da terra (VOLPATO, 2001).

Segundo Cassia et al. (2014), o desgaste dos componentes do mecanismo de corte basal, composto por discos rotativos com múltiplas lâminas de corte, tem grande influência e importância nos danos e abalos causados às soqueiras. Os danos aos colmos das soqueiras aumentam à medida que ocorre o desgaste do fio de corte. Assim, há um incremento no índice de danos às soqueiras, o que potencialmente prejudica rebrota do canavial.

Neste contexto, em uma área não otimizada, é de fundamental importância testar os materiais que constituem as facas de corte basal disponíveis comercialmente, com a finalidade de identificar qual material e o processo de fabricação melhor se adequa às condições de serviço.

2. OBJETIVO

Avaliar o desempenho dos aços elencados abaixo, utilizados nas facas de corte basal de colhedoras de cana-de-açúcar John Deere modelo 3522, a fim verificar a relação entre o desgaste das amostras em campo com os ensaios laboratoriais, que visam prever o comportamento das facas em serviço:

- SAE 5160, sem tratamento térmico;
- SAE 1045, sem tratamento térmico;
- SAE 15B30, tratado termicamente;
- SAE 15B30, com tratamento superficial (DURMAT WC), composto de partículas de Carboneto de Tungstênio Sinterizado (50%) e uma matriz à base de NiCrBSi (50%).

Dessa forma, será possível constatar se a sequência de ensaios laboratoriais é suficiente para prever o comportamento das facas em campo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com estimativas, na safra 2017/2018, de 8.77 milhões de hectares de área a ser colhida e de 646.4 milhões de toneladas produzidas. Isso demonstra a grande importância que o setor apresenta no agronegócio brasileiro e o aumento da demanda mundial por etanol, que somado às grandes áreas cultiváveis e às boas condições edafoclimáticas torna o país promissor para a exportação desse produto renovável (CONAB, 2018).

No Brasil, a colheita manual da cana-de-açúcar foi utilizada até meados dos anos 90 e substituída pela colheita mecanizada, a qual com a utilização da palha para a geração de energia nas usinas e para a cobertura do solo colaborou para a melhora das condições dos trabalhadores durante a colheita, reduziu os custos da produção da lavoura e os impactos ambientais (FURTADO, 2002; DRUDI, 2017). Desde então, ao longo dos anos, tornou-se irreversível, ao passo que favorece o desenvolvimento inicial da cultura com seu elevado nível de qualidade operacional (VOLTARELLI et al., 2013).

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar aprimorou a gestão da produção do corte até o transporte, então realizado com constância no fluxo de carga nas paradas eventuais na indústria sem a necessidade de queimar a palha no canavial (RAMOS, 2013). A eficiência gerencial das empresas é primordial para o bom desempenho da colheita mecanizada, tendo em vista o elevado custo do sistema produtivo. Investimentos em tecnologias de precisão, capacitação dos operadores e em pesquisas, além de reduzir os custos operacionais, auxiliam no melhor desempenho e desenvolvimento das colhedoras (RAMOS et al., 2016).

Segundo Ripoli; Ripoli (2009) e Ramos et al. (2014), a qualidade operacional na colheita mecanizada de cana-de-açúcar é avaliada de acordo com os seguintes parâmetros:

- Eficácia de capacidade operacional e nas operações de limpeza da matéria-prima;
- Qualidade tecnológica do material colhido;
- Índice de perdas de matéria-prima industrializável durante a colheita;

As máquinas utilizadas na colheita mecanizada podem causar elevados níveis de perdas qualitativas e quantitativas durante a operação devido a diversos fatores como o descuido do operados, pelas más condições do terreno (dificultando a movimentação das

máquinas), porte do canavial, teor de água do solo, velocidade de deslocamento da colhedora, entre outros aspectos (NEVES et al., 2006; VOLTARELLI et al., 2015).

3.2. Facas de corte de base

O corte de base é constituído por um cortador de discos duplos rotativos e funcionam de acordo com o princípio da inércia por impacto, com lâminas múltiplas (facas) que devem realizar o corte mais perfeito possível a fim de assegurar o melhor aproveitamento da lavoura, com menores perdas e índices de contaminação da matéria-prima, garantindo a rebrota do canavial sem prejudicar a produtividade das futuras safras (NEVES, et al., 2006; SANTOS, 2008; SILVA et al., 2008; VOLTARELLI et al., 2017).

O corte basal pode proporcionar a incorporação do solo à matéria-prima e ser o responsável por parte das perdas na colheita. Somado ao desgaste das lâminas de corte, aumenta os índices de danos e de abalos causados às soqueiras. Esta situação pode ser agravada ao diminuir o ângulo de ataque da faca ao cortar os colmos (SESTARI et al., 20 ; VOLTARELLI et al., 2017).

Mello (2011), na avaliação de um sistema de corte sem impacto com lâminas serrilhadas e que poderiam ser adaptadas em qualquer colhedora de cana-de-açúcar, concluiu que o sistema avaliado apresentou menores índices de danos e abalos às soqueiras e perdas de matéria-prima. Assim, a utilização dessas lâminas se torna mais uma alternativa para garantir a eficiência do corte basal da cana-de-açúcar. Pesquisas na mesma linha são cada vez mais realizadas a fim de proporcionar maior eficiência na operação.

3.3. Aços das facas

Aços são ligas ferrosas que contém teor de carbono variando entre 0,008 a 2,14%, podem conter outros elementos residuais do processo de produção ou outros elementos de liga que são adicionados propositalmente de acordo com as características desejadas. Quando o aço não possui outros elementos de liga, é denominado aço-carbono, caso contrário, é designado aço-liga. O termo ferro fundido é utilizado para designar genericamente as ligas de aço-carbono com teores de carbono acima de 2,14% (CALLISTER, 2012; LAM; ITOYAMA, 2015).

3.3.1. Aço SAE 15B30

O aço SAE 15B30 é um aço com percentual médio de carbono e mínimo de 0,0005% de Boro, o que gera a propriedade de boa conformabilidade e tenacidade do aço quando temperado (PRETI, 2008; VENDRAMINE, 2012).

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 15B30.

Elementos (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	B
Min.	0,27	1,15	0,15	-	-	-	-	-	-	0,010	0,0005
Máx.	0,35	1,50	0,35	0,003	0,0025	0,20	0,06	0,30	0,25	0,06	0,003

Fonte: Adaptado de Preti (2008) e Vendramine (2012).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 15B30.

Propriedades Mecânicas	Faixa
Resistência ao escoamento	320-400
Resistência à tração	560-640
Alongamento (% em 200mm)	16-28
Dureza (HB)	160-200

Fonte: Adaptado de Preti (2008) e Vendramine (2012).

Segundo Vendramine (2012), o aço 15B30 apresenta diversas aplicações para os segmentos de máquinas e implementos agrícolas, como:

- Facas para corte de cana;
- Colheita e descaroçamento de algodão;
- Lâminas roçadeiras de grama;

Também é utilizado na confecção de ferramentas manuais, como picaretas e enxadas, ferramentas para construção civil, como as espátulas e desempenadeiras, e autopeças, como as linguetas de cinto de segurança, componentes de embreagem e presilhas para contrapeso de roda automotiva.

3.3.2. Aço SAE 5160

Este aço possui alta temperabilidade e boa ductilidade, sendo amplamente utilizado na fabricação de eixos automotivos, molas planas e molas de corte. Na condição temperada é capaz de atingir durezas de 63, mantendo a sua dureza após o revenimento (DUTRA, 2015).

Tabela 3 - Composição química do aço SAE 5160.

%C	%Mn	%P, Max	%S, Max	%Cu, Max²	%Si,	%Cr,	%Mo, Max²
0,56-0,64	0,75-1,00	0,030	0,040	0,13	0,15-0,35	0,70-0,90	0,04

Fonte: Adaptado dos resultados das composições dos aços fornecidos pela Villares.

3.3.3. Aço AISI 1045

Tabela 4 - Composição química dos aços AISI 1045 (SAE J403) (% massa),¹.

%C	%Mn	%P, Max	%S, Max	%Cu, Max²	%Ni, Max²	%Cr, Max²	%Mo, Max²
0,43-0,50	0,60-0,90	0,030	0,050	0,35	0,25	0,20	0,06

Fonte: Adaptado de SAE International (2009) e Dagnese (2012).

¹ Quando limites de Silício são requeridos para barras e semi-acabados, as seguintes faixas são comumente usadas: 0,10% a 0,20%; 0,15% a 0,35%; 0,20% a 0,40% ou 0,30% a 0,60%.

² Elementos residuais para aplicações específicas devem ser acordados entre fornecedor e comprador. Valores da tabela são indicados quando não há outras especificações.

3.4. Tratamento térmico dos aços das facas

Tratamento térmico é o nome dado ao conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que o aço é submetido. Tal tratamento é efetuado sob condições controladas de atmosfera, temperatura, tempo e velocidade do resfriamento. O objetivo é a alteração das propriedades do aço segundo as características desejadas em projeto. Visto que as propriedades as propriedades variam de acordo com a estrutura, os tratamentos térmicos modificam a estrutura inicial do aço até que sejam atingidas as estruturas necessárias para as propriedades desejadas (LAM; ITOYAMA, 2015).

Segundo Spectru (2013), os principais objetivos dos tratamentos térmicos são:

- Aumento da resistência mecânica;
- Aumento ou diminuição da dureza do aço;
- Melhora da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, propriedades de corte, resistência à corrosão e ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas;

3.4.1. Têmpera

O processo de têmpera tem como objetivo a alteração da microestrutura e consequentemente as propriedades mecânicas do aço, fornecendo dureza e resistência ao componente. Um dos piores problemas neste processo é a distorção, causada por fenômenos isolados ou ainda por suas interações (CHIQUETI, 2009).

O objetivo da têmpera é a obtenção de uma fase metaestável que promove o endurecimento do aço. Esta fase é a martensita: estrutura tetragonal de corpo centrada, deformada e saturada de carbono nos interstícios. A reação martensítica é uma transformação adifusional e a composição química é a mesma da austenita de origem. É classificada como transformação atérmica, pois a fração de martensita formada só depende da temperatura atingida e não do tempo nesta temperatura (MARCOMINI, 2012).

Osmond (1895) cunhou o termo martensita para microestrutura de um aço temperado, em homenagem a um metalurgista Adolf Martens. Christian (1965) chamou a transformação martensítica de transformação militar, pois ocorria de uma maneira organizada, diferente de uma transformação civil, desordenada. Clarence Zener (1946) escreveu o artigo “*Kinetics of the decomposition of austenite*”, marco na cinética de transformações de fases em aço. Propôs o primeiro modelo matemático da cinética de transformações de fases, incluindo a transformação martensítica (MARCOMINI, 2012).

Atualmente, o mecanismo mais aceito para a transformação martensítica é o de Wechsler, Lieberman e Read (MARCOMINI, 2008):

- a) Uma distorção de Bain transformando a estrutura FCC em BCC, com todos os planos sendo deformados-compressão de c (z) e expansão dos eixos a' ;
- b) Uma deformação por cisalhamento que mantém a estrutura do cristal (escorregamento ou maclagem);

c) As deformações anteriores ocorrendo simultaneamente dão origem a um plano distorcido, porém os planos não distorcidos da fase austenítica e da fase martensítica ainda apresentam orientações diferentes;

d) Uma rotação do reticulado que permite que os planos não distorcidos fiquem com a mesma orientação, permitindo a coerência entre matriz e martensita.

3.4.2. Revenimento

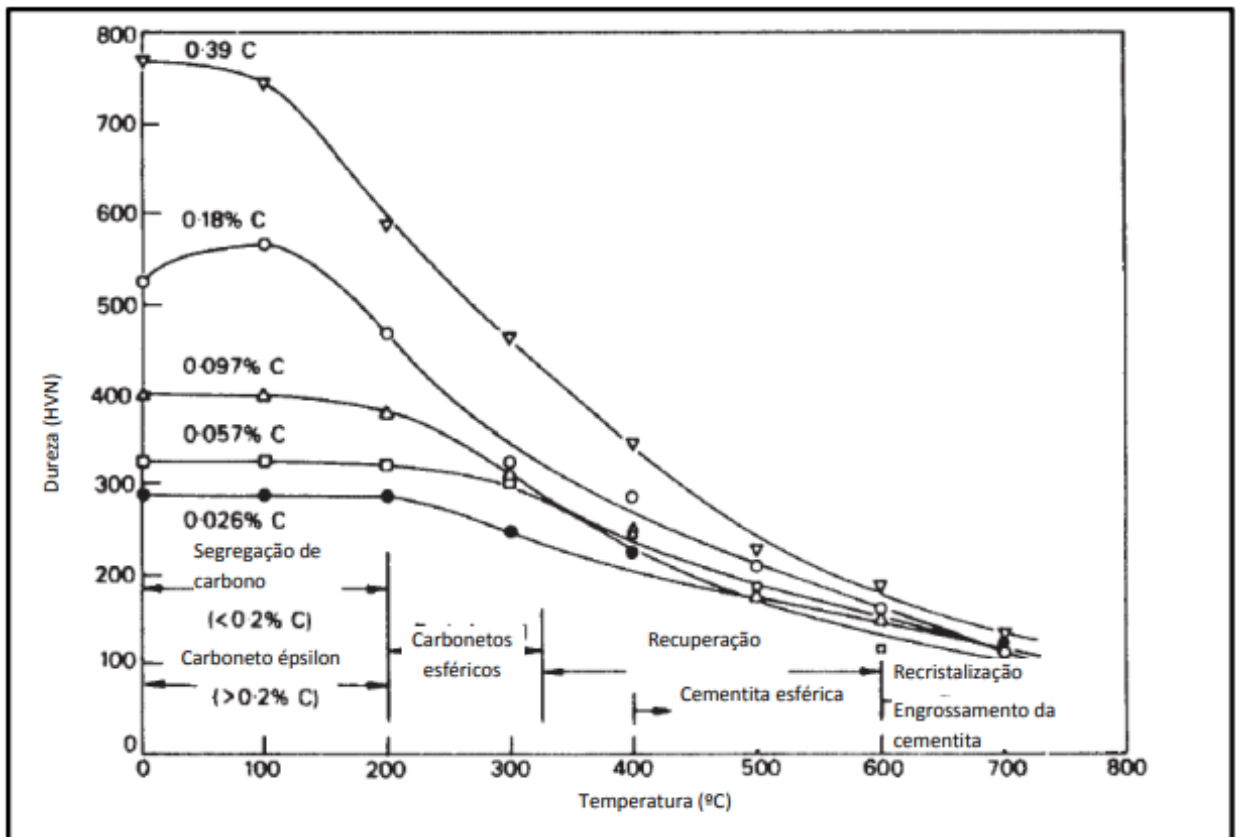
A queda de temperatura durante o resfriamento na têmpera pode promover transformações estruturais e, conseqüentemente, acarretar o surgimento de tensões internas. Portanto, o tratamento de revenimento, que é realizado complementarmente à têmpera, é necessário e especialmente importante na fabricação de aços para molas. O revenimento consiste em aquecer o material temperado entre 250 °C e 650 °C por um determinado tempo, a fim de aumentar a ductilidade e a elasticidade do material (CALLISTER, 2012; PIMENTA et al., 2017).

Ocorrem cinco categorias de reações durante o revenido, que são denominadas de os cinco estágios do revenido. No primeiro estágio, entre a temperatura ambiente e 200°C, ocorre a precipitação do carboneto ϵ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) na martensita e a perda da tetragonalidade da mesma. Com isso, o teor de carbono da martensita diminui, resultando em uma estrutura bifásica de martensita de baixo carbono e carbonetos. Ocorre então a dissolução do carboneto ϵ entre 200°C e 350°C, o qual é substituído pela cementita. A martensita perde a tetragonalidade e transforma-se em ferrita a partir de 100°C (ZENER, 1946; MARCOMINI, 2012).

O segundo estágio é caracterizado pela decomposição da austenita retida em bainita, entre 100°C e 300°C. No terceiro estágio do revenido, levando em conta aços cuja estrutura é essencialmente martensítica entre 200°C e 250°C, ocorre a precipitação de carbonetos de transição, que por volta de 400°C se dissolve e dá lugar a um precipitado esferoidal de cementita, definindo assim o quarto estágio (ZENER, 1946; MARCOMINI, 2012).

No quarto estágio do revenido, sua principal característica é o engrossamento de carbonetos. Para aços ligados, quando revenidos em temperaturas menores que 540°C, pode ocorrer a precipitação de carbonetos coerentes do tipo $(\text{Fe},\text{M})_3\text{C}$, em que M é um átomo substitucional, levando a um endurecimento secundário. Essa precipitação é conhecida como quinto estágio do revenido. A figura 1 é um resumo dos estágios do revenimento em um gráfico (HONEYCOMBE, 1982; MARCOMINI, 2012).

Figura 1 - Estágios de revenimento.



Fonte: Honeycombe (1982).

3.4.3. Recozimento

É um processo em que o aço é aquecido a temperaturas acima da zona de austenitização. É realizado com a finalidade de alcançar um ou mais dos seguintes objetivos: remover tensões devidas ao tratamento mecânico a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, entre outros (SPECTRU, 2013; DA SILVA et al. 2016).

Como é realizado em altas temperaturas, o tratamento por recozimento pode produzir uma camada de óxido na superfície do material que é chamada de “carepa”, esta deve ser removida por processos de decapagem. O resfriamento deve ser suficientemente rápido para que não ocorra precipitação de fases indesejáveis (NILSSON, 1992; MARTINS, 2017).

3.5. Desgaste

O desgaste dos componentes do mecanismo de corte basal tem grande influência nos danos e abalos causados às soqueiras, podendo ocasionar maior dilaceramento dos tocos, facilitando o ataque de doenças e pragas e chegando a destruir ou remover mecanicamente as soqueiras. Como consequência dos danos e abalos sofridos pelas soqueiras, ocorre a redução da produção de cana-de-açúcar nos anos subsequentes (SALVI et al., 2007; VOLTARELLI et al., 2015).

O desgaste das facas de corte basal tem grande relação com os índices de danos e abalos às soqueiras, isso demonstra a importância dos estudos que analisam o desgaste do fio de corte para que haja melhoria no sistema de produção da colheita da lavoura. Segundo Cassia et al. (2014), o aumento da espessura do fio de corte, como mostrado na figura 2, ocasiona um incremento no índice de danos e abalos às soqueiras, prejudicando substancialmente a rebrota futura do canavial.

Figura 2 - Aumento na espessura do fio de corte na faca de corte basal.



Fonte: Autoria própria.

3.6. Soldagem de Revestimento Duro

Segundo a norma técnica AWS A3.0 (2010), *Standard Welding Terms and Definitions*, a definição de revestimento superficiais é a adição de um material com propriedades de interesse sobre a superfície de um substrato, com a finalidade de melhorar suas propriedades, podendo ser aplicado por soldagem, brasagem ou aspersão térmica.

Wainer et al. (2004) destaca os principais os processos de soldagem e de deposição de revestimento, como a soldagem a arco elétrico, usando eletrodos revestidos consumíveis na forma de varetas compostas por uma alma metálica de composição específica para cada aplicação e material a ser soldado. Com a formação do arco elétrico, ocorre a fusão da alma e do revestimento e, como o revestimento é menos denso que o metal fundido da alma, há a formação de uma camada sobre o cordão de solda, impedindo a difusão de gases atmosféricos para o metal. Nesse processo, temos a geração de gases que protegem a poça de fusão e, em alguns casos, o revestimento dos eletrodos revestidos pode introduzir na poça de fusão o elemento químico especial de interesse.

Em outros processos, onde não há um revestimento protetor que venha a impedir a solubilização dos gases atmosféricos para a zona termicamente afetada, deve-se então realizar a soldagem em um ambiente de atmosfera controlada ou com uso de gases inertes aplicados no momento da soldagem na poça de fusão (WAINER et al., 2004).

Segundo Mondenesi (2012), quando se faz uso da soldagem para a recuperação superficial de um componente, tem-se a deposição de um revestimento metálico sobre o local onde o agente agressivo atua. Um dos processos de revestimento superficial mais utilizado é o processo por fusão, que consiste na aplicação localizada de uma fonte de calor, para uma diluição por fusão do metal de base com o metal de adição, de forma controlada, formando uma região onde se encontra o metal de revestimento e uma região intermediária, que é uma mistura do metal de revestimento e o metal base.

Segundo Batista et al (2004), o revestimento com uso de metal duro pode ser aplicado tanto em recuperação de peças desgastadas, quanto em peças novas, atuando na prevenção do desgaste. Para a escolha do material de revestimento, deve-se levar em consideração o custo do processo, bem como o custo do material de revestimento, a área a ser revestida e o mecanismo de desgaste.

3.8. Influência do sistema de preparo do solo e plantio no desgaste das facas de corte basal

Alguns aspectos no preparo do solo, como no plantio e adubação, têm grande influência na qualidade do corte basal e no desgaste dos componentes da colhedora. Há uma relação direta com o aumento dos desníveis, buracos, presença de obstáculos, como pedras e tocos, que também aumentam as dificuldades de operação das colhedoras, refletindo em maiores perdas de matéria-prima, aumento das impurezas no produto final e de manutenção das máquinas devido ao desgaste (VOLPATO, 2001; RIPOLI; RIPOLI, 2002).

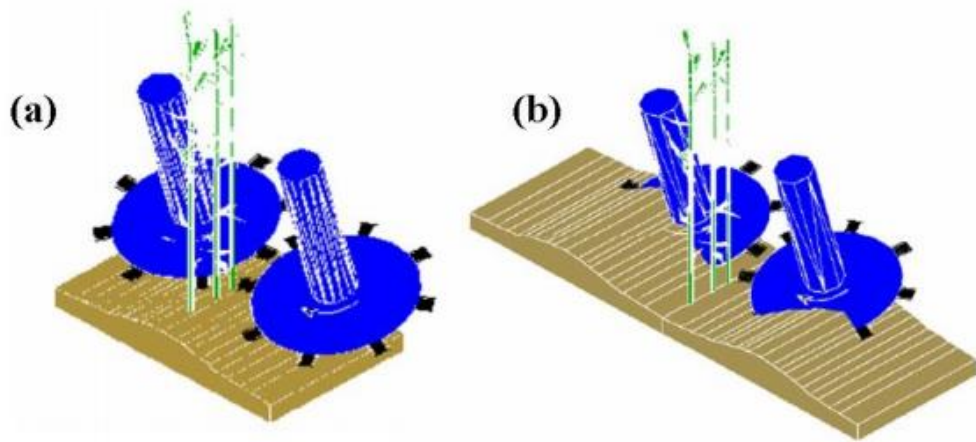
O conjunto cortador basal possui um sistema de acionamento hidráulico que permite variação na altura do corte, sendo projetado para cortar colmos acima do nível do terreno, com a touceira devendo estar elevada sobre um leve camalhão, figura 3 (a). Devido à implementação relativamente recente da colheita mecanizada como forma predominante de colheita da cana-de-açúcar, essa condição ideal da touceira é raramente encontrada, pois as práticas de preparo do solo em uso no Brasil não são otimizadas e voltadas para a colheita mecanizada (VOLPATO, 2001; RIPOLI; RIPOLI, 2002).

A condição ideal para o corte da cana-de-açúcar é dificultada na primeira colheita devido à forma do seu plantio que é realizado em sulcos e a uma profundidade média de 30 cm, o que normalmente dificulta a operação do mecanismo de corte e alimentação da colhedora, necessitando de uma operação adicional para o nivelamento do solo (MAGALHÃES; BRAUNBECK, 1998).

Quando o nivelamento do solo não ocorre, a cana encontra-se dentro do sulco, figura 3 (b), não havendo possibilidade de existir as condições ideais de corte, como mostrado na figura 4 (a) e (b), resultando no dilaceramento do internódio do que, propriamente, um cisalhamento, que seria o esperado (RIPOLI; RIPOLI, 2002).

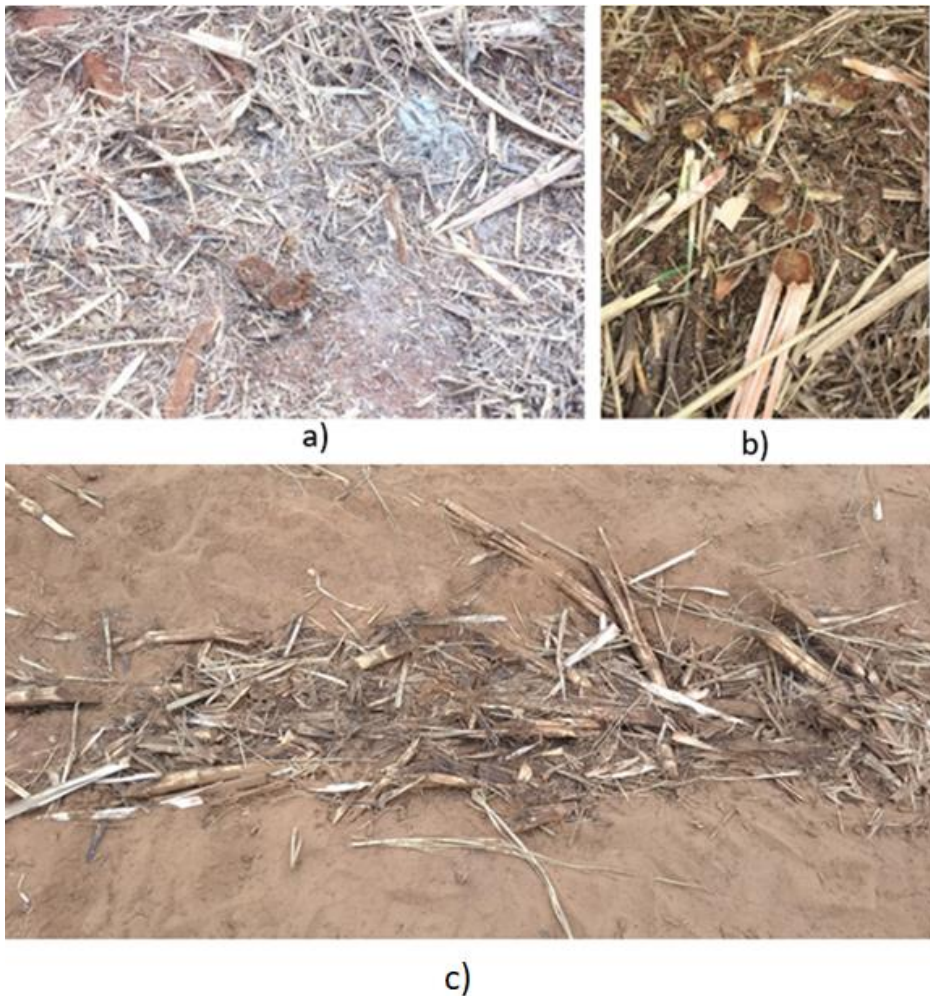
A razão para o dilaceramento da touceira, figura 4 (c), tem como causa principal a menor resistência de sustentação pelo colmo ao corte, visto que ele está mais distanciado da raiz e o desgaste por abrasão das facas, por entrar em contato com o solo. Tal situação gera um corte não homogêneo, deixando um toco alto e fragmentado, aumentando as perdas no campo e a probabilidade de ataques de insetos e doenças na soqueira, além de incorporar solo à matéria-prima colhida (RIPOLI; RIPOLI, 2002).

Figura 3 - Touceira sobre o camalhão (a); sulco fundo e impacto das facas no solo (b).



Fonte: Adaptado de Volpato (2001).

Figura 4 - Condições ideais de corte (a) e (b); dilaceramento dos colmos (c).



Fonte: Adaptado de Corte de base – Case IH MultRow.

3.9. Desenvolvimento da colhedora

Segundo Furlani Neto (1984), o primeiro relato do desenvolvimento de uma máquina capaz de realizar o corte da cana-de-açúcar teve seu registro de patente em 1854 no Havaí. A máquina era impelida por tração animal e, além de cortar a cana, removia folhas e palhas dos colmos com escova de arame, o que foi considerado um grande avanço.

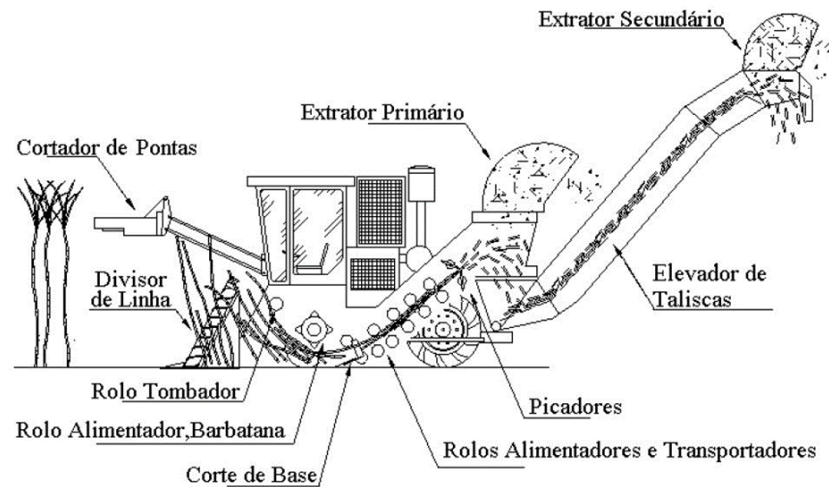
Em meados de 1950, surgiu, na Austrália, um novo conceito que revolucionou a mecanização da colheita da cana-de-açúcar e viabilizou seu uso. A máquina cortava, picava, limpava e carregava a matéria-prima. Tais máquinas substituíram inteiramente o sistema de corte mecânico da cana em 1960, pois a colhedora picava o produto final e facilitou o seu carregamento. Em 1970, 95% da colheita da cana-de-açúcar na Austrália já eram realizadas por colhedoras combinadas, o que tornou o país uma referência em tecnologia e difusor do conceito para o mundo (PINTO, 1977).

Segundo Ripoli e Villa Nova (1992), a Massey Ferguson introduziu, no Brasil, a primeira colhedora com essa inovação, importada da Austrália. Uma máquina foi importada em 1956 e, logo depois, em 1962, para experimentação no Brasil por uma empresa de Piracicaba- SP, e em 1973, em São Paulo, pela empresa Santal Equipamentos S/A, que inovou ao lançar a primeira máquina de fabricação nacional, utilizando tecnologia importada como base do projeto.

Ações de entidades ambientais originaram a Lei da Queima da Cana (Lei nº 11.241/2002), que tratou da queima controlada da cana-de-açúcar para despalha e de sua gradual eliminação. Com isso, a colheita manual se tornou pouco atrativa, forçando o setor a investir nas colhedoras combinadas automotrizes de cana picada.

Tomando como base os componentes vistos na figura 5, podemos explicar o processo no momento do corte. A máquina se alinha com a fileira de cana, o cortador de pontas é regulado de acordo com a altura das plantas, os discos de corte basal também têm sua altura regulada e a cana é enviada para o sistema de alimentação, que é constituído pelos divisores de linhas, rolo alimentador e tombador, direcionando a fileira de cana para o corte. O corte da cana em rebolos é feito pelos picadores e a retirada das impurezas (limpeza) é realizada pelo extrator primário. Por fim, os rebolos são elevados pelo elevador de taliscas e, na parte superior, antes do descarregamento dos rebolos, ocorre uma segunda limpeza pelo extrator secundário (NEVES, 2003).

Figura 5 - Principais componentes de uma colhedora de cana-de-açúcar combinada.



Fonte: Adaptado de Neves (2003).

3.10. Espectrometria de emissão óptica (OES)

Em linhas gerais, a espectrometria de emissão óptica (OES) pode ser definida como um processo responsável por analisar e fornecer, com precisão, muitos componentes presentes na amostragem, no caso, para a determinação da composição química de amostras metálicas. É muito utilizado para garantir um maior controle em relação a todo o processo e à qualidade (MERMET J M, 2002).

Este processo é amplamente utilizado nas indústrias de fabricação de metais, incluindo produtores primários, fundições, fundições em molde e manufatura. Graças ao curto tempo de análise e à acurácia inerente, os sistemas OES são extremamente eficazes no controle de processamentos de ligas. Estes espectrômetros podem ser utilizados em muitos aspectos do ciclo de produção, inclusive na inspeção de entrada de materiais, no processamento de metais, no controle de qualidade de produtos semiacabados e acabados e em muitas outras aplicações, onde a composição química do material metálico seja necessária (MERMET J M, 2002).

A espectrometria de emissão óptica é uma técnica multielementar que possibilita a determinação simultânea de elementos inorgânicos em um curto período. Robustez e ampla faixa linear de calibração são características da técnica. Os primeiros equipamentos de ICP OES foram introduzidos comercialmente em 1974 e tornaram-se amplamente usados em análises de rotina. No entanto, ainda há uma grande demanda por parte dos usuários de ICP

OES para aumentar a confiabilidade e facilidade de uso dos instrumentos, a fim de melhorar o desempenho analítico, para extrair mais informações do espectro de emissão e para aumentar a eficiência do processamento de dados (MERMET J M, 2002).

A otimização adequada das condições de operação do OES com configuração axial diminui drasticamente efeitos de matriz e processos de auto- absorção e a considerável melhora na sensibilidade faz com que essa configuração apresente vantagens significativas comparativamente aos sistemas radiais (MERMET J M, 2002).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais utilizados

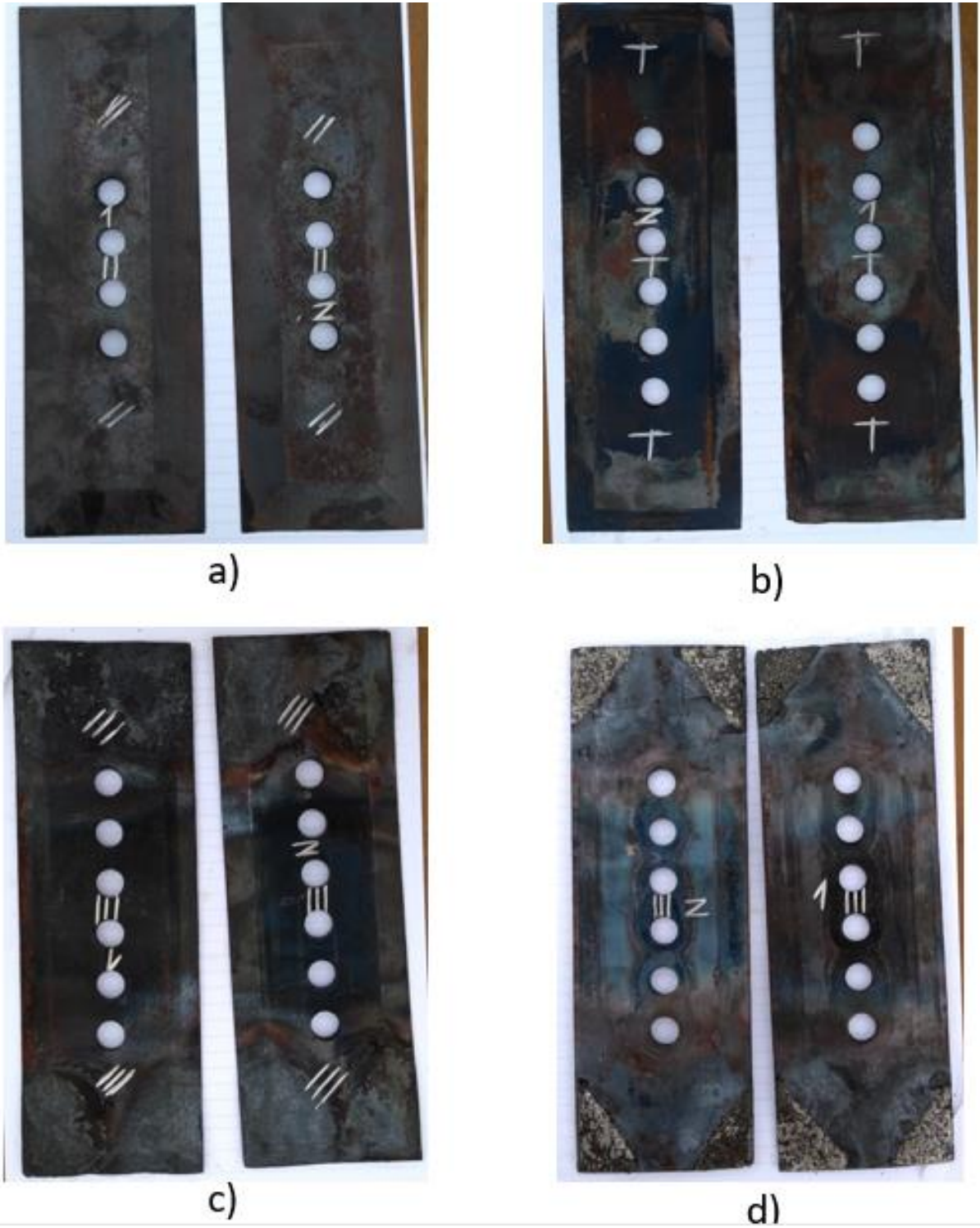
Para a elaboração deste trabalho, foram utilizadas facas de corte basal constituídas pelos seguintes aços comerciais, conforme mostra a figura 6:

- SAE 5160, sem tratamento térmico;
- SAE 1045, sem tratamento térmico;
- SAE 15B30, tratado termicamente;
- SAE 15B30, com tratamento superficial (DURMAT WC), composto de partículas de Carboneto de Tungstênio Sinterizado (50%), com dureza de 1800-2000 HV, e uma matriz à base de NiCrBSi (50%), com dureza de 40 HRC.

O revestimento DURMAT WC é aplicado na forma de pasta, com uso de uma espátula e um gabarito de metal, para depositar o composto de forma correta com 1 mm de espessura nas extremidades da faca do lado oposto ao corte, onde é fundida através de um maçarico de oxiacetileno.

Foram analisadas 2 peças de cada tipo de aço, totalizando em 8 facas de corte basal. O material para o tratamento superficial foi fornecido pela empresa DURUM DO BRASIL em Diadema – SP, e as amostras de SAE 5160 foram fornecidas pela empresa AGRICORTE em São Carlos - SP.

Figura 6 - Facas ilustradas são respectivamente: SAE-5160 (a), SAE-15B30 tratada termicamente (b), SAE-1045 (c) e SAE-15B30 revestida (d).



Fonte: Autoria própria.

4.2. Ensaaios

Para a elaboração deste trabalho, foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise química por espectrometria óptica, para confirmação da classificação dos aços utilizados;
- Teste de desgaste a três corpos (que mais se aproxima das condições encontradas em campo), de acordo com a norma ASTM G65;
- Análise de inclusões conforme ASTM E 45 e análise microestrutural;
- Teste de campo, no qual um par de cada amostra foi testado simultaneamente em uma colhedora, sendo computado o tempo até a falha por fratura ou desgaste. O cálculo das áreas desgastadas das facas foi realizado utilizando o programa de análise de imagem *ImageJ*.

4.3. Espectrometria de Emissão Óptica (OES)

São denominados elementos “residuais”, aqueles que não são adicionados deliberadamente. Os chamados “elementos de liga” são os demais elementos adicionados no aço, visando afetar seu comportamento. É frequente omitir, das discussões, diversos elementos críticos para o desempenho do aço que não se classificam diretamente como residuais ou como elementos de liga, como usualmente entendido.

Também se deve atentar para os considerados elementos residuais provenientes da sucata, tais como o cobre, arsênio, antimônio, zinco, chumbo e, elementos provenientes da atmosfera, como nitrogênio, hidrogênio e o oxigênio, agente de refino amplamente empregado e que se dissolve no aço. A análise química das facas foi realizada no Espectrômetro de Modelo SPECTROMAX x, ilustrado na figura 7.

Figura 7 - Espectrômetro Modelo. SPECTROMAX x Fatec Sertãozinho.



Fonte: Brito, Silva e Farah (2017).

4.5. Ensaio de Dureza

De acordo com a ABNT NBR 6671:1992, o procedimento de medida da dureza Rockwell consiste em forçar, pela aplicação de uma carga pré-estabelecida, um penetrador de forma e dimensões conhecidas, sobre a superfície da peça a ensaiar. O valor da Dureza Rockwell é um número arbitrário proporcional à profundidade de penetração. A escala utilizada foi HRC, onde se utilizou um penetrador tipo cone de diamante. Foi utilizado o durômetro analógico, modelo: PAN 300JW, da Marca Pantec, conforme mostra figura 8.

Figura 8 - Durômetro Analógico pertencente à Fatec de Sertãozinho.



Fonte: Brito, Silva e Farah (2017).

4.6. Ensaio Metalográfico

A preparação de corpos de prova, para análise metalográfica, foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 13284:1995. As amostras (figura 9) foram retiradas das facas de corte basal com auxílio do cortador Arotec Arocor 60 (figura 10b), e embutidas em baquelite na embutidora Arotec Pre-30 (figura 10a). Posteriormente, as amostras foram preparadas superficialmente com as lixas de granulometria igual a 80, 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, e 1200. Por fim, foram polidas com alumina, utilizando a politriz Arotec Aropol E (figura 10 c), atacadas com reagente Nital 2%, durante 10 segundos, e levadas ao microscópio óptico para análise metalográfica.

Figura 9 - Amostras preparadas e embutidas em baquelite.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 - Embutidora Arotec Pre-30 (a); Cortador Arotec Arocor 60 (b); Politriz Arotec Aropol E (c).



a)



b)



c)

Fonte: Autoria própria.

4.7. Ensaio de Desgaste

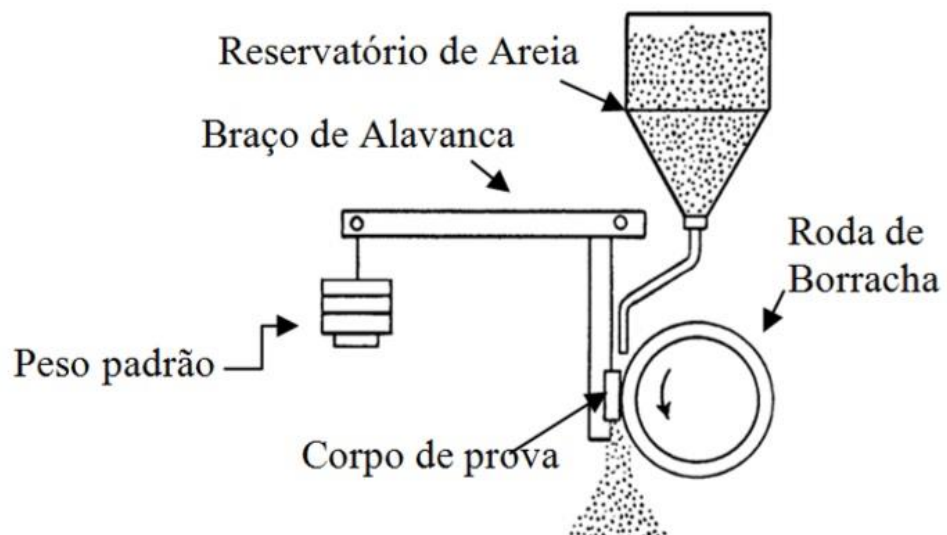
Para o ensaio de desgaste a três, em abrasômetro do modelo Roda de Borracha, normalizado pela norma ASTM G65, foram feitos dois corpos-de-prova das seguintes dimensões: 25 mm de largura por 75 mm de comprimento, e 12,5 mm de espessura (figura 11). A granulometria da areia era de 60/70, o disco com rotação de 200 RPM, anel de

borracha com dureza de 60 Shore A e força aplicada de 130N. Nessas condições, o ensaio simulou um desgaste abrasivo de baixa tensão, conforme a norma ASTM G65-04, que indica que o teste seja feito com a areia seca.

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM G65-04 (2010), *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, a qual determina que a intensidade do desgaste abrasivo em qualquer sistema é diretamente proporcional à natureza do abrasivo, tamanho das partículas do abrasivo, à dureza (HV) das partículas, à forma física da partícula desse abrasivo (esférica, acicular etc) e à tensão aplicada no sistema, formado entre as partículas de abrasivo, a superfície do corpo de prova e a frequência deste contato.

A figura 11 é um esquema que representa o funcionamento do abrasômetro proposto pela norma ASTM G65, onde o teste de abrasão acelerada é utilizado o mecanismo tribológico conhecido como roda de borracha e areia.

Figura 11 - Esquema de funcionamento do equipamento de ensaio abrasômetro.



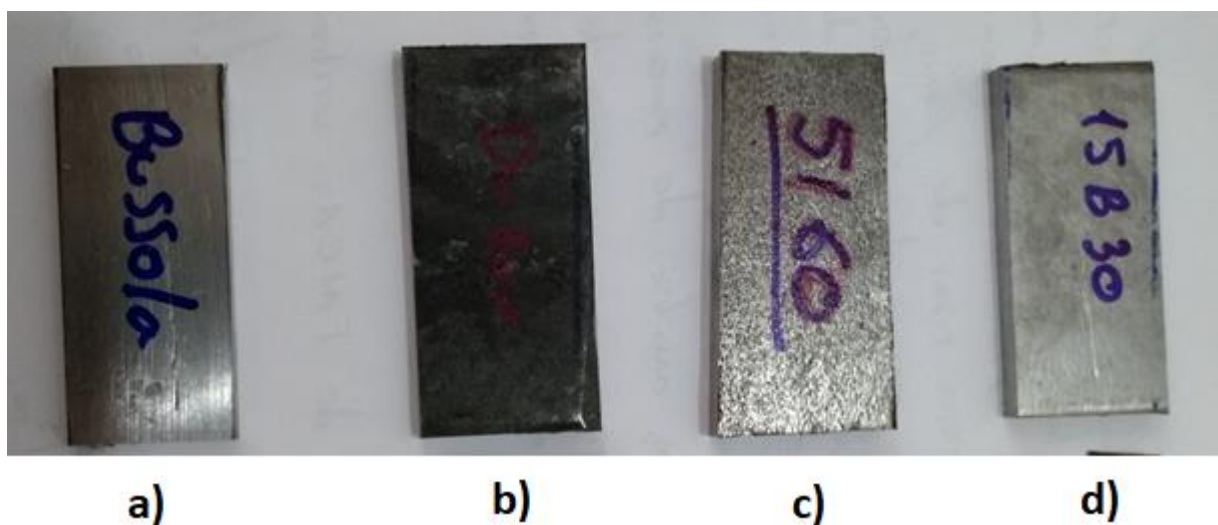
Fonte: Adaptado de ASTM G65-04 (2010).

O abrasivo retido no reservatório flui de forma constante entre a roda de borracha e a face superficial do corpo de prova, respeitando o sentido de giro da roda, que deve ser no mesmo sentido do fluxo abrasivo. Existe uma tensão aplicada que pressiona a amostra contra

a roda giratória com uma força tangencial, a qual é exercida pela ação do braço de alavanca enquanto o fluxo constante de abrasivo promove o desgaste do corpo de prova, que é denominado de desgaste a três corpos.

A massa da amostra deve ser mensurada antes e depois do teste, a fim de computar a perda de massa, fixando o mesmo tempo de fricção para cada amostra. O ensaio foi composto por quatro ciclos de desgaste, que tiveram a duração de três minutos.

Figura 12 - Amostras para o teste de desgaste a três corpos. SAE 1045 (a); SAE 15B30 com revestimento superficial (b); SAE 5160 (c); SAE 15B30 tratado termicamente.



Fonte: Autoria própria.

4.8. Teste de Campo

As amostras foram levadas para teste de campo, onde um par de cada amostra foi testado em uma colhedora John Deere modelo 3522 (figura 13). O corte basal da colhedora é composto por discos duplos que giram em sentidos opostos e as facas de corte basal são fixadas nos discos por meio de parafusos. As amostras foram testadas simultaneamente, para que as condições de desgaste fossem as mesmas, visto que, o tipo de solo, umidade, variedade, idade da planta e outros, influenciam no desgaste das facas de corte basal.

Como são os elementos de maior manutenção na colhedora, as facas de corte basal necessitam ter sua posição trocada para que o desgaste ocorra nas quatro superfícies de corte, e um acompanhamento periódico de sua área útil, já que seu estado pode causar muitos

prejuízos para a produção e para a soqueira, prejudicando a rebrota e, conseqüentemente, a produção futura.

A cada ciclo de manutenção, as amostras eram medidas com base nas referências expostas na figura 15, fazendo uso de um paquímetro com um cursor móvel, no qual a gravação da escala especial (nonio ou vernier) vale 0,05 mm. Como a incerteza associada à resolução pode ser considerada como a metade da menor divisão do nonio, ou apenas como a menor divisão do nonio, como o paquímetro utilizado tem nonio de 20 divisões, sua resolução é 0,05 mm e incerteza “instrumental” de medida igual a 0,025mm, sendo computados os valores referentes à largura em mm e o tempo em horas, até a fratura.

Figura 13 - Colhedora John Deere modelo 3522.



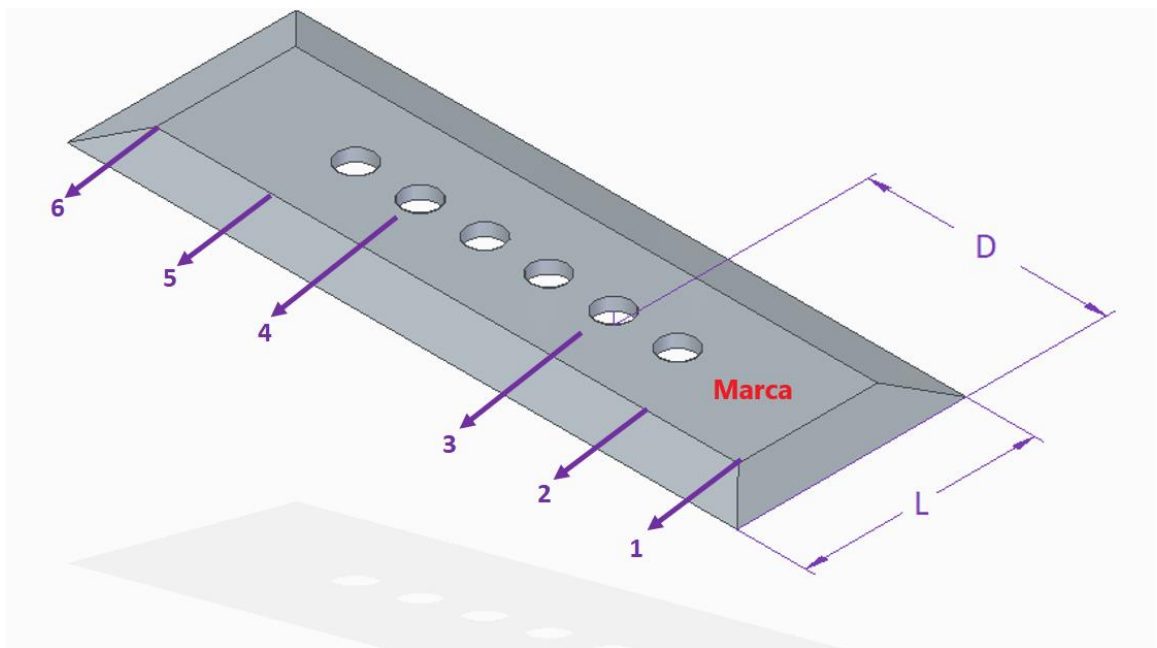
Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Amostras fixadas no disco do cortador de base.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Desenho da faca com as referências usadas para as medidas no teste de campo. Feito no *Solidedge ST9*.



Fonte: Autoria própria.

4.9. Determinação da Área de Material Desgastado

Foram calculadas as áreas desgastadas utilizando um programa de análise de imagem (*ImageJ*). Com esse trabalho, será possível apontar qual é a melhor amostra dentre as quatro e comparar os resultados de campo com os gerados nos testes laboratoriais e, futuramente, fazer uma pesquisa focada nos melhores resultados, para a otimização deste componente.

O processo foi executado de acordo com as seguintes etapas:

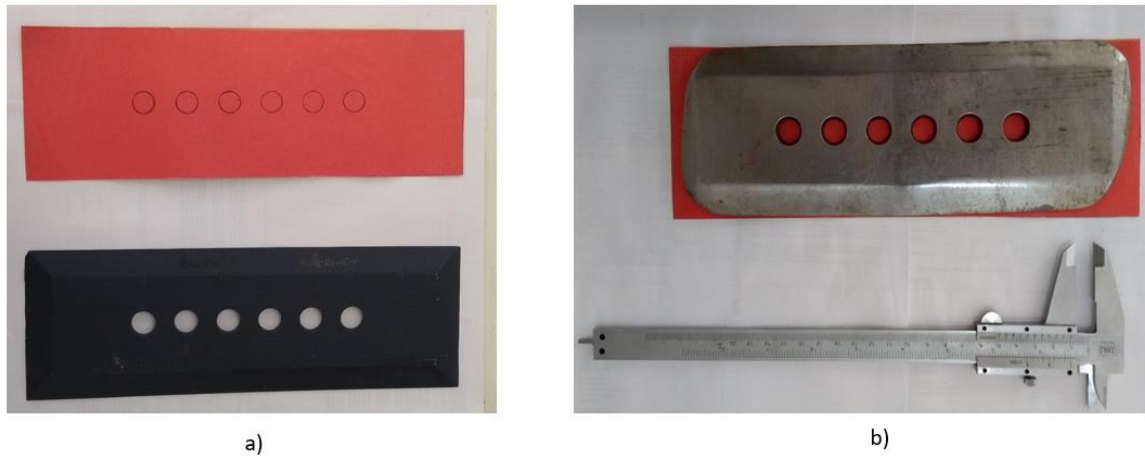
- Primeiramente, foi feito um molde em cartolina de uma peça nova com medidas padrão, tal molde foi feito na cor vermelha a fim de contrastar com a peça desgastada, conforme mostra a figura 16;
- A peça usada no teste de campo foi colocada sobre a cartolina, com cautela na centralização da peça e alinhando seus furos com os desenhos dos furos na cartolina;
- Como medida de referência para o programa, utilizou-se um paquímetro aberto na medida de 10 mm;
- Fazendo uso de uma câmera, foi tirada uma foto e levada ao computador;
- Por meio de filtros, o programa selecionou a porção da imagem que se contrastou em relação à peça (Figura 17 áreas 1 e 2), e traçou uma correlação entre os pixels da medida de referência com a porção da imagem analisada, permitindo assim o cálculo da área.

Para efeito de teste, foi calculada a área do furo da peça, fazendo uma medida direta, medindo seu diâmetro com o paquímetro e calculando sua área, indiretamente por meio do programa (Figura 17, área 3).

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi 7.5^2 = 176,715mm^2 \approx 176,487mm^2$$

Figura 16 - Molde em cartolina com base em uma faca virgem (a); Amostra posicionada sobre a cartolina utilizando um paquímetro como referência (b).



Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Cálculo das áreas desgastadas, fazendo uso do software *ImageJ*.



Fonte: Autoria própria.

4.10. Análise de inclusões

Os métodos de ensaio expostos na norma ASTM E-45, *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels*, que expõe os procedimentos de classificação manual, fazendo o uso da técnica de comparação de quadros (“*chart comparison*”), onde se obtém uma imagem da amostra ao microscópio e a compara com quadros de referência que contém exemplos esquemáticos dos diversos tipos de inclusão.

Nestes métodos microscópicos, as inclusões são atribuídas a uma categoria baseada em similaridades na morfologia, e não necessariamente em sua identidade química. Além do método manual, podemos fazer uso da análise automática de imagem de acordo com a norma ASTM E-1122, *Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis*, que expõe métodos quantitativos, baseados em análise digital de imagens, para identificar e classificar inclusões em imagens. Com isso, reduz-se o erro humano na comparação visual e se podem classificar as amostras de acordo com os métodos microscópicos A à D, com maior precisão.

A classificação segundo os critérios A à D é baseada segundo o tipo de inclusão, onde as inclusões, classificadas como do tipo A, estão relacionadas aos Sulfetos, tipo B à Alumina, tipo C aos Silicatos e tipo D aos Óxidos (tabela 5).

De acordo com a ASTM E-45, a formação de “*stringers*”, que é definido por uma sequência de inclusões alinhadas na direção de laminação, é tratada como um único objeto, ou seja, uma inclusão individual que é altamente alongada na direção de deformação, três ou mais do Tipo B ou C, alinhados em um plano paralelo ao eixo de trabalho quente e com o tamanho de não mais que 15 μm , com uma separação de menos de 40 μm entre os dois vizinhos mais próximos incluído. Esta definição não se aplica às inclusões do tipo D. Espessura ou diâmetro das inclusões, neste caso, são separados em séries grossa ou fina, com limites diferentes por tipo de inclusão. A severidade é uma medida da densidade de inclusões em cada campo. Esta medida é obtida, em cada campo, a partir do comprimento total dos “*stringers*”, para inclusões dos tipos A, B e C, e a partir da contagem de inclusões, para o tipo D.

A análise de inclusões quantitativa foi feita com auxílio do programa de análise de imagens *ImageJ*, que por meio de filtros e um comprimento de referência, resalta as inclusões (figura 18).

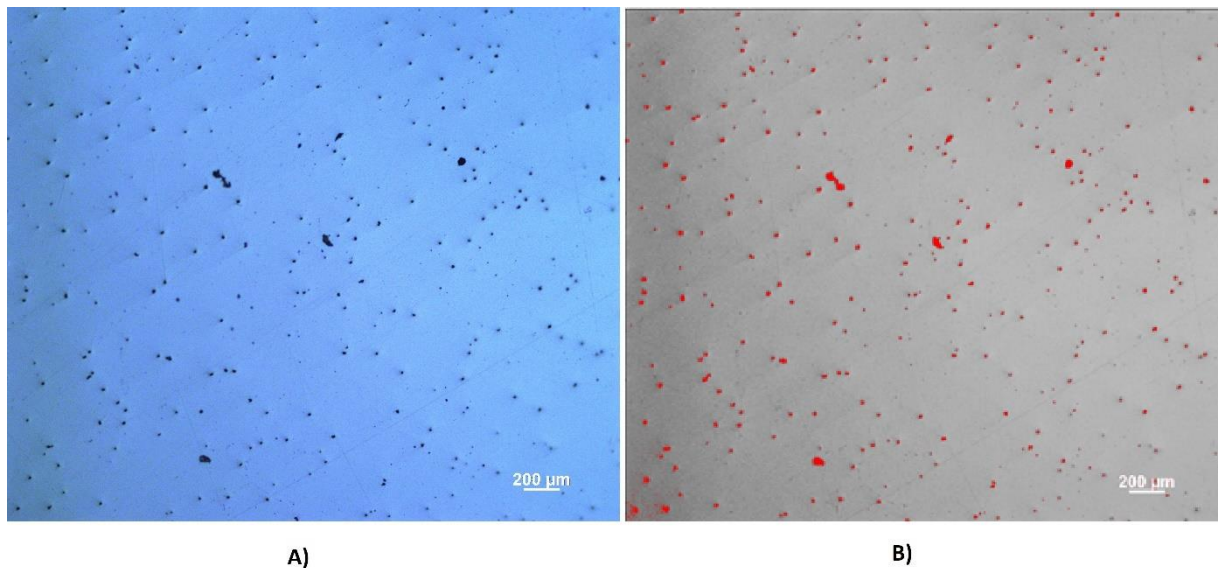
Tabela 5 - Parâmetros de largura e diâmetro de inclusão (métodos A à D).

Inclusão	Série Fina		Série Grossa	
	Largura, min,	Largura, Max,	Largura, min,	Largura, Max,
	μm	μm	μm	μm
A	2	4	> 4	12
B	2	9	> 9	15
C	2	5	> 5	12
D	2	8	> 8	13

*Qualquer inclusão com dimensões máximas superiores ao máximo para a série grossa deve ser relatada como Grandes dimensões.

Fonte: ASTM E45-18^a pág. 15.

Figura 18 - Análise de inclusões fazendo uso do *software* ImageJ. Imagem da amostra antes da aplicação de filtros que ressaltam as inclusões em (A). Imagem da amostra após a aplicação de filtros em (B).



Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, serão apresentados os resultados dos ensaios de análise química, com a finalidade de verificar a verdadeira classificação dos aços para, posteriormente, relacionando os aços com a verdadeira classificação, apresentar os resultados de análise metalográfica (inclusões e microestruturas), dureza, desgaste, teste de campo e determinação da área desgastada.

5.1. Espectrometria de Emissão Óptica (OES)

Após a análise química feita por Espectrometria de Emissão Óptica, concluiu-se que nenhum dos aços analisados poderia ser enquadrado na classificação dada pelos fabricantes. Temos que a peça tida como SAE-1045 se enquadrou na classificação SAE-1530 (tabela 6), a peça tida como SAE-5160 se enquadrou na classificação SAE-5135 (tabela 7) e, por fim, a peça tida como SAE-15B30 melhor se enquadrou na classificação SAE-61B50 (tabela 8).

Tabela 6 - Composição química da peça tida como SAE-1045 (SAE-1530).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	La
%	0,315	0,181	1,5	0,0025	<0,0005	0,159	<0,002	0,107	<0,001
Elemento	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Fe
%	0,0299	<0,0015	0,0063	<0,001	0,0328	0,0023	<0,01	0,0084	97,6
Elemento	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn	
%	0,0029	0,0037	<0,0015	<0,004	0,0023	<0,003	0,0033	<0,002	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Composição química da peça tida como SAE-5160 (SAE-5135).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	La
%	0,316	0,186	0,794	0,00051	0,0282	0,801	<0,002	<0,012	<0,001
Elemento	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Fe
%	<0,0005	<0,0015	0,003	<0,001	<0,001	0,0026	<0,01	0,0044	97,8
Elemento	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn	
%	0,0029	0,0013	<0,0015	<0,004	0,00091	<0,003	0,0011	<0,002	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Composição química da peça tida como SAE-15B30 (SAE-61B50).

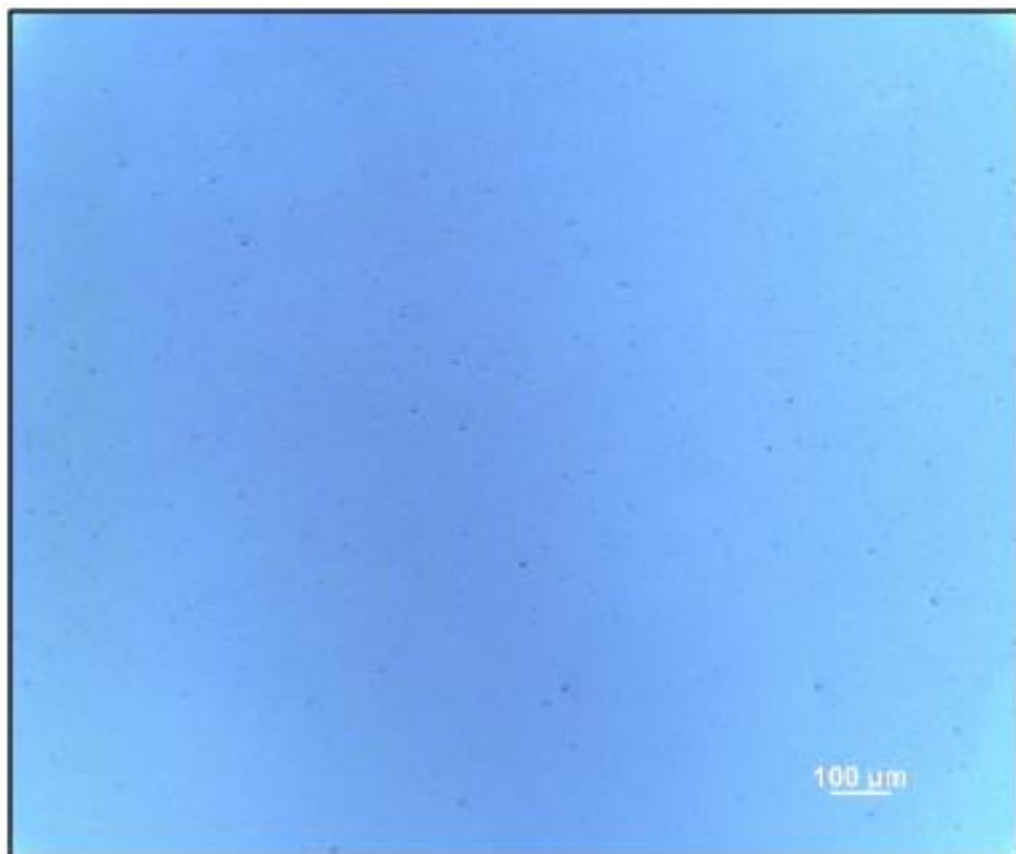
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	La
%	0,507	0,235	0,838	<0,0005	<0,0005	0,975	<0,002	0,0276	<0,001
Elemento	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Fe
%	<0,0005	<0,0015	0,0049	<0,001	0,001	0,176	<0,01	0,0038	97,2
Elemento	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn	
%	0,0031	0,0017	<0,0015	<0,004	0,00088	<0,003	0,0015	<0,002	

Fonte: Autoria própria.

5.2. Análise de Inclusões

A análise de inclusões, feita conforme a norma ASTM-E45 (figuras 26 a 29), na qual, as inclusões classificadas como do tipo A são Sulfetos, tipo B é Alumina, tipo C são Silicatos e tipo D são Óxidos.

Figura 19 - Análise de inclusões da amostra SAE-5135.

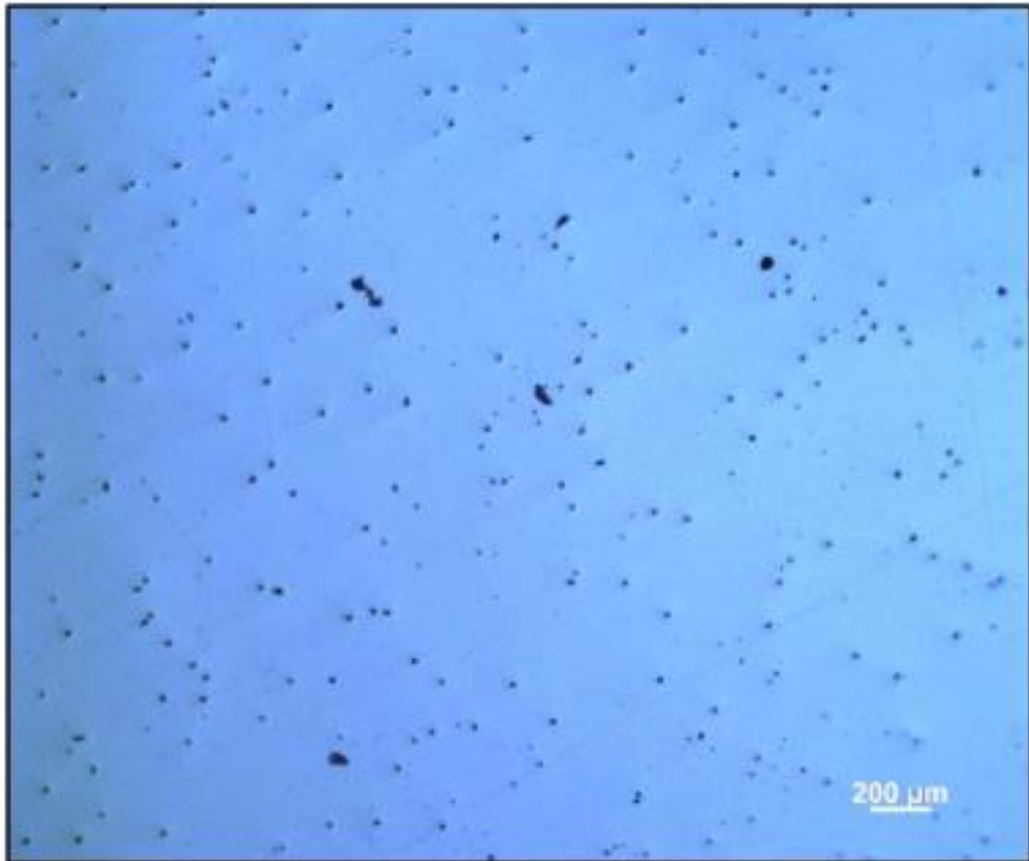


Fonte: Autoria própria.

Na figura 26, verifica-se que o aço está bastante limpo e pode ser classificado como:

- Série fina. Tipos: A - 0,5, B – isento, C – isento, D – 1,0.

Figura 20 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-1530.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 27, verifica-se a presença de macroinclusões no aço, que se mostra bastante sujo com uma péssima qualidade. Pode ser classificado como:

- Série fina. Tipos: A – 1,0, B –1,0, C – isento, D – 2,0.
- Série grossa. Tipos: A – 3,0, B –2,0, C – isento, D – 3,0.

Figura 21 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-61B50 revestida.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 28, verifica-se a presença de macroinclusões de alumina no aço, que se mostra bastante sujo com uma péssima qualidade. Pode ser classificado como:

- Série fina. Tipos: A – 1,5, B – 2,0, C – isento, D – 1,5.
- Série grossa. Tipos: A – 1,5, B – 2,0, C – isento, D – 1,5.

Figura 22 - Análise de inclusões da amostra tida como SAE-61B50 tratada termicamente.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 29, verifica-se a presença de macroinclusões de alumina no aço, que se mostra bastante sujo com uma péssima qualidade. Pode ser classificado como:

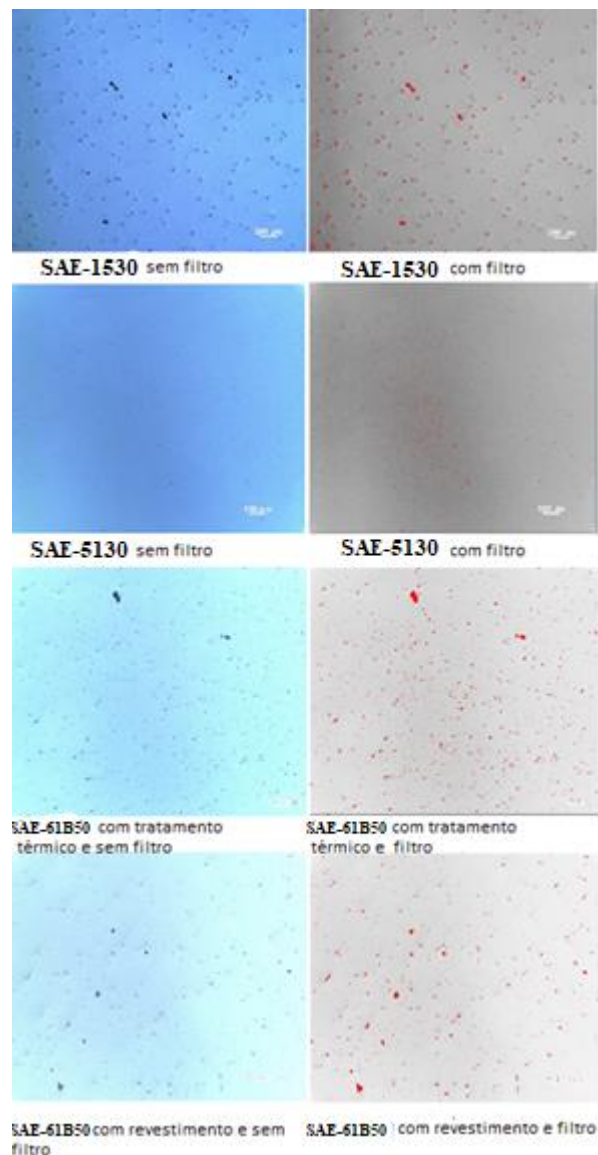
- Série fina. Tipos: A – 2,5, B – isento, C – isento, D – 2,5.
- Série grossa. Tipos: A – 2,5, B – isento, C – isento, D – 2,5.

Com esses dados, pode-se concluir que, em um teste de qualidade, apenas a amostra de SAE-5135 seria aprovada em um controle industrial.

5.2.1. Análise de Inclusões via *software*

Com o auxílio do programa de análise de imagens *ImageJ*, que por meio de filtros que isola as partículas das amostras (figura 30), foi possível realizar a contagem de inclusões e a análise de parâmetros, como área total da amostra, tamanho médio de partícula, porcentagem em área ocupada pelas partículas, maior dimensão das partículas em média e menor dimensão das partículas em média (tabela 9). Com isso, foi possível analisar quantitativamente esses dados e expô-los na forma de gráficos.

Figura 23 - Análise de inclusões fazendo uso do software *ImageJ*. Imagens das amostras antes da aplicação de filtros que ressaltam as inclusões, do lado esquerdo, em contraste com imagens das amostras após a aplicação de filtros, do lado direito.



Fonte: Autoria própria.

Visualmente, é possível notar a magnitude das inclusões e o número de inclusões na imagem acima, onde se tem a imagem sem tratamento, do lado esquerdo, e a imagem após a aplicação de filtros, do lado direito, que deixa as inclusões mais evidentes e destacadas na cor vermelha. Com isso, foi possível verificar a ausência de macropartículas na amostra de SAE-5135 e a presença massiva destas nas demais amostras.

Tabela 9 - Análise de partículas calculadas com auxílio do *ImageJ*.

PEÇA	Número de partículas	Área Total	Tamanho médio de partícula	% Área	Maior dimensão das partículas em média	Menor dimensão das partículas em média
SAE 61B50 com tratamento superficial	1464	63,402	43,307	0,652	7,083	4,507
SAE 61B50 Tratada Termicamente	1025	14,251	13,904	0,603	5,146	3,302
SAE 5135	1609	14,922.124	9,274	0,158	4,476	2,489
SAE 1530	656	73.444,438	75,511	0,776	12,869	8,654

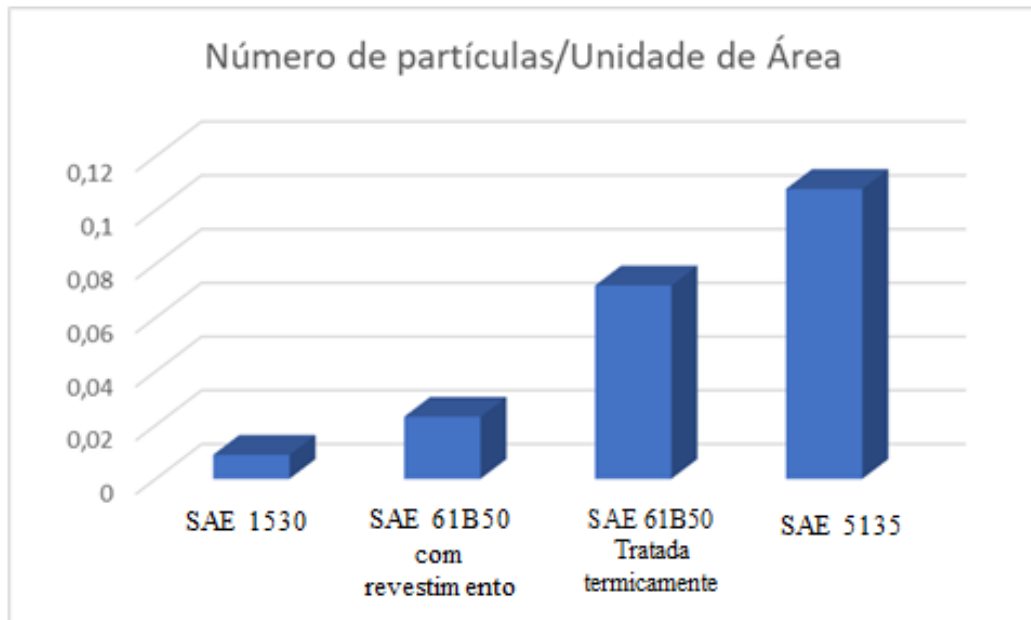
Fonte: Autoria própria.

Com a tabela 11, foi possível dar origem a dois gráficos, no primeiro gráfico da figura 31, leva-se em conta no número de partículas por unidade de área, e o segundo gráfico da figura 32, mostra tamanho médio de partícula em μm em cada amostra. Analisando os dois extremos, tem-se que, no primeiro gráfico, a amostra de SAE-5135 tem maior número de partículas por unidade de área em relação às demais e, a amostra de SAE-1530, a menor relação. Porém, ao se analisar o segundo gráfico, o quadro é invertido, e se tem a amostra de SAE-5135 com menor tamanho médio de partícula e, a amostra de SAE-1530, com maior tamanho médio de partículas.

As amostras que ficaram dentro do gráfico, exibiram o seguinte comportamento, no primeiro gráfico, verifica-se que a amostra SAE-61B50 tratada termicamente possui o maior número de partículas por unidade de área em relação à amostra SAE-61B50 revestida, que apresenta a menor relação. Porém, ao se analisar o segundo gráfico, o quadro é invertido

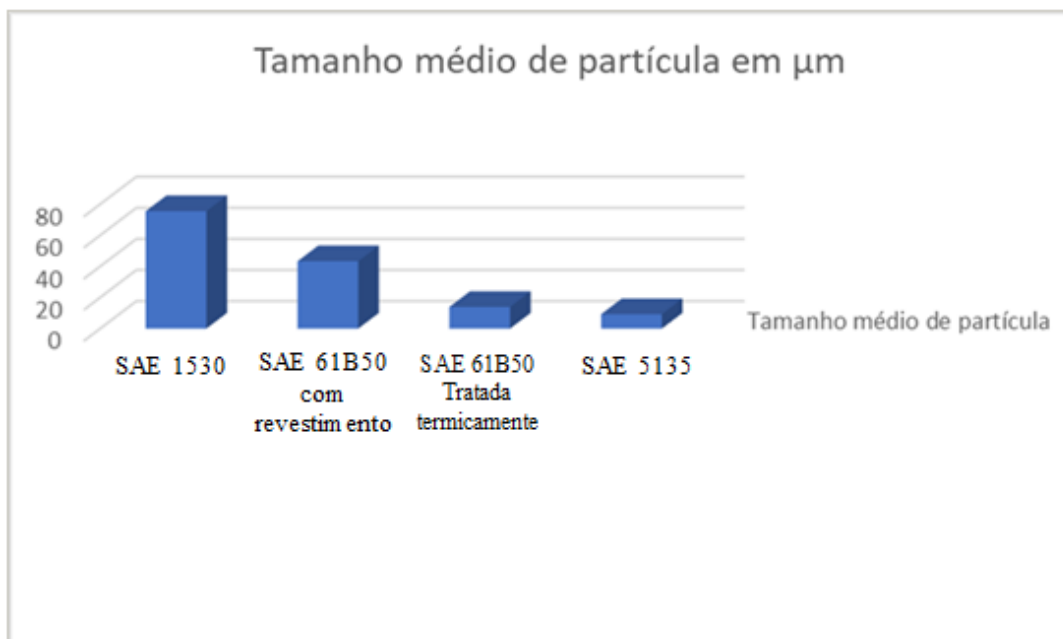
novamente, e se tem a amostra SAE-61B50 tratada termicamente com menor tamanho médio de partícula e, a amostra SAE-61B50 revestida, com maior tamanho médio de partícula.

Figura 24 - Gráfico do número de partículas por unidade de área.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Gráfico do tamanho médio de partícula em μm .

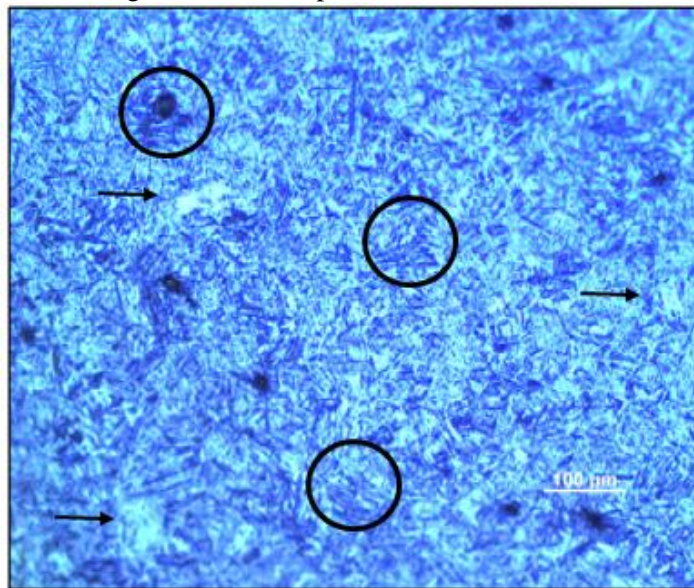


Fonte: Autoria própria.

5.3. Análise Metalográfica

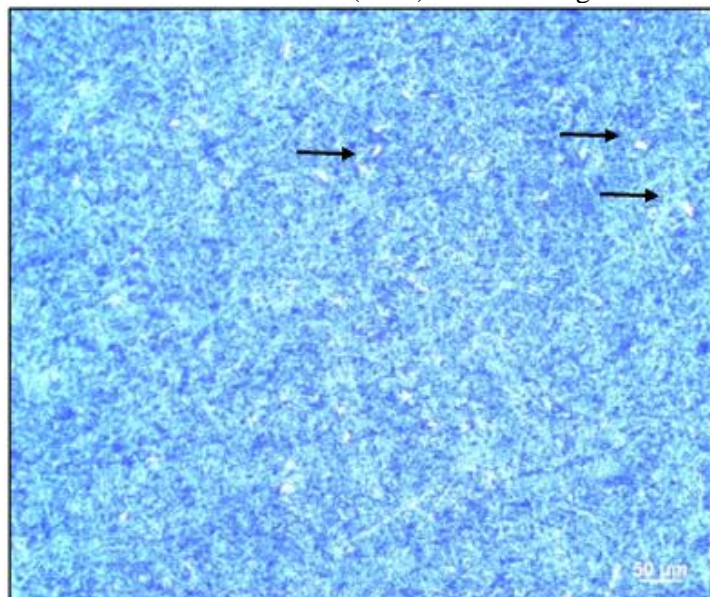
Foram retiradas amostras no sentido longitudinal das facas para análise metalográfica. Verificou-se que a maior parte das peças sofreu tratamento térmico de têmpera e revenimento, como revelam as microestruturas das figuras de 33 a 36.

Figura 33 - SAE-1530 com aumento de 500 vezes: Microestrutura composta de martensita e bainita (círculos) grosseiras, com pontos de austenita retida (setas).



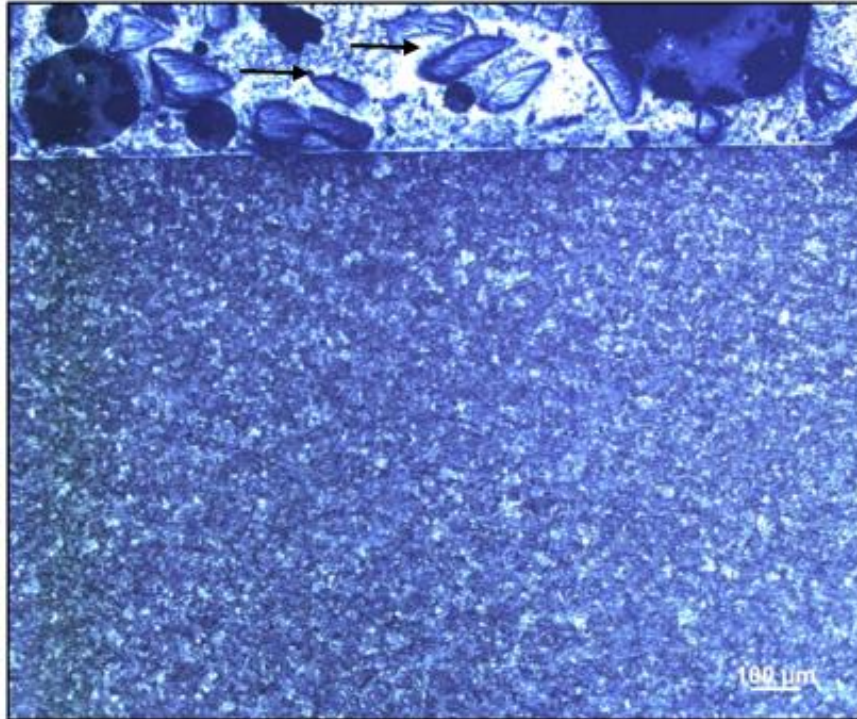
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - SAE- 5135 com aumento de 500 vezes: Microestrutura composta de martensita e bainita, com carbonetos de cromo (setas) e cementita grosseira.



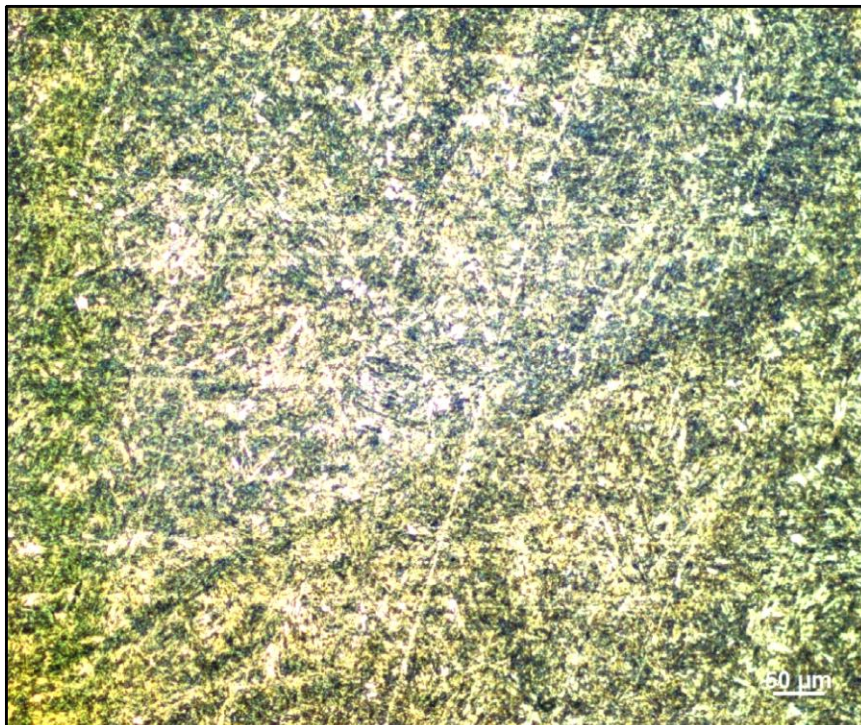
Fonte: Autoria própria.

Figura 35- SAE-61B50 com revestimento de carbeto de tungstênio (setas) (1800-2000 HV), e uma matriz à base de NiCrBSi (40 HRC). Matriz martensítica. Aumento de 500 x.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 - SAE-61B50 tratado termicamente. Matriz martensítica, provavelmente com ferrita e perlita. Aumento de 500 x.



Fonte: Autoria própria.

5.4. Ensaio de Dureza

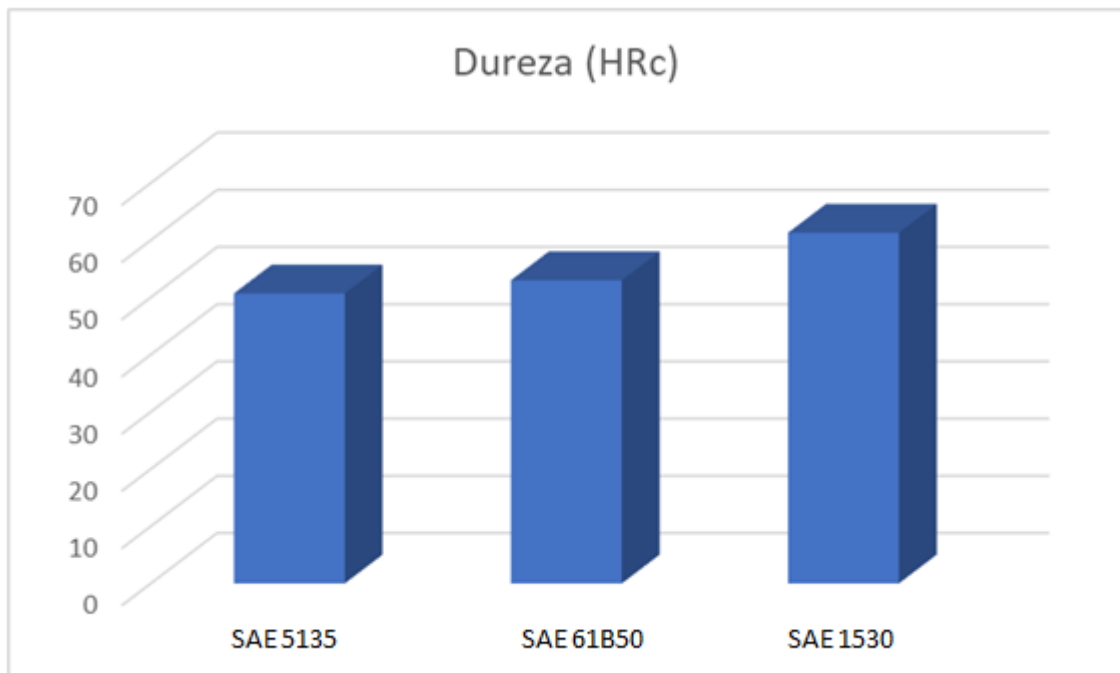
Os resultados presentes na tabela 10 e no gráfico da figura 19, mostram a maior dureza de 61,3 HRc para a peça de SAE-1530 (fornecida como SAE-1045), 53,0 HRc para a peça de SAE-61B50 (fornecida como SAE-15B30) e, a menor dureza dentre as três, de 50,7 HRc para a peça de SAE-5135 (fornecida como SAE-5160). Como não é possível conhecer o histórico térmico e mecânico dessas peças, se torna difícil traçar um valor de referência para as durezas encontradas, como os obtidos em manuais de aços fornecidos por algumas empresas.

Tabela 10 – Resultado médio das durezas das peças analisadas.

PEÇAS	Dureza (HRc)
SAE 61B50	53,0
SAE 5135	50,7
SAE 1530	61,3

Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - Dureza das peças em HRc.



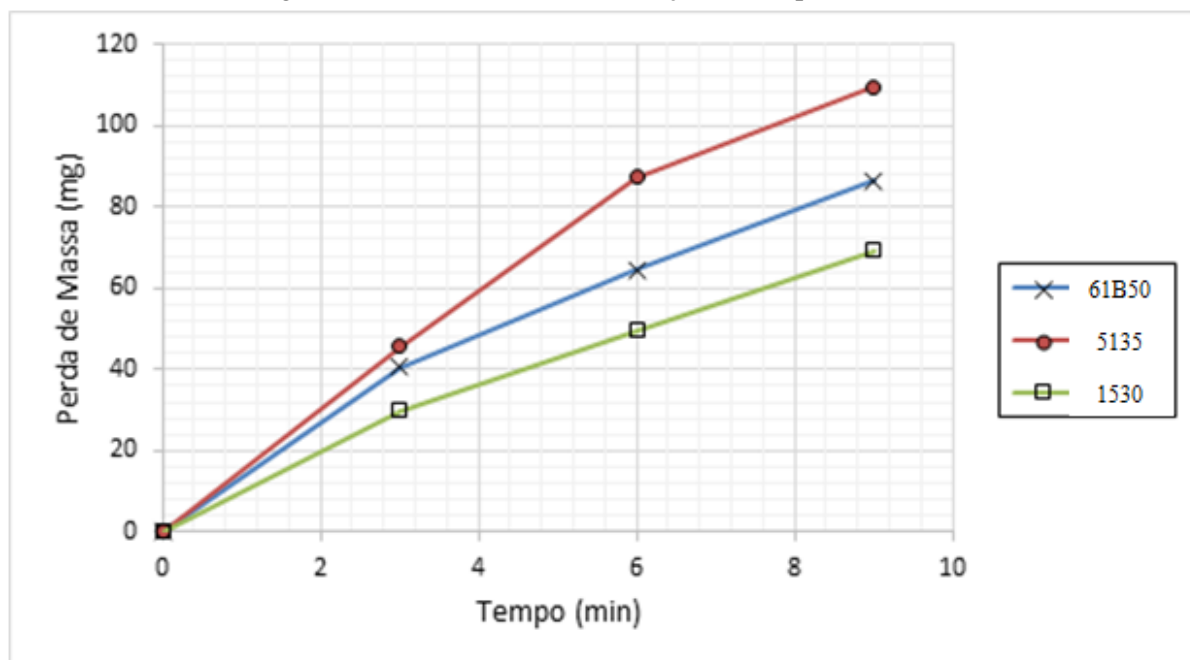
Fonte: Autoria própria.

Os resultados do ensaio de dureza mostram que o aço SAE1530 apresenta maior dureza, o que pode ser explicado pela microestrutura de martensita e bainita mais grosseira, o que sugere que o revenimento aplicado foi em temperatura mais baixa que para os outros aços. A dureza do aço SAE61B50 está coerente com a microestrutura da figura 21, que sugere um tratamento não muito efetivo, com a presença de ferrita e perlita. A microestrutura também explica a dureza do aço SAE5135. Possivelmente, o revenimento em temperatura mais alta, e por tempo relativamente longo, levou à precipitação mais intensa de cementita e o engrossamento da mesma. Infelizmente, não foi possível a obtenção de informações dos parâmetros de tratamento térmico utilizados nos aços deste trabalho.

5.5. Ensaio de Desgaste

Através do ensaio de desgaste abrasivo a três-corpos, gerou-se o gráfico da figura 20, que mostra a perda de massa em miligramas pelo tempo em minutos. Analisando-o, verificou-se que a amostra de SAE-5135 (fornecida como SAE-5160) apresentou a maior perda de massa, em contrapartida, a amostra de SAE-1530 (fornecida como SAE-1045) apresentou a menor perda e, por fim, a amostra de SAE-61B50 (fornecida como SAE-15B30) apresentou um nível de perda intermediário entre as demais.

Figura 27 - Perda de Massa em função do tempo de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

O mecanismo do desgaste abrasivo está relacionado à dureza superficial. Assim, o aço SAE1530 apresentou melhor resultado, pois apresentava maior dureza superficial. O aço SAE61B50 revestido teve uma perda de massa razoável, muito possivelmente, devido a problemas com a interface entre o metal base e o revestimento que era muito abrupta, além do tamanho grosseiro e forma das partículas de carvão de tungstênio.

5.6. Teste de Campo

As medidas referentes às larguras presentes na tabela 11 estão em milímetros, com incerteza de 0,025 mm e o tempo em horas. Nessa tabela, pode-se observar a evolução do desgaste, de acordo com o tempo que as peças foram expostas às condições de trabalho. Pode-se analisar o resultado do desgaste após mais de 27 horas de serviço no gráfico da figura 24, gerado pela tabela 12, que representa as médias das larguras das peças.

A peça de SAE-1530 apresentou os piores resultados dentre as demais, além do desgaste excessivo (visto na figura 21 em comparação com as outras amostras), quebrou prematuramente (com aproximadamente 31,5 horas de serviço). O segundo pior desempenho ficou por conta da peça de SAE-61B50 tratadas termicamente, além do desgaste elevado, houve o rompimento da primeira peça com aproximadamente 31,5 horas de serviço e da segunda peça com aproximadamente 39 horas de serviço.

A amostra de SAE-61B50 revestidas apresentou severo desgaste devido ao lascamento do revestimento (figura 22(A)). Por se tratar de um revestimento a base de metal duro, o que lhe confere boa resistência à abrasão, o material tem característica frágil e, conseqüentemente, baixa tenacidade à fratura. Estes fatores, aliados aos tamanhos macroscópicos dos poros e as trincas indicadas na figura 23(B), agravam ainda mais o problema, visto que o choque da peça com pedras e tocos é algo comum no processo.

O melhor resultado do teste em campo foi o da peça de SAE-5135, sendo a única a resistir às 44 horas de teste, apresentando condições de resistir ainda mais. A peça apresentou ótimos resultados frente às demais, além de apresentar o menor desgaste, melhor qualidade de corte ao final do teste, a peça se mostrou excelente frente aos danos causados pelo impacto com pedras. Na figura 23(A), pode-se ver que a peça, com aproximadamente 21 horas de trabalho, teve sua ponta entortada, provavelmente devido ao choque com uma pedra, 3 horas e meia de trabalho depois (figura 23(B)), a ponta entortada foi removida e o fio de corte reestabelecido nesta região.

Figura 28 - Aspecto visual das peças após aproximadamente 7 horas de trabalho.

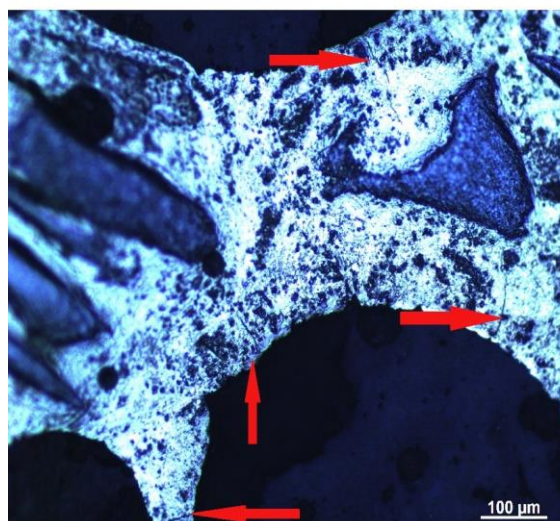


Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - Peça tida como SAE-61B50 revestida, com aproximadamente 21 horas de trabalho, indicado o lascamento do revestimento arrastando o metal base (A). Revestimento a base de WC/Co, com aumento de 10x visto no microscópio óptico, com trincas indicadas (B).



(A)



(B)

Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - Peça tida como SAE-5135 com aproximadamente 21 horas de trabalho, em destaque ponta entortada (A). Mesma peça 3,5 horas depois, com destaque a correção devido a abrasão (B).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Variação das larguras, em milímetros, frente ao desgaste gerado pelo tempo de serviço.

TRABALHO = 0 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	88,7	88,9	88,85	88,75	89,95	88,8
2 SAE1530	88,75	88,85	88,9	88,8	88,9	88,75
1 SAE 5135	89,2	89,3	89,3	89,6	89,65	89,65
2 SAE 5135	89,65	89,8	89,85	89,9	89,8	89,8
1 SAE 61B50+Revestimento	89,65	89,6	89,45	89,15	89	89,55
2 SAE 61B50+Revestimento	89,15	88,9	89,1	89,55	89,1	89,25
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	89,7	89,75	89,9	90,1	89,6	90,2
2 SAE61B50 Tratada Termicamente	89,95	89,25	89,25	88,8	89,3	89,1
TRABALHO = 1 HORA E 15 MINUTOS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	88,7	88,9	88,85	88,2	89,8	88,7
2 SAE 1530	88,75	88,85	88,9	88,75	88,7	88,7
1 SAE 5135	89,2	89,3	89,3	81,35	84,65	89,5
2 SAE 5135	89,65	89,8	89,85	86,55	87,25	89,3
1 SAE 61B50+Revestimento	89,65	89,6	89,45	86,85	89	89,25
2 SAE 61B50+Revestimento	89,15	88,9	89,1	87,5	88,95	89
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	89,7	89,75	89,9	90,1	89,6	90,2
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	89,95	89,25	89,25	88,8	89,3	89,1
TRABALHO = 3 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	88	88,85	88,8	88,2	89,8	88,7
2 SAE 1530	87,95	88,7	88,85	88,75	88,7	88,7
1 SAE 5135	88,95	89	89,3	81,35	84,65	89,5
2 SAE 5135	89,1	89,4	89,8	86,55	87,25	89,3
1 SAE 61B50+Revestimento	84,7	88,85	89,1	86,85	89	89,25
2 SAE 61B50+Revestimento	85,5	88	89	87,5	88,95	89
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	89,7	89,75	89,9	81,5	88,4	89,75
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	89,95	89,25	89,25	82,4	87,75	88,95
TRABALHO = 7 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	88	88,85	88,8	88,45	88,75	88,25
2 SAE 1530	84,15	87,95	88,55	88,75	88,7	88,7
1 SAE 5135	88,95	89	89,3	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	89,1	89,4	89,8	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	84,7	88,85	89,1	84,1	88,2	89
2 SAE 61B50+Revestimento	85,5	88	89	85,35	88,75	88,55
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	85,95	88,95	88,9	81,5	88,4	89,75
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	86,75	89,25	89,25	82,4	87,75	88,95

TRABALHO = 21 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	70,15	86,4	88,1			
2 SAE 1530	84,15	87,95	88,55	81,45	87,8	88,35
1 SAE 5135	83,55	86,7	89	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	87,3	88,25	89,1	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	81,65	87,45	88,7	84,1	88,2	89
2 SAE 61B50+Revestimento	80,7	87,85	88,9	85,35	88,75	88,55
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	85,95	88,95	88,9	77,3	87,35	88,25
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	86,75	89,25	89,25	77,8	87,3	88,55
TRABALHO = 24 HORAS E 30 MINUTOS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	57,9	83,15	86,55			
2 SAE 1530	84,15	87,95	88,55	74,6	87,25	88
1 SAE 5135	83,55	86,7	89	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	87,3	88,25	89,1	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	81,65	87,45	88,7	79,85	87,65	88,7
2 SAE 61B50+Revestimento	80,7	87,85	88,9	80,7	88,35	87
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	81,15	88,55	88,1	77,3	87,35	88,25
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	82,35	87,75	88,65	77,8	87,3	88,55
TRABALHO = 27 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	57,9	83,15	86,55	65,3	85,35	87,2
2 SAE 1530	77,3	87,55	87,8	74,6	87,25	88
1 SAE 5135	80,2	84,4	88,75	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	85,7	87,85	89	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	75,55	86,3	87,2	79,85	87,65	88,7
2 SAE 61B50+Revestimento	76,25	86,9	86,1	80,7	88,35	87
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	81,15	88,55	88,1	76,2	86,65	87,35
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	82,35	87,75	88,65	74,75	86,4	88,3
TRABALHO = 31 HORAS E 45 MINUTOS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	57,9	83,15	86,55	0	0	0
2 SAE 1530	75,75	87,2	87,75	0	0	0
1 SAE 5135	80,2	84,4	88,75	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	85,7	87,85	89	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	75,55	86,3	87,2	76,45	86,75	88,1
2 SAE 61B50+Revestimento	76,25	86,9	86,1	77,35	87,1	86,55
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	77,3	86,75	87,2	76,2	86,65	87,35
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	75,85	85,25	88,1	0	0	0

TRABALHO = 39 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	0	0	0	0	0	0
2 SAE 1530	0	0	0	0	0	0
1 SAE 5135	78,4	82,45	88,5	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	84,65	87,2	88,75	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	0	0	0	0	0	0
2 SAE 61B50+Revestimento	74,55	84,8	85,6	0	0	0
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	75,6	85,2	86,4	0	0	0
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	0	0	0	0	0	0
TRABALHO = 44 HORAS						
AÇOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
1 SAE 1530	0	0	0	0	0	0
2 SAE 1530	0	0	0	0	0	0
1 SAE 5135	77,3	80,5	88,3	81,35	84,65	87,9
2 SAE 5135	82,3	86,45	88,7	86,55	87,25	89
1 SAE 61B50+Revestimento	0	0	0	0	0	0
2 SAE 61B50+Revestimento	0	0	0	0	0	0
1 SAE 61B50 Tratada Termicamente	0	0	0	0	0	0
2 SAE 61B50 Tratada Termicamente	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Variação média das larguras frente ao desgaste gerado pelo tempo de serviço (excluindo as últimas três medidas).

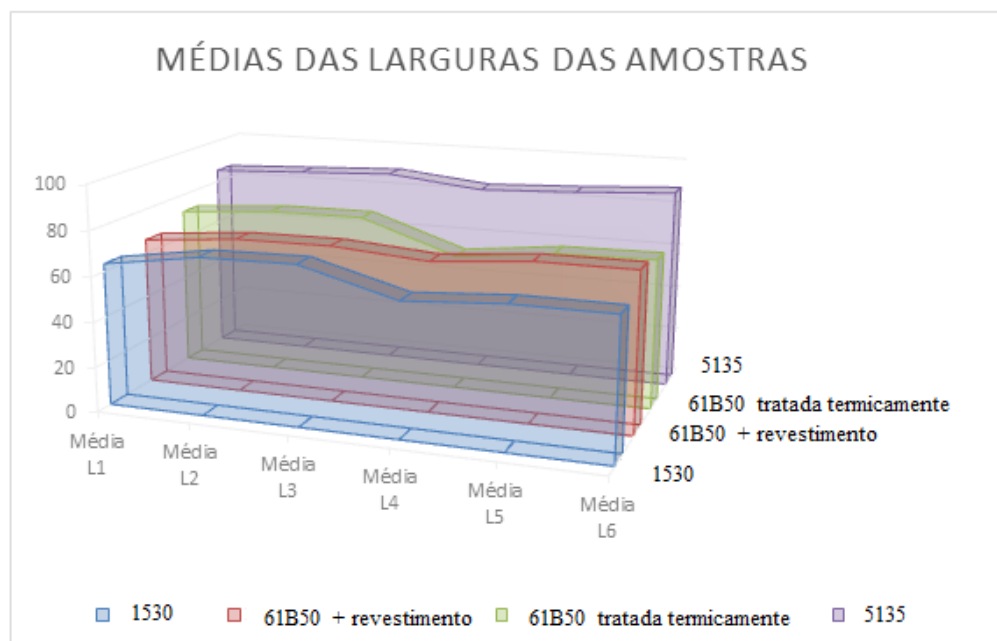
	SAE 1530	SAE 61B50 Revestida	SAE 61B50 Tratada Termicamente	SAE 5135
Média L1	63,41	66,1275	72,005	85,4975
Média L2	69,8175	69,86056	75,16	87,3
Média L3	70,545	70,29056	75,4475	89,1225
Média L4	59,075	67,06	61,1475	84,53
Média L5	61,9225	70,6875	65,955	86,3275
Média L6	61,8675	70,8225	66,63	88,7675

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, a incerteza (σ) é a mesma incerteza do instrumento de medida ($\sigma = 0,025$ mm), e pode ser demonstrada pelo somatório de todas as incertezas (Δx), dividido pelo número de medições (n), que é uma constante.

$$\sigma = \frac{\sum^n \Delta x}{n} = \frac{\sum^7 0,025}{7} = 0,025 \text{ mm}$$

Figura 31 - Gráfico das médias das larguras das amostras.



Fonte: Autoria própria.

5.7. Determinação da Área de Material Desgastado

Com auxílio do programa de análise de imagens *ImageJ*, foi possível determinar a área desgastada no teste de campo para cada uma das peças, gerando os dados da tabela 13 em mm². Com isso, foi possível confirmar com maior precisão o desgaste gerado e afirmar, com base nos resultados gerados na tabela 14, que se trata das médias ponderadas das áreas e, juntamente com o gráfico da figura 25, que a diferença entre o desgaste da peça de SAE-1530 tem um desgaste duas vezes e meia maior que o desgaste da peça de SAE-5135. Ao analisar a

peça de SAE-61B50 tratada termicamente e SAE-61B50 revestida, tem-se um desempenho superior da peça tratada, em relação a peça revestida, na ordem de aproximadamente 14,6%.

Tabela 13 - Áreas desgastada no teste de campo calculadas com auxílio do *ImageJ*.

Material	SAE 5135		SAE 61B50 TRATADA TERMICAMENTE		SAE 1530		SAE 61B50 REVESTIDA	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1 (Lado da marca)								
2 (lado sem marca)								
Área face 1 em milímetros quadrados	980,805	847,017	1186,829	x	2121,511	x	1034,754	x
Área face 2 em milímetros quadrados	960,232	116,593	1207,051	x	1153,932	903,295	1009,854	x

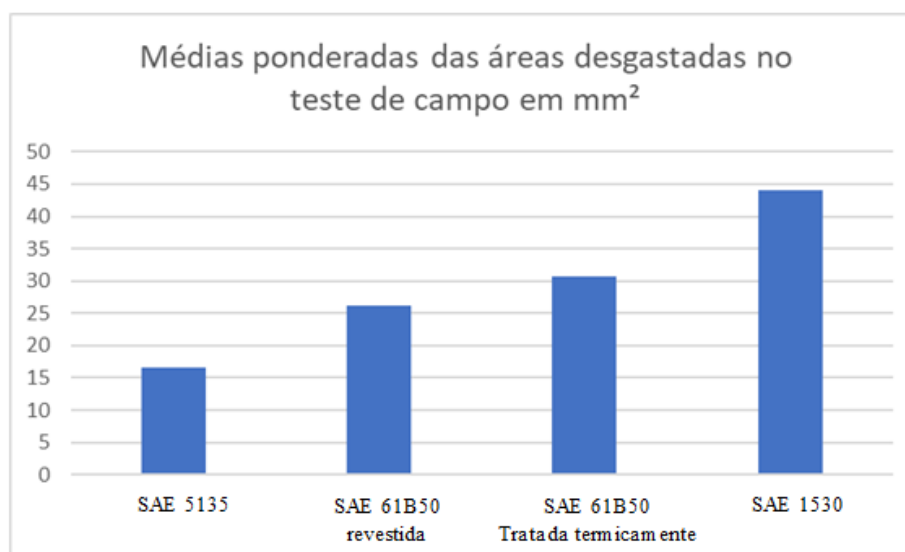
Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Médias ponderadas das áreas desgastadas no teste de campo em mm².

SAE-5135	SAE-61B50 REVESTIDA	SAE-61B50 TRATADA TERMICAMENTE	SAE-1530
16,50368	26,21292	30,69077	43,98625

Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - Gráfico das médias ponderadas das áreas desgastadas no teste de campo em mm².



Fonte: Autoria própria.

O melhor desempenho da peça de aço SAE 5135 deve-se à limpeza do aço, ou seja, ao baixo nível de inclusões não metálicas, o que é comprovado pelo resultado oposto do aço SAE1530, pelo mesmo motivo. Este fato demonstra que o ensaio de desgaste em laboratório não é adequado para previsão do desempenho da peça em campo. Isto porque a solicitação em campo é um misto de desgaste, fadiga e impacto. As resistências à fadiga e ao impacto são altamente afetadas pela presença de inclusões não metálicas.

6. CONCLUSÃO

Na a análise química, feita por Espectrometria de Emissão Óptica, concluiu-se que nenhum dos aços analisados poderia ser enquadrado na classificação dada pelo fabricante. Onde as amostras tidas com SAE-1045 melhor se enquadraram na classificação SAE-1530, SAE-5160 melhor se enquadraram na classificação SAE-5135 e as amostras tidas como SAE-15B30 melhor se enquadraram na classificação SAE-61B30. Tal variação é preocupante, visto que a classificação dada pelo fabricante é a usada como referência para a obtenção de valores característicos do material utilizados no dimensionamento de elementos de máquinas.

Os resultados dos testes laboratoriais mostraram, em um primeiro momento, que as amostras SAE-1530 tiveram um desempenho superior em comparação com as demais, tanto no ensaio de dureza quanto no ensaio de desgaste abrasivo a três-corpos. Quanto à dureza, as amostras SAE-1530 apresentaram maior dureza e menor perda de massa, seguida pelas amostras SAE-61B50, com valores intermediários nos quesitos avaliados e, por fim, as amostras SAE-5135 apresentaram os piores resultados.

Ao se analisar o resultado das mesmas peças no ensaio de campo, constatou-se que os melhores resultados em campo foram das amostras SAE-5135, com um resultado muito superior quando comparado com as demais, sendo as únicas a não fraturarem no teste.

Primeiramente, na medição direta da evolução do desgaste de acordo com o tempo que as peças foram expostas às condições de trabalho, as amostras SAE-5135 apresentaram melhor resultado, seguidas das amostras SAE-61B50 tratadas termicamente, seguidas pelas amostras SAE-61B50 revestidas. As amostras SAE-1530 apresentaram os piores resultados, onde, além do desgaste excessivo, foram as primeiras a fraturarem. Além da medição direta, foi possível determinar a área de desgaste por meio de um programa de análise de imagens, onde foi possível quantificar as perdas.

Com base nestes resultados, não foi possível atestar o motivo das piores amostras nos testes laboratoriais se mostrarem as melhores peças no teste de campo. Para responder tal questionamento, recorreu-se ao teste de inclusões, de acordo com a norma ASTM E-45, onde foi possível classificar a natureza das inclusões em cada amostra, bem como sua severidade.

Também foi possível quantificar, por meio do *software* de análise de imagens *ImageJ*, o número de inclusões e suas dimensões. Assim, a análise de inclusões e os resultados de tamanho médio de partículas, gerados pelo *software*, apontaram a presença de macroinclusões

nas amostras SAE-1530, SAE-61B50 revestida e SAE-61B50 tratada termicamente. Apenas a amostra tida como SAE-5135 seria aprovada em um controle de qualidade industrial.

Com esses resultados, conclui-se que, apesar de apresentar, em um primeiro momento, resultados inferiores aos das outras três amostras analisadas, as amostras SAE-5135 e SAE-61B30 apresentaram melhores resultados no teste de campo devido à ausência de macroinclusões. Quando analisadas isoladamente em laboratório, as amostras não estavam sujeitas aos vários esforços a que a peça está sujeita em campo, ao colocarmos as peças no teste de campo, tem-se as macroinclusões atuando como concentradores de tensões, o que gera um ponto no corpo onde as tensões são concentradas (mais elevadas).

Logo, tem-se que um corpo é mais resistente quando as forças por eles transmitidas são uniformemente distribuídas sobre sua área e, portanto, uma diminuição de área causada pela ocorrência de uma trinca, leva a um aumento localizado de tensões. Por consequência, o material pode falhar, quando uma tensão concentrada excede a resistência de coesão teórica do material, ocorrendo uma propagação de trincas. Trincas de fadiga sempre iniciam em concentração de tensões e, assim, removendo tais defeitos, é aumentada a resistência à fadiga.

Como conclusão final, o presente trabalho comprova que ainda não existe uma sequência de ensaios de laboratório que sejam suficientes para prever o comportamento das facas de corte basal em campo.

7. REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL; Heat Treatment of Steel, Vol. 4, 1991, pp 317-413.

ASTM E1122-96 - Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis – Annual Books of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, ASTM, West Conshohocken, p729-736,1999.

ASTM E45-97 - Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels – Annual Books of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, ASTM, West Conshohocken, p163-176,1999.

BATISTA, A.L.B., NASCIMENTO, I.A., “Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas”, Spectru Instrumental Científico (2004)

BRITO, Vagner José de; SILVA, Tiago Ap. Bueno da; FARAH, Prof. Dr. Alessandro Fraga. ESTUDO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE, DE FACAS DE CORTE DE BASE, TRATADAS TERMICAMENTE E REVESTIDAS. 2017. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Mecânica, Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo Curso Superior de Tecnologia em Mecânica, Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Sertãozinho, 2017.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 8. ed. New York: LTC, 2012. 724 p.

CASSIA, M. T.; SILVA, R. P.; PAIXÃO, C. S. S.; BERTONHA, R. S.; CAVICHIOLI, F. A. Desgaste das facas do corte basal na qualidade da colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n.6, p. 987-993, 2014.

CHIQUETI, Cleber Michel. **Estudo das distorções em aços AISI 5160 e AISI 6150 com variação da temperatura e da agitação do meio de resfriamento**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Eesc-usp, São Carlos, 2009.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira, primeiro levantamento** - safra 2017/2018 - ago/2017. Brasília-DF, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 abril 2018.

DAGNESE, Juliana. **Análise do comportamento elasto-plástico de um aço AISI 1045 em baixas deformações**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DA SILVA, R. N. A.; DE FREITAS, B. M.; DE OLIVEIRA, V. C.; KIELING, A. C.; NETO, J. C. M. Análise comparativa com diferentes tratamentos térmicos no aço VC131. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC. 2016.

DAVENPORT, E.S.; BAIN, E.C.; **Trans. Met. Soc. AIME** 90 (1930) 117-154.

DRUDI, Fernanda Scaranello. **PARÂMETROS PARA A PADRONIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA AVALIAÇÃO DE SEU DESEMPENHO ENERGÉTICO**. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Unesp, Botucatu, 2017.

DUTRA, William Todenti. **Soldagem à arco assistida por pré-aquecimento indutivo localizado**. 2015. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FURTADO, F. **Mecanização da colheita da cana traz benefício ambiental**. 2002. Disponível em: <<http://www.cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/1382>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

HONEYCOMB, R.W.K, Aços: microestrutura e propriedades, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa,1982.

JOHN G. SPEER (2018) 2017 BESSEMER PALESTRA: progresso na pesquisa de produtos siderúrgicos para o avanço da indústria e da sociedade, *Ironmaking & Steelmaking*, 45:10, 858-866, DOI: 10.1080 / 03019233.2018.1543605

LAM, Kelvin; ITOYAMA, Matheus Yukio de Arruda. **Análise Microestrutural e caracterização mecânica do Aço AISI 4350 submetido a diferentes tratamentos térmicos**. 2015. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Unesp, Guaratinguetá, 2015.

MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O. A. colheita de cana-de-açúcar: atualidade e perspectiva. In: CONGRESO DE INGENIERÍA RURAL Y MECANIZACIÓN AGRARIA EN EL AMBITO LATINOAMERICANO. **Anais...** La Plata: Argentina, 1998. p. 262-271.

MARCOMINI, José Benedito; GOLDENSTEIN, Hélio. Nova liga Fe-C-Mn-Si Cr para rolamentos: curvas de revenimento e fragilização da martensita revenida. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, ABM, v. 9, n. 4, p. 324-329, 2012. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/materias/download/1933461.pdf>>.

MARTINS, Maria Amélia. **Influência de Tratamentos Térmicos de Recozimento na Precipitação de Fase Sigma e nas Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Duplex**

UNS S31803. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Redemat, Ouro Preto, 2017

MELLO, R. C. **Utilização de lâminas serrilhadas no corte basal da Cana-de-açúcar.** 2011. 117 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

MERMET, J. M. “Trends in instrumentation and data processing in ICP- AES” J. Anal. At. Spectrom., 17: 1065, 2002.

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V., SANTOS, D.B., Introdução à metalurgia da soldagem. UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais-Demet. Belo Horizonte, MG (2012).

NEVES, J. L. M. *et al.* Avaliação de perdas invisíveis na colheita mecanizada em dois fluxos de massa de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 787-794, 2006.

NILSSON J.O. Super duplex stainless steels. *Materials Science and Technology*, v.8, p. 685-700, 1992.

PIMENTA, Cristie Diego et al. OTIMIZAÇÃO E ESCOLHA DE MODELOS PROBABILÍSTICOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO TÉRMICO EM ARAMES DE AÇO TEMPERADOS E REVENIDOS. **Revista Produção e Engenharia**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.640-652, 10 abr. 2017. Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (FCT). <http://dx.doi.org/10.18407/issn.1983-9952.2016.v8.n1.p640-652>.

PINTO, L.A.R. Colheita de cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.39, n.4, p. 38-51, abr. 1977.

PRETI, Itamar. Estudo do efeito das temperaturas de austenitização e de revenido na resistência e tenacidade do aço SAE 15B30. 2008. 87 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RAMOS, C. R. G. **Desempenho operacional da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Em função da velocidade de deslocamento e rotação do motor da colhedora.** 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita”, Botucatu, 2013.

RAMOS, Carlos Renato Guedes et al. EFICIÊNCIA E DEMANDA ENERGÉTICA DE UMA COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM TALHÕES DE DIFERENTES

COMPRIMENTOS. **Energia na Agricultura**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.121-128, 16 abr. 2016. EIA Energy in Agriculture. <http://dx.doi.org/10.17224/energagric.2016v31n2p121-128>.

RAMOS, Carlos Renato Guedes et al. QUALIDADE DA COLHEITA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO E ROTAÇÃO DO MOTOR DA COLHEDORA. **Energia na Agricultura**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.87-94, 10 jul. 2014. EIA Energy in Agriculture. <http://dx.doi.org/10.17224/energagric.2014v29n2>.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009. 333 p.

RIPOLI, T.C.C., VILLA NOVA, N.A. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: novos desafios. **STAB. Álcool, Açúcar, e Subprodutos**, Piracicaba, v. 11, n. 12, p.28-31, set./out. 1992.

SAE INTERNATIONAL. **J403: Chemical Composition of SAE Carbon Steels**. SAE International, 2009.

SANTOS, E. P. **Rebrota de duas variedades de cana-de-açúcar colhida crua sob dois níveis de desgaste das facas do mecanismo de corte basal**. 2008. 40 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

SALVI, J. V.; MATOS, M. A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de cortes de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 201-209, 2007.

SESTARI, A. V. *et al.* Avaliação qualitativa do corte basal de cana-de-açúcar realizado por facas revestidas com carbeto de tungstênio. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIARÍA AGRICOLA, 9., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: ALIA, 2010. 1 CD-ROM.

SILVA, R. P. *et al.* Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 292-304, 2008.

SOUZA, Filipe Possamai de. **EFEITO DOS PARÂMETROS DE AUSTÊMPERA NAS PROPRIEDADES DE UM AÇO SAE 5160 UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE FIXADORES**. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SPECTRU, Instrumental Científico Ltda. Tratamento Térmico dos Aços, 2013, disponível em: www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf.

VENDRAMINE, Cecília de Freitas. **LEVANTAMENTO DA CURVA TTT DO AÇO 15B30 COM ANÁLISE DOS CONSTITUINTES FERRITA E PERLITA**. 2012. 119 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2012.

VOLTARELLI, M. A.; SILVA, R. P.; ROSALEN, D. L.; ZERBATO, C.; CASSIA, M. T. Quality of performance of the operation of sugarcane mechanized planting in day and night shifts. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, n. 9, p.1396-1406, 2013.

VOLTARELLI, Murilo A. et al. QUALIDADE DO CORTE BASAL DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO-SE DE TRÊS MODELOS DE FACAS. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p.528-541, maio/jun. 2015.

VOLTARELLI, Murilo Aparecido et al. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar efetuado por facas de diferentes angulações e revestimentos. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, p.438-447, jul./set. 2017.

VOLPATO, J.L.M. Otimização de um cortador de base flutuante para seguimento do perfil de solo em colhedoras de cana-de-açúcar. 2001. 204 f. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., Soldagem : Processo e Metalurgia, Edgard Blücher, São Paulo (2004).