

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DE FALHA DE MARTELOS OSCILANTES DE DESFIBRADORES
UTILIZADOS EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS**

Ricardo Aparecido Sasso

São Carlos – SP
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DE FALHA DE MARTELOS OSCILANTES DE DESFIBRADORES
UTILIZADOS EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS**

Ricardo Aparecido Sasso

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. Piter Gargarella

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

São Carlos – SP

2021

DEDICATÓRIA

A Deus

A memória Póstuma do meu pai;

A minha mãe, que se dedicou inteiramente a minha felicidade;

A minha irmã Isabel, que tanto tem me apoiado, em todos estes anos como uma guerreira;

A minha sobrinha Maria Eduarda;

A minha noiva;

Aos amigos.

VITAE

Bacharel em Administração de Empresas pela Universidade Paulista

(2016)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro das Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais

FOLHA DE APROVAÇÃO

Defesa de dissertação de Mestrado do candidato Ricardo Aparecido Sasso,
realizada em 30/07/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Piter Gargarella (UFSCar)

Prof. Dr. Claudio Shyinti Kiminami (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Floriano (UNICAMP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se
arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Este trabalho não foi construído sozinho. Várias pessoas que cruzaram meu caminho ao longo desses 2 anos merecem um agradecimento especial. Primeiramente agradeço a Deus, por jamais deixar de cuidar de mim, sempre me protegendo e guiando meus passos.

Ao meu alicerce, minha família! Eles, que independente de qualquer coisa, estão sempre por mim. Aquele amor incondicional que é só de vocês. Se estou onde estou hoje é porque vocês me proporcionaram uma boa educação e estudo. Obrigado pai, mãe, irmã, sobrinha e noiva que tanto amo, obrigado por serem a melhor parte de mim.

Ao orientador desta dissertação o Doutor Professor Piter Gargarella, pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou. Aqui lhe exprimo a minha gratidão. Ao co-orientador Doutor Professor Guilherme Yuuki Koga, pela sua disponibilidade nos trabalhos de campo, pelo seu incentivo, e pelo seu apoio na elaboração deste trabalho. Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, pela atenção e eficiência no cumprimento de suas atribuições.

Aos meus amigos Dennis Coelho Cruz e Gustavo Figueira por todos os ensinamentos e pela contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho... meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

As usinas sucroalcooleiras tem exigido um maior controle de sua linha de produção com diminuição de perda de matéria prima, redução da manutenção de seus equipamentos e aumento dos lucros. A estação principal desse processo é a moenda, onde os seus componentes estão sujeitos a processos de degradação, principalmente desgaste e corrosão, diminuindo a eficiência da produção e aumentando os custos de manutenção. Este trabalho teve como objetivo realizar a análise de falhas dos martelos revestidos por solda, retirado do desfibrador de uma moenda após o uso. Através de técnicas de caracterização composicional, determinou-se que o material base é um aço carbono 1030, e o revestimento de liga ferrosa de alto Cr (22,2 %p) e C (3,65 %p). O revestimento apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo comparado ao material base e o de referência (aço inoxidável 410), por apresentar maior dureza e carbonetos duros (do tipo M_7C_3) que agem como elementos de reforço e proteção contra a remoção de material da matriz macia de ferrita e austenita por ação abrasiva. Apesar da complexidade do caldo de cana-de-açúcar, composto por cloretos, sulfetos e ácidos orgânicos, os resultados de corrosão obtidos através das curvas de polarização cíclica não apresentaram diferenças significativas entre os materiais testados nesse meio corrosivo. O aço inoxidável 410 obteve melhor desempenho frente aos efeitos corrosivos, devido ao Cr estar distribuído em solução sólida por todo o volume da microestrutura, que assegurou a formação de um filme passivo protetor, que ao contrário do revestimento, com elevado teor de Cr e C, forma-se carbonetos em excesso e interfaces empobrecidas em Cr, representando pontos preferenciais para a corrosão. As trincas presentes inicialmente no revestimento permitiram a penetração do caldo de cana-de-açúcar, e posterior desprendimento da solda por impacto, expondo o material base ao desgaste abrasivo e corrosivo. Um maior controle durante o processo de preparação do revestimento e o uso de um material base com maior resistência a corrosão poderiam prolongar significativamente a vida útil dos martelos.

Palavras Chaves: Análise de falha; Aço; Martelo desfibrador; Cana-de-açúcar; Desgaste; Corrosão.

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF OSCILLATING HAMMER MILL USED IN THE SUGARCANE INDUSTRY

Sugarcane mills have demanded more control of their production line, reduced loss of raw material, and a longer period before maintenance of their equipment, aiming to increase their profitability. The main station of this process is the mill responsible for crushing the sugar cane. Its components such as knives, hammers, and rollers are subject to degradation processes, mainly wear and corrosion, decreasing production efficiency and increasing the maintenance costs. This work aims to perform the failure analysis of hammers coated with weld, removed from a mill shredder after use. Through compositional characterization techniques, it was determined that the base material is a 1030 carbon steel, and the coating is a high Cr (22,2 %wt) and C (3,65 %wt) ferrous alloy. The coating showed greater resistance to abrasive wear compared to the base and reference material (410 stainless steel), it has greater hardness and hard carbides (type M_7C_3) that act as reinforcement and protection elements against the removal of the soft matrix material of ferrite and austenite by abrasive action. Despite the complexity of sugarcane juice, composed of chlorides, sulfides, and organic acids, the cyclic polarization curves did not show significant differences between the materials tested in this corrosive environment. The 410 stainless steel had better performance against corrosive effects, due to the complete dissolution of Cr in the solid solution, which ensured the formation of a protective passive film, which, unlike the coating, with a high content of Cr, creates carbides in excesses and interfaces depleted in Cr, representing preferential points for corrosion. The cracks in the coating allowed the penetration of the sugarcane juice, and subsequent detachment of the weld by impact, exposing the base material to abrasive wear and corrosive. Greater control during the coating preparation process and the use of a base material with greater corrosion resistance could significantly extend the life of the hammers.

Keywords: Failure analysis; Shredding hammer; Sugar cane; Wear; Corrosion.

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
SIMBOLOS E ABREVIACÕES	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	5
1.2 Objetivos Específicos.....	5
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 Produção Sucroalcooleira	7
2.2 Cana-de-açúcar e sua composição.....	8
2.3 Impurezas	10
2.4 Desfibrador	11
2.5 Processo de fabricação dos martelos	13
2.6 Implicações econômicas da degradação dos martelos	17
2.7 Desgaste.....	18
2.8 Corrosão	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Martelo.....	28
3.2 Preparação das amostras	28
3.3 Análise da microestrutura.....	30
3.4.1 Difração de Raios X (DRX)	31
3.4.2 Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha (S-OES).....	32
3.4.3 Técnica de combustão direta e detecção por infravermelho.....	32
3.5 Dureza Brinell	33
3.6 Ensaio de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha	34

3.7 Estudo da Corrosão	35
3.7.1 Polarização potenciodinâmica cíclica	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Caracterização dos materiais	39
4.2 Resistência ao desgaste	46
4.3 Resistência a Corrosão	50
4.4 Análise de Falha	53
5 CONCLUSÕES	57
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Expansão da produção de produtos sucroalcooleiro [11].	7
Tabela 2.2 – Variação da composição do caldo da cana-de-açúcar durante o período de safra [15].	9
Tabela 2.3 – Classificação do pH do caldo da cana-de-açúcar [16].	10
Tabela 2.4 – Análise quantitativa de impurezas [20].	11
Tabela 2.5 – Composição química e propriedades mecânicas do aço carbono ASTM A36 [25].	14
Tabela 2.6 – Composição química e propriedades mecânicas do bronze ASTM B584 -14 [26].	15
Tabela 2.7 – Detalhamento do custo de 01 manutenção dos martelos [33].	18
Tabela 3.1 – Detalhamento do procedimento D da norma ASTM G65-16 [54].	35
Tabela 4.1 – Resultados da análise química (%p) por Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha (S-OES) para material base e revestimento. Fonte: Próprio autor.	40
Tabela 4.2 – Resultados da análise química (%p) através da técnica de Combustão Direta e Detecção por Infravermelho. Fonte: Próprio autor.	40
Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de desgaste para o aço inoxidável 410. Fonte: Próprio autor.	47
Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de desgaste para o material base. Fonte: Próprio autor.	48
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de desgaste para o revestimento. Fonte: Próprio autor.	48
Tabela 4.6 – Resultados obtidos a partir de curvas de polarização potenciodinâmica para o material base, aço inoxidável 410 e revestimento. Fonte: Próprio autor.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma do processo de beneficiamento da cana-de-açúcar. Fonte: Próprio autor.	2
Figura 1.2 – (a) Martelo novo, (b) martelo degradado (desgaste e corrosão), (c) martelo com revestimento de solda. Fonte: Próprio autor.	3
Figura 1.3 – Produção científica durante o período de 1999/2019. Palavras chaves: <i>shredder hammer, wear, corrosion, sugar cane</i> . Fonte: Base de dados Scopus, Science Direct, Web of Science e Springer.	4
Figura 2.1 – (a) Desfibrador de cana-de-açúcar, (b) martelos (c) desenho esquemático com suas dimensões [22].	12
Figura 2.2 – (a) Detalhamento do desfibrador de cana-de-açúcar. (b) Mais detalhes de um martelo [24].	13
Figura 2.3 – Desenho técnico do martelo e seus componentes [28].	14
Figura 2.4 – Desenho do produto fabricado: martelo do desfibrador de cana-de-açúcar, com enfoque na região da base submetida à maior abrasão. Fonte: Próprio autor.	17
Figura 2.5 – Riscos e múltiplas indentações na superfície das facas [34].	19
Figura 2.6 – Microestrutura do revestimento: a) dendritas de austenita e b) Carbonetos M_7C_3 , onde M é o elemento metálico da liga [36].	20
Figura 2.7 – Desgaste típico nos vértices dos martelos convencionais (largura da peça entre 130 e 170 mm e espessura de 50 e 70 mm) [41].	21
Figura 2.8 – Histórico de impurezas na cana-de-açúcar (Centro Tecnológico da Coopersucar - CTC) [45].	22
Figura 2.9 – Representação do teste de fadiga por flexão rotativa [45].	23
Figura 2.10 – Aspecto superficial: aço AISI 316 a (esquerda) e AISI 304 a (direita) após a imersão em ácido cítrico 10% em água destilada (100 °C), por 180 minutos [47].	23
Figura 2.11 – Superfície do aço AISI 304L com corrosão por pites (à esquerda) e imagem ampliada do pite (à direita) [49].	24
Figura 3.1 – Diagrama esquemático das etapas de desenvolvimento do trabalho. Fonte: Próprio autor.	27

- Figura 3.2** – Martelo do desfibrador: vista frontal (**à esquerda**) e vista lateral (**à direita**). Fonte: Próprio autor.28
- Figura 3.3** – **(a)** Martelo, **(b)** detalhe da extremidade, **(c)** amostra embutida para ensaio de microscopia e difração de raios X, **(d)** amostra sem embutir para ensaio de dureza, **(e)** lascas para ensaio de combustão direta e detecção por infravermelho, **(f)** cubo para ensaio de espectrometria de emissão óptica por centelha e polarização potenciodinâmica cíclica, e **(g)** chapa para ensaio de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha. Fonte: Próprio autor.29
- Figura 3.4** – **(a)** Cortadora cut off Arotec Arocor 40, **(b)** embutidora Arotec PRE 30. **(c)** Microscópio ótico Olympus, modelo BX41MLED. Fonte: Próprio autor.....31
- Figura 3.5** – Difratômetro de raios X Bruker D8 ADVANCE. Fonte: Próprio autor.....31
- Figura 3.6** – Espectrômetro SPECTROMAX (**à esquerda**) e detalhe do suporte da amostra (**à direita**) [51].....32
- Figura 3.7** – Quantificação de carbono em analisador LECO CS-844 [52]. .33
- Figura 3.8** – Durômetro modelo Heckert HPO250. **A esquerda** (vista frontal) e **a direita** (vista lateral). Fonte: Próprio autor.....33
- Figura 3.9** – Abrasômetro – Roda de Borracha. Fonte: Próprio autor.34
- Figura 3.10** – Representação esquemática de uma curva de polarização anódica genérica **(a)** com a indicação de alguns parâmetros característicos e suas regiões específicas. Em caso de corrosão localizada, curvas de polarização cíclica são geralmente utilizadas **(b)**, na qual duas regiões características de passivação existem (perfeita e imperfeita). Em **(a)** i_{cp} é a densidade crítica de passivação correspondente a um potencial primário de passivação E_{pp} onde há a transição entre o estado ativo para o passivo; a partir de E_p , potencial de passivação, ocorre a passivação completa e a densidade de corrente de passivação i_{pass} é baixa, até que ocorre a ruptura do filme passivo a partir do potencial de transpassivação, E_{transp} . Em **(b)**, ao se reverter a polarização em sentido catódico a partir de densidade de corrente de reversão (i_r) o filme passivo pode ser completamente restabelecido se o

potencial for abaixo do potencial de proteção, E_{prot} . Fonte: Próprio autor.	37
Figura 4.1 – Difratoograma do material base do martelo. Fonte: Próprio autor.	41
Figura 4.2 – Microestrutura do material base do martelo com aumento de 200X (à esquerda) e 1000X (à direita) com ataque químico de Nital 2%. Fonte: Próprio autor.	42
Figura 4.3 – Difratoograma do revestimento do martelo. Fonte: Próprio autor.	43
Figura 4.4 – Microestrutura do revestimento do martelo com aumento de 1000X. Fonte: Próprio autor.	44
Figura 4.5 – Microestrutura da interface (material base + revestimento) com aumento de 1000 x vezes. Fonte: Próprio autor.	45
Figura 4.6 – Microestrutura do aço inoxidável 410 com ataque por reagente Villela. Fonte: Próprio autor.	45
Figura 4.7 – Valores de dureza brinell do material base, revestimento, material de referência (aço inoxidável 410) e do quartzo (SiO_2). Fonte: Próprio autor.	46
Figura 4.8 – Antes do ensaio (linha superior) e depois (linha inferior): material base (a,d), revestimento (b,e) e aço inoxidável 410 (c,f). Fonte: Próprio autor.	49
Figura 4.9 – Curvas de polarização cíclica obtida para o aço inoxidável 410, material base e revestimento. Fonte: Próprio autor.	51
Figura 4.10 – Composição do martelo oscilante (a) com detalhes das trincas no revestimento duro (b) e a interface da solda (c); rotação típica de operação (d); início da fratura a partir das trincas (e) e degradação do metal base (f); degradação preferencial do metal de base e remoção do revestimento (g); metal de base severamente degradado (h). Fonte: Próprio autor.	54

SIMBOLOS E ABREVIACÖES

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Standard for Testing of Materials</i>
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CR	Revestimento duro
C	Carbono
Cr	Cromo
DRX	Difratometria (ou Difracção) de Raios X
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
E_{corr}	Potencial de corrosão
E_{transp}	Potencial de transpassivação
HB	Dureza Brinell
I_{corr}	Intensidade de corrente de corrosão
i_{pass}	Densidade de corrente de passivação
Mn	Manganês
MO	Microscopia Ótica
NBR NM	Norma Brasileira Norma Mercosul
P	Fosforo
S-OES	Espectrometria de Emissão Ótica por Centelha
Si	Silício
S	Enxofre
ÚNICA	União da Indústria de cana-de-açúcar
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Rocha [1], a indústria sucroalcooleira sempre teve um papel histórico no Brasil, especialmente na economia ao gerar *commodities* sustentáveis e proporcionando empregos. Historicamente, as regiões do país que têm cultivado a cana-de-açúcar em larga escala são o Nordeste e o estado de São Paulo. A plantação de cana-de-açúcar e a extração de seus derivados (açúcar e álcool) é uma das mais importantes atividades agroindustriais e econômicas do país. A cana-de-açúcar é a segunda principal fonte de energia do país, atrás apenas do petróleo [2]. O Brasil é o maior exportador mundial de açúcar e álcool [3]. Enquanto a produção de soja (um dos principais produtos agrícolas exportados pelo Brasil) cresceu 1,3%, a produção de derivados da cana-de-açúcar cresceu 26,7% em 2019, sendo que o Brasil possui o menor custo de produção de açúcar do mundo devido aos baixos salários pagos aos trabalhadores do campo e por não possuir práticas voltadas para a sustentabilidade [4].

A produção da cana-de-açúcar é de grande importância econômica para o país, maior produtor mundial com 337.328.000 toneladas anual, sendo mais da metade produzida no estado de São Paulo, com 178.180.000 toneladas anual. A influência econômica da cana-de-açúcar é muito grande no país, gerando muitos empregos durante o período de colheita mais conhecida como “safra”, e nos outros meses do ano com a manutenção de máquinas e equipamentos das usinas. Tudo isso é significativo para o crescimento da agroindústria e, portanto, da economia do país [5].

No Brasil, a cana-de-açúcar é um importante fator socioeconômico constituindo-se como base de três importantes agroindústrias: açúcar, aguardente e álcool; essas, por sua vez, são fontes de matéria-prima para outras indústrias.

O Fluxograma do processo de beneficiamento da cana-de-açúcar é mostrado na Figura 1.1. O martelo que será estudado na presente dissertação, é um componente do desfibrador localizado na moenda. Ele é considerado como um elemento essencial dentro do processo produtivo das indústrias

açucareiras devido a sua alta eficiência na obtenção do suco da cana-de-açúcar, realizando o desmembramento completo do produto, e extraíndo as impurezas. Por outro lado, o componente tem seu desempenho reduzido por conta do efeito corrosivo do extrato da cana-de-açúcar, além do desgaste devido a incorporação de contaminantes minerais.

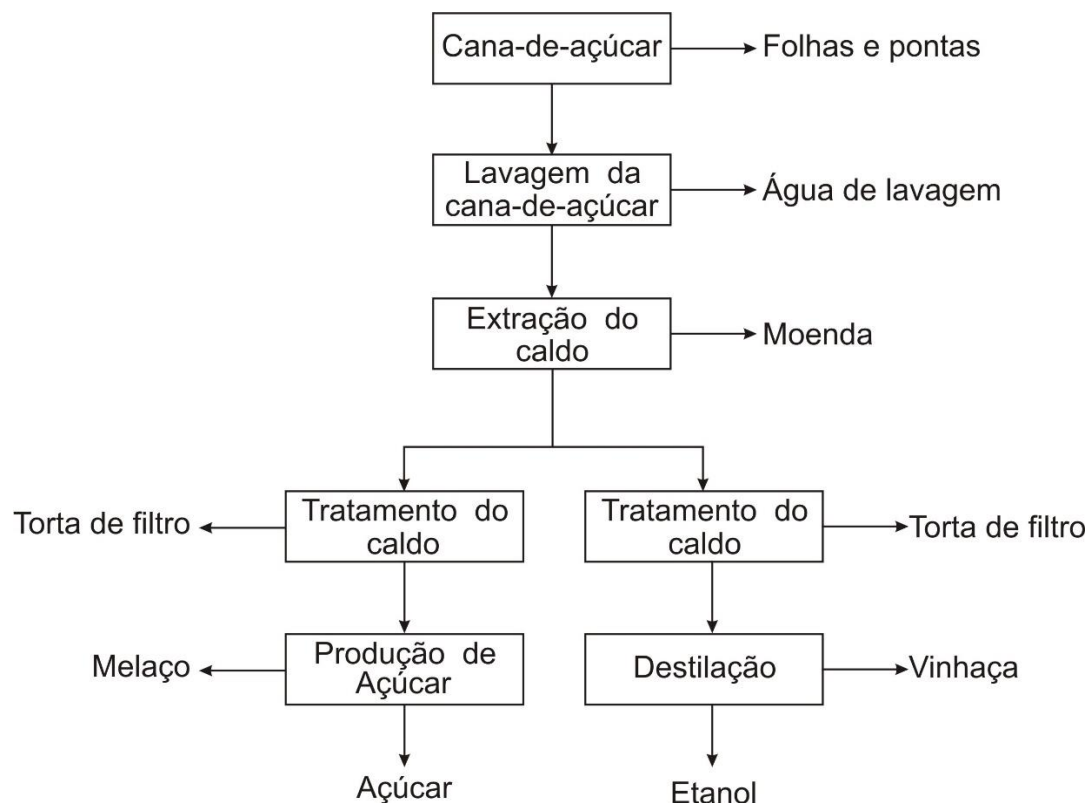


Figura 1.1 – Fluxograma do processo de beneficiamento da cana-de-açúcar.

Fonte: Próprio autor.

O martelo é uma ferramenta que pode sofrer degradação prematura em consequência dos altos níveis de incorporação de impurezas minerais advindos da cana-de-açúcar e de seu corrosivo extrato. As consequências são as frequentes paradas de manutenção do desfibrador para troca ou reparo do martelo (Figura 1.2), impactando nos custos de produção.

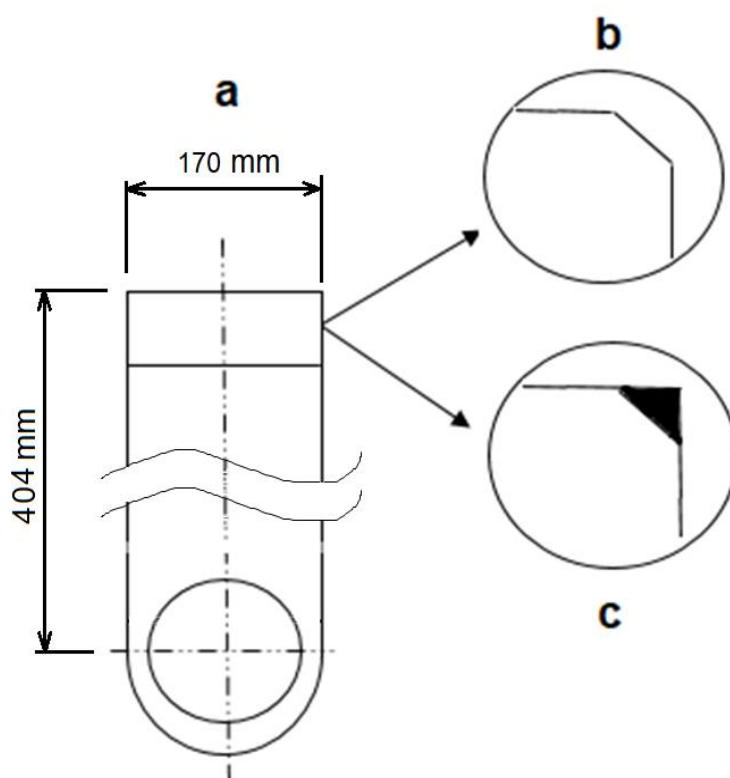


Figura 1.2 – (a) Martelo novo, (b) martelo degradado (desgaste e corrosão), (c) martelo com revestimento de solda. Fonte: Próprio autor.

Avaliando a evolução da produção científica sobre o processo de moagem da cana-de-açúcar nos últimos 20 anos (Figura 1.3), nota-se a presença de trabalhos relacionados a obtenção dos seus derivados bem como estudos sobre o desempenho de equipamentos. Poucos estudos foram realizados sobre a análise de falhas dos martelos degradados, o que mostra uma lacuna no conhecimento que pode ser explorada.

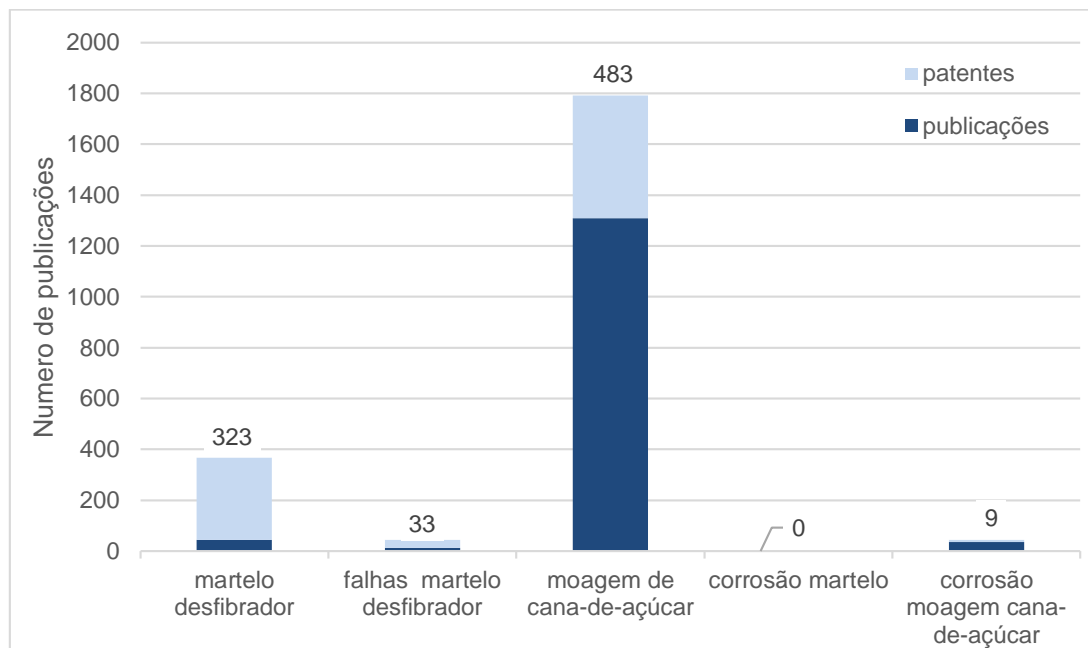


Figura 1.3 – Produção científica durante o período de 1999/2019. Palavras chaves: *shredder hammer*, *wear*, *corrosion*, *sugar cane*. Fonte: Base de dados *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Springer*.

Informações provenientes da União da Indústria de cana-de-açúcar (ÚNICA), que possui 313 usinas cadastradas, revelam que os custos com reposição e manutenção de componentes da moenda (facas, martelos e rolos) representam em torno de 5% da receita bruta anual [6]. Isso implica em torno de 500 milhões de reais por ano para as usinas cadastradas e citadas por Brandim *et al.* [7]. Portanto, o aumento em vida dos martelos poderia acarretar uma economia considerável para as usinas sucroalcooleiras.

Estudos realizados no processamento da cana-de-açúcar estão focados no desgaste abrasivo à baixa tensão, classificado pela literatura [8] como o mais representativo nas usinas sucroalcooleiras. Outro mecanismo associado à degradação dos equipamentos sucroalcooleiros (evaporadores, moenda e caldeira) é a corrosão. Durante o processamento e tratamento da cana-de-açúcar existem meios corrosivos como: a água da chuva no recebimento da cana-de-açúcar e, principalmente, o caldo da cana-de-açúcar, o qual pode ser ácido e conter íons cloretos [9]. Tais estudos, no entanto, não

se preocupam com a caracterização composicional e superficial de amostras do material desse componente, o martelo desfibrilador.

Com base no que foi apresentado anteriormente, o martelo é um componente essencial na cadeia produtiva da usina sucroalcooleira, e a compreensão dos seus mecanismos de falha pode favorecer uma maior previsibilidade e espaçamento entre as operações de manutenção, evitando prejuízos para a empresa. Para tanto, o desafio deste trabalho será caracterizar amostras do material de base e revestimento formador do martelo oscilante retirado do desfibrador após o uso, buscando uma relação dessas falhas quando o mesmo é submetido às solicitações de serviço, tais como esforço mecânico, ambiente corrosivo e atrito.

1.1 Objetivo geral

O principal objetivo desse trabalho é a análise de falhas do martelo desfibrador retirado após uso em moendas da indústria sucroalcooleira, visando compreender os mecanismos de sua degradação.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Investigar a microestrutura e a composição química dos materiais de base e do revestimento;
- b) Avaliar o desempenho de amostras retiradas do martelo em ambiente simulado de desgaste abrasivo;
- c) Determinar o efeito corrosivo do caldo de cana-de-açúcar nos materiais estudados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Produção Sucroalcooleira

A cana-de-açúcar sempre teve papel muito importante na economia brasileira. A valorização do etanol como alternativa à substituição dos combustíveis fósseis, o fortalecimento do preço do açúcar no mercado de *commodities*, a utilização e a valorização de subprodutos industriais resultantes da fabricação de açúcar e álcool e a alcoolquímica são fatores que motivaram uma forte expansão da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, induzindo à modernização e à maior eficiência da indústria canavieira. A expansão da cultura da cana-de-açúcar, prevista para os próximos anos, está baseada no aumento de produção e do consumo do etanol para atender ao crescimento do mercado interno e suprir as exportações, que deverão crescer substancialmente [10]. A Tabela 2.1 mostra a expansão de produção dos produtos da indústria sucroalcooleira.

Tabela 2.1 – Expansão da produção de produtos sucroalcooleiro [11].

Produção de açúcar, etanol e energia elétrica				
Período Safra	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Cana-de-açúcar (milhões de tons)	20	20,3	22,2	23,5
Açúcar (mil tons)	1.230	1.301	1.407	1.513
Etanol (m ³)	750	883	953	1.097
Energia Elétrica (mil MW)	741	720	913	998

Legenda: tons = toneladas; MW = 10⁶ Watts

2.2 Cana-de-açúcar e sua composição

Segundo Manella [12], a cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum*, é uma gramínea indiana cultivada principalmente em países tropicais para a extração do açúcar, com haste de três a quatro metros de altura e com módulos e miolo ricos em sacarose.

De acordo com Payne [13], a cana-de-açúcar constitui-se de uma fração sólida, a fibra, e outra líquida, o caldo, que devem ser separadas para a produção do açúcar. A constituição morfológica da cana-de-açúcar são: rizomas, raízes, colmo, folhas e flores. Para a indústria, o colmo apresenta valor agregado superior aos demais apresentados, devido seus derivados (açúcar e etanol) produzidos a partir de seu extrato.

Nas épocas do ano em que predominam altas temperaturas e umidade, há grande crescimento vegetativo da planta e, conseqüentemente, a fotossíntese se dedica à produção de hidratos de carbono de alto peso molecular. Sob temperaturas mais amenas e menor umidade, a síntese de sacarose atinge níveis máximos, sendo este estágio chamado de maturidade tecnológica da cana-de-açúcar. Este ciclo de crescimento e maturação se repete anualmente, num ciclo de 12 a 14 meses. A colheita é feita ao se completar um ou dois ciclos, de acordo com o requerimento de massa de cana-de-açúcar por hectare [14].

A Tabela 2.2 mostra dados de uma composição típica do caldo de cana-de-açúcar, medida pela técnica de análise quantitativa inorgânica.

Tabela 2.2 – Variação da composição do caldo da cana-de-açúcar durante o período de safra [15].

Componentes	Variação analítica	
	Mínimo	Máximo
	%	%
Sacarose	8,0	20,0
Açúcares redutores	0,3	2,5
	mg/100ml	mg/100 ml
Cinzas	250	600
Cálcio (Ca)	8	30
Magnésio (MgO)	10	30
Potássio (K ₂ O)	80	250
Sódio (Na ₂ O)	30	60
Fósforo (P ₂ O ₅)	7	40
Ferro (Fe ₂ O ₃)	2	10
Alumínio (Al ₂ O ₃)	2	5
Cloro (Cl)	15	30
Óxido sulfúrico (SO ₃)	30	50
Sílica (SiO ₂)	10	50
Proteínas (N x 6,25)	150	400
Gomas	20	50
Pectinas	20	100
Ceras, gorduras	50	150
Amido	55	50
Ácidos orgânicos	50	150

A composição da cana-de-açúcar pode variar de acordo com as condições do solo e as correções realizadas (calcário, gesso, fertilizantes), que podem afetar a qualidade do caldo extraído. De acordo com os dados da Tabela 2.3, pH entre 5,2 e 5,5 é a faixa de melhores condições de uso, no entanto valores entre 5,0 e 5,2 é possível apontar a deterioração do caldo

(estado envelhecido), e abaixo de 5,0, sua aparência leitosa indica elevada fermentação (azedo) [16].

Tabela 2.3 – Classificação do pH do caldo da cana-de-açúcar [16].

pH	Qualidade da Cana-de-açúcar
<i>Menor que 5,0</i>	Cana-de-açúcar muito deteriorada
<i>Entre 5,00 a 5,10</i>	Cana-de-açúcar deteriorada
<i>Entre 5,11 a 5,20</i>	Cana-de-açúcar muito verde ou deteriorada
<i>Entre 5,21 a 5,30</i>	Cana-de-açúcar verde ou com níveis normais de deterioração
<i>Entre 5,31 a 5,40</i>	Cana-de-açúcar madura e fresca
<i>Maior que 5,41</i>	Cana-de-açúcar muito madura e fresca

As análises são realizadas em duas em duas horas, para que a indústria sucroalcooleira possa tomar as melhores decisões, minimizando as perdas dos produtos e aumentando o rendimento industrial, resultando em uma maior produtividade [17]. A partir das Tabelas 2.2 e 2.3, observa-se que o caldo possui composição complexa, contém cloretos e pode ser ligeiramente ácido (pH ~ 5), portanto, potencialmente corrosivo aos elementos metálicos a ele exposto.

2.3 Impurezas

Após a colheita da cana-de-açúcar, são enviadas para a usina, além da matéria orgânica vegetal (constituída por plantas com folha, raiz e ponta do caule), outros materiais de origem mineral (terra e pedra) [18]. As impurezas minerais são indesejáveis porque causam desgaste nos equipamentos; já as impurezas vegetais aumentam o volume de matéria-prima de entrada, diminuindo o aproveitamento da extração devido à utilização de potência desnecessária das máquinas [19].

A Tabela 2.4 apresenta os dados de impurezas de diferentes frentes de trabalho em um determinado dia, indicando que pouco mais de 1% é impureza mineral e 7% são impurezas vegetais.

Tabela 2.4 – Análise quantitativa de impurezas [20].

Data da Análise	Frente	Impureza Mineral	Impureza Vegetal
		kg de impurezas / ton de cana-de-açúcar	
03/08/2019	1	0,85	8,24
03/08/2019	2	0,42	6,82
03/08/2019	3	0,59	8,90
03/08/2019	4	0,45	7,11
03/08/2019	5	0,42	8,72
03/08/2019	6	1,17	7,21
03/08/2019	7	0,59	9,00
03/08/2019	8	2,61	15,63
03/08/2019	9	1,43	0,00
03/08/2019	10	3,18	0,00
Total		11,71	71,63

2.4 Desfibrador

A cana-de-açúcar é higienizada após a colheita, seguindo para um processo de desintegração das suas células vegetais por meio dos martelos do desfibrador (Figura 2.1), que extrai seus derivados com alta produtividade e baixo consumo de energia elétrica [21].

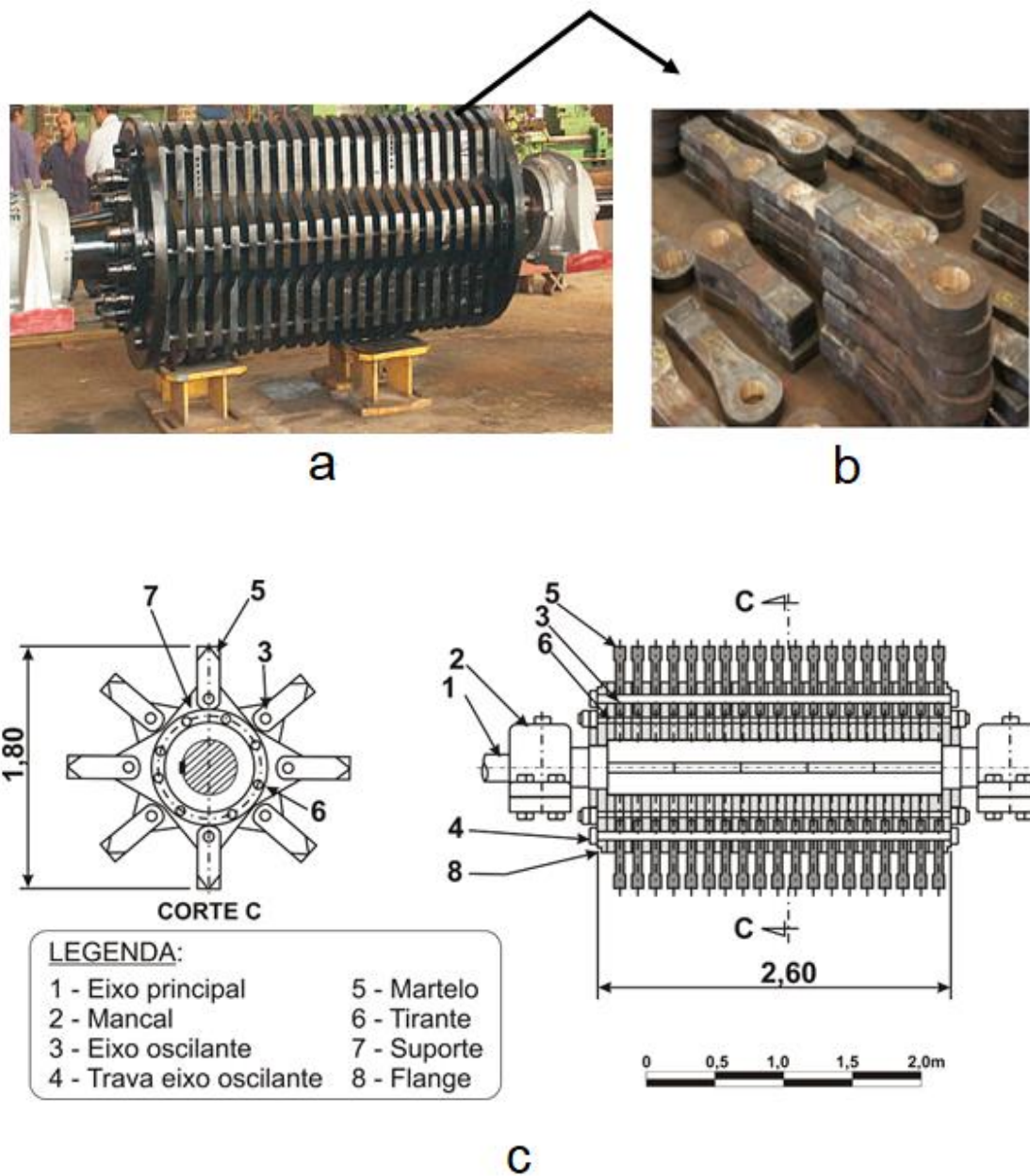


Figura 2.1 – (a) Desfibrador de cana-de-açúcar, (b) martelos (c) desenho esquemático com suas dimensões [22].

Durante o processo de desfibramento, a cana-de-açúcar picada é carregada pela esteira metálica (Figura 2.2), direcionada pelo tambor de alimentação para que ocorra o esmagamento entre a placa desfibradora e o martelo (abertura de 30 mm), e posteriormente obtém o vegetal cisalhado. Os martelos são movidos por um rotor com potência de 50 cv e rotação entre 500

e 1500 rpm, girando em sentido contrário à esteira com velocidade periférica de 60 a 90 m/s. [23].

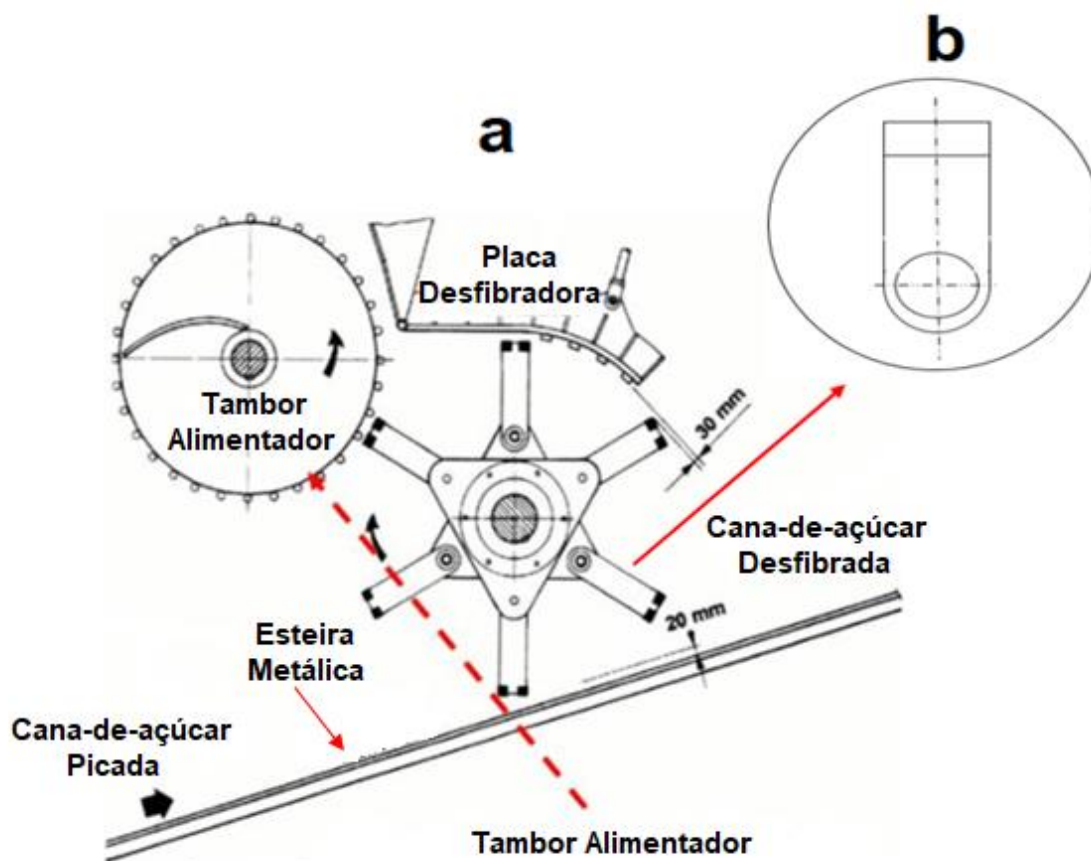


Figura 2.2 – (a) Detalhamento do desfibrador de cana-de-açúcar. **(b)** Mais detalhes de um martelo [24].

2.5 Processo de fabricação dos martelos

Para fabricação dos martelos oscilantes, utilizam-se como matéria-prima chapas de aço carbono ASTM A36 [25] de 2" e de ½" obtidas pelo processo de oxicorte, utilizadas nos itens 1 e 2 da Figura 2.3, respectivamente. A composição química e propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 2.5, como preconiza a referida norma ASTM A36 [25].

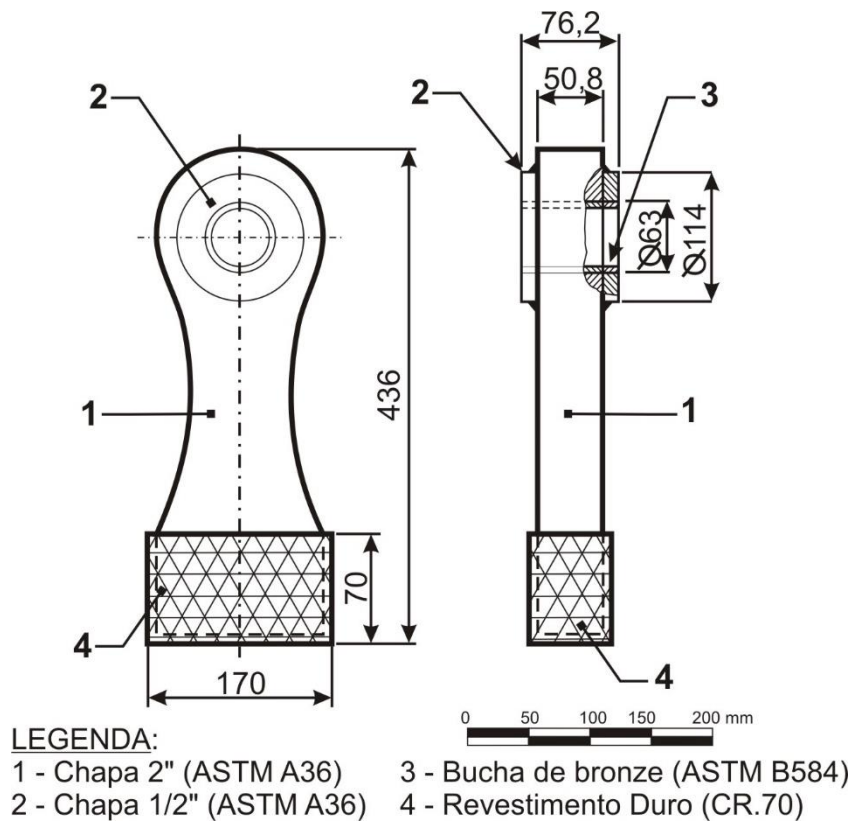


Figura 2.3 – Desenho técnico do martelo e seus componentes [28].

Tabela 2.5 – Composição química e propriedades mecânicas do aço carbono ASTM A36 [25]

Composição Química (%p)					
C	P	S	Si	Cu	Fe
0,26	0,04	0,05	0,40	0,20	Restante
Propriedades Mecânicas					
Limite de Escoamento				250 MPa	
Limite de Ruptura				400 – 550 MPa	
Dureza Brinell				112 HB	

Outro componente do martelo é a bucha (item 3 da Figura 2.3), fabricado com tarugos de bronze ASTM B584 [26], conforme especificações da Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Composição química e propriedades mecânicas do bronze ASTM B584 -14 [26].

Composição Química (%p)			
Cu	Ni	Fe	Al
79,5	5	6,0	9,5
Propriedades Mecânicas fornecidas pelo fabricante			
Limite de Escoamento		147 – 196 MPa	
Limite de Ruptura		294 – 392 MPa	
Dureza Brinell		90 HB	

Os nove passos a seguir detalham de forma resumida o processo de fabricação dos martelos oscilantes [27].

1° passo: as chapas passam inicialmente pelo setor de caldeiraria, responsável pela remoção das rebarbas, montagem, soldagem e acabamento.

2° passo: ao término do processo de soldagem, as peças são submetidas a inspeções dimensionais e verificação de trincas e porosidades nas soldas. Caso aprovadas, elas são encaminhadas ao setor de usinagem.

3° passo: no setor de usinagem as peças são enviadas para a fresadora ou centro de usinagem para a realização da furação. Já os tarugos são enviados aos tornos CNCs para fabricação das buchas de bronze.

4° passo: ao término do processo de usinagem, as chapas e buchas são submetidas a uma inspeção dimensional, para verificar se elas foram

fabricadas conforme medidas e tolerâncias adotadas nos desenhos de fabricação. As chapas aprovadas são encaminhadas novamente para o setor de caldeiraria, e as buchas de bronze são encaminhadas para o setor de montagem.

5° passo: no setor de caldeiraria ocorre a aplicação de solda dura (CR 70 / DIN 8555) [29], que possui em sua composição química C, Mn, Cr e Si. O processo utilizado é com Eletrodo Revestido (Arco Manual) nas pontas e vértices dos martelos. A aplicação de solda dura nessas regiões tem como objetivo aumentar a dureza e durabilidade superficial.

6° passo: ainda no setor de caldeiraria os martelos são balanceados em uma balança estática, também conhecida como balança de braço.

7° passo: após finalizar o balanceamento dos martelos, eles são encaminhados ao setor de montagem para colagem das buchas.

8° passo: após a colagem das buchas nos martelos, eles são inspecionados e encaminhados ao setor de pintura, em caso de aprovação.

9° passo: depois de pintados, os martelos sofrem uma última inspeção e são liberados para serem embalados e expedidos para os clientes, em caso de aprovação.

O processo de fabricação dos martelos oscilantes envolve, portanto, basicamente as etapas de caldeiraria, usinagem, montagem, pintura e expedição. A Figura 2.4 mostra o martelo fabricado com a base reforçada.

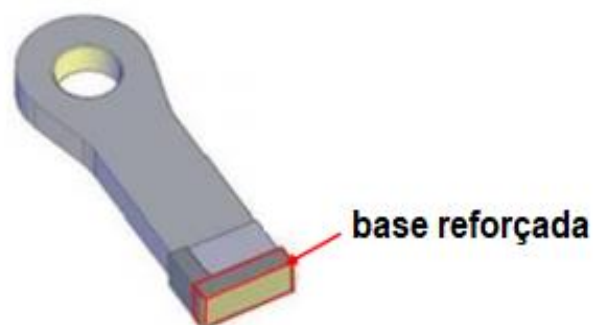


Figura 2.4 – Desenho do produto fabricado: martelo do desfibrador de cana-de-açúcar, com enfoque na região da base submetida à maior abrasão. Fonte: Próprio autor.

2.6 Implicações econômicas da degradação dos martelos

Perdas operacionais devido a falhas de equipamentos reduzem a eficiência e acarretam elevados prejuízos econômicos no setor sucroalcooleiro. Para Kardec e Nascif [30], a manutenção de equipamentos deve e tem que ser entendida como uma função estratégica na obtenção de resultados da organização, com a função de suporte ao gerenciamento e à solução de problemas apresentados na produção, elevando a empresa em patamares competitivos de flexibilidade, qualidade e produtividade. Assim, a política de manutenção deve ser definida pela empresa segundo os seus objetivos organizacionais, apresentando-se como fator determinante do sucesso do planejamento da produção e, portanto, da produtividade do processo.

Devido à necessidade das usinas sucroalcooleiras em realizar manutenção nas moendas, as implicações econômicas são elevadas, conforme custos da usina mostrados na Tabela 2.7 [31]. Durante o período de safra, os martelos oscilantes dos desfibradores sofrem manutenção a cada 45 dias, na qual ou sofrem reparação na região degradada ou são substituídos por novos. Cada manutenção gira em torno de R\$ 545.880,16 reais, como detalhada na Tabela 2.7, totalizando R\$ 2.729.400,80 reais por safra [32].

Tabela 2.7 – Detalhamento do custo de 01 manutenção dos martelos [33].

Composição dos custos para manutenção dos martelos					
Descrição	Quantidade de operadores	Quantidade litros de etanol (m ³)		Toneladas de açúcar	Total (R\$)
Mão de obra	8	-		-	230,16
Etanol a ser produzido	-	122,5		-	243.775
Açúcar a ser produzido	-	-		287,5	301.875
Total custos	-	-		-	545.880,16

Descrição	Salário (hora)	Valor (litro)	Valor (R\$)	Valor (kg)	Quantidade de horas
Operadores	R\$ 9,59	-	-	-	-
Etanol	-	R\$ 1,99		-	-
Açúcar	-	-	-	R\$ 1,05	-
Reparo do equipamento	-	-	-	-	3
Martelo	-	-	1.349,87	-	-

2.7 Desgaste

Yin *et al.* [34] estudaram os martelos manufaturados com pontas de carbeto de tungstênio utilizados em moendas de cana-de-açúcar, onde observaram desgaste, fraturas e trincas de fadiga na superfície do material devido às impurezas minerais do processo (rochas, areias, etc) e ao impacto e alta velocidade do desfibrador. Os autores concluíram que as áreas

fraturadas reduziram significativamente (em 10%) a funcionalidade dos martelos.

Lima [35] caracterizou os mecanismos de desgaste em facas picadoras após a trituração da cana-de-açúcar em usina sucroalcooleira, onde identificou riscos por partículas abrasivas e múltiplas indentações na superfície (Figura 2.5); o desgaste relativo da ferramenta foi de aproximadamente 1,4 gramas/tons por cana-de-açúcar processada.

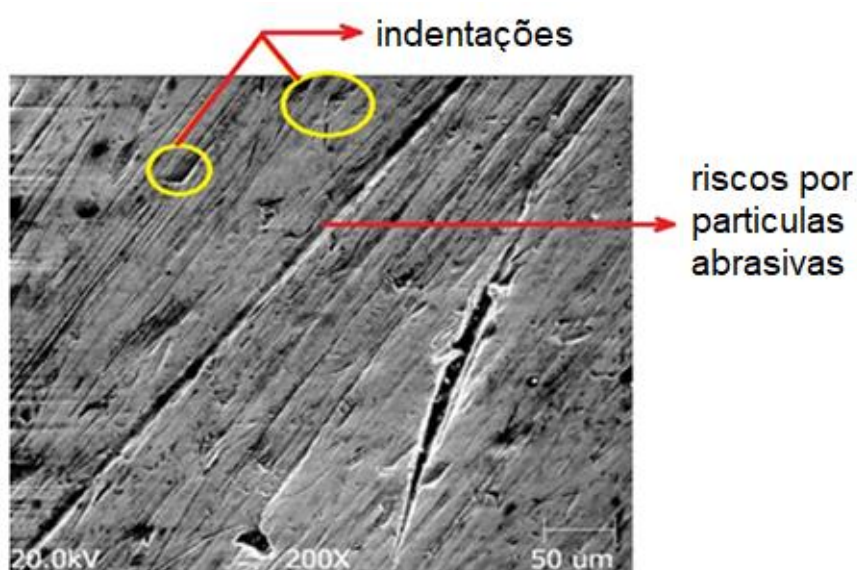


Figura 2.5 – Riscos e múltiplas indentações na superfície das facas [34].

Podany, Džugan e Vacik [36] simularam quatro tipos de soldas aplicadas em martelos desfibradores com diferentes teores de C, Si, Mn, e Cr. Todas as soldas exibiram alta dureza e boa resistência ao impacto, exceto a solda com maior teor de Cr, que mostrou propagação de trincas. Após ensaios de pino sobre disco, a amostra com menor teor de Cr foi a indicada pelos autores para uso em martelos graças à boa dureza e menor taxa específica de desgaste de $4,53 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Em outro estudo, Lima e Ferraresi [37] analisaram a microestrutura do revestimento das facas, cuja microestrutura era composta por dendritas de austenita (Figura 2.6a, fase de menor dureza e resistência ao desgaste) e carboneto de Cr (Figura 2.6b). Observaram neste último propriedades inversa

em relação as dendritas, onde a taxa de resfriamento influenciou na variação química da liga, promovendo o aumento da resistência mecânica com a formação de carbonetos [38].

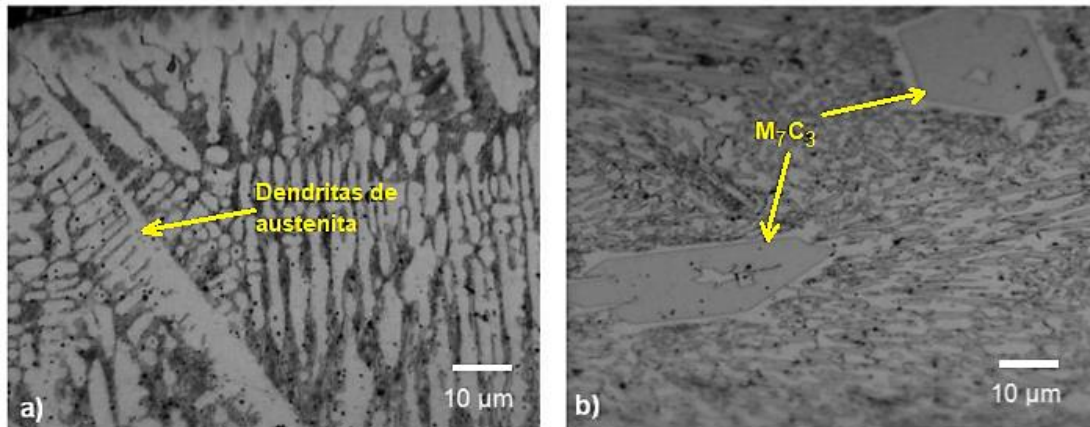


Figura 2.6 – Microestrutura do revestimento: **a)** dendritas de austenita e **b)** Carbonetos M_7C_3 , onde M é o elemento metálico da liga [36].

Os martelos desfibradores são submetidos a severo atrito com as ramas da cana-de-açúcar e as impurezas presentes, sofrendo desgaste muito acentuado, principalmente na superfície de impacto. Os esforços mecânicos sobre a base do martelo são heterogêneos em direções de atuação, magnitude, e tipo de esforço. Estão presentes principalmente impacto e atrito com o arraste da cana-de-açúcar e das impurezas; como consequência desses esforços, o dano na base do martelo pelo amassamento, fratura e remoção de material resultam em um perfil não linear de desgaste, mais acentuado na região de impacto inicial [39].

Na Figura 2.7 é apresentado o aspecto dos vértices dos martelos desfibradores comerciais danificados após o uso, com perfil não linear. Aparentemente, dois tipos predominantes de mecanismos de desgaste estão presentes: no início do contato, desgaste por adesão deve estar atuando mais fortemente, enquanto durante arraste da cana-de-açúcar, o mecanismo principal deve ser o desgaste abrasivo [40]. Os martelos desfibradores comerciais apresentam em sua base uma camada de revestimento de material mais duro, depositado por cordões de solda. O dano em trabalho promove a

retirada deste revestimento e o atrito passa a ocorrer entre a cana-de-açúcar e a base do martelo sem revestimento.



Figura 2.7 – Desgaste típico nos vértices dos martelos convencionais (largura da peça entre 130 e 170 mm e espessura de 50 e 70 mm) [41].

A causa principal de desgaste dos martelos são as condições em que a matéria prima chega ao equipamento de desfibramento. Um dos fatores a ser considerado no desgaste dos martelos desfibradores é o teor de impurezas. Estudos feitos pelo Centro de Tecnologia Canavieira [42] mostram a presença de, por exemplo, terra, raízes, palmito (é extraído da ponteira da cana-de-açúcar), palha, pedras, etc, que aumentam o desgaste na base dos martelos.

Segundo estudos feitos pelo Centro Tecnológico da Coopersucar [43], as impurezas presentes na cana-de-açúcar para o processo de desfibramento são da ordem de 9%, que podem ser de natureza vegetal ou mineral. As impurezas minerais que provocam maior desgaste são os grãos de areia (sílica) de alta dureza, que provocam o maior desgaste por abrasão. O gráfico apresentado na Figura 2.8 mostra a concentração média de impurezas na cana-de-açúcar em moendas na indústria açucareira [44].

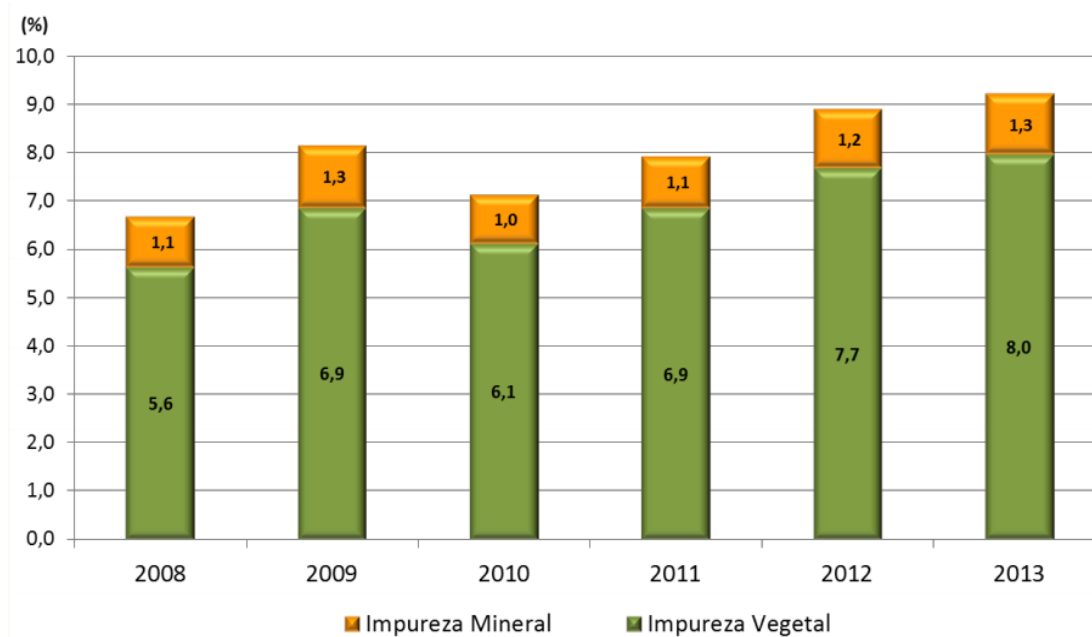


Figura 2.8 – Histórico de impurezas na cana-de-açúcar (Centro Tecnológico da Coopersucar - CTC) [45].

2.8 Corrosão

Uma das formas de avaliar a corrosão em metais é através do ensaio de fadiga em ambiente corrosivo (Figura 2.9). Cubillos, Rodríguez e Coronado [46] submeteram uma peça cilíndrica em rotação sobre carga (ensaio padronizado ASTM E606) [45] em caldo de cana-de-açúcar. O aço SAE 1045 revenido a 600 °C, ensaiado em temperatura ambiente e ao ar, teve melhor desempenho comparado ao aço revenido à 300 °C imerso em caldo de cana-de-açúcar, onde identificaram a ocorrência de corrosão que se manifestou em forma de pites, além da presença trincas de fadiga. A presença de partículas pequenas de cementita (revenido a 600 °C), segundo os autores, gerou um material mais durável em testes ao ar do que em ambiente agressivo.

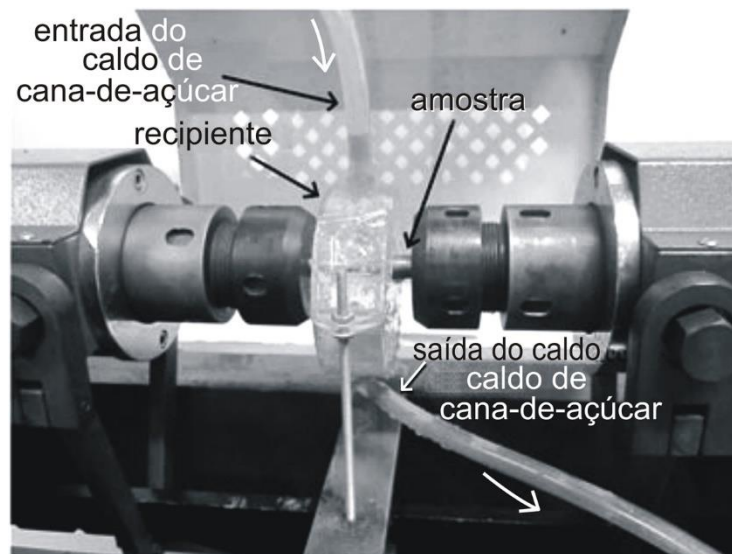


Figura 2.9 – Representação do teste de fadiga por flexão rotativa [45].

Bosquetti *et al.* [47] investigaram a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 imersos em solução de ácido cítrico 10% em água destilada (100 °C), notaram que a presença de pites nos materiais após 30, 60 e 180 minutos de experimento, sendo o mais agressivo no AISI 304 (Figura 2.10 a direita), que segundo os autores tem efeito corrosivo similar ao ácido transaconítico presente no extrato de cana-de-açúcar.

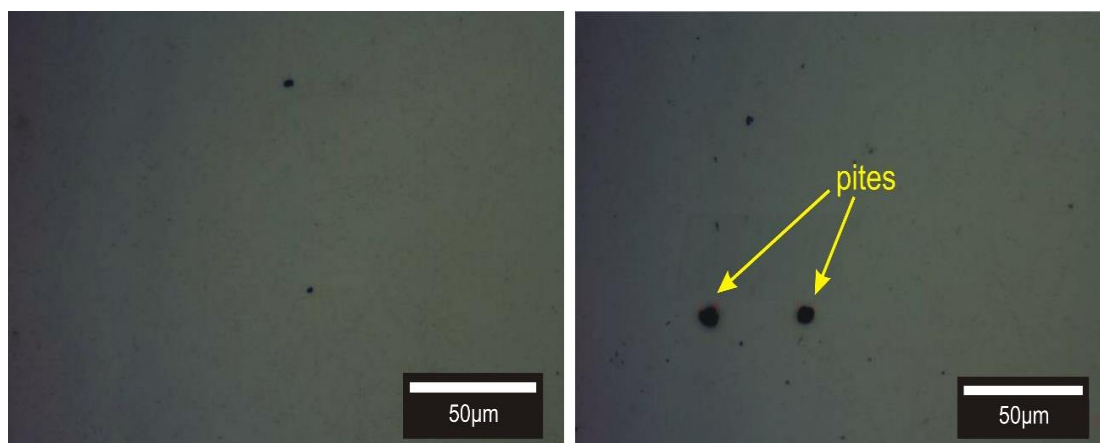


Figura 2.10 – Aspecto superficial: aço AISI 316 a (**esquerda**) e AISI 304 a (**direita**) após a imersão em ácido cítrico 10% em água destilada (100 °C), por 180 minutos [47].

A indústria sucroalcooleira utiliza nos seus equipamentos materiais de aços de baixo teor de carbono e inoxidáveis. Wesley *et al.* [48] investigaram o desempenho do efeito corrosivo do caldo da cana-de-açúcar nos aços inoxidáveis ferríticos AISI 439 e AISI 444 comparado ao AISI 1010, que foi menos resistente à corrosão por pite, gerado pela aderência de bactérias (*Brevibacillus, parabrevis, Bacillus e azotoformans*) presentes no extrato da cana-de-açúcar.

Durmoo *et al.* [49] avaliaram o comportamento do aço inoxidável AISI 304L, material comum na indústria sucroalcooleira, imerso com o caldo de cana-de-açúcar com pH 5,6 durante 2 dias com ocorrência de corrosão por pites na superfície (Figura 2.11). O caldo extraído com este pH supracitado é uma solução complexa com uma variedade de ácidos (cítrico, málico, glicólico, oxálico, entre outros), nível não desprezível de cloreto (1300 ppm) e microrganismos (bactérias, leveduras e fungos) que podem contribuir para acelerar a corrosão.

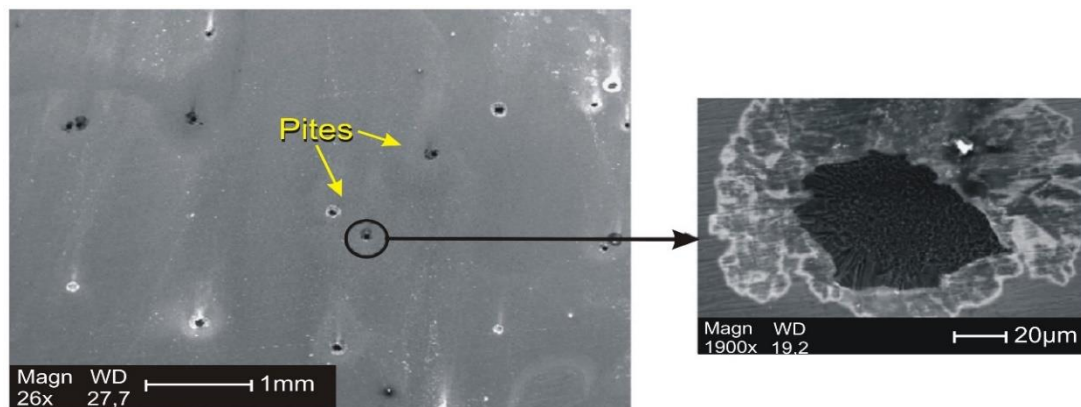


Figura 2.11 – Superfície do aço AISI 304L com corrosão por pites (à esquerda) e imagem ampliada do pite (à direita) [49].

Nas etapas de produção do açúcar existem dois meios corrosivos que devem ser considerados, o próprio caldo de cana-de-açúcar, que possui pH próximo a 5,6 quando extraído, que é suficiente para gerar um eletrólito capaz de causar a corrosão de peças constituídas de aço carbono, como nos componentes da moenda, a presença de halogênio (Cl⁻) no caldo de cana-de-

açúcar e a adição de dióxido de enxofre (SO_2) na etapa de sulfitação utilizado para a clarificação, que aumenta ainda mais a acidez do meio, resultando valores próximos de pH em torno de 4,4. Esse meio inclusive pode provocar corrosão por pite e trazer implicações na durabilidade dos componentes metálicos (evaporadores, tubulações, caldeira e moenda), resultando em elevados custos associados a paradas de manutenção na indústria sucroalcooleira [50].

Nota-se que os trabalhos apresentados avaliaram a corrosão em diversos metais aplicados em equipamentos de usinas sucroalcooleiras, que indicaram que a acidez e os constituintes do caldo de cana-de-açúcar podem causar a degradação prematura de componentes metálicos. Um método de avaliar esses materiais em meio agressivo é através de curvas de polarização que permite distinguir dentre os metais o mais resistente, e a literatura é escassa nessas informações quando o meio é o extrato de cana-de-açúcar em temperatura ambiente (condição de operação da moenda), que carece estudos sobre o assunto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas do desenvolvimento do projeto podem ser visualizadas através do diagrama esquemático da Figura 3.1. O martelo é um componente do desfibrador. A preparação das amostras do martelo foi efetuada visando a caracterização do material com relação a composição química e quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases presentes na microestrutura. Ensaio de corrosão em caldo de cana-de-açúcar e de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha foram realizados para fornecer informações sobre a degradação do martelo.

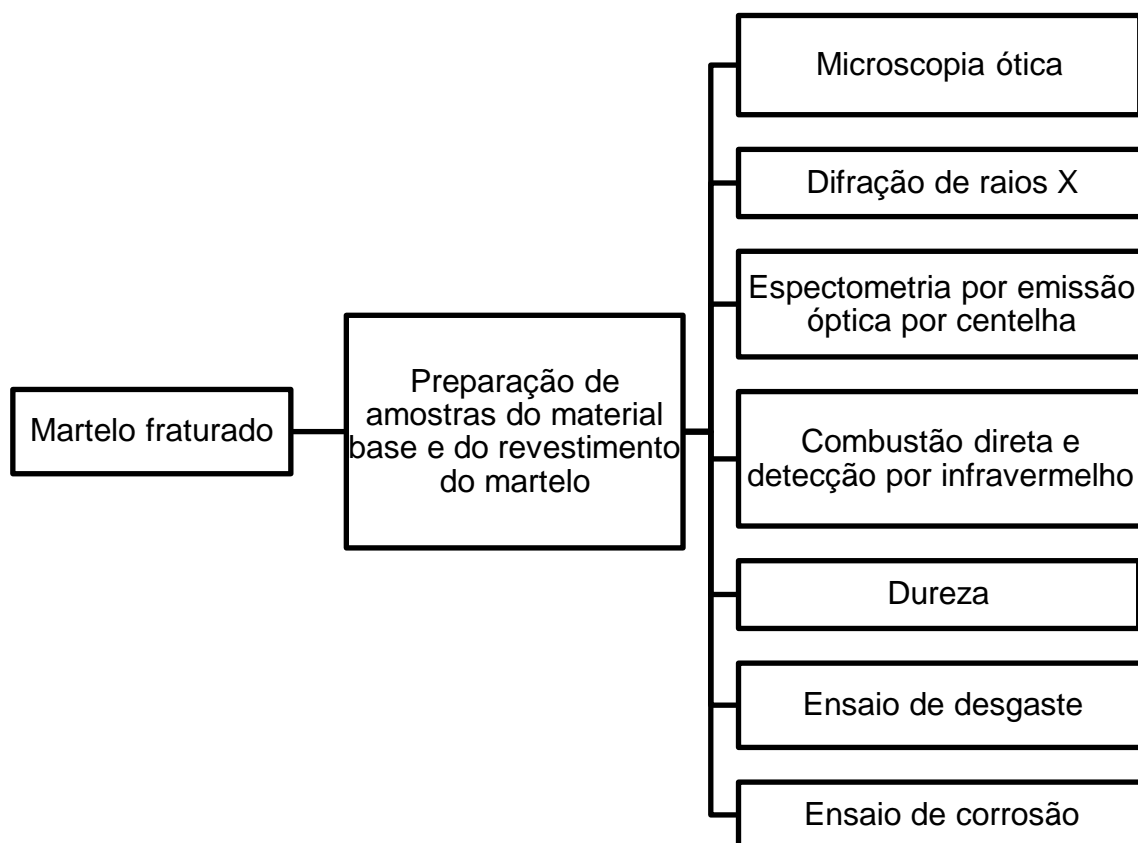


Figura 3.1 – Diagrama esquemático das etapas de desenvolvimento do trabalho. Fonte: Próprio autor.

3.1 Martelo

O martelo utilizado nesse trabalho é um componente do desfibrador de uma moenda fornecido por uma usina sucroalcooleira (Figura 3.2). Com as dimensões de 436 mm de comprimento, 170 mm de largura e 70 mm de espessura.

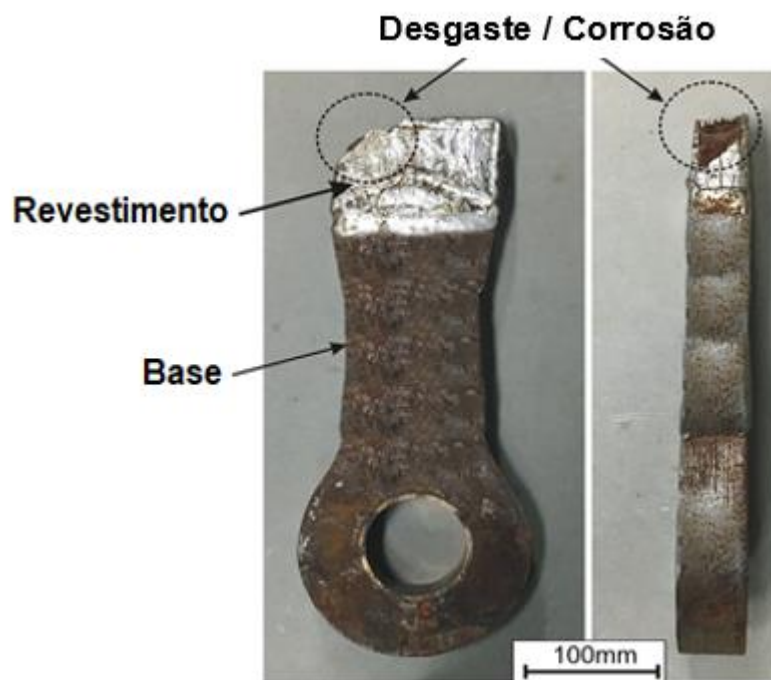


Figura 3.2 – Martelo do desfibrador: vista frontal (**à esquerda**) e vista lateral (**à direita**). Fonte: Próprio autor.

3.2 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas nos equipamentos existentes no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. As amostras foram retiradas do martelo do desfibrador conforme indica a Figura 3.3.

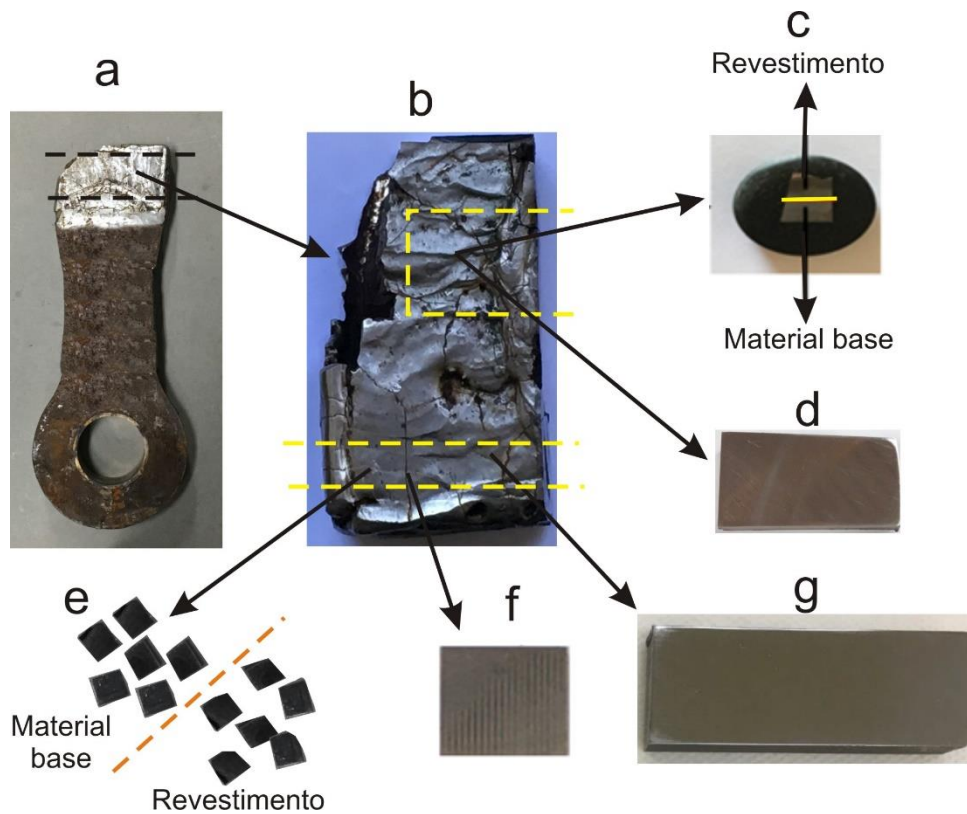


Figura 3.3 – (a) Martelo, (b) detalhe da extremidade, (c) amostra embutida para ensaio de microscopia e difração de raios X, (d) amostra sem embutir para ensaio de dureza, (e) lascas para ensaio de combustão direta e detecção por infravermelho, (f) cubo para ensaio de espectrometria de emissão óptica por centelha e polarização potenciodinâmica cíclica, e (g) chapa para ensaio de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha. Fonte: Próprio autor.

Da extremidade do martelo (Figura 3.3.b), foram cortadas duas amostras (Figura 3.3 c e 3.3 d) com dimensões 13 x 10 x 10 mm e 40 x 20 x 10 mm, respectivamente, utilizando uma serra circular de bancada da fabricante Arotec. A primeira, moldada em baquelite a quente com a embutidora PRE 30 Mi do mesmo fabricante, foi destinada para caracterização da microestrutura por microscopia ótica e difração de raios X. A segunda, preparada a superfície com lixas de granulometria 80, 100, 320, 400, 600 e

1200, foi destinada para medições de dureza. Pelo mesmo processo de corte obteve-se lascas do material base e do revestimento apresentados na Figura 3.3e, para ensaio de combustão direta e detecção por infravermelho. Na mesma região foram cortados um corpo de prova de formato cubico (Figura 3.3.f) com dimensões 10 x 10 x 10 mm, pelo processo de corte por eletroerosão a fio com o equipamento da marca Eletro – FW400 – 2017, e uma outra peça no formato de chapa com 60 x 30 x 10 mm (Figura 3.3g), por corte com disco abrasivo. O cubo foi utilizado no ensaio de espectrometria de emissão óptica por centelha e polarização potenciodinâmica cíclica, e a chapa, no ensaio de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha. Para fins de comparação, utilizou a amostra de aço inoxidável 410 com dimensões 60 x 25 x 10 mm, para ensaios de corrosão e desgaste abrasivo.

3.3 Análise da microestrutura

Os cortes das amostras analisadas foram efetuados com auxílio dos equipamentos: cortadora da fabricante Arotec modelo Arocor 40 e cortadora da fabricante Buehler modelo Isomet 2000, em ambos os casos utilizando discos de corte abrasivo e refrigeração à água.

A preparação metalográfica das amostras foi realizada através do embutimento a frio seguido de lixamento com lixas de granulometria #320, #400, #600, #1200 e #1500 e polimento utilizando suspensão metalográfica de alumina com granulometria de 1 μm . A revelação da microestrutura ocorreu através do ataque químico utilizando solução Nital 2% por um tempo de 3 a 6 segundos através do processo de imersão da amostra no reagente.

O registro das microestruturas foi realizado com auxílio do microscópio ótico Olympus BX41M-LED e do sistema de processamento de imagens Infinity Capture acoplado ao microscópio, conforme Figura 3.4.

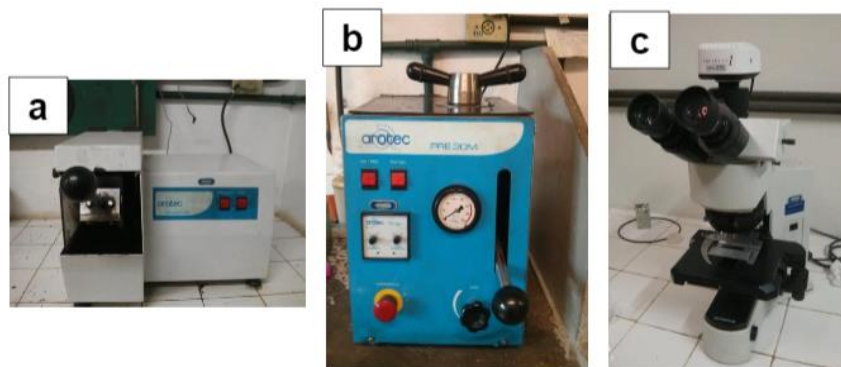


Figura 3.4 – (a) Cortadora cut off Arotec Arocor 40, (b) embutidora Arotec PRE 30. (c) Microscópio ótico Olympus, modelo BX41MLED. Fonte: Próprio autor.

3.4.1 Difração de Raios X (DRX)

As amostras destinadas a esta análise tiveram suas superfícies trabalhadas a fim de se obter uma forma plana e polida. O difratômetro de raios X que foi utilizado nestas análises (Figura 3.5) é da marca Bruker D8 ADVANCE. A tensão e a corrente foram de 40 kV e 30 mA respectivamente, com radiação Cu-K α no intervalo de 5° a 90°, pertencente ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE-DEMa-UFSCar).



Figura 3.5 – Difratômetro de raios X Bruker D8 ADVANCE. Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha (S-OES)

Para a análise da composição química, a amostra foi cortada com dimensões de 10 x 10 mm utilizando uma cortadora da fabricante Arotec modelo Arocor 40, utilizando discos de corte abrasivo e refrigeração à água e preparada mediante lixamento para retirada de possíveis contaminantes. Em seguida, a amostra foi submetida à análise através de Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha. Para o ensaio foi utilizado um espectrômetro SPECTROMAX, do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Espectrômetro SPECTROMAX (à esquerda) e detalhe do suporte da amostra (à direita) [51].

3.4.3 Técnica de combustão direta e detecção por infravermelho

A Técnica de combustão direta e detecção por infravermelho foi usada para determinar a quantificação de carbono (C) e enxofre (S) do aço do material de base e do revestimento do martelo desfibrador, utilizando o equipamento LECO CS-844 (Figura 3.7), instalado no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM – UFSCar/DEMa).



Figura 3.7 – Quantificação de carbono em analisador LECO CS-844 [52].

3.5 Dureza Brinell

A medição da dureza foi realizada conforme preconiza a norma ASTM E10-18 [53] com o durômetro modelo Heckert HPO250 (Figura 3.8), com um penetrador esférico de aço de \varnothing 2,5 mm, empregando uma carga de 187,5 kgf e tempo de penetração de 15 s, observando a distância de quatro vezes o diâmetro da calota impressa entre os centros de indentação, executando cinco medições no material base e revestimento.



Figura 3.8 – Durômetro modelo Heckert HPO250. **A esquerda** (vista frontal) e **a direita** (vista lateral). Fonte: Próprio autor.

3.6 Ensaio de desgaste por abrasão com areia seca contra roda de borracha

O equipamento utilizado para a avaliação da resistência ao desgaste foi um abrasômetro do tipo roda de borracha (Figura 3.9), pertencente ao Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais do DEMa-UFSCar.



Figura 3.9 – Abrasômetro – Roda de Borracha. Fonte: Próprio autor.

Esse equipamento é constituído de um sistema digital para contagem do número de voltas, alarme para assegurar os limites mínimo e máximo de rotações por minuto e desligamento automático ao completar 6000 rpm, garantindo as mesmas condições de ensaios para todas as amostras. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros de ensaios de desgaste, conforme o procedimento D da norma ASTM G65-16 [54].

Tabela 3.1 – Detalhamento do procedimento D da norma ASTM G65-16 [54].

Parâmetro de ensaio	Valor
Carga Aplicada (N)	45
Rotações	6.000
Tempo de ensaio (minutos)	30
Tipo da areia (AFS)	50/70
Vazão de areia (g / minuto)	300/400
Velocidade da roda de borracha (RPM)	200 ± 10
Diâmetro externo anel de borracha (mm)	228,6
Espessura anel de borracha (mm)	12,7
Dureza (shore A) do anel de borracha	59/60

As dimensões finais das amostras, também padronizadas por essa norma, são: comprimento 67,0 mm, largura 32 mm e espessura variando entre 11,3 e 12,5 mm. Devido aos diferentes pesos específicos dos materiais, a mesma norma padroniza que os resultados da resistência ao desgaste sejam apresentados em termos de perda volumétrica (em mm³).

3.7 Estudo da Corrosão

3.7.1 Polarização potenciodinâmica cíclica

Para a realização dos ensaios de corrosão foi utilizada uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos, com contra eletrodo de platina e eletrodo de referência de Hg/HgO 1 M NaOH. As superfícies dos eletrodos de trabalho foram preparadas através de lixamento gradual até grana 2000, seguido de polimento usando suspensão contendo partículas de Al₂O₃ (1 µm). O revestimento e o substrato do martelo desfibrador foram utilizados como eletrodo de trabalho em um potenciostato Gamry 600+ para aquisição de dados, localizado no Laboratório de Eletroquímica Aplicada do DEMa-UFSCar. Os ensaios foram realizados em um extrato de cana-de-açúcar

naturalmente aerada em temperaturas próximas à 25 °C. Os extratos foram usados nos ensaios em até 3 dias após sua extração da cana-de-açúcar para evitar fermentação pronunciada.

Todas as análises de polarização cíclica foram programadas para serem iniciadas após 60 minutos em potencial de circuito aberto, partindo-se de um potencial de 200 mV abaixo do potencial de circuito aberto em sentido anódico até uma corrente limitada a 10 mA/cm², a partir da qual a varredura foi revertida no sentido catódico até o potencial de partida, empregando uma varredura direta e reversa de 1 mV/s. Os testes foram repetidos ao menos duas vezes para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

Quando possível, a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) foi estimada através da extrapolação de Tafel dos ramos catódico e anódico ao redor do potencial de corrosão (E_{corr}). O potencial de transpassivação (E_{transp}) foi identificado como o potencial a partir do qual ocorre um acentuado aumento da densidade de corrente. Já o potencial de proteção (i_{prot}) foi aquele que há queda da densidade de corrente para valores abaixo da densidade de corrente de passivação (i_{pass}). Os parâmetros de interesse (E_{corr} , i_{corr} , E_{transp} , i_{pass} e i_{prot}) foram apresentados na forma de média e desvio padrão de três resultados obtidos a partir de três curvas diferentes de polarização. Uma representação esquemática de curvas de polarização (anódica e cíclica) é mostrada na Figura 3.10.

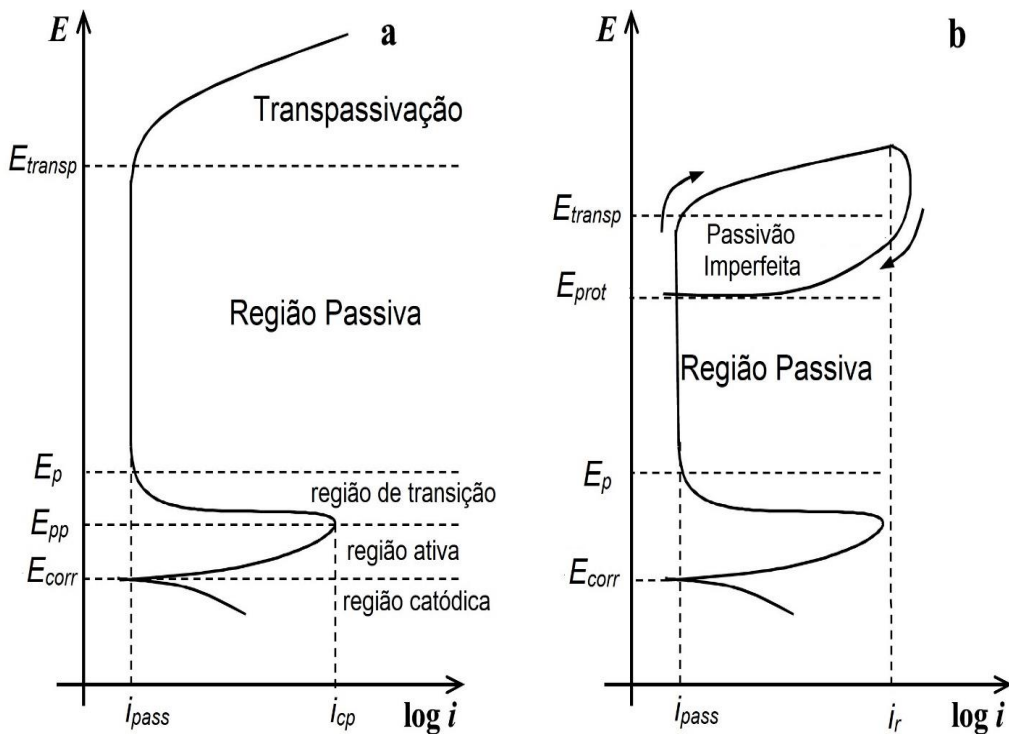


Figura 3.10 – Representação esquemática de uma curva de polarização anódica genérica **(a)** com a indicação de alguns parâmetros característicos e suas regiões específicas. Em caso de corrosão localizada, curvas de polarização cíclica são geralmente utilizadas **(b)**, na qual duas regiões características de passivação existem (perfeita e imperfeita). Em **(a)** i_{cp} é a densidade crítica de passivação correspondente a um potencial primário de passivação E_{pp} onde há a transição entre o estado ativo para o passivo; a partir de E_p , potencial de passivação, ocorre a passivação completa e a densidade de corrente de passivação i_{pass} é baixa, até que ocorre a ruptura do filme passivo a partir do potencial de transpassivação, E_{transp} . Em **(b)**, ao se reverter a polarização em sentido catódico a partir de densidade de corrente de reversão (i_r) o filme passivo pode ser completamente restabelecido se o potencial for abaixo do potencial de proteção, E_{prot} . Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da análise química dos materiais estudados comparados aos seus respectivos materiais de referência, obtidos pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha (S-OES). Já a Tabela 4.2 mostra os resultados através da técnica de Combustão Direta e Detecção por Infravermelho. Observa-se que os valores estão próximos aos encontrados nas normas ABNT NBR NM 87 [55], AWS 5.5-96 [56], para um aço carbono 1030 e revestimento (solda) de liga ferrosa de alto Cr e C.

No processo de fabricação do aço, a incorporação do C confere o endurecimento por solução sólida, visto que esse elemento é intersticial devido as diferenças de raio atômico com o Fe. Observou-se que o material base e o aço inoxidável 410 (material de referência) têm um teor, aproximadamente, de ~0,3%p e ~0,16%p C, respectivamente. Por outro lado o teor 3,65 %p C do revestimento (Tabela 4.2) pode favorecer a formação de carbonetos duros enriquecidos com Cr, gerando uma interface adjacente empobrecida de Cr, suscetível a corrosão.

Nota-se, também, a presença de um alto teor de Cr no revestimento (22,2 %p) e no aço inoxidável 410 (12,28 %p), diferentemente do material base que não possui, ambos portanto com teor acima de 10,5 %p Cr, valor mínimo para que os aços inoxidáveis tradicionais formem espontaneamente um filme passivo.

Tabela 4.1 – Resultados da análise química (%p) por Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha (S-OES) para material base e revestimento. Fonte: Próprio autor.

	Base	Aço carbono (ABNT NBR NM 87) [55]	Revestimento (C, Cr e Si)	Revestimento duro (AWS 5.5-96) [56]	Aço Inoxidável 410
C	0,29	0,22 – 0,28	4,52	4,4	0,16
Mn	1,18	0,30 – 0,60	-	0,3	0,38
P	0,14	0,040 máx.	-	-	0,05
S	0,11	0,05 máx.	-	-	0,07
Si	-	-	2,44	0,3	0,38
Cr	-	-	22,2	27,0	12,28
Mo	-	-	0,36	-	0,08
Ni	-	-	0,26	-	0,19
W	-	-	0,21	-	-
Cu	-	-	-	-	0,08

Tabela 4.2 – Resultados da análise química (%p) através da técnica de Combustão Direta e Detecção por Infravermelho. Fonte: Próprio autor.

	C	S	O	H	N	Fe
Base	0,27	0,15	-	-	-	Bal.
Revestimento	3,65	0,11	0,22	0,38	0,18	Bal.

Pela difração de raios X comprovou-se que a fase majoritária no material base é ferrita de estrutura (CCC) cúbica de corpo centrado (Figura 4.1) com picos de difração característicos dessa fase nas posições $2\theta = 44,5$, 65 e $82,5^\circ$. Os picos de cementita não foram detectados porque sua fração volumétrica está abaixo dos limites de detecção da técnica.

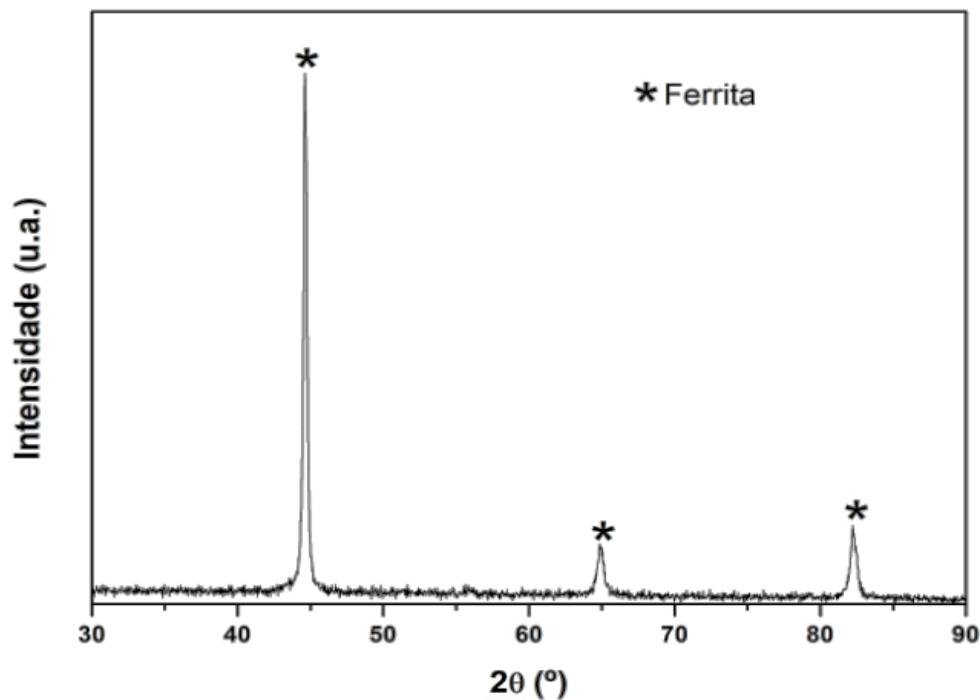


Figura 4.1 – Difratograma do material base do martelo. Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.2 reforça a existência de uma microestrutura hipoeutetóide, de matriz ferrítica com ilhas de cementita, sendo que o composto formado por essas duas fases (perlita) encontra-se de forma ordenada em faixas estreitas horizontalmente (Figura 4.2 à esquerda), efeito causado pela laminação da matéria prima, o que também explica o bandeamento do carbono gerando este padrão de distribuição de faixas de ferrita [58]. A ferrita possui grãos equiaxiais, como mostra a Figura 4.2 à direita. A perlita é composta de duas fases, ferrita e cementita, que apresentam ductilidade e alta dureza, respectivamente. A conjugação dessas duas fases propicia ao material uma elevada dureza, alta resistência mecânica, alta resistência à fadiga, alta resistência ao desgaste e uma tenacidade à fratura intermediária [58]. Considerando que os aços hipoeutetóides possuem teor máximo de 0,77%C e o diagrama de fases Fe-C, obteve-se pela regra da alavanca as frações volumétricas de ferrita e perlita para 0,27%C (Tabela 4.2) resultando em 61% e 39%, respectivamente.

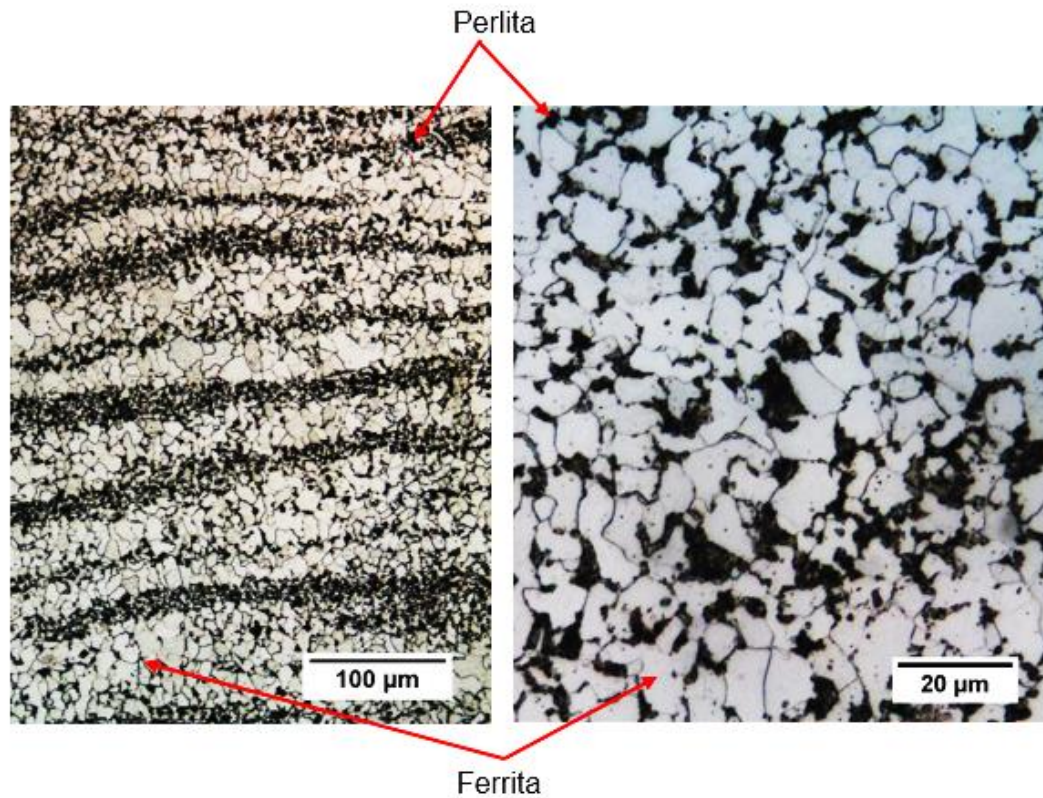


Figura 4.2 – Microestrutura do material base do martelo com aumento de 200X (à esquerda) e 1000X (à direita) com ataque químico de Nital 2%. Fonte: Próprio autor.

Já no revestimento, a difração de raios X mostrou a presença das fases ferrita, austenita e carboneto de cromo do tipo Cr_7C_3 (Figura 4.3). A fase ferrítica justifica-se pelo alto teor de Cr (Tabela 4.1), elemento alfa-gênico, além de Si e Mo. A fase austenita justifica-se pelo alto teor de C (Tabela 4.2), elemento gama-gênico, além de Ni e N. Já a formação de carbonetos de cromo é favorecida pelo alto teor de C e Cr.

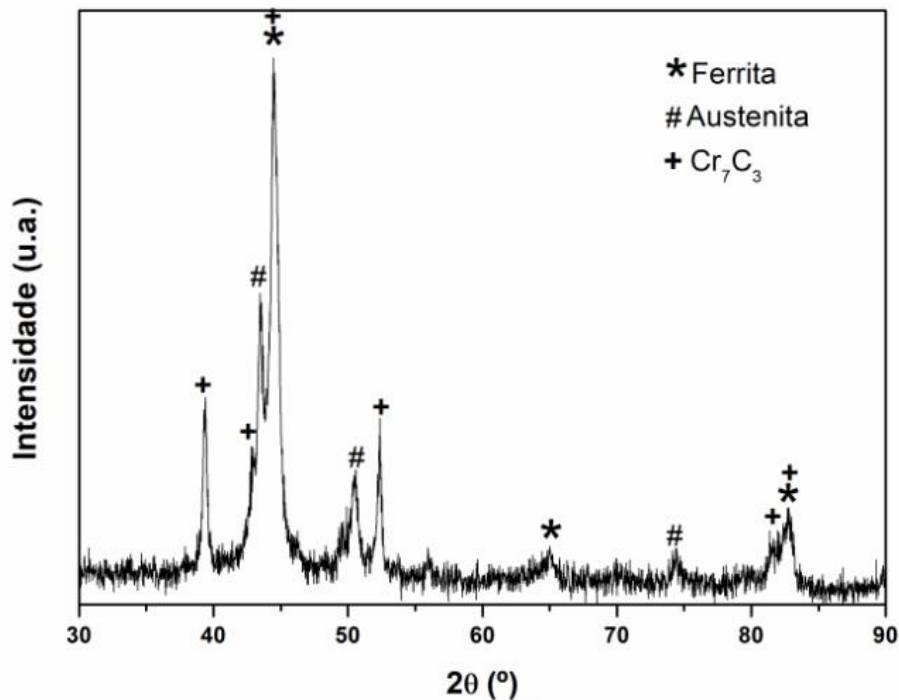


Figura 4.3 – Difratoograma do revestimento do martelo. Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 4.4 uma microestrutura hipereutética, formada por carbonetos primários de Cr (M_7C_3) em matriz eutética. Vale ressaltar que o revestimento apresenta um teor de Cr de 22,2% (Tabela 4.1) e de C 3,65% (Tabela 4.2), este alto teor de Cr, combinado com alto teor de C, produz carbonetos duros com morfologia hexagonal na estrutura [59]. De acordo com Corrêa et al. [60] e Hutchings [61], conseguindo-se uma distribuição uniforme e um espaço pequeno entre os carbonetos, as partículas abrasivas não podem efetivamente penetrar na matriz tenaz, levando a uma melhoria da resistência ao desgaste. Os carbonetos (M_7C_3) estão com morfologia uniforme ao longo da camada, dispersos em uma fase eutética contínua formada de austenita.

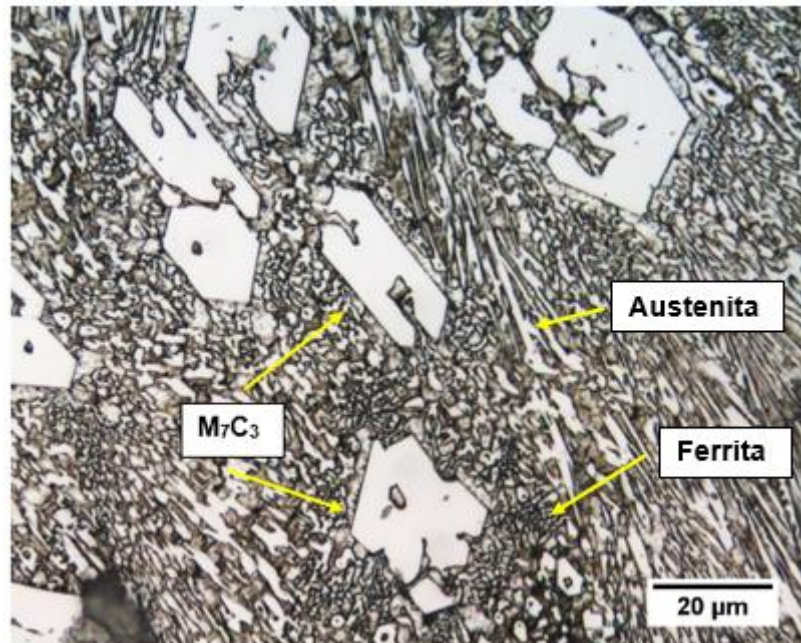


Figura 4.4 – Microestrutura do revestimento do martelo com aumento de 1000X. Fonte: Próprio autor.

Analisando a interface do material de base/revestimento da amostra através da Figura 4.5, observa-se que a região adjacente a linha de fusão, do lado do revestimento, apresentou uma zona de transição composta por uma faixa clara, a qual é livre de contornos de grãos e cuja morfologia sugere que na solidificação ocorreu crescimento epitaxial de austenita a partir do metal de base, com uma possível camada de óxido na interface indicando que não houve ligação metalúrgica efetiva. Observa-se também a presença de dendritas de austenita em todo o volume do revestimento que segundo Hernandez [62] pertence ao sistema Fe-Cr-C. A zona de transição é uma região bastante estudada na soldagem quando se trata de materiais dissimilares, pelo fato de apresentar características do material base e do revestimento [62].

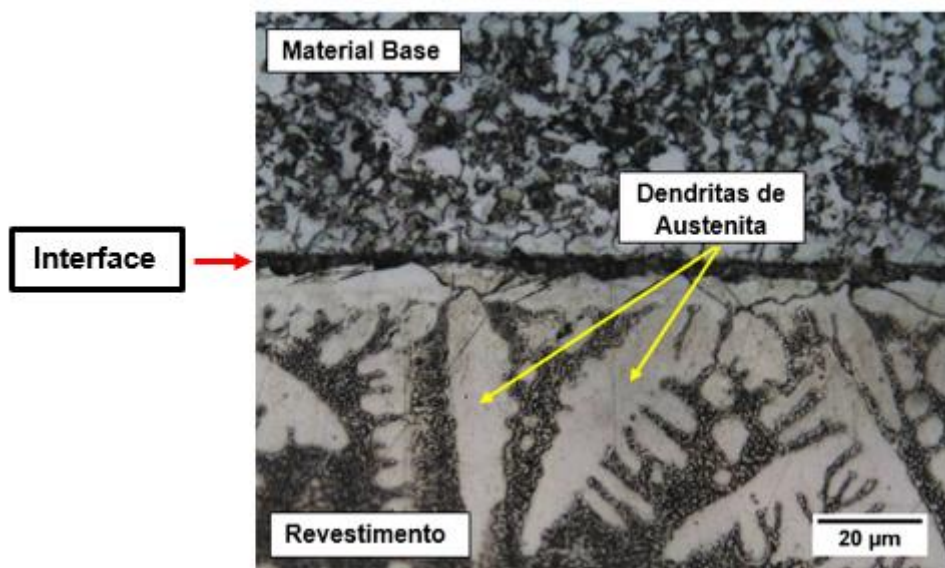


Figura 4.5 – Microestrutura da interface (material base + revestimento) com aumento de 1000 x vezes. Fonte: Próprio autor.

O aço inoxidável 410 compõem-se de ferrita com microestrutura homogênea (Figura 4.6), sem segunda fase. A ferrita deve-se ao teor de ~12.3 %p de Cr e o baixo teor de C (0,16 %p) e Ni (0,19 %p), conforme apresentado na Tabela 4.1.



Figura 4.6 – Microestrutura do aço inoxidável 410 com ataque por reagente Villela. Fonte: Próprio autor.

4.2 Resistência ao desgaste

A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos a partir de ensaios de dureza Brinell para o material base e revestimento. Para fins comparativos foi utilizado os valores de dureza do material de referência (aço inoxidável 410) e do quartzo (SiO_2), onde o primeiro está conforme a norma ABNT NBR 6442 [63] e o segundo possui dureza 7 na escala de Mohs, acima de 739 HB [64].

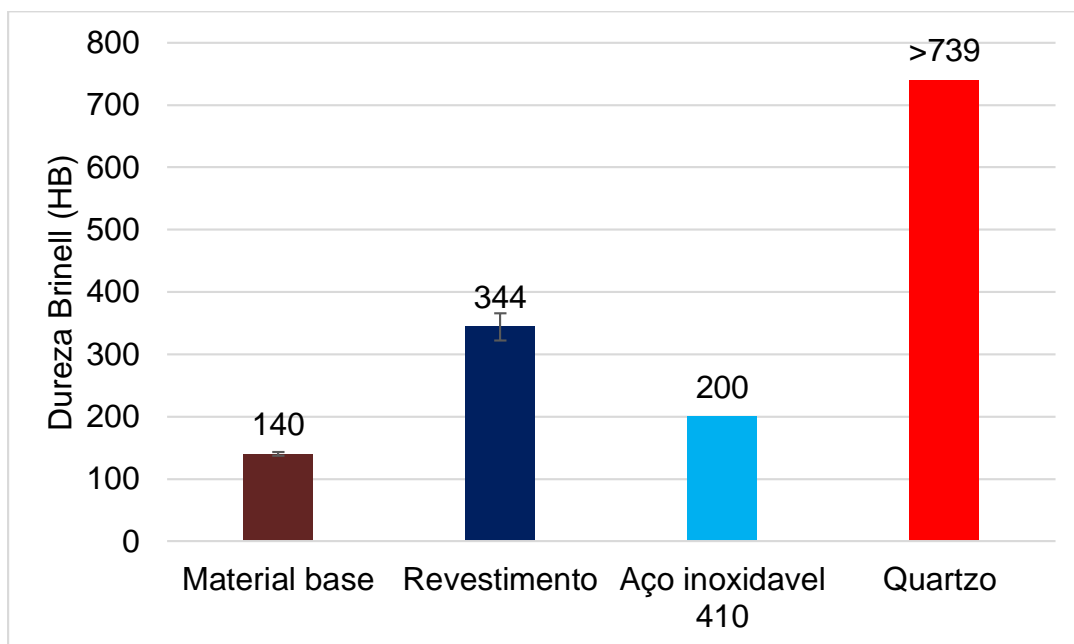


Figura 4.7 – Valores de dureza brinell do material base, revestimento, material de referência (aço inoxidável 410) e do quartzo (SiO_2). Fonte: Próprio autor

Nota-se pela Figura 4.7, que os materiais com menor dureza foram o material base e o de referência (aço inoxidável 410) devido ao baixo teor de C. A diferença entre as durezas refere-se a pouca fração de perlita no material base, e ao Cr no material de referência, agindo como endurecimento por solução sólida. Já a elevada dureza do revestimento deve-se a presença de carbonetos duros (Cr_7C_3) com dureza entre 1200 e 1600 HV [65], similar ao quartzo (SiO_2) que possui entre 1103 e 1260 HV [66].

Os resultados de dureza coincidem com os encontrados por Kotecki e Ogborn [67], que concluíram que elevada dureza não significa um aumento da resistência ao desgaste abrasivo e que a mesma não é o melhor indicador, e sim a microestrutura.

4.2.1 Ensaio de areia seca contra roda de borracha

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste são expressos nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 de acordo com o procedimento "D" da norma ASTM G65-16 [51] apresentado na Tabela 3.1 da seção 3.6. Observa-se que o aço inoxidável 410 (material referência) e o material base foram os materiais que apresentaram a maior perda volumétrica por não possuírem reforços duros para resistir à abrasão, ao contrário do material de revestimento que obteve a menor taxa específica de desgaste, explicado pela microestrutura que apresenta carbeto primários do tipo M_7C_3 numa matriz eutética de carbeto mais austenita, que agem como reforço e proteção da matriz dúctil de ferrita e austenita frente a ação de partículas abrasivas do quartzo.

Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de desgaste para o aço inoxidável 410.

Fonte: Próprio autor.

Amostra	Perda de Massa (g)	Densidade (g/cm^3)	Volume Perdido (mm^3)	Taxa específica de desgaste ($10^{-4} \times mm^3/N.m$)
CP - 01	0,42	7,81	0,05	5,69
CP - 02	0,51	7,82	0,06	6,95
CP - 03	0,44	7,83	0,06	6,01
Média	0,46	7,82	0,06	6,02
Desvio Padrão	0,05	0,01	0,01	0,66

Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de desgaste para o material base. Fonte: Próprio autor.

Amostra	Perda de Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Volume Perdido (mm ³)	Taxa específica de desgaste (10 ⁻⁴ x mm ³ /N.m)
CP - 01	0,55	7,69	0,07	7,63
CP - 02	0,52	7,69	0,07	7,21
CP - 03	0,52	7,70	0,07	7,17
Média	0,53	7,69	0,07	7,34
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,01	0,25

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de desgaste para o revestimento. Fonte: Próprio autor.

Amostra	Perda de Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Volume Perdido (mm ³)	Taxa específica de desgaste (10 ⁻⁴ x mm ³ /N.m)
CP - 01	0,07	7,41	0,01	1,04
CP - 02	0,06	7,43	0,01	0,91
CP - 03	0,07	7,43	0,01	0,97
Média	0,07	7,42	0,01	0,96
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,01	0,06

As Figuras 4.8a, 4.8b e 4.8c apresentam as superfícies do material base, revestimento e aço inoxidável 410, respectivamente, antes do ensaio de desgaste areia seca contra roda de borracha e, as Figuras 4.8d, 4.8e e 4.8f, para os respectivos materiais após o experimento.

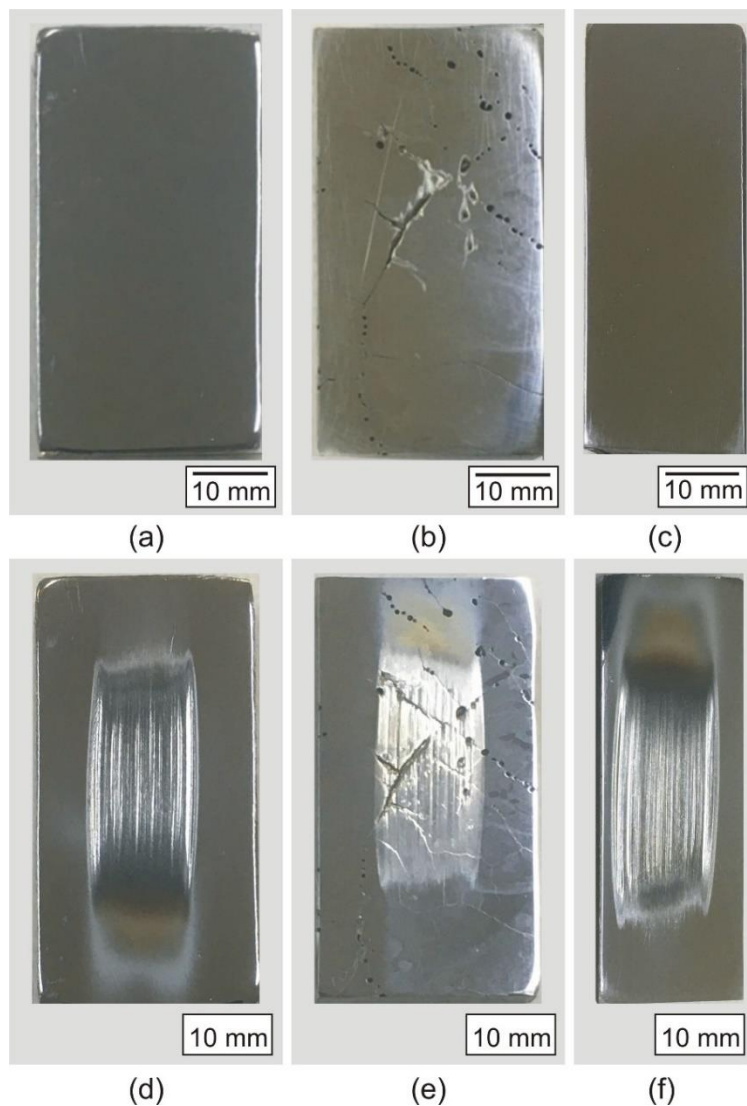


Figura 4.8 – Antes do ensaio (linha superior) e depois (linha inferior): material base **(a,d)**, revestimento **(b,e)** e aço inoxidável 410 **(c,f)**. Fonte: Próprio autor.

As Figuras 4.8f e 4.8d mostram a superfície da região de desgaste do aço inoxidável 410 e do material base, respectivamente. A abrasão a baixas tensões por riscamento, segundo Misra [68], é essencialmente o mecanismo primário da perda de volume da superfície em comparação com outros mecanismos de desgaste abrasivo. As superfícies desgastadas analisadas apresentam riscos provocados pelas partículas duras de areia seca e possíveis fragmentos das superfícies, que aram o material, fazendo sulcos nas superfícies dos mesmos.

Nota-se que as superfícies desgastadas do material base (aço carbono 1030), e do material de referência (aço inoxidável 410), representadas pelas Figuras 4.8d e Figura 4.8f, foram as que apresentaram maior concentração de riscos quando comparada com a superfície do revestimento. Esta análise condiz com os resultados de perda de volume obtidos (Tabelas 4.3 e 4.4), onde o revestimento possui maior resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões devido a quantidade de C e carbonetos de Cr existente na liga gerando fases com maior dureza na microestrutura.

O revestimento apresentou trincas e poros na superfície (Figura 4.8e), que são tipicamente formadas durante o resfriamento logo após o passe de soldagem e surgem devido as elevadas tensões residuais geradas. De acordo com Corrêa [69], as ligas Fe-Cr-C são susceptíveis às trincas de solidificação, as quais agem no sentido de aliviar as tensões de soldagem. Entretanto o número de trincas e poros visíveis na superfície revestida com liga Fe-Cr-C-Nb foram menores havendo maior resistência ao desgaste.

Em resumo, o tipo de desgaste sofrido pelos três materiais analisados pode ser classificado como desgaste abrasivo a baixas tensões de 3 corpos, sistema fechado, por riscamento, e, provavelmente, o micromecanismo de desgaste atuante nos três materiais foi o microcorte, causado pelo riscamento das partículas duras de quartzo (SiO_2) na superfície metálica, promovendo uma perda de material igual ao volume de desgaste. A resistência ao desgaste do material base é baixa, similar ao aço inoxidável 410 de referência, por não possuírem nenhuma fase dura que possa proteger a matriz ferrítica, além de possuírem dureza inferior em comparação ao revestimento, material com elevada resistência ao desgaste devido ao teor de Cr (22,2%p), com a formação de fases duras (M_7C_3) que agem como reforço e proteção e que reduz a remoção da matriz dúctil de ferrita e austenita.

4.3 Resistência a Corrosão

Nesta seção estão apresentados os resultados dos ensaios de polarização cíclica dos materiais estudados: material base, revestimento e

para o material de referência (aço inoxidável 410). Para tal são apresentadas as curvas de polarização cíclica (Figura 4.9) em meio (caldo de cana-de-açúcar) com valores de pH ~ 5,5.

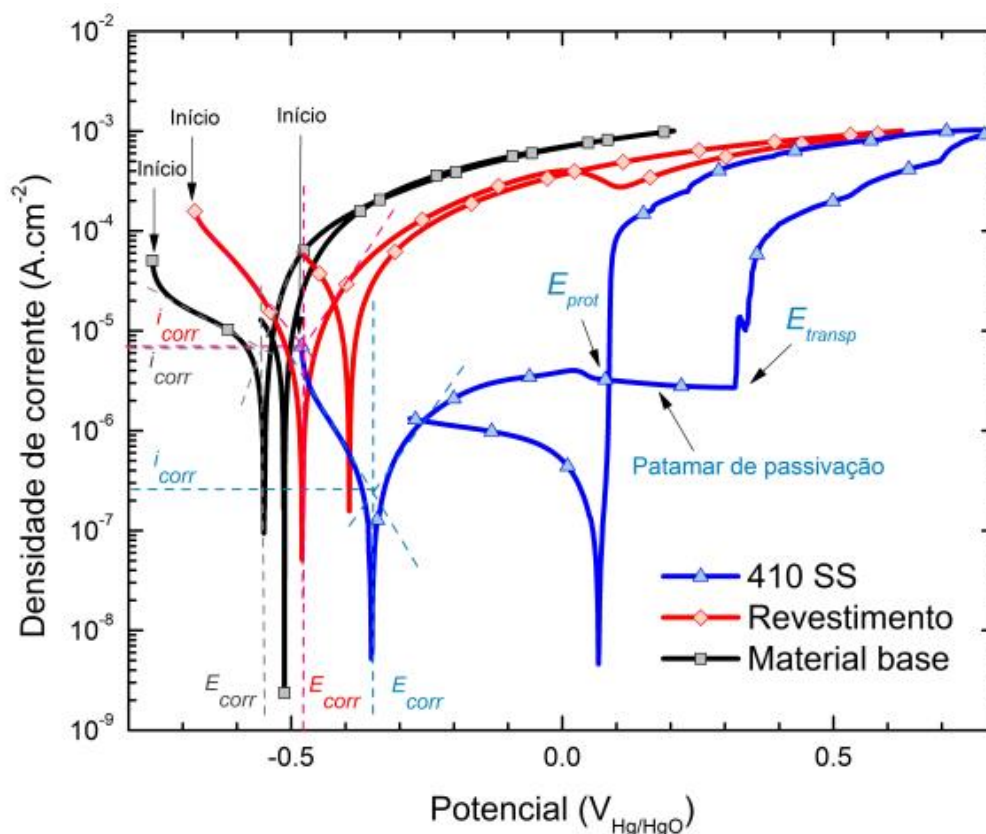


Figura 4.9 – Curvas de polarização cíclica obtida para o aço inoxidável 410, material base e revestimento. Fonte: Próprio autor.

As curvas de polarização obtidas através do meio (caldo de cana-de-açúcar) foram apresentadas na Figura 4.9 e, portanto resumidas na Tabela 4.6. Um comportamento distinto foi observado, o material de referência (aço inoxidável 410) apresentou resistência superior a corrosão (menores valores de intensidade de corrente de corrosão, i_{corr} , e valores mais nobres de potenciais, E_{corr}) em relação ao material base e ao revestimento, pois ambos não apresentaram formação de filme passivo, resultando em elevados valores de intensidade de corrente (i_{corr}) e baixos valores de potencial de corrosão (E_{corr}).

Tabela 4.6 – Resultados obtidos a partir de curvas de polarização potenciodinâmica para o material base, aço inoxidável 410 e revestimento. Fonte: Próprio autor.

	I_{corr} (A.cm ²)	E_{corr} (VHg/HgO)	I_{pass} (μ A.cm ²)	E_{transp} (VHg/HgO)	E_{prot} (VHg/HgO)
Material base	8	-552			
	\pm	\pm	-	-	-
	3	9			
	6	-477			
Revestimento	\pm	\pm	-	-	-
	3	2			
Aço	0,4	-264	2,5		
Inoxidável	\pm	\pm	\pm	375 \pm 54	88 \pm 2
410	0,1	133	0,5		

O efeito deletério do material base deve-se ao fato de não possuir Cr, elemento de liga que confere a resistência a corrosão, apresentando passividade no intervalo de pH típico do caldo de cana-de-açúcar (5.5) sendo sensível à sulfatos e cloretos da solução ensaiada (Tabela 2.2), que aumentam a agressividade da solução. O comportamento do aço inoxidável 410 aponta melhor resistência a corrosão em relação ao material base e revestimento. Isso é esperado pois o aço inoxidável 410 possui todo o Cr em solução sólida, assegurando a formação de um filme passivo protetor entre E_{corr} e E_{transp} . Após a transpassivação, o aço inoxidável 410 apresentou capacidade de interromper a propagação da corrosão por pite para potenciais abaixo de E_{prot} . Além disso, a resistência a corrosão do aço inoxidável 410 é atribuída a composição química e ao controle da microestrutura e fases formadas, que são essenciais para assegurar a apropriada resistência a corrosão em caldo de cana-de-açúcar.

O Cr é o elemento de liga mais importante para garantir a passivação de ligas a base de Fe. Embora o revestimento possua elevado teor de Cr

(~22,2 %p), pode-se ter ocorrido o fenômeno da sensitização onde o mesmo consiste na precipitação dos carbonetos nos contornos de grão e no empobrecimento em Cr da região vizinha, representando pontos preferenciais para a corrosão. De acordo com Magri [70], o mecanismo para explicar a sensitização dos aços do sistema Fe-Cr-C se baseia na precipitação de carbonetos ricos em Cr nos contornos de grão. O crescimento destes carbonetos faz surgir nas suas adjacências uma zona empobrecida em Cr depois do material ter sido tratado termicamente ou aquecidos para trabalho a quente ou durante soldagem em uma faixa de temperatura entre 400 °C e 850 °C e, quando o aço for aquecido dentro dessa faixa, ainda que por um tempo muito curto, fica susceptível ao ataque preferencial num meio corrosivo (oxidante) [70].

4.4 Análise de Falha

Na Figura 4.10 é proposto um mecanismo de degradação do martelo oscilante. Uma grande quantidade de trincas é formada no revestimento duro durante a fabricação (Figura 4.10b), o que ocorre devido a falta de uma ligação metalúrgica entre metal de base e revestimento, as elevadas taxas de resfriamento durante a soldagem, a formação dos carbonetos M_7C_3 que são duros e frágeis e/ou a incorporação de hidrogênio. Essas trincas são pontos de início de fratura após o caldo de cana-de-açúcar penetrar pelas fendas geradas (Figura 4.10e) e atingir o material de base (Figura 4.10f). O caldo de cana-de-açúcar corroe a interface entre metal de base e revestimento, ocorrendo, na sequência, o desprendimento do revestimento do substrato, com sua gradual remoção por impacto (Figura 4.10g). Assim, o aço carbono do metal de base fica exposto e é preferencialmente degradado por corrosão/desgaste (Figuras 2.7, 3.2 e 4.10h).

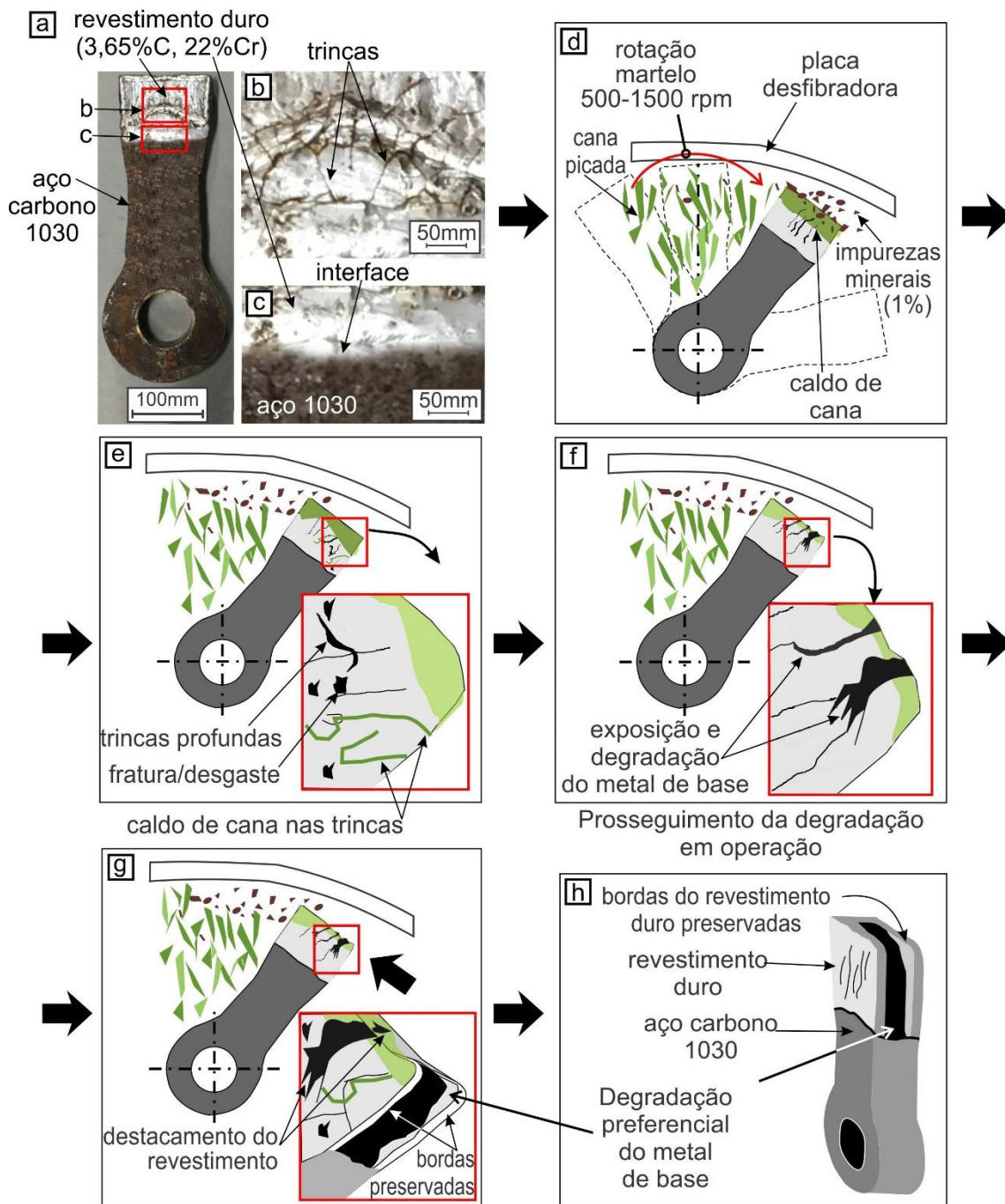


Figura 4.10 – Composição do martelo oscilante **(a)** com detalhes das trincas no revestimento duro **(b)** e a interface da solda **(c)**; rotação típica de operação **(d)**; início da fratura a partir das trincas **(e)** e degradação do metal base **(f)**; degradação preferencial do metal de base e remoção do revestimento **(g)**; metal de base severamente degradado **(h)**. Fonte: Próprio autor.

Como sugerido no mecanismo proposto, as trincas formadas no revestimento durante sua fabricação tem um papel fundamental na falha do componente. Para diminuir a quantidade de trincas formadas no revestimento, é necessário que a interface esteja limpa e uma ligação metalúrgica ocorra, melhorando o procedimento de soldagem. Segundo a norma da Petrobrás [71], alguns cuidados podem ser tomados durante a aplicação de solda utilizando eletrodos revestidos, como instalação de uma cabine para o controle do processo de soldagem, sendo necessário ter um processo de limpeza por goivagem nas peças com o objetivo de eliminar qualquer tipo de impureza, inclusive antigas incrustações de solda do próprio revestimento. Após a limpeza por goivagem, um lixamento com lixadeira manual é essencial para complementar o processo de limpeza. Faz-se necessário também pré-aquecer a peça com o maçarico para minimizar o efeito do choque térmico. Em seguida, é necessário revestir primeiramente com o eletrodo de base e então com o eletrodo de liga dura e por fim, após o processo de revestimento, envolver as peças em uma lã de vidro a fim de amenizar o processo de resfriamento e minimizar o possível surgimento de trincas.

Os estudos de corrosão e desgaste mostraram que a liga ferrosa de alto Cr (22,2 %p) e C (3,65 %p) do revestimento mostrou resistência ao desgaste abrasivo significativamente maior do que o material de base e aço inoxidável 410. Porém, com relação a corrosão em caldo de cana-de-açúcar, tanto o revestimento quanto o metal de base tiveram um desempenho pior que o aço inoxidável 410. Ligas com menores teores de Cr e de baixo custo ou o aço inoxidável 410, que já é amplamente utilizado na agroindústria, poderiam ser utilizados como alternativa ao material de base utilizado, o que ajudaria a prolongar a vida útil do componente e diminuir os custos de manutenção. O aço inoxidável 410, além de apresentar elevada resistência à corrosão, pode ser endurecido por transformação martensítica durante a soldagem, o que melhora seu comportamento ao desgaste.

5 CONCLUSÕES

- O material base do martelo oscilante foi caracterizado como um aço carbono 1030, o que foi confirmado pelas análises químicas e de microscopia ótica, que mostrou uma microestrutura hipoeutetóide, de matriz ferrítica com ilhas de perlita, condizente com o teor de ~0,3 %p C.

- O material utilizado no revestimento do martelo foi definido como liga do sistema Fe-Cr-C com alta concentração de Cr (22,2 %p) e C (3,65 %p). Através da DRX foi identificada as fases ferrita, austenita e Cr_7C_3 e comprovou-se claramente a presença desses carbonetos na microestrutura através de imagens de microscopia ótica.

- Dos materiais testados, o que apresentou maior resistência à corrosão foi o aço inoxidável 410 (material de referência), seguido do revestimento de liga ferrosa de alto Cr (22,2 %p) e C (3,65 %p), evidenciando o efeito benéfico da adição de Cr nas ligas. O ensaio de polarização cíclica realizado conforme os parâmetros utilizados no trabalho não apresentaram diferenças significativas entre os materiais nesse meio corrosivo. Na literatura são escassos os estudos de curvas de polarização utilizando como meio o caldo de cana-de-açúcar.

- O revestimento apresentou comportamento ao desgaste significativamente superior ao material base e aço inoxidável 410. Os valores de perda de volume obtidos através dos ensaios de areia seca contra roda de borracha se mostraram adequados à avaliação comparativa da resistência aos danos abrasivos dos materiais ensaiados, onde o revestimento apresentou melhor desempenho por ter uma microestrutura considerada por vários autores como a mais eficaz contra o desgaste abrasivo a baixas tensões. Os resultados obtidos podem não refletir diretamente o comportamento dos materiais avaliados nas condições reais em serviço, porém podem ser utilizados como referência na seleção de materiais que proporcionem melhor resistência aos danos abrasivos, na condição de baixas tensões similares aos dos testes realizados. O mecanismo predominante de desgaste observado é o desgaste abrasivo a baixas tensões por riscamento.

- As trincas no revestimento se mostraram um ponto de fragilidade dos martelos oscilantes, permitindo a penetração do caldo de cana-de-açúcar e promovendo a fratura do revestimento devido ao impacto durante a operação de desfibramento, deixando o material base exposto aos efeitos de desgaste abrasivo e corrosivo. Um maior controle durante o processo de preparação do revestimento e o uso de um material base com maior resistência a corrosão poderiam prolongar significativamente a vida útil dos martelos

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de tribocorrosão nos martelos oscilantes dos desfibradores.
- Analisar os mecanismos de desgaste e corrosão nos martelos oscilantes dos desfibradores após aplicação de revestimento duro com liga Fe-Cr-C-Nb.
- Estudar a relação do nível de impurezas da cana-de-açúcar com o desgaste e corrosão dos martelos oscilantes dos desfibradores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROCHA, D. **“O Brasil na Liderança Mundial do Agronegócio”**
<http://www.zootecniabrasil.com.br> . Acesso em: ago. 2019.
- [2] SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar e sucroalcooleiro: prognóstico**. São Paulo, 2012. 11 p.
- [3] COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 2014. v.1, n.3, 27 p.
- [4] MONTEIRO NETO, A. Q. **Novo Ciclo da Cana. Estudo sobre a competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana de açúcar e Prospecção de Novos Empreendimentos** Ed IEL. Brasília, 344p, 2005.
- [5] O’LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models in their prediction of sucrose yield **Proc. S. Afr. Sug. Technol.**, v.73, p.33-34, 1999.
- [6] ÚNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇUCAR. Setor Sucroenergético – **Histórico**. Disponível em: <https://www.unica.com.br/cont/Default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BB2-5D12B834EF59}>. Acesso em: jul. 2019.
- [7] BRANDIM, A. S. **Influência da Adição de Pó Metálico em Soldas de Revestimentos do Tipo Fe-C-Cr Depositadas Por Arco Submerso. Dissertação de Mestrado – PPG-CEM – UFSCar**. 1998. 92p.
- [8] HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1977b. v.2, 1198p.

[9] CHEN, J. C.P.; CHOU, CHUNG CHI. **Cane Sugar Handbook – A manual for cane sugar manufacturers and their chemists**. 12th, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

[10] TEXEIRA, Luiz Alexandre. **O Engenho Colonial**. Goiânia: Editora Atica, 1977. 40p.

[11] MARJOTTA-MAISTRO, M.C. **Análise do consumo industrial de açúcar no estado de São Paulo**. 1998. 100 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

[12] MANELLA, José Nazareno Anzanello. **Glossário de termos técnicos usados na indústria açucareira e alcooleira**. Maracaí: Markgraf, 2012.

[13] PAYNE, John Howard. **Operações unitárias na produção de açúcar da cana**. Tradução de Florenal Zarpelon. São Paulo: Nobel, 1989.

[14] ANDRADE, Ednilton Tavares Sergio; CARVALHO, Roberto Garcia; SOUZA, Lucas Fernandes. **Programa do proálcool e o etanol no Brasil**. ENGEVISTA, V. 11, n. 2. p. 127- 136, dezembro 2009.

[15] DELGADO, A. A.; AZEREDO CÉSAR, M. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. Vol. II. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1977.

[16] SHIKIDA, P.F.A. **A evolução diferenciada da agroindústria canavieira no Brasil de 1975 a 1995**. Cascavel: Edunioste, 1998.

[17] RIDESA. REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de açúcar**. Curitiba, 2010. 136 p.

[18] Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo - COPERSUCAR. Centro de Tecnologia de Cana (CTC). **Amostragem e análise de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 37p, 1980.

[19] STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria prima. In: PARANHOS, S. P. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v.1, cap. 7, p. 761-804.

[20] PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Fundação Cargil, Campinas – SP, v. 1, 1987, 244p.

[21] VIEIRA, Maria Celia Azeredo; LIMA, Jaldir Freire; BRAGA, Natália Mesquita. **Setor Sucroalcooleiro Brasileiro : Evolução e Perspectivas**. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/liv_perspectivas/07.pdf. Acesso em: jan. 2020.

[22] SIQUEIRA, I.P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: manual de implementação** – Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005, 408p.

[23] COPERSUCAR. Apostila do curso de Engenharia Açucareira – **Processo de fabricação do açúcar** – Parte I. Centro de Tecnologia Copersucar – CTC. Copersucar, Piracicaba, 1987.

[24] EUTECTIC & CASTOLIN. Aplicações & Sistemas. **Catálogo Geral de Produtos**. Eutectic do Brasil Ltda. Disponível em: <http://www.eutectic.com.br/Catálogos.html>. Acesso em: Jan. 2020.

[25] **ASTM A36-19** - Standard Specification for Carbon Structural Steel . West Conshohocken: 2019.

[26] **ASTM B584 – 14** - Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications. West Conshohocken: 2014.

[27] COPERSUCAR. **Apostila Operação de Moendas**. São Paulo. 1990. 117 p.

[28] HUGOT, Emile. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1977. V.2, 544p.

[29] **DIN 8555** - Filler metals used for surfacing, Berlim/ 1983.

[30] KARDEC, A. & NASCIF, J.A. **Manutenção – função estratégica**. 3.^a ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2010.

[31] ZILLO LORENZETTI (2002). **Moendas**. Treinamento industrial – atualização técnica. [S.L.: s.n.], 80p.

[32] FIVESGROUP, Disponível em: <http://www.fivesgroup.com/business-way/technologiesectors.html>. Acesso em: jan. 2020.

[33] CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-manutencao>. Acesso em: set. 2019.

[34] YIN, L.et al. Fracture and wear in shredder hammer tungsten carbide tips in the sugar cane shredding process. **Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014)**, Woodhead Publishing, 2014, p.57-61. <http://doi:10.1533/9780081002254.57>

[35] LIMA, A. C.. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto a resistência ao desgaste de facas picadoras de cana de açúcar**, 2008. Tese (Doutorado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

- [36] PODANY, P., DŽUGAN, J., & VACIK, J.. Construction of Hammer for Sugarcane Shredder. **Advanced Materials Research**, v.811, p.308–313. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/amr.811.308>
- [37] Lima, A. C., Ferraresi, V. A. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. **Soldagem & Inspeção**, v.14, n.2, p.140–150, 2009. <http://doi:10.1590/s0104-92242009000200006>
- [38] ASM INTERNACIONAL. **ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys**. 1st. Ed. ASM Internacional, 2000.
- [39] DIAS, M. F.; GOMES, S. I. Avaliação da Resistência ao Desgaste abrasivo a Baixa Tensão de Revestimentos soldados por arco submerso. **II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, São Paulo, 2003.
- [40] RAMALHO, JOSÉ PINTO. – Revestimento por Soldagem. **Coleção Tecnologia SENAI – Soldagem**. p. 315-336 - Senai-S.P, 1997.
- [41] COPERSUCAR. **Apostila Operação de Moendas**. São Paulo. 1990. 108 p.
- [42] BENEDINI, M.S. ; BERTOLANI, F.C. Carta de solos e ambientes de produção - Centro de Tecnologia Canavieira. **Revista Coplana**, guariba, mar. 2008 .Disponível em: <https://www.coplana.com/gxfiles/ws001/design/RevistaCoplana/2008/Marco/pag24-255.pdf>. Acesso em: Jan.2020.
- [43] COPERSUCAR.**Próalcool: Fundamentos e perspectivas**. 2.ed. São Paulo, 1989.121p.

[44] COPERSUCAR – COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ÁLCCOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos sólidos da agroindústria sucro-alcooleira**. Piracicaba, 1993. 60p. (Relatório Técnico RT-561-92/93).

[45] **ASTM E606-19** - Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, 2019.

[46] CUBILLOS, J. m., RODRÍGUEZ, S. A., CORONADO, J. J. . On the fatigue behaviour of quenched and tempered at 300 and 600 °C SAE 1045 steel in an environment of sugar cane juice. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, p.1299–1308, 2016. <http://doi.org/10.1111/ffe.12454>

[47] BOSQUETTI, p. et al. Avaliação da resistência à corrosão nos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316, em processos de extração da cana em usinas de açúcar e álcool. **70º Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro, p. 2277-2286, 2015. <http://doi: 10.5151/1516-392X-27082>

[48] Wesley, S. B. et al. Experimental investigation of microbiologically influenced corrosion of selected steels in sugarcane juice environment. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 29, n.12, p. 2353–2357. <http://doi:10.1007/s11274-013-1402-5>

[49] Durmoo, et al. Biocorrosion of stainless steel grade 304 in sugar cane juice. **Electrochimica Acta**, v. 54, n.1, p. 74–79, 2008. <http://doi:10.1016/j.electacta.2008.06.028>

[50] MAREK, M.I. **Fundamentals of Corrosion: Introduction**, ASM Handbook, 4^a ed.: Corrosion, v. 13, 1992.

[51] CCDM–DEMa/UFScar. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/ensaios-quimicos/espectrometria-de-emissao-optica-por-centelha/>. Acesso em: jun. 2021.

[52] CCDM – DEMa/UFScar. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/determinacao-de-carbono-e-enxofre-por-combustao-e-quantificacao-por-absorcao-de-infravermelho/>. Acesso em: jun. 2021.

[53] **ASTM E10-18** - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic. West Conshohocken: 2018.

[54] **ASTM G65-16**. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. (2017). 12p.

[55] NBR NM 87. **Aço carbono e ligados para construção mecânica; designação e composição química**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

[56] AWS 5.5-96. Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. **American Welding Society**, 1996.

[57] APERAM – Disponível em: <https://brasil.aperam.com/>. Acesso em: jun. 2019.

[58] COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p. Revisão técnica André Luiz V. da Costa.

[59] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**: Surface engineering. Metals Park: 1994. v. 5.

- [60] CORRÊA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D.G.; KUMMAR, R. V. **Avaliação de Resistência ao Desgaste de Ligas Fe-Cr-C-Nb-V Desenvolvidas para a Solda de Revestimento Duro para Uso sob Condições Altamente Abrasivas.** “8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIBIM 8”, Cusco, Peru, out. 2007.
- [61] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials.** CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 273p. 1992.
- [62] HERNÁNDEZ, O. J. S. **Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indústria Sucroalcooleira.** Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 1997, 102 p.
- [63] ABNT NBR 6442. **Tabelas de valores de dureza Brinell (HB) para materiais metálicos.** Rio de Janeiro: 1999.
- [64] ABDALLAH, Said. **PROJETO QUARTZO INDUSTRIAL DUERÉ-CRISTALÂNDIA (TO).** Goiânia: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 59 p. (Série Rochas e Minerais Industriais, nº 06), 2010.
- [65] EYRE T.S.. Wear characteristics of metals. **Tribology International**, v. 9. n. 5., p 203-212 , 1976. [http://doi.org/10.1016/0301-679x\(76\)90077-3](http://doi.org/10.1016/0301-679x(76)90077-3)
- [66] BAUCCIO, M.(ed.). **ASM Engineered Materials Reference Book**, 2 ed. Materials Park..ASM International, 1994.
- [67] KOTECKI, D. J. & OGBORN, J. S. - **Abrasion resistance of iron based hardfacing alloy. Welding Journal** nº 8. 269-278p. August. 1995.
- [68] MISRA, A. FINNIE, I - **A Classification of Three-Body Abrasive Wear and Design of New Tester.** Wear, 1970.

[69] CORRÊA, E.O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. D.G.; KUMMAR, R.V. Desenvolvimento de uma Liga Ferrosa para Solda de Revestimento Duro Reforçada com carbonetos complexos; **IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. 22 a 25 de agosto. Recife-PE.2006.

[70] MAGRI, M. ;ALONSO, N. -Métodos eletroquímicos para a avaliação da sensitização em aços inoxidáveis martensíticos. **In: CONGRESSO ABM-Corrosão e tratamento de superfície**.São Paulo-1995.p.133.

[71] PETROBRÁS. Norma nº 1737: inspeção de soldagem - **qualificação de pessoal**. Módulo 06: metalurgia da soldagem. FBTS, 1983, p.17-20.