

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Ewerton Firmino das Chagas

**AUMENTO DO CICLO DE VIDA DOS MARTELOS DO
MOINHO DE MARTELOS NO PROCESSAMENTO DE
LATAS DE ALUMÍNIO**

**Taubaté – SP
2022**

Ewerton Firmino das Chagas

**AUMENTO DO CICLO DE VIDA DOS MARTELOS DO
MOINHO DE MARTELOS NO PROCESSAMENTO DE
LATAS DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Curso Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Materiais
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

**Taubaté – SP
2022**

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau**

C433a Chagas, Ewerton Firmino das
Aumento do ciclo de vida dos martelos do moinho de martelos no
processamento de latas de alumínio / Ewerton Firmino das Chagas. -- 2022.
153 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de
Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2022.

Orientação: Prof. Dr. José Rubens de Camargo, Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Moinho de martelo. 2. Hardox. 3. Ravur. 4. Laser Cladding.
5. Reciclagem de latas de alumínio. I. Universidade de Taubaté. Dep. de
Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 669.95

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

EWERTON FIRMINO DAS CHAGAS

**AUMENTO DO CICLO DE VIDA DOS MARTELOS DO MOINHO DE MARTELOS
NO PROCESSAMENTO DE LATAS DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Curso Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Materiais
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Data: 08/03/2022

Resultado: **APROVADO**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

Universidade de Taubaté

Assinatura

Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

FATEC - Pindamonhangaba

Assinatura

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente ao Deus Pai, Deus Filho e ao Deus Espírito Santo por conceder a cada dia a sabedoria e o conhecimento do direcionamento da minha vida, em segundo lugar a minha esposa Joana Angélica Chagas que tem sido a minha conselheira e companheira durante estes anos. Ao meu pai Sebastião Firmino das Chagas (*in memoriam*) pelas longas conversas e por ter me concedido a oportunidade de receber uma boa educação onde nunca me desmotivou em nenhuma circunstância. Ao meu irmão Dr. Jeferson Firmino das Chagas pelos incentivos e longas discussões técnicas. Agradeço a minha mãe Benedita de Jesus Chagas (*in memoriam*) pela paciência e por me ajudar no processo evolutivo da minha vida. A Novelis do Brasil Ltda que sempre tem apoiado e investido em minha carreira profissional. Aos meus companheiros de trabalho Diogo Silva, Luis Naressi, Vitor Ataíde e Leticia Rocha e aos meus líderes Daniel Freire e Elton Teixeira por ter concedido essa grande oportunidade em minha carreira. Aos meus amigos Samyr Meirelles, Robson Carvalho e Marcos Santos pelas longas conversas durante todo esse processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. José Rubens de Camargo por ter me orientado com grande sabedoria e pela grande sabedoria e experiência.

Ao Vice-Presidente de Operações da Daniel Freire, por todo o apoio e momentos de motivação para a realização deste projeto.

Ao Diretor de Operação Francisco Carvalho e ao Gerente de Engenharia América do Sul Keisuke Okazaki de conceder essa oportunidade de estudo e ao grande suporte nas horas difíceis.

Ao Gerente da Reciclagem Elton Teixeira, pelo suporte e ajuda no planejamento do estudo e o incentivo e ao time da Reciclagem.

Ao profissionalismo e dedicação da Diogo Silva, Luis Naressi, Cesar Britto, Juliana Vieira, Vitor Ataíde e Leticia Rocha sem esses profissionais seria impossível concluir esse estudo.

“Existe uma coisa que uma longa existência me ensinou: toda a nossa ciência, comparada a realidade, é primitiva e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso.”

Albert Einstein

RESUMO

A cada ano as empresas buscam a pegada de carbono (cálculo da emissão total de gases de efeito estufa) cada mais forte, principalmente no mercado do alumínio, devido ser um produto infinitamente reciclado, tem como principal objetivo em desenvolver e conhecer o martelo usados dentro de um moinho de martelo, com reciclagem de latas, na qual este insumo tenha um ciclo de vida. Após estudar e pesquisar vários tipos e processo de aços, foram realizadas algumas reuniões com diversos fornecedores para o desenvolvimento do martelo em nossa linha de produção. Então após aquisição, foi realizado um plano de testes com duração de oito meses, pois cada teste na linha de produção que tem a duração de um mês do plano de testes as variáveis em estudo em analisar os desgastes pela perda de massa, produtividade, dureza, perfil de desgaste e caracterização e macrografia no martelo. Analisou-se todas as condições no software Minitab. Esses métodos de análises mostraram o desempenho dos martelos a espessura da camada dura ou sobremetal no martelo usando a tecnologia Laser Cladding.

Palavras Chaves: Moinho de martelo. Hardox. Ravur. Aço forjado. Laser Cladding. Reciclagem de latas de alumínio.

ABSTRACT

Each year companies seek an increasingly strong carbon footprint (calculation of total greenhouse gas emissions), mainly in the aluminum market because it is an infinitely recycled product and the cost of transforming bauxite into primary aluminum, grows every year due to the energy cost, causes aluminum processing companies to increase recycling in their products. In this sense, this dissertation has as main objective in developing and knowing the hammer used inside a hammer mill, with the main objective of grinding the processed used beverage cans in a recycling line, in which this hammer has a life cycle, that is, wear resistance higher than currently used. After studying and researching various types and process of steels, we held some meetings with various suppliers for the development of the hammer in our production line. Then after acquisition, we carried out a test plan lasting eight months, because each test on the production line lasts one month and in this of the test plan the variables under study consist of analyzing the wear by loss of mass, productivity, hardness, release profile and characterization and macrography in the hammer. All the conditions defined in the experiments were analyzed, applying the results through the Minitab software, macrography and micrograph that the percentage of wear in an action with temperate martensitic structure with tungsten carbide cover proved to be the best performance, lowest specific wear. These methods of analysis show that we can further increase hammer performance by improving the thickness of the hard or overmetal layer on the hammer using Laser Cladding technology.

Key-words: Hammer mill. Hardox. Ravur. Forged steel. Recycling of used beverage cans.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo e funcionamento do moinho de martelos	23
Figura 2 - Modelo e funcionamento do moinho de bola	24
Figura 3 - Moinho de Martelos para o processamento de latas de alumínio	25
Figura 4 - Localização do martelo dentro do moinho de martelos.....	26
Figura 5 - Consumo médio de energia para produção do alumínio primário.....	27
Figura 6 - Índice de Reciclagem de Latas	28
Figura 7 - Aumento do preço do minério de ferro.....	29
Figura 8 - Crescimento de consumo de ferro na China impactando o preço do minério de ferro no mundo.....	29
Figura 9 - Densidade dos materiais.....	32
Figura 10 - Temperatura de fusão dos metais.....	33
Figura 11 – Processo Bayer, transformação da bauxita em alumina (Al_2O_3)	34
Figura 12 - Processo Hall – Héroult	35
Figura 13 - Fornos de redução de alumina para obtenção do alumínio primário	35
Figura 14 - Fluxograma geral de uma linha de produção de Refusão de placas de alumínio.....	36
Figura 15 – Forno de Refusão (<i>top charge</i>)	37
Figura 16 - Forno de espera (<i>Holder</i>) fabricado pela empresa Insertec.....	38
Figura 17 – Fluxação e escumagem no forno de espera	38
Figura 18 – Projeto da linha de produção de placas (<i>Direct Chill</i>).....	39
Figura 19 - Visão esquemática durante o vazamento de placas	40
Figura 20 - Conceito de um laminador universal	40
Figura 21 - Laminador a quente	41
Figura 22 - Tipos de laminadores.....	42
Figura 23 - Fluxo de processo da laminação a quente de alumínio	42
Figura 24 - Modelo de 3D das tensões durante a laminação a frio	43
Figura 25 - Laminador a frio com alto nível de automação	44
Figura 26 - Fluxo de processos de uma fábrica de laminação de alumínio.....	44
Figura 27 - Fluxograma de uma fábrica de latas de alumínio.....	45
Figura 28 - Tombador de bobinas	45
Figura 29 – Desenrolador de bobinas.	46
Figura 30 - Conformação do copo.....	46

Figura 31 - Conjunto de matrizes da <i>bodymaker</i>	47
Figura 32 - Processo de alongamento da lata.....	47
Figura 33 - Formação do perfil da boca da lata.....	48
Figura 34 - Formação (<i>shell</i>) e progressão da tampa (<i>conversion press</i>) da lata de alumínio.....	48
Figura 35 - Fluxograma de uma fábrica de tampa e anel de alumínio	49
Figura 36 - Componentes da lata: corpo (<i>can body</i>) e tampa (<i>can end</i>)	49
Figura 37 - Composição química comparativa das ligas	50
Figura 38 - Homogeneização das ligas 3XXX.....	51
Figura 39 - Precipitado tipo $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ com forma arredondada após ataque HF 0,5%	51
Figura 40 - Efeito da composição dos intermetálicos em relação a taxa de resfriamento	52
Figura 41 - Equilíbrio de fase da liga AA5182	52
Figura 42 - Fardo de latas de alumínio.....	53
Figura 43 – Metais não-ferrosos detectado na entrada na linha de reciclagem	53
Figura 44 - Impurezas contida nos fardos de latas.....	54
Figura 45 - Areia dentro dos fardos e latas de alumínio para aumentar o peso da carga	54
Figura 46 - Sucata de cabo de alumínio revestido	55
Figura 47 - Prensa Jacaré.....	56
Figura 48 - Fluxo da reciclagem de latas	56
Figura 49 - Desenfardador (<i>bale breaker</i>).....	57
Figura 50 - Esteira eletromagnético ou eletro-ímã.....	57
Figura 51 - <i>Air Knife</i>	58
Figura 52 - Moinho de martelos (<i>hammer mill</i>).....	58
Figura 53 – <i>Trommel</i> ou peneira rotativa	59
Figura 54 - Rolo magnético	59
Figura 55 - Forno rotativo ou <i>decoater</i>	60
Figura 56 - Vistas de um forno de reverbero (<i>sidewell</i>).....	61
Figura 57 - Caminhão de transporte de metal líquido em cadinhos	62
Figura 58 - Tipos de Manutenção.....	62
Figura 59 - Curva da banheira (<i>bathtub curve</i>).....	63
Figura 60 - Moinho de Martelos (<i>hammer mill</i>).....	66

Figura 61 Esquema do deslocamento linear (A) e helicoidal (B) na estrutura cristalina	67
Figura 62 – (a) micrografia de elétrons em alta resolução da interface entre o γ -Al ₂ O ₃ cristalina e o alumínio observado em “Cross section” (b) difração de elétrons de feixe convergente no padrão da γ -Al ₂ O ₃ cristalina mostrado em (a) na direção [0 1 1] _{γ-Al₂O₃}	71
Figura 63 - Variação da oxidação do alumínio ao longo da adição de oxigênio	72
Figura 64 - Óxido de alumínio retirado da superfície do metal líquido e com 75 nm visto no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	72
Figura 65 - Partículas de quartzo	73
Figura 66 - Especificação do martelo para o moinho de martelos da Novelis do Brasil Ltda	74
Figura 67 - Localização do martelo (<i>Hammer</i>) no moinho de martelos	74
Figura 68 - Martelos produzidos com a partir de chapas de aço Hardox 500	75
Figura 69 - (a) Ravur 500 revestido com Rockit 706 pela técnica <i>Laser Cladding</i> (b) Ravur 500 sem revestimento.....	77
Figura 70 - Conceito do processo Laser Cladding	78
Figura 71 - Conjunto de martelos da Açoforja para consumo	79
Figura 72 - Exemplos de desgastes abrasivos.....	81
Figura 73 – Microplowing	81
Figura 74 – Microcutting.....	83
Figura 75 - Geração de rachaduras sob um indentador em sólidos quebradiços	84
Figura 76 – <i>Microcracking</i>	84
Figura 77 - Visão esquemática do teste de desgaste abrasivo ASTM G65	86
Figura 78 – Gráfico da variação da perda de massa e profundidade do desgaste de uma peça.....	87
Figura 79 - dimensão de resposta e geometria para o tipo de penetração Vickers...88	
Figura 80 - Seção metalográfica através de uma cicatriz de desgaste que foi gerada por um teste de desgaste anel-no-bloco em um bloco de aço inoxidável tipo 304....89	
Figura 81 - Facetas do desgaste para aplicação no MEV (SEM).....	91
Figura 82- (a) Diagrama da coluna e câmera de um SEM (b) Fotografia de um SEM de baixo vácuo	92
Figura 83 - Diagrama dos níveis de energia de um átomo mostrando a excitação das camadas K,L,M e N e a formação de raios X K α , K β , L α e M α	93

Figura 84 - (a) imagem de MEV (b) espectro do EDS amostra "a".....	94
Figura 85 - Tipos de contatos abrasivos (a) alimentação em esteiras de mineração (b) usinagem em peças (c) pá de arado entre metal e terra (d) trituradores	95
Figura 86 - Esquema de Desgaste Adesivo	96
Figura 87 – (a) Desgaste corrosivo - início da reação química entre as superfícies; (b) Desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão	97
Figura 88 - Mecanismos de propagação de trinca durante o processo de fadiga	99
Figura 89 - Danificação por atrito " <i>fretting damage</i> " ocorrido no anel do rolamento por causa de pressão de contato insuficiente entre o anel e a caixa do rolamento.....	99
Figura 90 - Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo; d) fusão da superfície causada por altas velocidades de impacto; e) erosão macroscópica com efeitos secundários; f) degradação da rede cristalina por impacto de átomos.....	101
Figura 91 - Representação esquemática de vários estágios envolvidos na formação das folhas de desgastes por delaminação	102
Figura 92 - Valores do coeficiente de desgaste (k) para sistemas tribológicos sem lubrificação.	103
Figura 93 - Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico.....	104
Figura 94 - Classificação de integridade superficial	105
Figura 95 - Representação da rugosidade média R_z	106
Figura 96 – A taxa de desgaste normalizada, K_a , comparado contra Dureza, expressado em MPa ao invés de Vickers (H in MPa = 10 HV). O gráfico mostra uma visão do caminho de quais materiais comuns de engenharia se comportam.	107
Figura 97 - A relação entre cavaco (chip), peça de trabalho e ferramenta.....	109
Figura 98 - Estado de estress e deformação no momento do corte do material	109
Figura 99 - (a) Seleção de ligas resistente ao desgaste entre os principais mecanismos de desgaste (b) % de carbono em relação ao desgaste por abrasão	110
Figura 100 - Fluxograma para realização dos testes no moinho de martelo	112
Figura 101 - Controle de peso dos martelos	113
Figura 102 - Pesagem dos rotores antes e depois da realização dos testes	114

Figura 103 - Balança suspensa Digitron ULD 200	115
Figura 104 - Microdurômetro <i>Future Tech 310</i>	116
Figura 105 - Cortadora Metalográfica AROCOR-250.....	117
Figura 106 - Embutidora a quente sob pressão Buehler SimpliMet-400	117
Figura 107 - Lixadeira metalográfica Arotec (Aropol VV)	118
Figura 108 - Polítriz AutoMet 250.....	119
Figura 109 - Metalizador Quorum (Q150R ES).....	120
Figura 110 - Lupa estereoscópica Nikon SMZ645	120
Figura 111- Microscópio Ótico Zeiss	121
Figura 112 - Microscópio eletrônico de varredura da FEI Company®, modelo Quanta 450	122
Figura 113 – Equipamento de fluorescência de raios X e princípio de funcionamento	123
Figura 114 - Progressão do desgaste dos martelos.....	124
Figura 115 - Posição de montagem nos martelos nos eixos.....	124
Figura 116 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor Açoforja	125
Figura 117 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor SSAB (Hardox)	126
Figura 118 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor HRC... 127	
Figura 119 - Gráfico do dimensional de desgaste por posição e fornecedor	127
Figura 120 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 1	128
Figura 121 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 2	129
Figura 122 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 3	129
Figura 123 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 4	130
Figura 124 – (a) Média total do desgaste específico por eixo (b) desgaste médio total (eixo e posição) e condição dos testes	131
Figura 125 - ANOVA material em relação a produtividade diária.....	131
Figura 126 - ANOVA por posição do martelo	132
Figura 127 - Análise das médias do desgaste específico	133

Figura 128 - Gráfico de Classificação errada versus números de nós terminais.....	134
Figura 129 - Diagrama de árvore alternativa.....	135
Figura 130 – Gráfico séries temporais da microdureza Vickers dos martelos.....	137
Figura 131 – Gráfico ANOVA Normal com um fator para microdureza Vickers dos martelos.....	137
Figura 132 – (a) e (b) análise do desgaste superficial com diferentes morfologias no martelo Hardox via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x	138
Figura 133 - (a) e (b) análise do desgaste superficial com diferentes morfologias no martelo Ravur 750 via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x	139
Figura 134 - (a) e (b) análise do desgaste superficial no martelo Açoforja via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x.....	139
Figura 135 – (a) e (b)Análise da qualidade da aplicação do pó de cobertura Rockit 706 pelo processamento Laser Cladding no martelo Ravur 750 via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x.....	140
Figura 136 – <i>Cross Section</i> (seção transversal) da microestrutura do aço Hardox 500 com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Hardox 500 em 100x (b) microestrutura do material Hardox em 200x	141
Figura 137 - <i>Cross Section</i> da microestrutura do aço Ravur 450 com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Ravur 450 em 100x (b) microestrutura do material Ravur 450 em 200x	141
Figura 138 - <i>Cross Section</i> da microestrutura do aço Açoforja com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Açoforja em 100x (b)microestrutura do material Açoforja em 200x.....	142
Figura 139 - <i>Cross Section</i> da microestrutura do aço Ravur 450 com cobertura em CB70 com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do metal base e revestimento CB70 em 100x (b)microestrutura do metal base e revestimento em 500x.	143
Figura 140- <i>Cross Section</i> da microestrutura do aço Ravur 450 com cobertura em Rockit 706 com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do revestimento Rockit 706 em 500x (b)microestrutura do metal base e revestimento em 100x (c) microestrutura do metal base e revestimento em 200x.....	144
Figura 141 – Microscópio Eletrônico de Varredura (<i>SEM</i>) e Espectro Energia Dispersiva (<i>EDS</i>) da análise do material Hardox 500 (a) <i>SEM com 862x</i> (b) <i>EDS</i> . 144	

Figura 142- Microscópio Eletrônico de Varredura (<i>SEM</i>) e Espectro Energia Dispersiva (<i>EDS</i>) da análise do material Açoforja 500 (a) <i>SEM</i> da estrutura do material 2664x (b) <i>EDS</i> no contorno de grão (c) <i>EDS</i> da matriz.....	145
Figura 143- Microscópio Eletrônico de Varredura (<i>SEM</i>) e Espectro Energia Dispersiva (<i>EDS</i>) (da análise do material Ravur 450 com cobertura em Rockit 706 ((a) <i>SEM</i> no Ravur 450 com 1918x (b) <i>SEM</i> na cobertura em Rockit 706 com 2786x (c) <i>EDS</i> no Ravur 450 (d) <i>EDS</i> na cobertura em Rockit 706	146
Figura 144 - Microscópio Eletrônico de Varredura (<i>SEM</i>) e Espectro Energia Dispersiva (<i>EDS</i>) (da análise do material Ravur 450 com cobertura em CB70 ((a) <i>SEM</i> no Ravur 450 com 1800x (b) <i>SEM</i> na cobertura em CB70 em 2700x (c) <i>EDS</i> no Ravur 450 (d) <i>EDS</i> na cobertura em CB70.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo anual de martelos e grelhas do moinho de martelos	30
Tabela 2 - Ligas de alumínio e composição química predominante	37
Tabela 3 - Composição química dos componentes da lata de alumínio	50
Tabela 4 - Atividades de um plano de manutenção em uma recicladora	64
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da Al ₂ O ₃ (Corundum)	72
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da SiO ₂ (Quartzo)	73
Tabela 7 - Composição química do aço Hardox 500	75
Tabela 8 - Propriedades mecânica do aço Hardox 500	75
Tabela 9 - Composição química do aço Ravur 500	76
Tabela 10 - Propriedades mecânica do aço Ravur 500	76
Tabela 11 - Composição química do aço Ravur 500 como metal base e o Rockit 706 como cobertura	77
Tabela 12 - Propriedades mecânica do pó Rockit 706	77
Tabela 13 - Composição química do aço Ravur 500 como metal base e o CB70 como cobertura	78
Tabela 14 - Propriedades mecânica do pó Rockit 706	78
Tabela 15 - Composição química do aço forjado da empresa Açoforja	79
Tabela 16 – Propriedade mecânica do aço forjado da empresa Açoforja	79
Tabela 17 – Fatores que influenciam o comportamento do desgaste abrasivo	80
Tabela 18 - Resoluções típicas obtidas por diversas técnicas de microscopia e olho	90
Tabela 19 - Classificação e composição das ligas Hardfacing	111
Tabela 20 - Cronograma dos testes dos martelos e seus respectivos fornecedores	112
Tabela 21 - Matriz de responsabilidade dos testes	113
Tabela 22- Matriz R.A.C.I. do projeto	114
Tabela 23 - Composição química dos martelos	136

LISTA DE SIGLAS

UBC	Used Beverage Can (Latas de Bebidas Usadas)
G.U.	Grau de Utilização
Abal	Associação brasileira de alumínio
RFI	Rotor de injeção de sal (<i>rotary flux injection</i>)
D.C	Direct Chill
SEM	Scanning Eletron Micrograph
ASM	American Society for Metals
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NENS	<i>Nano eletromechanical systems</i> (Sistema Nano Eletromecânico)
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
PV	Produto da pressão e velocidade
RA	Rugosidade Aritmética Principal
V	Velocidade
CFD	Computacional Fluid Dinamics
CQ	Composição Química
HC	Rockit 706
AIRS	Adsorption induced Reduction of Strength

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.2	Objetivos Específicos	26
1.2	Justificativa.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	Fabricação de alumínio no mundo	31
2.1.1	O Alumínio e suas propriedades	32
2.1.2	Processo de obtenção e fusão do alumínio.....	33
2.2	Processo de laminação do alumínio.....	40
2.2.1	Laminação a quente e frio do alumínio.....	40
2.2.2	Processo de fabricação de latas de alumínio	44
2.2.2.1.	Tipo de ligas nas latas de alumínio	49
2.2.2.2.	Impureza nas latas de alumínio para reciclagem	52
2.2.2.3.	Processo de reciclagem industrial das latinhas de alumínio	55
2.2.2.4.	Programa de manutenção em recicladoras.....	62
2.2.2.5.	Moinho de martelos	64
2.2.2.6.	Projetos de moinho de martelos	66
2.2.2.7.	Características do abrasivo corundum (Al_2O_3)	71
2.2.2.8.	Características do abrasivo quartzo ou dióxido de silício (SiO_2)	72
2.2.3	Materiais para moinho de martelos	73
2.2.3.1.	Aço Hardox 500.....	75
2.2.3.2.	Aço Ravur 450.....	76
2.2.3.3.	Cobertura em Rockit 706 (HC70)	76
2.2.3.4.	Cobertura em CB 70.....	77
2.2.3.5.	Aço Açoforja	78
2.2.4	Mecanismos de desgaste abrasivos.....	79

2.2.4.1.	Tipo de defeitos por <i>microplowing</i>	81
2.2.4.2.	Tipo de defeito por <i>microcutting</i>	81
2.2.4.3.	Tipo de defeito por <i>microcracking</i>	83
2.2.5	Análise de desgaste	84
2.2.5.1.	Análise de desgaste por perda de massa	85
2.2.5.2.	Análise de desgaste por dureza	87
2.2.5.3.	Análise de desgaste por metalografia	89
2.2.5.4.	Análise de desgaste por MEV	90
2.2.5.5.	Análise de material impregnado na superfície por EDS	92
2.2.6	Desgaste em Metais	94
2.2.6.1.	Desgaste Abrasivo	94
2.2.6.2.	Desgaste Adesivo e por transferência de material.	95
2.2.6.3.	Desgaste triboquímico	96
2.2.6.4.	Desgaste por Fadiga	98
2.2.6.5.	Desgaste por atrito " <i>Fretting wear</i> "	99
2.2.6.6.	Desgaste por erosão	100
2.2.6.7.	Desgaste por delaminação	101
2.2.6.8.	Coeficiente de Desgaste	102
2.2.7	Parâmetros tribológicos	104
2.2.7.1.	Rugosidade e Dureza	105
2.2.7.2.	Velocidade, Carga e Temperatura	107
2.2.7.3.	Seleção de materiais (ligas metálicas)	109
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	112
3.1	Montagem do Sistema de Testes	112
3.2	Equipamentos utilizados para análise o desgaste dos martelos	115
3.2.1	Medição do desgaste pela perda de massa	115
3.2.2	Microdurômetro	115

3.2.3	Análise das imagens	116
3.2.3.1.	Preparação das amostras	116
3.2.3.1.1.	Cortadora Metalográfica (<i>Cutt-Off</i>)	116
3.2.3.1.2.	Prensa Embutidora.....	117
3.2.3.1.3.	Lixadeira.....	118
3.2.3.1.4.	Politriz AutoMet 250	118
3.2.3.1.5.	Metalizador Quorum (Q150R ES).....	119
3.2.3.2.	Microscópio lupa estereoscópica.....	120
3.2.3.3.	Microscópio óptico.....	121
3.2.3.4.	Microscópio Eletrônico de Varredura (<i>MEV</i>) Espectroscopia por energia dispersiva (<i>EDS</i>)	121
3.2.4	Análise da composição química dos martelos.....	122
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	123
4.1	Desgaste dos martelos.....	123
4.1.1	Perfil do desgaste.....	123
4.1.2	Análise dimensional.....	125
4.1.3	Análise do desgaste específico dos martelos.....	128
4.1.4	ANOVA do desgaste específico dos martelos.....	131
4.1.5	Árvore de Classificação e Regressão - CART®.....	133
4.2	Composição química dos martelos.....	135
4.2.1	Análise comparativa dos materiais dos martelos	135
4.3	Análise da microdureza Vickers (HV0.2) dos martelos.....	136
4.4	Análise macroscópica dos defeitos de superfície dos martelos	138
4.4.1	Aço Hardox 500.....	138
4.4.2	Aço Ravur 450 (após o uso CB70).....	138
4.4.3	Aço Açoforja	139
4.4.4	Aço Ravur com cobertura Rockit 706 (antes do uso)	139

4.5	Análise microscópica dos martelos	140
4.5.1	Microestrutura do Aço Hardox 500	140
4.5.2	Microestrutura do Aço Ravur 450	141
4.5.3	Microestrutura do Aço Açoforja	142
4.5.4	Microestrutura do Aço Ravur com cobertura CB 70	142
4.5.5	Microestrutura do Aço Ravur com cobertura Rockit 706	143
4.6	Análise MEV e EDS dos martelos	144
4.6.1	MEV e EDS do Aço Hardox 500.....	144
4.6.2	MEV e EDS do Aço Açoforja	145
4.6.3	MEV e EDS do Aço Ravur com cobertura Rockit 706	146
4.6.4	MEV e EDS do Aço Ravur com cobertura CB70	147
5	CONCLUSÕES	148
	REFERÊNCIAS	150

1 INTRODUÇÃO

O desafio para aplicação tribológica nos aços para o ramo de moagem em metais e mineração está basicamente relacionado à durabilidade da peça durante o processo de moagem nas minerações e processamentos de minérios nas indústrias, por exemplo, a terraplanagem, em britadeiras, dentes escavadores, lâminas de escoamento, moagem de metais nas indústrias de reciclagem ao redor do mundo. Em vários componentes da máquina que operam em deslizamento relativo ou rolamento. Conseqüentemente, a perda de materiais e energia ocorre em componentes da máquina em diferentes níveis, se manifesta nas paralisações frequentes da produção e caro custo de manutenção gerando maior preço no produto.

O processo de trituração tem sido altamente usado para reduzir o tamanho e a mudança de forma das rochas desde a antiguidade. Graças à sua simplicidade e eficácia, trituradores são usados em setores-chave como a indústria alimentícia, indústria de cimento, mineração e reciclagem de metais. No entanto, o serviço contínuo de trituradores em condições severas de operação (velocidade, taxa de alimentação, consumo de energia) provocando desgaste prematuro. Além disso, este desgaste é amplamente encontrada no processo, sendo considerado como o principal causa. De fato, vários componentes do triturador sofrem de dano de desgaste em martelos no tipo moinho de martelo conforme a Figura 1 ou bola no tipo de moinho de bola conforme a Figura 2 (ASM Metals Handbook, 1992).

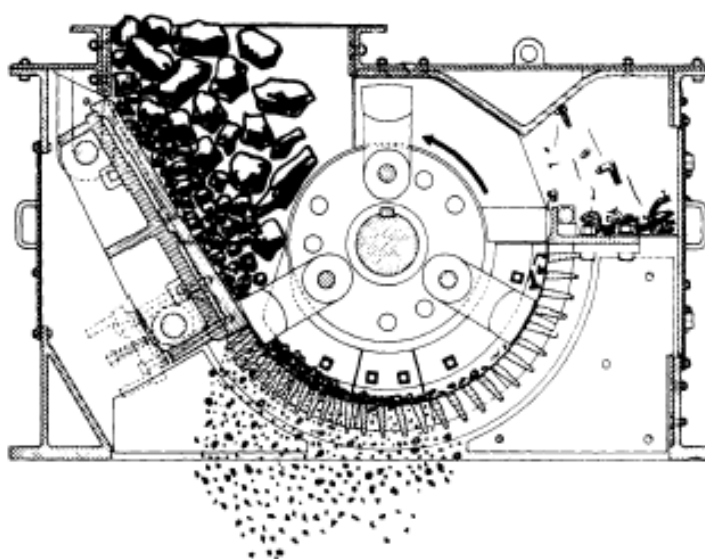


Figura 1 - Modelo e funcionamento do moinho de martelos
Fonte: ASM Metals Handbook (1992)

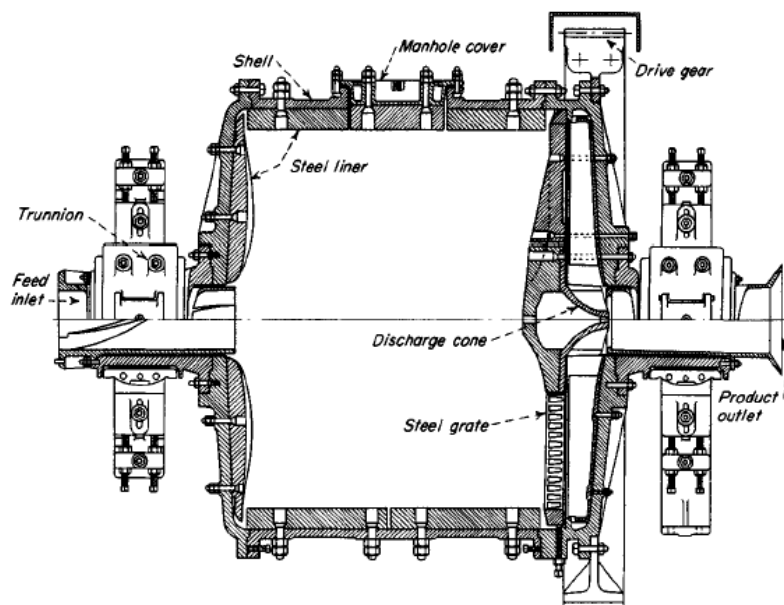


Figura 2 - Modelo e funcionamento do moinho de bola
Fonte: ASM Metals Handbook (1992)

Para a maioria das peças, os testes em larga escala no campo de trabalho geralmente são caros para serem desenvolvidos além de necessitarem de um bom tempo para serem completados. Aliado a isto tem-se problemas com a variação das condições climáticas, que mudam o curso dos testes. A fim de reduzir estes custos inconvenientes e acelerar o desenvolvimento de materiais mais resistentes ao desgaste em cada uma das aplicações existentes, é que os testes em laboratório vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo (DANIELI, 2021).

O desgaste de componentes em um moinho de martelo tem um custo elevadíssimo. Estima-se que o desgaste custe por ano de 6% a 7% do produto nacional total. A partir do momento que se notou a importância do desenvolvimento de materiais com maiores resistências ao desgaste, começaram a ser feitas várias pesquisas na área de desgaste no geral.

Além do aspecto relacionado à confiabilidade, faz-se necessário nas minerações e reciclagem atentar-se a outros dois aspectos relevantes e muito requeridos, que são a qualidade e o custo do produto. Relacionado à qualidade tem uma série de requisitos desde teste em laboratório para comprovação da composição química e metalografia dos componentes do produto, dimensional dos componentes e produto final. Para o aspecto custo, é muito importante em avaliar o material, definir os principais fornecedores e qualificá-los. Após a avaliação geral do time técnico e

comercial, o time comercial emite solicitação da cotação para o fornecedor, quanto ao ganho em custo do produto para um contrato anual onde ambas as partes passam a ter um ganho no projeto em aumentar a vida útil e aumentando a performance do equipamento.

Observando esse cenário desafiador, onde a cobrança por aumento de conteúdo reciclado no alumínio, confiabilidade, qualidade e custo é requerida por todo o meio deste mercado, cada vez mais se busca materiais com alta performance que podem ser usados principalmente em aplicações estruturais substituindo produtos fundido ou laminado de ferro ou aço e em aplicações tribológicas onde ocorre o principal processo neste funcionamento.

A procura por materiais com alta performance permite a redução de massa, redução de custo do ferramental, sem onerar a empresa, isto é, melhorando ainda mais o custo operacional da área fabril.

1.1.1 Objetivo Geral

Um planejamento experimental aplicado ao moinho de martelos inserido em uma linha de reciclagem localizado na da Novelis do Brasil Ltda na cidade de Pindamonhangaba-São Paulo, a um teste tribológico com intuito de desenvolver um material com alta resistência a abrasão e entender o fenômeno deste desgaste no processamento (Figura 3).



Figura 3 - Moinho de Martelos para o processamento de latas de alumínio
Fonte: Danieli (2021)

1.1.2 Objetivos Específicos

Os parâmetros de processo como composição química, dureza, processo de endurecimento e fabricação dos martelos conforme a Figura 4 são os elementos chaves para garantir uma para um bom GU e performance na linha de reciclagem no moinho de martelos. Portanto se faz necessário testar novas tecnologias em fabricação de martelos e comparar seus efeitos.

Análise fatores significativos em cada variável de saída e a definição do melhor processo de fabricação que possa atender o processo de reciclagem de *UBC*.

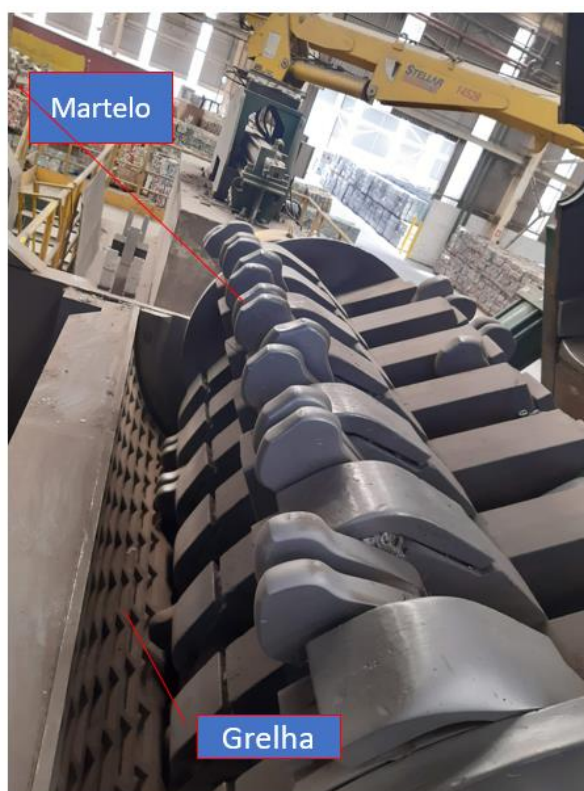


Figura 4 - Localização do martelo dentro do moinho de martelos
Fonte: Próprio autor, 2021

1.2 Justificativa

Devido a busca cada vez mais incessante em redução do custo operacional e aumento de produtividade, faz-se necessário em estudar os fenômenos de desgastes e falhas sistêmicas para prevenção e possível predição dessa falha para que as empresas desenvolvem seus projetos de forma sistêmica e assertiva. E com esta visão, faz-se necessário também a investigação e caracterização de quais são os componentes que sofrem um maior desgaste e quais fatores influênciam na aceleração

desse processo, sendo assim possível a mitigação desse comportamento que tende em resultar numa maior confiabilidade do produto ou até na predição dessa falha, fazendo assim com que em cada revisão periódica do equipamento seja possível verificar a funcionalidade da peça.

Ao longo dos últimos anos após a crise energética em 2008 conforme a Figura 5, muitas empresas produtoras de alumínio primário no Brasil fecharam suas portas e passando a importar alumínio primário de vários países (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2019).

**Consumo médio específico de energia elétrica
na produção mundial de alumínio primário**
*Specific average power consumption
in world primary aluminum production*

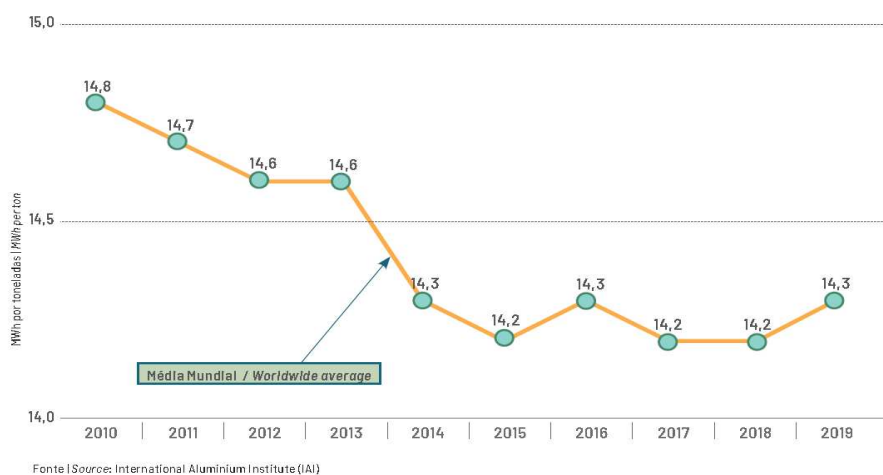


Figura 5 - Consumo médio de energia para produção do alumínio primário
Fonte: International Aluminium Institute (2019)

Sendo assim o mercado de reciclagem de latas passa a ser o principal foco na indústria do alumínio no Brasil conforme a Figura 6 crescendo a cada ano, sendo nos últimos 17 anos o país com maior índice de reciclagem de latas no mundo (ABAL, 2020).

Reciclagem de alumínio Aluminum recycling

Índice de reciclagem de latas de alumínio Aluminum can recycling index



Fontes | Sources:
 ABAL; Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio - Abralatas;
 The Japan Aluminum Can Recycling Association, The Aluminum Association; European Aluminium.

Figura 6 - Índice de Reciclagem de Latas
 Fonte: ABAL (2020)

Então a partir deste novo cenário, os equipamentos da linha de reciclagem de *UBC* passam a exigir sua capacidade máxima de engenharia, em consequência desgastes em seus trituradores. Em 2020 com aumento da demanda de ferro no mundo o preço do minério de ferro dobrou em relação ao ano anterior conforme a Figuras 7 e 8 (BLOOMBERG, 2021; VALOR ECONÔMICO, 2020), fazendo que os fornecedores que fornecem os martelos para aplicação da trituração do *UBC* aumentem dos martelos seus preços para Novelis do Brasil Ltda. Sendo assim, conforme Tabela 1 (PRÓPRIO AUTOR, 2020).

Preço do Minério de Ferro

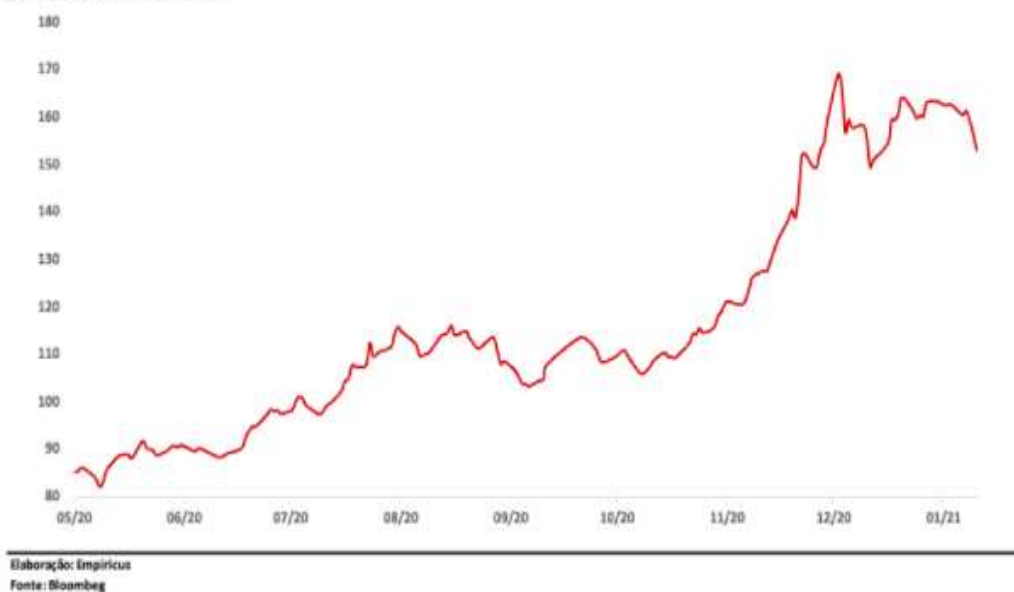


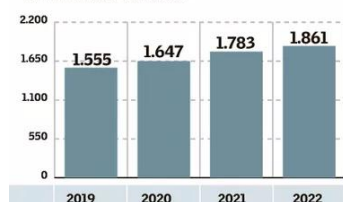
Figura 7 - Aumento do preço do minério de ferro
Fonte: Bloomberg (2021)

Peso da China

Crescimento de consumo da China vai pressionar cotações

■ Mercado total

Em milhões de toneladas



■ Importadores

	2019	2020	2021	2022
China	1.071	1.209	1.343	1.421
União Européia*	137	128	125	125
Japão	120	96	101	100
Coreia do Sul	74	69	74	75

■ Exportadores

Austrália	836	876	896	923
Brasil	336	269	281	301

■ Minério de ferro* 62% - Spot

Dia a dia, em US\$/tonelada



■ Minério de ferro* 62% - Spot

Média anual, em US\$/tonelada



Fontes: Argus e Metal Bulletin. Elaboração: Valor Data. * No porto de Qingdao. ** até o dia 21/dez

Figura 8 - Crescimento de consumo de ferro na China impactando o preço do minério de ferro no mundo

Fonte: Valor econômico (2020)

Tabela 1 – Estimativa do custo anual de martelos e grelhas do moinho de martelos

FY	FY20											
Área	(Tudo)											
Soma de Total	Rótulos de Coluna											
Rótulos de Linha	11046274	Grelha Rec2	11024173	Martelos Rec1	11040786	Martelos Rec2	11023719	Grelha Rec1	11040785	Debaler	Total Geral	
abr	R\$	101.700,00	R\$	21.392,00	R\$	57.624,00	R\$	92.000,00	R\$	232.200,00	R\$	504.916,00
mai	R\$	25.425,00			R\$	172.872,00	R\$	23.000,00			R\$	221.297,00
jun			R\$	21.392,00	R\$	57.624,00	R\$	46.000,00			R\$	125.016,00
jul	R\$	58.986,00	R\$	24.814,72	R\$	174.271,44	R\$	106.720,00	R\$	241.488,00	R\$	606.280,16
ago	R\$	58.986,00	R\$	24.814,72	R\$	133.687,68	R\$	53.360,00			R\$	270.848,40
set	R\$	58.986,00	R\$	24.814,72	R\$	133.687,68	R\$	26.680,00			R\$	244.168,40
out	R\$	88.479,00			R\$	267.375,36	R\$	80.040,00			R\$	435.894,36
nov	R\$	29.493,00	R\$	49.629,44			R\$	80.040,00	R\$	250.776,00	R\$	409.938,44
dez	R\$	58.986,00			R\$	133.687,68					R\$	192.673,68
jan	R\$	58.986,00	R\$	24.814,72	R\$	133.687,68	R\$	53.360,00			R\$	270.848,40
fev	R\$	29.493,00	R\$	24.814,72	R\$	66.843,84	R\$	53.360,00			R\$	174.511,56
mar	R\$	88.479,00			R\$	200.531,52	R\$	26.680,00	R\$	241.488,00	R\$	557.178,52
Total Geral	R\$	657.999,00	R\$	216.487,04	R\$	1.531.892,88	R\$	641.240,00	R\$	965.952,00	R\$	4.013.570,92

Fonte: Próprio autor (2020)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fabricação de alumínio no mundo

A Novelis é o principal produtor de produtos de laminados de alumínio e a maior empresa de reciclagem de alumínio do mundo. Tem uma rede integrada de instalações de laminagem na América do Norte, América do Sul, Europa e Ásia. A Novelis fornece folha de alumínio premium e produtos de folha para os mercados do transporte, embalagem, construção, industrial e de eletrônica de consumo. A sua base de clientes inclui marcas icônicas como a Coca-Cola, *AB Inbev*, *Ford Motor Company*, *Jaguar Land Rover* e *Samsung*. A sustentabilidade é o núcleo do negócio da Novelis.

Como a maior recicladora de alumínio e maior produtora de alumínio plano laminado do mundo, a usufruindo das propriedades únicas do alumínio para oferecer soluções sustentáveis a nossos clientes, mantendo um alto nível de insumos metálicos reciclados em nosso portfólio de produtos. Este é um diferencial competitivo e um componente-chave de nossa estratégia de sustentabilidade.

Nosso modelo de fabricação não apenas reduz a energia, a água, o desgaste dos aterros e as emissões de gases do efeito estufa associados às operações, mas também reduz o impacto de carbono dos produtos feitos como o nosso alumínio.

É reciclado mais de 74 bilhões de latas de bebidas a cada ano, transformando-as em novas latas de bebidas em apenas 60 dias, em média. Também criamos o primeiro, e maior, sistema de reciclagem automotiva em circuito fechado do mundo. O sistema de circuito fechado recicla a sucata de alumínio decorrente do processo de fabricação automotiva. A reciclagem em circuito fechado nos permite recuperar o máximo possível de sucata de alumínio de nossos clientes, transformando-a diretamente no mesmo produto novamente. O fechamento do circuito preserva o valor da liga, reduz os custos de reciclagem e transporte, minimiza o impacto ambiental e estabelece uma cadeia de abastecimento segura.

Este processo requer apenas 5% da energia e emite somente 5% dos gases de efeito estufa em comparação ao uso de alumínio primário, ajudando a Novelis e seus clientes a caminharem no sentido de zerar a quantidade de resíduos enviados a aterros sanitários e a uma maior redução de carbono.

2.1.1 O Alumínio e suas propriedades

O alumínio tem o peso específico de $2,7 \text{ g/cm}^3$ a 20°C ; seu ponto de fusão corresponde a 660°C e o módulo de elasticidade é de 6.336 Kgf/mm^2 , conforme apresentado na Figura 9. O alumínio também apresenta boa condutividade elétrica (62% da em relação ao cobre); e não é magnético, apresenta baixo coeficiente de emissão térmica e em altas temperaturas não muda sua cor (Adaptado ALCAN, 1996).

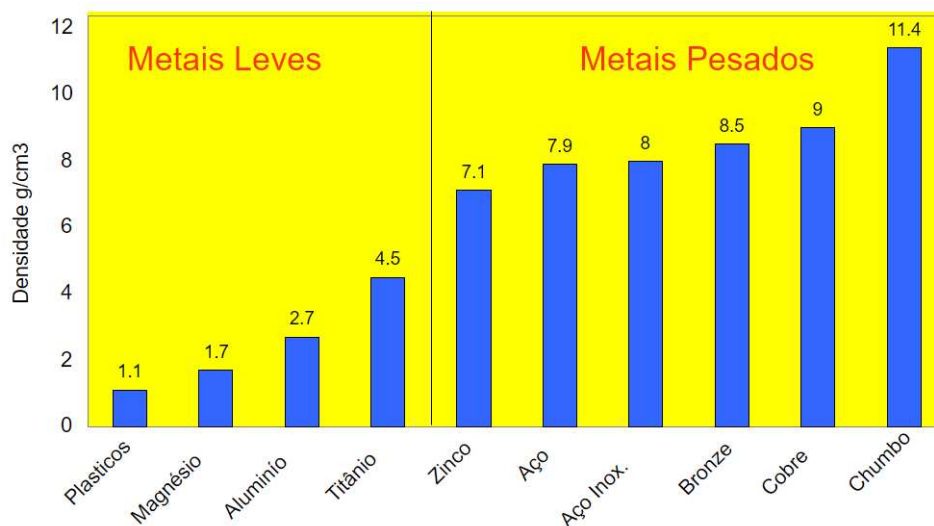


Figura 9 - Densidade dos materiais
Fonte: Adaptado ALCAN (1996)

Essas características, além da abundância do seu minério principalmente, vêm tornando o alumínio o mais importante no mercado metalúrgico. O baixo peso específico, torna-o de grande utilidade em equipamento de transporte, ferroviário, rodoviário, aéreo, naval e bens de consumo, e na indústria mecânica, numa grande variedade de aplicações. O baixo ponto de fusão conforme a Figura 10, aliado a um elevado ponto de ebulição (cerca de 2.000°C) e a uma grande estabilidade e qualquer temperatura, torna a fusão e a soldagem do alumínio muito fáceis. A condutividade térmica, inferior somente às da prata, cobre e ouro, o torna adequado para aplicações em equipamentos destinados a permutar calor. Sua alta condutibilidade elétrica e ausência de magnetismo, o tornam recomendável em aplicações na indústria elétrica, principalmente em cabos condutores. O baixo fator de emissão o torna aplicável como isolante térmico. Entretanto, a resistência mecânica é baixa, pois no estado puro (99.99% de alumínio), o seu valor gira em torno de 5 a 6 Kgf/mm^2 , e no estado encruado (laminação à frio com redução de 75%) sobe para cerca de 11.5 Kgf/mm^2 . É muito dúctil, apresentando alongamento de 60% a 70%.

Alumínio puro apresenta boa resistência a corrosão, devido à estabilidade do seu principal óxido que se forma na superfície do metal. Essa resistência à corrosão, é melhorada por anodização, a qual melhora sua aparência, tornando-o adequado para aplicações decorativas (ALUMINUM ASSOCIATION, 2000).

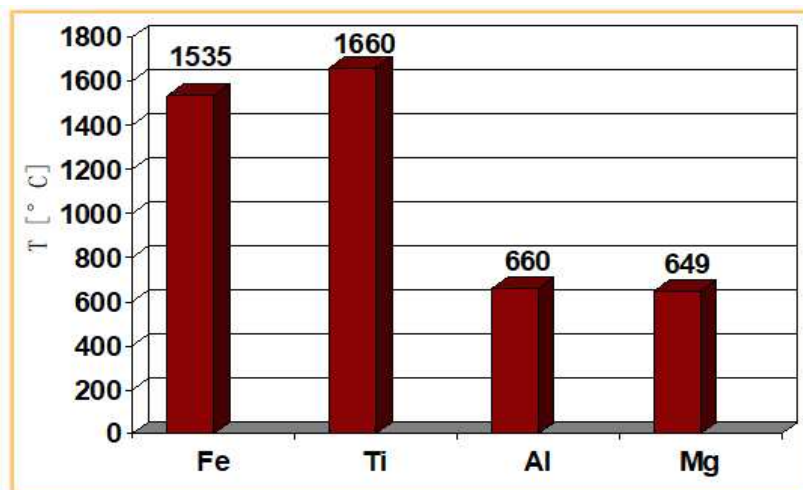


Figura 10 - Temperatura de fusão dos metais
Fonte: Aluminum Association (2000)

2.1.2 Processo de obtenção e fusão do alumínio

O alumínio não se apresenta na natureza no estado metálico. Em contrapartida, na forma de distintos compostos, entra na composição da crosta terrestre com a importante proporção de 8%, de modo que sob este aspecto, somente é ultrapassado pelo silício com 26,5% aproximadamente. Portanto, é o Metal útil que se apresenta em maior abundância. Depois do alumínio vem o ferro, com aproximadamente 5%. Da enorme série de materiais que contém alumínio, somente um pequeno número deles resulta em um interessante ponto de vista econômico.

Os materiais mais importantes, sob aspecto técnico, são as bauxitas. Este minério contém geralmente, em quantidades aptas para obtenção do alumínio com 62% a 65% de alumina (Al_2O_3). Para obtenção da alumina purificada é utilizado um processo que sinteticamente consiste em moer a bauxita bruta em grandes pedras, seguindo de processar estas pedras em um forno rotativo, não só para facilitar a desidratação e posterior moagem fina, como também para destruir a matéria orgânica. A moagem fina subsequente, tem lugar em moinho de bolas. A bauxita assim preparada, é colocada em um misturador e passa por sucessivas operações de lixiviação, isto é, operação química que por meio de lavagem adequada

separa de certas substâncias os sais nelas contidas. Obtém-se assim a alumina hidratada que para pode ser empregada na eletrólise, precisa ser liberada da água de hidratação, mediante a calcinação em fornos rotativos, conforme a Figura 11 (ABAL, 2000).

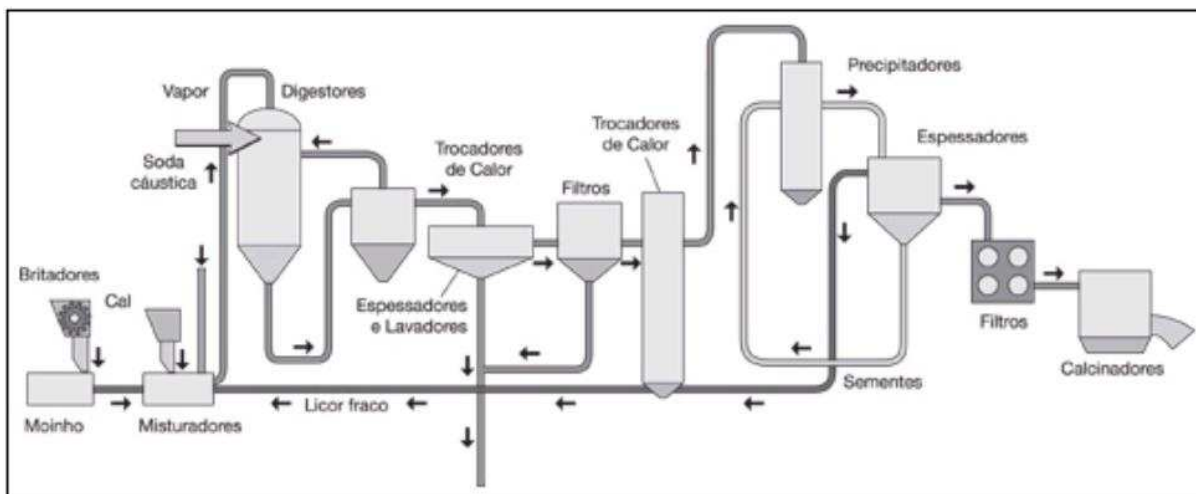


Figura 11 – Processo Bayer, transformação da bauxita em alumina (Al_2O_3)
Fonte: Abal (2000)

Essa alumina desidratada vai a redução por via eletrolítica. Para isso, se dissolve a alumina em um banho de sais fundidos, constituído essencialmente por criolita (flúor titanato de potássio). Essa dissolução se eletrolisa nos chamados fornos de eletrólise, onde a corrente elétrica mantém constantemente o banho em fusão, e o alumínio separado se precipita no fundo da cuba do forno, onde depois com um processo de sucção, este alumínio líquido é removido do fundo da cuba, conforme as Figuras 12 e 13 (ALUMINUM ASSOCIATION, 2000).

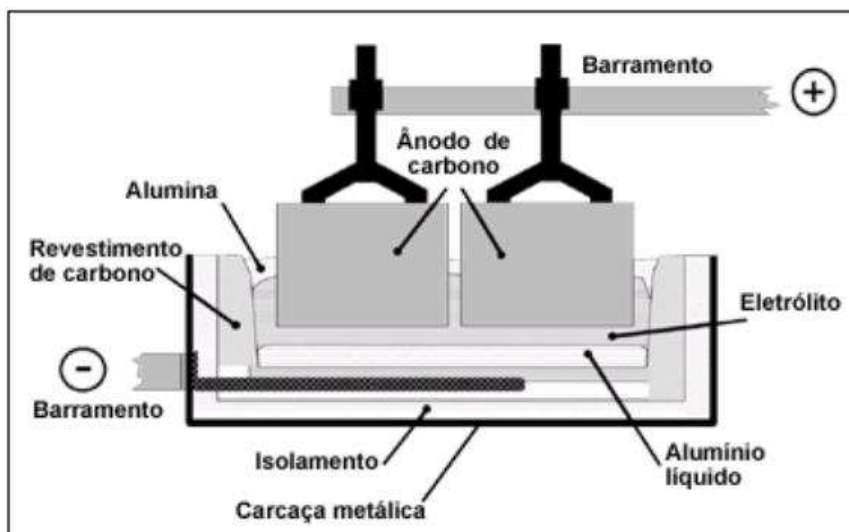


Figura 12 - Processo Hall – Héroult
 Fonte: Aluminum Association (2000)



Figura 13 - Fornos de redução de alumina para obtenção do alumínio primário
 Fonte: Aluminum Association (2000)

As ligas de alumínio trabalháveis são obtidas por refusão de alumínio primário, ante ligas e metais puros em fornos de fusão e fornos de espera conforme o fluxograma na Figura 14 (EUROPEAN ALUMINUM ASSOCIATION, 2002).

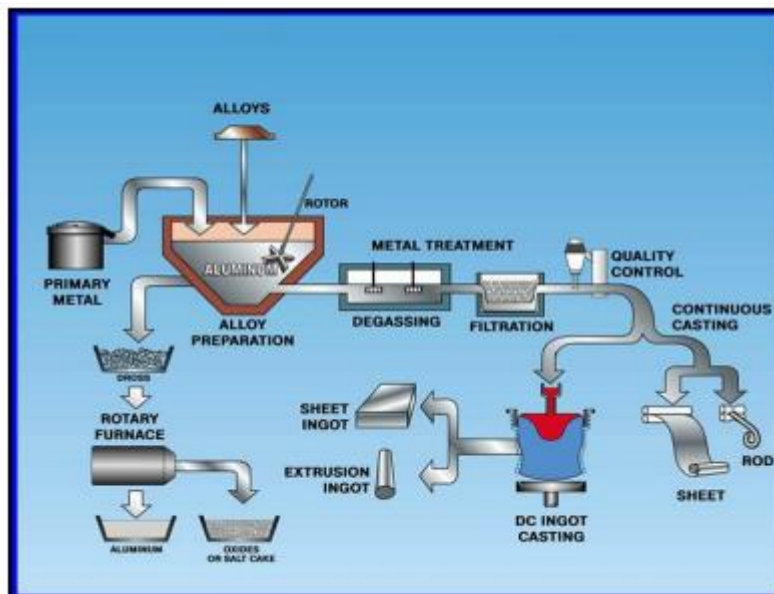


Figura 14 - Fluxograma geral de uma linha de produção de Refusão de placas de alumínio
 Fonte: European Aluminum Association (2002)

O forno de fusão da Figura 15, é encarregado de transferir energia calorífica para o alumínio colocado em seu interior (sólido ou líquido) de forma a se obter um banho de alumínio líquido a quantidade e composição desejada para produção de placas. O forno de fusão é carregado pela parte superior móvel com materiais sólidos através de uma caçamba e/ou alumínio líquido através de um cadinho refratário. Após a colocação da carga em seu interior a parte superior do forno (abóboda) é fechada e a partir desde momento torna-se possível o aquecimento da carga através de 4 até 6 bicos de queimadores posicionados nas laterais do forno (conforme a capacidade e dimensão) onde estes queimadores realizam a combustão do gás natural. Para o escape dos gases resultantes da queima do óleo existe uma tubulação de exaustão, onde estão instaladas válvulas para controle da pressão interna do forno e equipamentos de recuperação de calor. Nas laterais do forno existem vigias para inspeção visual do interior da câmara e para manipulação do metal do interior do forno (remoção de escória, correção da composição química e homogeneização). A temperatura interna da câmara é medida através de termopares no metal, termopares na parte superior do forno e na tubulação de saída de gases (GAUTSHI, 2020).



Figura 15 – Forno de Refusão (*top charge*)
Fonte: Gautshi (2020)

A transferência de calor e processa preferencialmente por convecção na fase sólida do alumínio e principalmente por radiação (transferência de calor da abóboda para o metal) e condução na fase líquida (transferência de calor da chama dos queimadores). Após do interior do forno ter se tornado líquido e atingido a temperatura adequada são inseridas quantidades pequenas de outros metais para obter a liga desejada para placa final conforme a Tabela 2, este procedimento denomina-se correção de ligas. A transferência para o forno de espera é efetuada através de uma abertura na parede lateral do forno, isto é, bica de transferência, onde todo metal líquido é transferido por uma calha refratária que liga ambos os fornos, quando o forno de fusão atingiu a temperatura e composição química desejada (REVISTA FERRAMENTAL, 2019).

Tabela 2 - Ligas de alumínio e composição química predominante

Série	Elemento de Liga	Faixa Típica (%)	Outros Elementos	Mecanismo de Endurecimento	LR (MPa ¹⁰)
1xxx	-	-	-	-	50-160
2xxx	Cu	2 – 6	Si, Mg	Trat. Térmico (*)	300-480
3xxx	Mn	0,5 – 1,5	Mg, Cu	Trabalho a Frio	100-240
4xxx	Si	0,8 – 1,7	-	Trat. Térmico (*)	150-400
5xxx	Mg	0,5 – 1,5	Mn, Cr	Trabalho a Frio	100-340
6xxx	Mg-Si	Mg = 0,5-1,5 Si = 0,5-1,5	Cu, Cr	Trat. Térmico (*)	200-320
7XXX	Zn-Mg	Zn = 5- 8 Mg = 1- 3	Cu = 1-2	Trat. Térmico (*)	c/Cu = 430-600 s/Cu = 320-350
8xxx	Fe-Si	Fe = 0,6-2,0 Si = 0,3-1,0	-	Trabalho a Frio	130-190

Nota: (*) solubilização¹¹ + têmpera + envelhecimento (natural ou artificial)

Fonte: Revista Ferramental (2019)

O forno de espera tem a tarefa de remover as impurezas e armazenar temporariamente o metal líquido, até o momento de vazá-lo para máquina de produção de placas. Este forno é dotado de único queimador encarregado de manter a temperatura de metal adequada, através de um termopar inserido no metal líquido e outro no teto do forno (INSERTEC, 2020).



Figura 16 - Forno de espera (*Holder*) fabricado pela empresa Insertec
Fonte: Insertec (2020)

Após a toda transferência do metal líquido ao forno de espera automaticamente pela automação da linha, é acionado um rotor de grafite (RFI) no qual é inserido sais de potássio e magnésio com objetivo de purificar (fluxação) o metal líquido e ao final deste processo toda impureza (escória) fica sobrenadante no metal líquido sendo removido com auxílio de uma empilhadeira, ficando em espera para decantação das impurezas pesadas, conforme a Figura 17. O forno de espera possui uma abertura lateral para onde recebe o metal líquido do forno de fusão e outra abertura frontal por onde o metal líquido é transferido ou vazado para máquina de D.C. (*direct chill*), denominado basculamento. Forno de espera não possui abóbodas as tampas superiores, apenas janela de inspeção e portas laterais para manipulação (GAUTCHI, 2021; INSERTEC, 2020).



Figura 17 – Fluxação e escumagem no forno de espera
Fonte: Gautchi (2021) e Insertec (2020)

A máquina de *Direct Chill* (D.C.) tem a função de receber o metal líquido do forno de espera e transformá-lo em placas sólidas para laminação a quente e posteriormente a frio. Esta tecnologia é também chamado de vazamento de placas, devendo ser feito a uma temperatura e velocidade do metal líquido específicas, para cada tipo de liga e placa que se deseja obter. Durante a transferência do metal do forno de espera para o *D.C.*, existem orifícios na parte inferior da calha fluindo para os moldes, possuem em sua parte inferior um suporte de placas (*platen*) que desce a medida em que o metal flui pela parte superior, conforme descrito na Figura 18 (PRECIMETER, 2021).

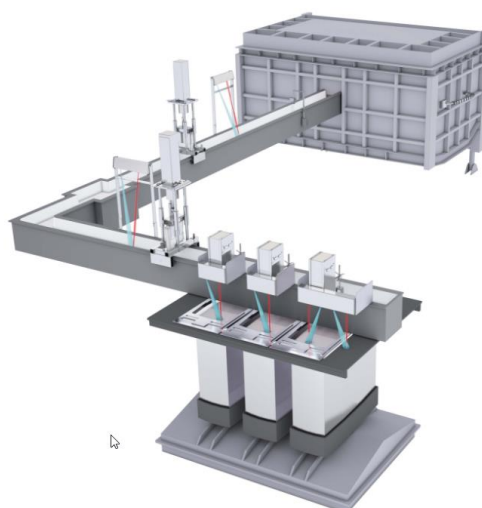


Figura 18 – Projeto da linha de produção de placas (*Direct Chill*)
Fonte: Precimeter (2021)

A medida em que o metal líquido vai entrando pelo orifício superior do molde (*dip tube*), um pouco mais baixo deste molde (*mold* ou *primary cooling*), é injetado água fria (*water jet*) sobre a superfície do metal. Quando o metal é atingido pelo jato de água já existe uma pequena crosta sólida formada sobre o interior líquido, crosta que vai aumentando a medida que a placa vai descendo (*sump* ou *liquid zone*) sendo esfriada pelo jato de água, acompanhando o *platen*. Nesta máquina são os principais fatores determinantes das características físicas da placa (*solid ingot*): temperatura do metal líquido, velocidade de descida do *platen*, vazão de água e controle do nível de metal, conforme a Figura 19 (NOVELIS PAE, 2019).

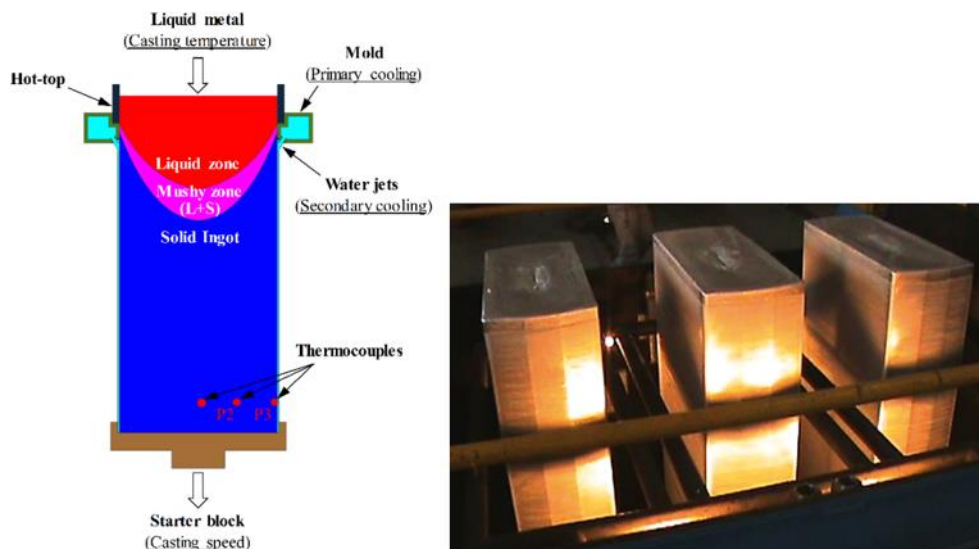


Figura 19 - Visão esquemática durante o vazamento de placas
 Fonte: Novelis PAE (2019)

2.2 Processo de laminação do alumínio

2.2.1 Laminação a quente e frio do alumínio

É um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal na placa produzida pela refusão, através da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. Tal secção transversal é retangular e refere-se a produtos planos de alumínio, ou seja, chapas planas ou bobinadas, folhas e discos. Esses semimanufaturados têm diversas aplicações em setores como transportes (carrocerias para ônibus, equipamentos rodoviários, elementos estruturais etc.), construção civil (telhas, fachadas, calhas, rufos etc.), embalagens (latas, descartáveis e flexíveis) e bens de consumo (painéis, utensílios domésticos etc.).

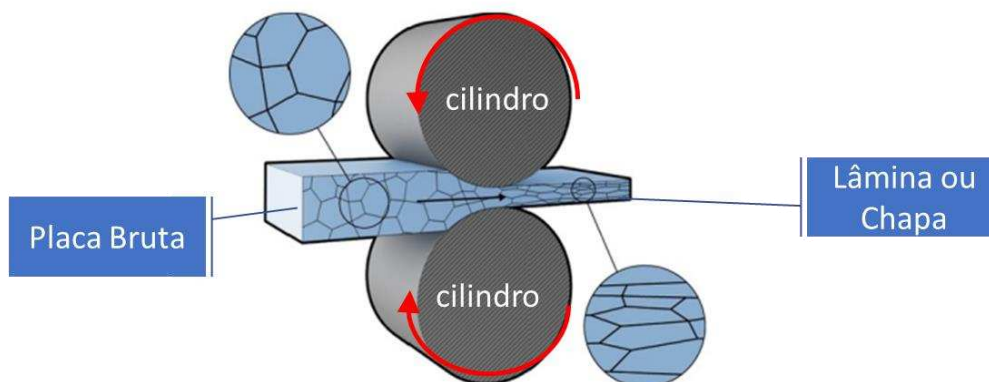


Figura 20 - Conceito de um laminador universal
 Fonte: Próprio autor (2021)

Existem dois processos básicos de laminação de alumínio: a laminação à quente e laminação a frio. A laminação a quente é o processo em que se consegue grandes reduções da seção transversal com o metal a uma temperatura mínima, igual à temperatura de recristalização do alumínio (aproximadamente 350°C); a ductilidade do metal a temperatura desta ordem é máxima e ocorre recristalização dinâmica na deformação plástica. A matéria-prima inicial para tal processo é uma placa produzida na refusão, em molde com secção transversal retangular atingindo, atualmente, espessuras da ordem de 600 mm, larguras de até 3.000 mm e comprimentos de até 10.000 mm já mencionado no item 2.2 (PERCON, 2020).



Figura 21 - Laminador a quente
Fonte: Percon (2020)

A laminação a quente se processa em laminadores reversíveis duos (dois cilindros) ou quadruos (dois cilindros de trabalho e dois cilindros de apoio ou encosto) conforme a Figura 22. O material laminado é deslocado, a cada passada, por entre os cilindros, sendo que a abertura deles define a espessura do passe. A redução da espessura por passe é de aproximadamente 50% e depende da dureza do material que está sendo laminado. No último passe de laminação, quando o material se apresenta com espessura entre 3 e 10 mm, o material é enrolado para constituir um rolo ou bobina que será a matéria prima para o processo de laminação a frio (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

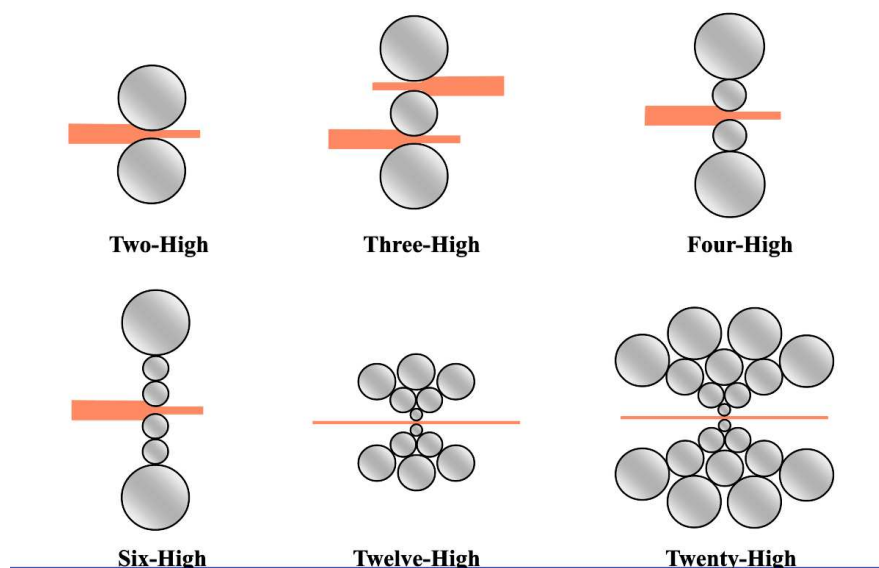


Figura 22 - Tipos de laminadores
Fonte: ASM Metals Handbook (1992)

Concepções mais modernas de processo de laminação a quente podem apresentar em linha, após o desbastamento em um laminador reversível, uma cadeia de vários laminadores, denominado *Tanden Mill*, que podem levar o material a espessuras da ordem de 3 mm sendo, ainda, um produto laminado à quente.

Uma unidade de laminação a quente (Figura 23) consiste não só do laminador, mas também, de uma bateria de fornos para o pré aquecimento de placas, bem como tratamento térmicos de homogeneização (distribuição mais homogênea de elementos/microconstituintes químico-metalúrgicos), tesouras rotativas e guilhotinas para cortes laterais e longitudinais do material laminado, bem como serras para cortes das extremidades e faceadeira para usinagem das superfícies maiores da placa, eliminando-se a camada de óxido de alumínio e o primeiro metal solidificado gerado na produção placa na refusão (ABAL, 2005).

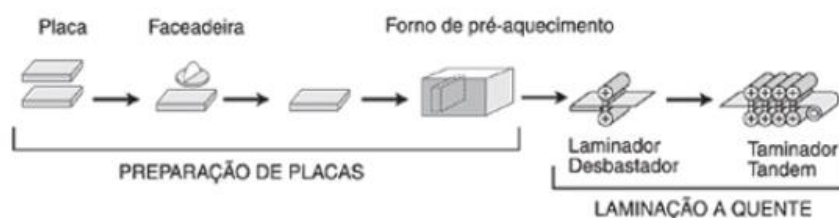


Figura 23 - Fluxo de processo da laminação a quente de alumínio
Fonte: Abal (2005)

A laminação a frio é o processo realizado a temperaturas bem inferiores aquela de recristalização do alumínio. A matéria-prima é aquela oriunda da laminação a quente, ou seja, bobinas com espessuras que podem variar de 3 a 10 mm. A laminação é executada, geralmente, em laminadores quadro, reversíveis ou não, sendo o último mais empregado, devido a produtividade. O número de passes depende da espessura inicial da matéria-prima da espessura final, da liga e da têmpera do produto desejado. Esses equipamentos estão dimensionados para reduções de secções de 30 a 70% por passe, dependendo, também das características do material em questão. Na laminação a frio utilizam-se dois recursos: tensões avante e a ré, que aliviam o esforço de compressão exercido pelos cilindros ou aumentam a capacidade de redução por passe, conforme mostra a Figura 24 (ADAPTADO LIGHT METALS, 2010).

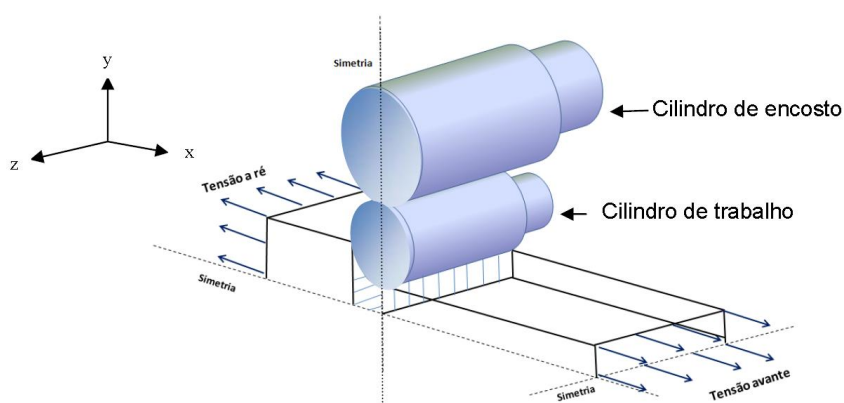


Figura 24 - Modelo de 3D das tensões durante a laminação a frio
Fonte: Adaptado Light Metals (2010)

Esse recurso é quase que responsável pela redução da espessura no caso de laminação de folhas finas, onde, praticamente, os cilindros estão em contato sem abertura perceptível. A deformação a frio confere encruamento ao alumínio, ou seja, aumento dos limites de resistência e de escoamento com diminuição do alongamento. Recozimento intermediários podem ser realizados para o amolecimento e para facilitar posterior laminação ou determinar têmperas específicas. Laminadores mais sofisticados possuem sistemas computadorizados de controle de espessura e de planicidade, conforme mostra a Figura 25 (SMS GROUP, 2019).

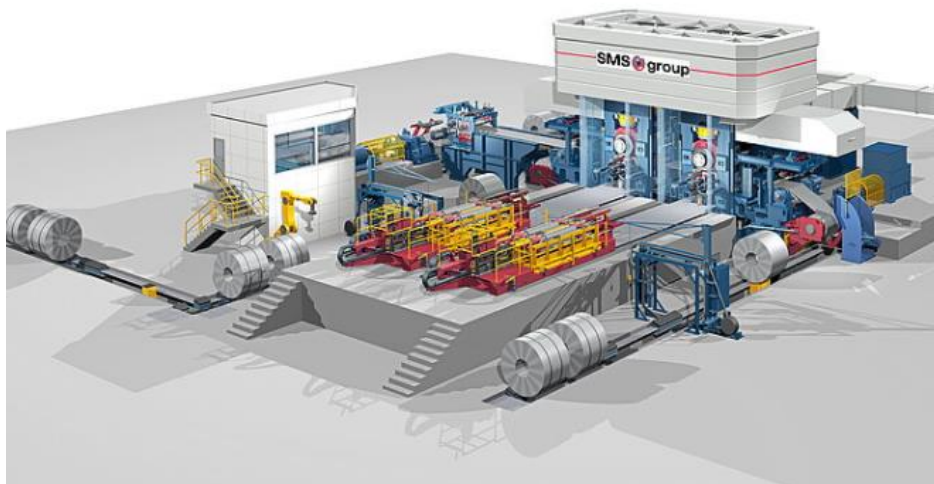


Figura 25 - Laminador a frio com alto nível de automação
Fonte: SMS Group (2019)

Como resumo da Figura 26, mostra todo processo de fabricação das bobinas, antes do envio para produção das latas de alumínio (ALCAN, 2005).

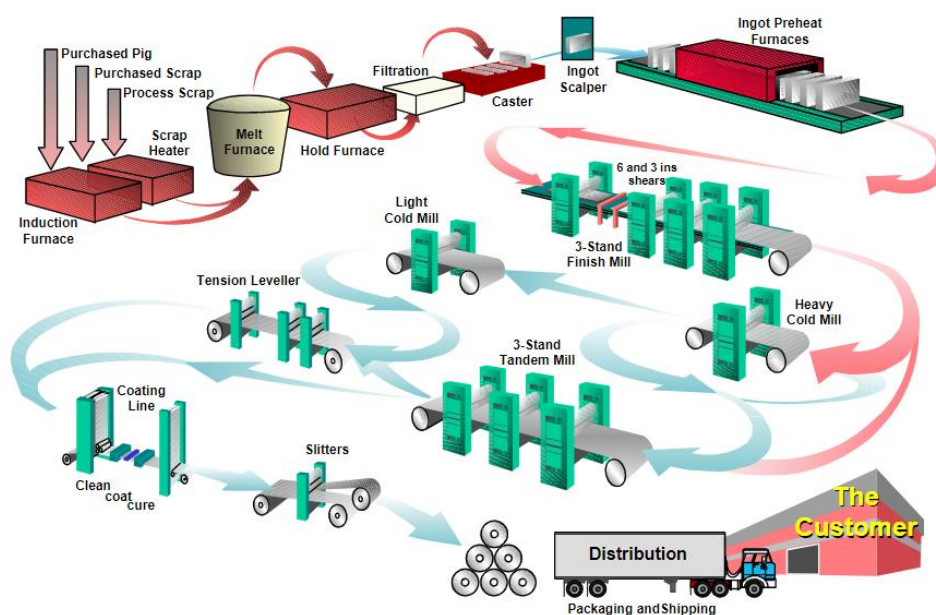


Figura 26 - Fluxo de processos de uma fábrica de laminação de alumínio
Fonte: Alcan (2005)

2.2.2 Processo de fabricação de latas de alumínio

Processo de fabricação de uma lata de alumínio começa a partir do momento que uma bobina de alumínio chega a fábrica, também conhecido como *Can Makers*,

pesando entre 9 à 16 toneladas, largura média de 1,6 metros, 12 Km de comprimento e uma espessura de 0,3 mm.

As latas de alumínio são tão leves que é difícil acreditar que como uma bobina pode produzir em torno de 1,5 milhão de latas e todo retalho gerado no processo retorna ao processo de reciclagem, conforme mostra a Figura 27 (ALCAN, 2005).

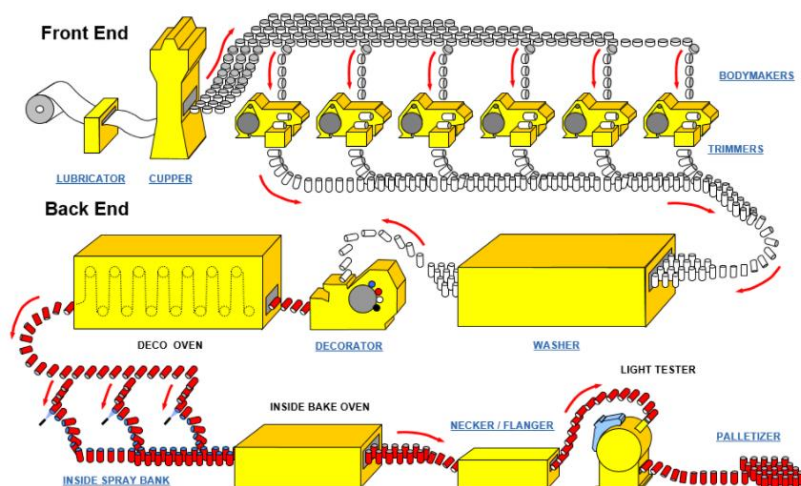


Figura 27 - Fluxograma de uma fábrica de latas de alumínio
Fonte: Alcan (2005)

O processo se inicia com a bobina posicionada no tombador e desenrolador bobinas, conforme as Figuras 28 e 29, para que o metal possa engatar a chapa ao *lubricator*, processo onde é aplicado um óleo lubrificante na superfície da chapa para conformação do metal (RM3 FILMES, 2014).



Figura 28 - Tombador de bobinas
Fonte: RM3 filmes (2014)



Figura 29 – Desenrolador de bobinas.
Fonte: R3 filmes (2014)

Após este processo de lubrificação a chapa é cortada por um *blank* na prensa de estampagem em dois estágios, isto é o corte circular e conformador na *cupper*, ganhando o formato de copo, conforme a Figura 30 (ADAPTAÇÃO NOVELIS DO BRASIL, 2017).

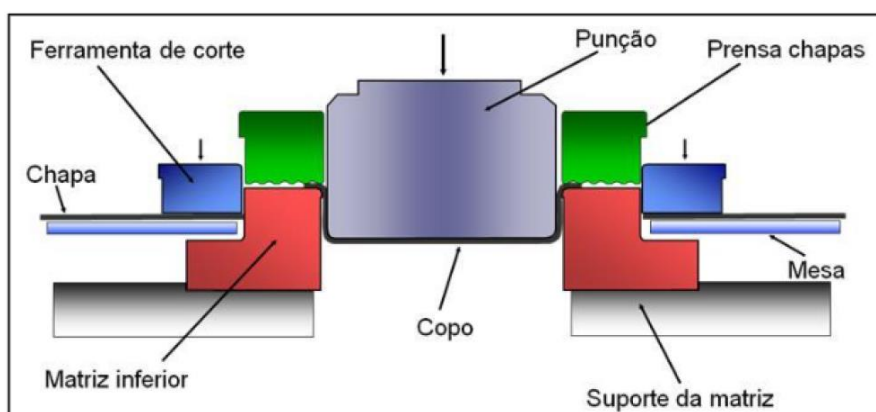


Figura 30 - Conformação do copo
Fonte: Adaptação Novelis do Brasil (2017)

Prosseguindo ao *bodymaker* (Figura 31), processo onde o copo é alongado e afinado através de pressão, punção na parte interna do copo atritando e conformando entre as matrizes, com taxas de redução de 20% até 40% em relação a espessura da chapa (ELLEUCH 2003), quanto o corpo da lata é formado borda é cortada pelo *trimmer*, para que todas as latas fiquem na mesma altura conforme a Figura 32, seguindo para *washer*, processo de lavagem com água e sabão e secagem para remoção do óleo dos processos anteriores (ADAPTAÇÃO NOVELIS DO BRASIL, 2017).

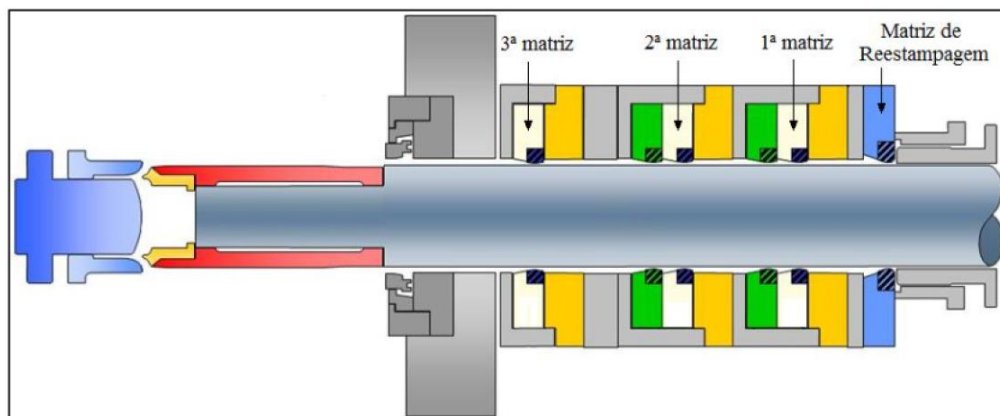


Figura 31 - Conjunto de matrizes da *bodymaker*
 Fonte: Adaptação Novelis do Brasil (2017)

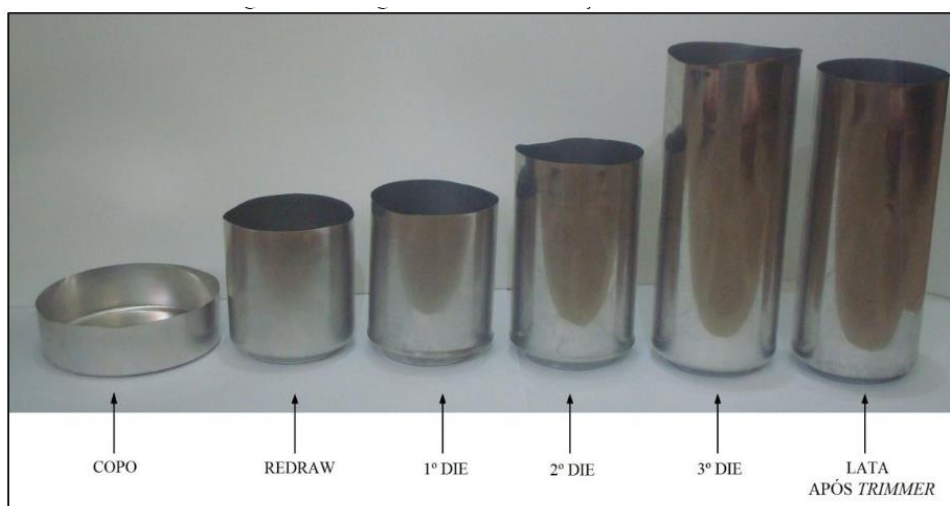


Figura 32 - Processo de alongamento da lata
 Fonte: Adaptação Novelis do Brasil (2017)

Na *decorator* ou *printer* as latas recebem o rótulo (2.000 latinhas por minuto) e na *deco oven* a tinta é secada, aplicando no interior da lata um verniz para proteger a lata e a bebida a ser envasada na *inside spray bank* e secada na *inside deco oven*. Com o corpo da lata pronto o próximo processo é *necker* para moldar o perfil da boca (ou pescoço) da lata (Figura 33), pronto para paletização na *palletizer*, processo totalmente automatizado (BELVAC, 2014 e STOLLE MACHINERY, 2020).



Figura 33 - Formação do perfil da boca da lata
Fonte: Belvac (2014)

Quanto ao processo da tampa da lata é mais simples em relação ao processo do corpo da lata, pois exige uma coformação menor no (Figuras 34 e 35) processamento de estampagem (ALCAN,1996).



Figura 34 - Formação (*shell*) e progressão da tampa (*conversion press*) da lata de alumínio
Fonte: Alcan (1996)

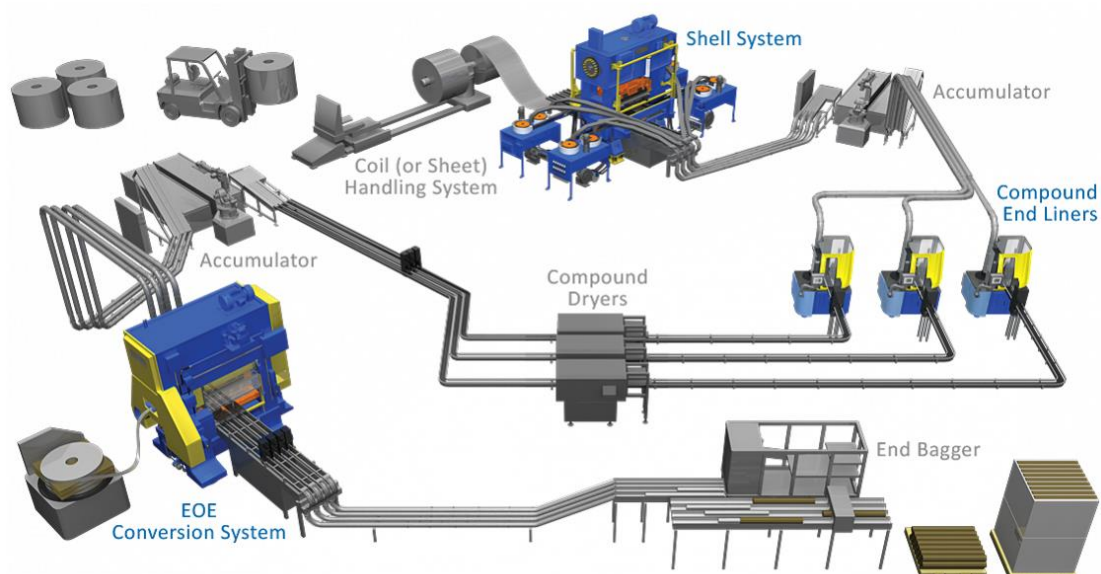


Figura 35 - Fluxograma de uma fábrica de tampa e anel de alumínio

Fonte: *Stolle Machinery* (2020)

Após o recebimento da bobina pintada com verniz colorido ou incolor, a bobina é tombada na *handling system* para o processamento na Shell e na conversora. Neste processo é aplicado uma cera para todo o processo de conformação.

2.2.2.1. Tipo de ligas nas latas de alumínio

O desejo da reciclagem da sucata metálica em 100% do retalho gerado na linha de produção de latas, produto 2x mais leve que o aço, tornou-se um sonho realizado nos últimos 20 anos, com alto poder econômico e geração de empregos tornando o alumínio líder no mercado de embalagem para bebidas conforme a Figura 36 (ALCAN,1996).

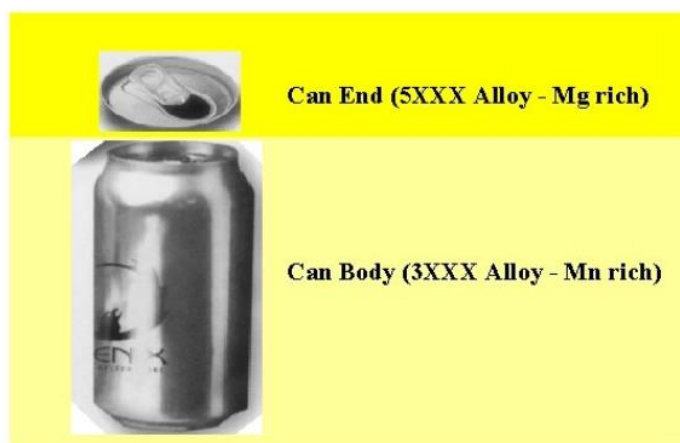


Figura 36 - Componentes da lata: corpo (*can body*) e tampa (*can end*)

Fonte: Alcan (1996)

As ligas de alumínio usado para embalagens, conforme a Tabela 3 e Figura 37, mostra alguns elementos de liga predominante na empregabilidade do componente na lata. A liga AA3104 com tempera H19 com resistencia similr a 2-3 tempera do aço são consideradas baixa ductibilidade (ALUMINUM ASSOCIATION,1996).

Tabela 3 - Composição química dos componentes da lata de alumínio

Componente da Lata e Liga	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Outros (cada)	Outros (total)
Corpo (AA3104)	0,25	0,2	0,5	1,0 - 1,5	0,8 - 1,3	0,25	0	0	0,05	0,15
Tampa (AA5182)	0,15	0,2	0,35	0,2 - 0,5	4,0 - 5,0	0,25	0,10	0,10	0,05	0,15
Anel (AA5182)	0,15	0,2	0,35	0,2 - 0,6	4,0 - 5,1	0,25	0,10	0,10	0,05	0,15

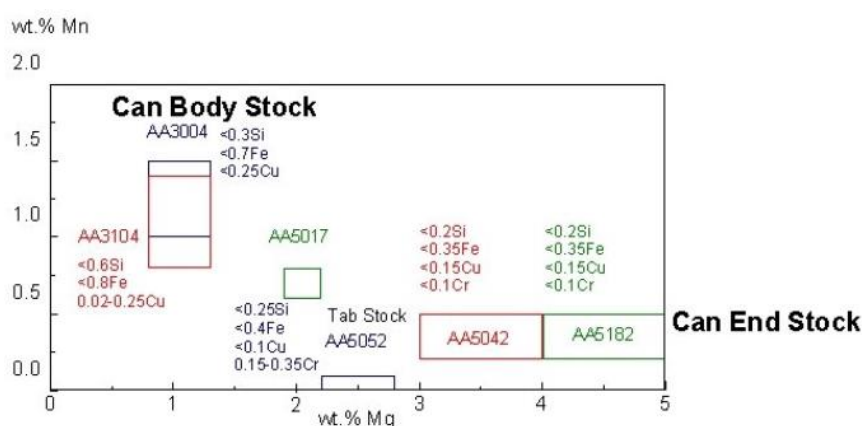


Figura 37 - Composição química comparativa das ligas
Fonte: Aluminum Association (1996)

As partículas intermetálicas (também conhecidas como partículas de segunda fase) nestas ligas tem o papel fundamental na aplicabilidade do material na fabricação da lata, pois durante o processo de solidificação e laminação são afetados por este elementos, impactando na textura, anisotropiam formabilidade e acabamento superficial da chapa a ser transformada em lata de bebida. Os elementos de liga silício, ferro e manganês durante a solificação formam intermetálicos em sua região interdendrítica, sendo estáveis devido sua morfologia e com uma alta densidade de imperfeições de crescimento $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$, conforme Figura 38. O elemento de liga ferro possui segrega direta na matriz do alumínio.

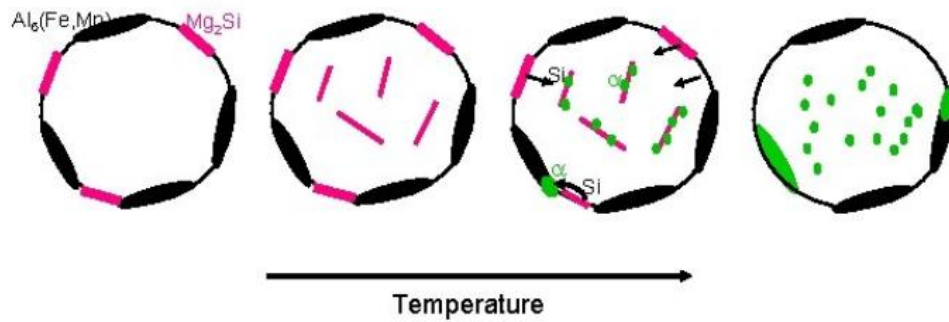


Figura 38 - Homogeneização das ligas 3XXX
 Fonte: Alcan (1996)

A liga AA3104 na Refusão após a solidificação, tornando uma placa de alumínio possui uma estrutura bruta de fusão com fase ortorrômbica $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ com 85% como partículas primárias e 15% fase cúbica $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ (Figura 39), com sua composição de acordo com a taxa de resfriamento no *D.C* (Figura 40). Então como exemplo somente 25% do mangânes se precipitou como na fase intermetálica. Então no processo de homogeneização (aquecimento das placas acima de 520 - 550°C antes da laminação à quente) com objetivo de corrigir a microsegregação, precipitação do elementos de liga supersaturados, transformação da fase $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ em $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ e crescimento das partículas intermetálicas estáveis, conforme as Figuras 39 e 40. Quanto ao mangânes sua função liga restringe a formação do aumento do grão na homogeneização e ajuda no refino do grão na laminação (PATROCINIO, 2011; AHMED, 2020).

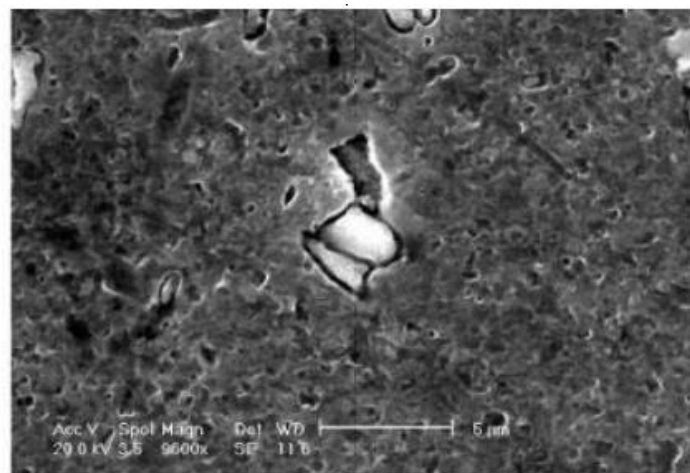


Figura 39 - Precipitado tipo $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ com forma arredondada após ataque HF 0,5%
 Fonte: Fogazzi *et al* (2005)

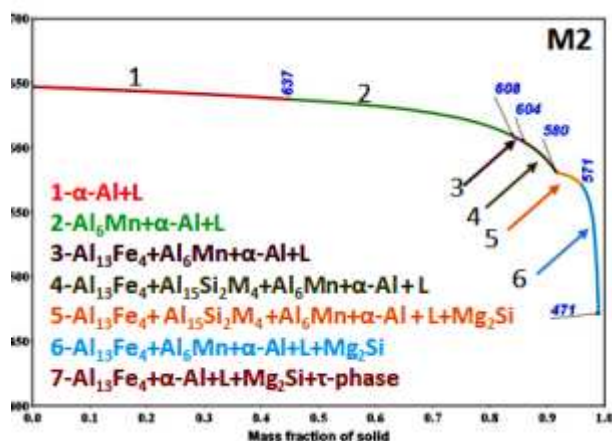


Figura 40 - Efeito da composição dos intermetálicos em relação a taxa de resfriamento
Fonte: Ahmed (2020)

Quanto magnésio sua principal função atuar como endurecedor da liga por solução sólida e com boa ductibilidade, o cobre ajuda no aumento da resistência mecânica e a resistência a corrosão, sendo o magnésio elemento de liga predominante na tampa da lata, conforme Figura 41 (AHMED, 2020).

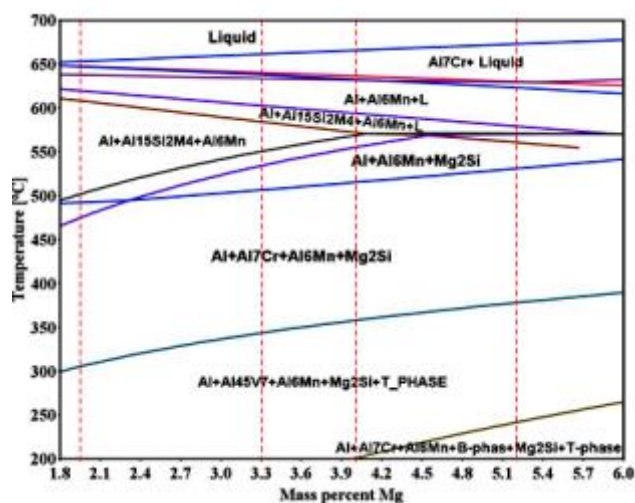


Figura 41 - Equilíbrio de fase da liga AA5182
Fonte: Ahmed (2020)

2.2.2.2. Impureza nas latas de alumínio para reciclagem

Além do alumínio ser um processo infinitamente reciclável, sem perda de sua propriedade mecânica e química, no processo de reciclagem da lata de alumínio onde a planta da Novelis de Pindamonhangaba – SP reciclam latas do mundo inteiro, onde nestas latas contém inúmeras impurezas, conforme Figura 42 (PRÓPRIO AUTOR, 2011).



Figura 42 - Fardo de latas de alumínio
Fonte: Próprio autor (2011)

As impurezas contidas dentro dos fardos e latas ocorrem devido ser um resíduo e também locais onde a reciclagem não é bem difundida. Então estas latas são misturadas com outros resíduos como resíduos como terra, água, metais não-ferroso (Pb, Zn, Cu, Ti, etc) , ferrosos, plásticos, óleos e materiais em decomposição (Figuras 43 e 44). Caso ocorra uma contaminação com metais pesados, como por exemplo o chumbo, para descontaminação são necessárias em torno de 200 toneladas de metal primário para descontaminação de um forno de reciclagem, gerando um alto custo de parada de linha e consumo de alumínio primário.



Figura 43 – Metais não-ferrosos detectado na entrada na linha de reciclagem
Fonte: Próprio autor (2011)

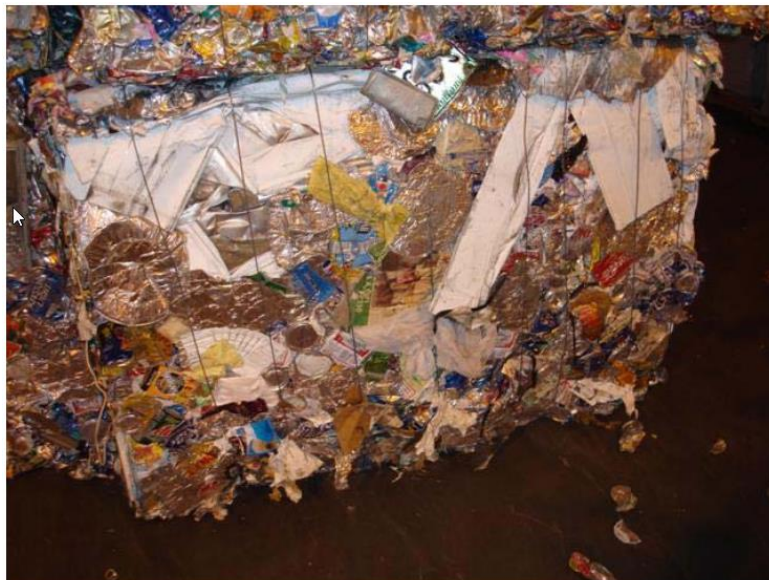


Figura 44 - Impurezas contida nos fardos de latas
Fonte: Próprio autor (2011)

Estes resíduos se não forem detectados pode causar danos nos equipamentos, danos a operação e também danos ao meio-ambiente. Existem alguns casos onde o coletor da lata, adiciona areia dentro dos fardos para aumentar o peso da carga e ganhar para aumentar seu lucro conforme a Figura 45.



Figura 45 - Areia dentro dos fardos e latas de alumínio para aumentar o peso da carga
Fonte: Próprio autor (2011)

2.2.2.3. Processo de reciclagem industrial das latinhas de alumínio

Segundo Dalfré (2007) há vários tipos de sucatas disponíveis no mercado sucateiro, e para sua adequada fusão, há necessidade de que haja uma preparação dessa sucata, objetivando remover todas as impurezas (sujeiras) não-alumínio existente descrita na seção anterior (Figura 46). Essa limpeza é fundamental para se obter alumínio secundário sem contaminações deletérias ao seu uso, principalmente metais pesados, dentre eles o chumbo. Além dessa contaminação, o carregamento nos fornos de fusão do alumínio limpo promove uma melhor recuperação do alumínio carregado na carga (JINLINGCABLE, 2020).

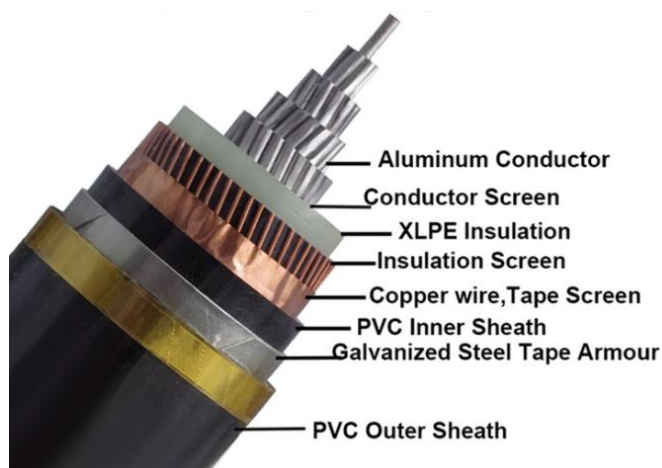


Figura 46 - Sucata de cabo de alumínio revestido
Fonte: *Jinlingcable* (2020)

As sucatas de processo, ou seja, retalhos oriundos dos processos de extrusão, laminação, peças rejeitas e canais de fundição nos casos de peças fundidas não necessitam de nenhuma preparação para serem refundidas, já que se conhecem sua origem e sua qualidade, também chamadas de sucatas pré-consumo. É prática comum, principalmente para retalhos de folhas de alumínio (espessura inferior a 0,3 mm), que sejam compactadas em prensas, conforme a Figura 47, para facilitar o transporte, carregamento e aumento da produtividade nos fornos e reduzir a perda por oxidação durante a fusão do mesmo (MASKINER, 2020).



Figura 47 - Prensa Jacaré
Fonte: Maskiner (2020)

Na Novelis do Brasil, conforme a Figura 48, todo seu ativo produz desde do recebimento da sucata até a bobina entregue aos produtores de latas, otimizando todo processo da reciclagem da lata, sendo o 23º consecutivo o maior de reciclador de latas do país (NOVELIS INC., 2000).

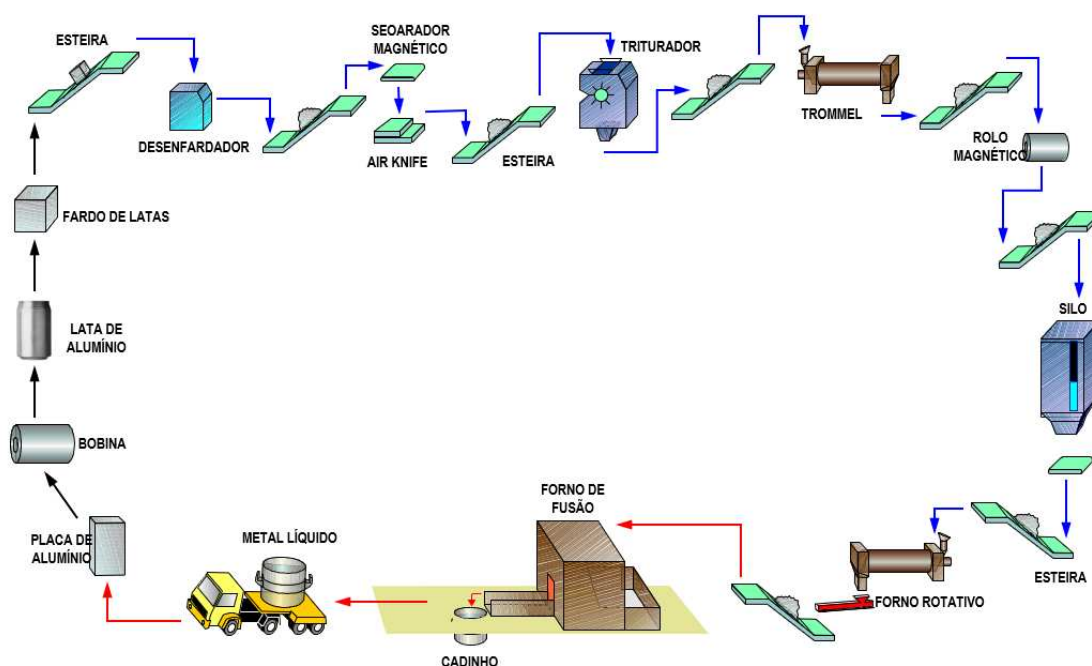


Figura 48 - Fluxo da reciclagem de latas
Fonte: Novelis Inc (2000)

Sucata prensada conforme a Figura 42, adquirida diretamente dos sucateiros de grande e médio porte, como também os centro de coletas espalhados ao longo de do território nacional, da qual desconhece a possível presença de impurezas e contaminantes ou que contenha sucatas pintadas ou envernizadas, idealmente devem

ser desenfundadas para eliminar qualquer material não-alumínio que esteja presente no fardo, protegendo também o equipamento posterior. Para tanto, há necessidade de se utilizar equipamentos específicos para o desenfundamento, conforme mostrado na Figura 49 (AMERICAN PUVERIZER, 2021).

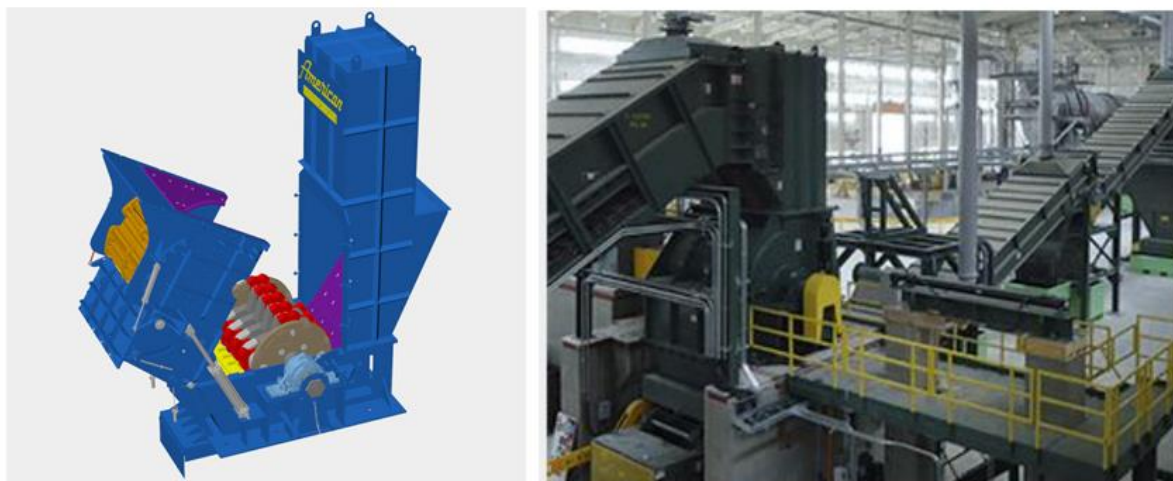


Figura 49 - Desenfundador (*bale breaker*)
Fonte: *American Puverizer* (2021)

Depois de desenfundado, as latas já estão soltas nas esteiras de alimentação para remoção de metais ferrosos através de eletroímã, por efeito de atração magnética os materiais ferrosos são separados, conforme Figura 50 (OXIMAG, 2020).

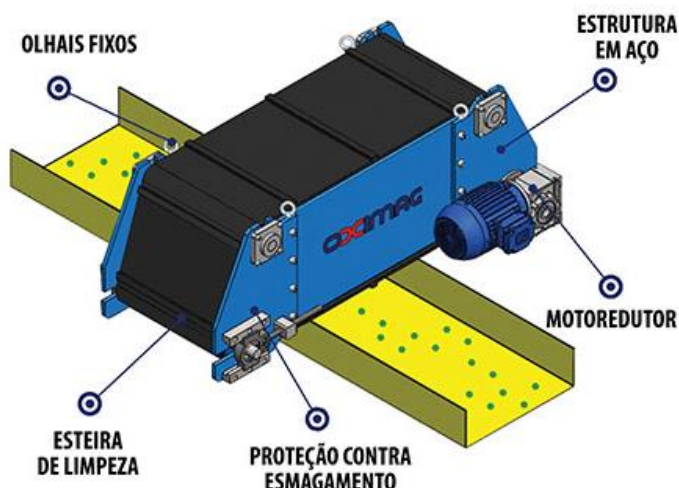


Figura 50 - Esteira eletromagnético ou eletro-ímã
Fonte: *Oximag* (2020)

E conseqüentemente o material já com ferrosos removidos passam pelo *Air Knife*, utilizando um processo de separação por densidade. A sucata sendo

processada passa por uma esteira em cuja extremidade é aplicado um jato de ar devidamente regulado para remover materiais não-alumínio, conforme a Figura 51 (POLYSORT, 2021).

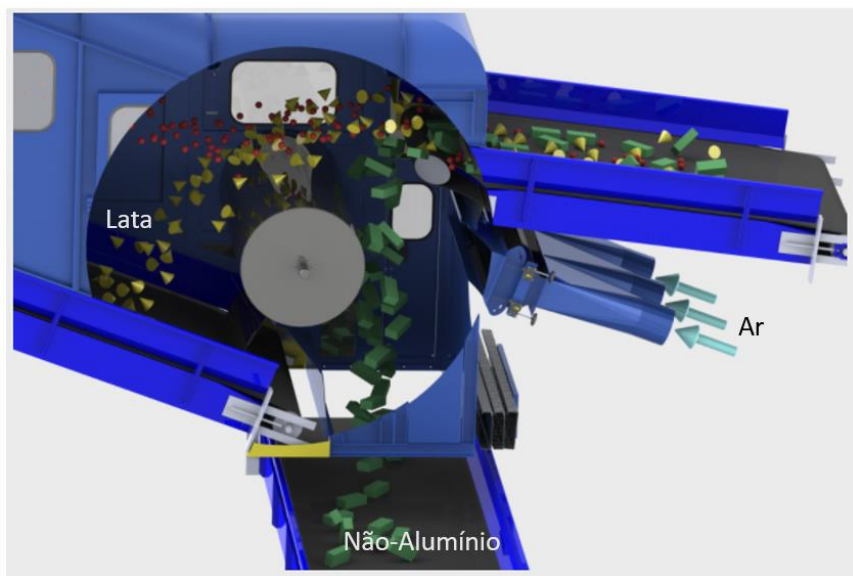


Figura 51 - *Air Knife*
Fonte: Polysort (2021)

As latas passam por um processo de trituração (KALLEL 2017), similar ao equipamento de desfardador, mas agora uma número de martelos maiores e grelhas sob o eixo de martelos para reduzir o tamanha lata entre 20-70mm, aumentando a densidade do material em linha de 80 Kg/m³ para 220 Kg/m³, conforme Figura 52 (MOINHOS TIGRE, 2020).

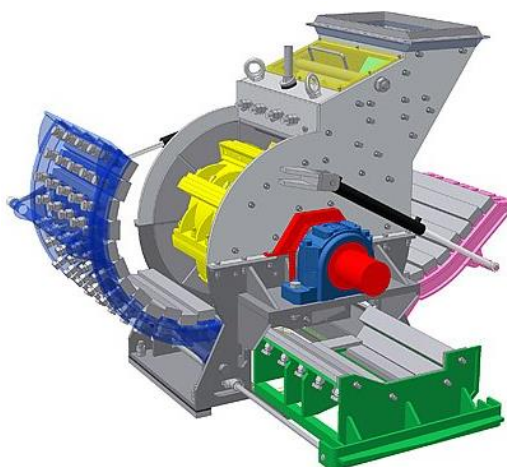


Figura 52 - Moinho de martelos (*hammer mill*)
Fonte: Moinhos Tigre (2020)

Após a lata toda triturada, qualquer resíduo dentro da mesma será removido no trommel e consequentemente no segundo Air Knife. Trommel é um cilindro com vários furos, também conhecido como peneira rotativa, função de remover toda impureza, principalmente areia e terra com dimensões menores que o diâmetro do furo, conforme Figura 53 (PLASTIC RECYCLING MACHINE, 2002).



Figura 53 – Trommel ou peneira rotativa
Fonte: *Plastic Recycling Machine*,(2002)

Devido a trituração gerar apresentar na parte interna da lata ainda alguns resíduos ferrosos, o último processo de limpeza é o rolo magnético. A lata triturada passa por cima do rolo magnético (Figura 54) para o silo de armazenagem onde todo resíduo ferro será atraído pelo tambor e removido pelo raspador. Este equipamento tem um magnetismo superior a esteira magnética e muito mais eficiente com partículas menores (DIRECT INDUSTRY, 2005).



Figura 54 - Rolo magnético
Fonte: *Direct industry* (2005)

Até o presente momento todo processo à frio para trituração e remoção da impurezas inorgânicas. O processo a seguir chamado decotagem da lata, onde o forno rotativo, equipamento destinado à remoção por temperatura das camadas de compostos orgânicos que revestem a superfície da lata (HAWK 1999). Há vários tipos de compostos orgânicos (plásticos, tintas, verizes, etc.), mas o mais importantes são as tintas e vernizes, principalmente os associados as latas de alumínio usada. A Figura 55 ilustra este tipo de equipamento que opera com temperaturas entre 550 à 570°C. Os retalhos previamente picotados são carregados neste forno horizontal rotativo e submetidos a essa temperatura, na qual o revestimento orgânico é vaporizado. Esses vapores poderão ser poluentes (dioxina e furanos), que se formam em temperaturas acima de 200°C e necessitam ser eliminados em temperaturas próximas a 900°C, através da incineração desses vapores no próprio forno por outro queimador (*after burner*). O produto dessa combustão é exaurido e conduzido para o sistema externo de filtros mangas (despoeiramento a quente) com injeção de cal ou bicarbonato de sódio para neutralização. A queima da tinta é importante também para minimizar a oxidação do alumínio durante a fusão (INSERTEC, 2020).



Figura 55 - Forno rotativo ou *decoater*
Fonte: Insertec (2020)

Após a lata estar sem nenhum resíduo em sua superfície e com uma temperatura de 400°C saindo do forno rotativo, todo este metal será continuamente adicionado no forno reverbero (*sidewell*) conforme a Figura 56. A perda de fusão (oxidação do alumínio durante a fusão) das ligas de alumínio é função da morfologia do metal sólido, sendo esta perda inversamente proporcional à espessura do metal. Assim, retalhos de alumínio com espessuras inferiores a 0,3 mm apresentam uma

perda de fusão bem superior à retalhos mais espessos. É de boa prática evitar que retalhos com espessuras baixas tenham contato com a atmosfera oxidante do forno e, sempre que possível, tentar submergi-lo no alumínio líquido que já está no forno. Fornos de reverbero do tipo sidewell são indicados para a fusão de retalhos finos, pois por efeito de um rotor localizado no poço lateral do forno, o vórtex formado tem ação de mergulhar o retalho para dentro do metal líquido já existente no forno, acelerando sua dissolução no banho, evitando assim sua oxidação (INSERTEC, 2020).



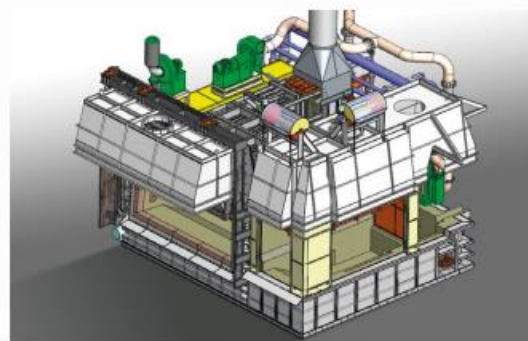
\ Dry hearth for ingot bundles or sows melting.



\ Sink vortex with molten metal on recirculation .



\ Dry hearth and sidewell.



\ 3D layout sidewell.

Figura 56 - Vistas de um forno de reverbero (*sidewell*)
Fonte: Insertec (2021)

A medida que a lata triturada se tornando um metal líquido (fusão) o nível de metal líquido vai aumentando onde ocorrerá a transferência deste metal líquido em cadinho refratários e transportado por caminhão (Figura 57) para os fornos de fusão na Refusão, economizando consumo de alumínio primário (alumínio puro) e consumo de gás, aumentando a produtividade evitando maior tempo dos fornos de fusão fundir metal sólido (MACHINERY, 2020).



Figura 57 - Caminhão de transporte de metal líquido em cadinhos
Fonte: Machinery (2020)

2.2.2.4. Programa de manutenção em recicladoras

O custo de manutenção em uma fábrica, com procedimentos e planejamentos, em sua maioria, são normalmente a maior porção do custo. E a cada momento que a inflação e os custos das materias-prima sobem, exemplo o aço e ferro, impactando diretamente a despesa planejada da fábrica. As grandes recicladoras devido o desgaste ocasionado do atrito metal com metal e abrasivos podem ocorrer manutenções corretivas e manutenções preventivas, conforme a Figura 58 (SENAI, 2016).



Figura 58 - Tipos de Manutenção
Fonte: SENAI (2016)

As manutenções corretivas (run-to-failure) quando a máquina quebra, e se quebrou, conserta.(SCAPIN 2013). Quanto as manutenções preventivas são manutenções programadas de acordo com a especificação dos equipamentos, experiência conhecida ou inspeções diárias realizadas pela equipe de manutenção. Para isso a fábrica possui um sistema de monitoramento e controle e uma equipe

especializada para garantir que a linha de reciclagem possa reduzir o tempo de máquina parada e garantir o seu grau de utilização cada vez mais alto. A Figura 59 ilustra a estatisticamente a taxa de falhas ao longo da utilização do equipamento (CLT SERVICES, 2020)

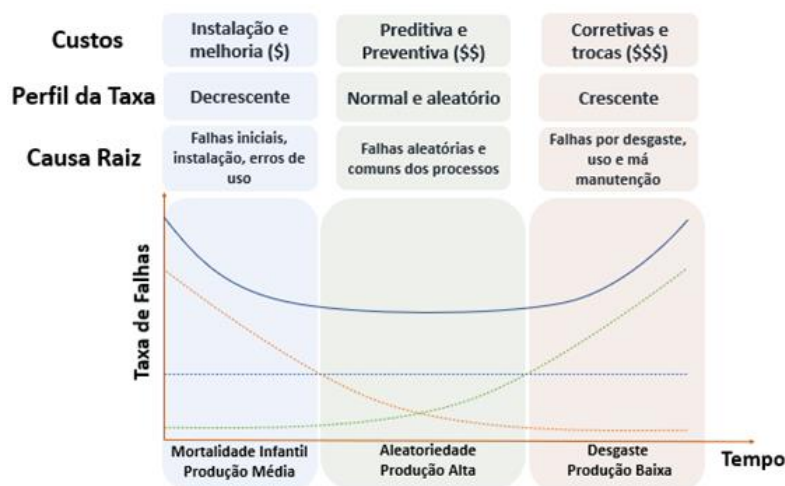


Figura 59 - Curva da banheira (*bathtub curve*)
Fonte: CLT Services (2020)

O tempo médio entre falhas (MTTF) indica que um novo equipamento tem alta probabilidade de falhar (mortalidade infantil), devido falhas iniciais, erro de uso ou problemas de instalação, mostrado na área azul da Figura 58. Após este período a probabilidade que ocorre falhas será baixo, ocasionando uma alta produção e um excelente grau de utilização do equipamento, isto é, com programa de manutenções preventivas e preditivas, mostrado na área verde da figura 58. Caso isto não for bem gerenciado começam a ocorrer falhas por desgastes, má manutenção que impactam diretamente no custo da manutenção e baixa produtividade, mostrado na área laranja da Figura 58.

Em uma recicladora o plano de manutenção se divide em atividades preventivas, preditivas e substituições, sendo ao todo uma média de 277 atividades para garantir o bom funcionamento da linha, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Atividades de um plano de manutenção em uma recicladora

Rótulos de Linha	Contagem de Atividade
CADINHOS	9
CARDANS	1
CARREGADORES DE METAL	6
CMAQUINA	8
CORREIAS TRANSPORTADORAS	3
CORTINAS DE AR	2
DESPOEIRADORES	4
EQUIPAMENTOS AUXILIARES	2
ESTEIRAS TRANSPORTADORAS	18
ESTRUTURAS E CHAPARIAS	7
FILTROS	4
FORNOS ROTATIVOS	8
FORNOS SIDEWELL	21
MALHAS INSTRUMENTACAO	17
MOTORES ELETRICOS	55
PAINES CCM	10
PAINES DE CONTROLE	5
PAINES ELETRICO DE ILUMINACAO	3
PENEIRAS VIBRATORIAS	2
PONTES ROLANTES	7
REDUTORES	1
ROLOS MAGNETICOS	2
ROTORES	4
SEPARADORES	3
SILOS	1
SISTEMAS ALIMENTADORES	1
SISTEMAS DE COMBUSTAO	17
SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO	3
SISTEMAS DE ELEVACAO	17
SISTEMAS DE FECHAMENTO	2
SISTEMAS DE GIRO	1
SISTEMAS DE RESFRIAMENTO	2
SISTEMAS DE TRANSLACAO	22
TRANSPORTADORES VIBRATORIOS	9
Total Geral	277

Fonte: Próprio autor (2021)

Os equipamentos mais críticos são por onde o metal está diretamente em contato com o equipamento, como moinhos, esteiras, correias, vibratórios e fornos (SHIPLEY 2002).

2.2.2.5. Moinho de martelos

Os moinhos são amplamente usados como estágio primário para produzir o produto particulado mais fino do que cerca de 50–100 mm. Eles são classificados como britadores de mandíbula, giratórios e cônicos baseados em compressão, moinho de corte baseado em cisalhamento e britador de martelo baseado em impacto. O britador de mandíbula consiste essencialmente em duas placas de britagem, inclinadas uma para a outra formando uma abertura horizontal por suas bordas inferiores. O material é triturado entre uma placa fixa e uma móvel por pressão alternada até que o produto triturado se torne pequeno o suficiente para passar pelo espaço entre as placas de trituração. Os britadores de mandíbulas encontram uma ampla aplicação para materiais frágeis. Por exemplo, eles são usados para trituração de torta de cobre porosa. Um britador de mandíbulas Fritsch com tamanho de alimentação máximo de 95 mm, finura final (depende da configuração do intervalo) 0,3–15 mm e produção contínua máxima de 250 Kg/h é mostrado. O britador giratório

inclui um cone sólido colocado em um eixo giratório e colocado dentro de um corpo oco, que tem lados cônicos ou verticais inclinados. O material é triturado quando as superfícies de trituração se aproximam e os produtos triturados caem pela abertura de descarga. Os moinhos de martelo são usados como triturador primário de uma etapa ou como triturador secundário para produtos de um triturador primário. Eles são amplamente usados para triturar sucata de metal duro para diferentes processos de reciclagem de metal duro. Os martelos pivotados são pendentes, montados nos eixos horizontais localizados simetricamente ao longo do perímetro de um rotor. A trituração ocorre por meio do impacto das peças do material com os martelos móveis (*hammer*) de alta velocidade e pelo contato com as placas quebradoras. Uma grade cilíndrica (*screen*) ou tela é colocada abaixo do rotor. Os materiais são reduzidos a um tamanho pequeno o suficiente para passar pelas aberturas da grade ou tela. O tamanho do produto pode ser regulado alterando o espaçamento das barras da grelha ou a abertura da tela. A característica dos trituradores de martelo é o aparecimento de pressão elevada de ar na unidade de descarga do triturador e subpressão na zona em torno do eixo próximo à superfície interna das paredes laterais do corpo. Assim, os trituradores de martelo também atuam como ventiladores de alta pressão e tiragem forçada. Isso pode levar à poluição ambiental e perdas de produto em frações de pó fino. O projeto de um britador de martelo (Figura 60) permite essencialmente uma diminuição da elevada pressão do ar na unidade de descarga do britador. A zona A abaixo da tela é comunicada através das nervuras ocas e aberturas nas paredes do corpo com a zona B ao redor do eixo próximo à superfície interna das paredes laterais do corpo. Como resultado, a circulação da matéria em suspensão no gás entre as zonas A e B é estabelecida e a alta pressão do ar na unidade de descarga do britador é reduzida (SCIENCE DIRECT, 2019).

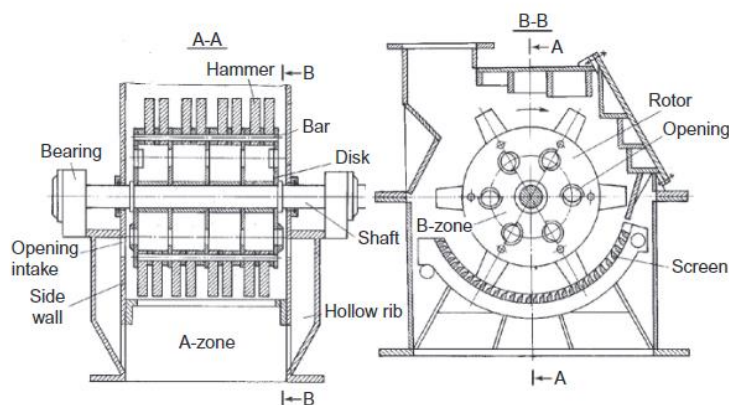


Figura 60 - Moinho de Martelos (*hammer mill*)
 Fonte: Science Direct (2019)

2.2.2.6. Projetos de moinho de martelos

As visões teóricas existentes sobre os padrões de britagem e moagem são baseadas no processo de desintegração multifásica de um sólido.(CHEN 2001). Tal modelo atua na promessa de que o processo de desintegração do sólido passa por várias fases:

- Acúmulo de defeitos levando a concentração local de estresse;
- Formação das microfissuras embrionárias, ou seja, a ruptura da rede cristalina contínua em várias células;
- Desenvolvimento e junção de microfissuras embrionárias até a formação da fenda de ruptura principal;
- Disruptura do sólido em várias partes;

Os deslocamentos, incipientes de números de átomos desiguais em planos de rede vizinhos, são um tipo principal de efeito de rede de cristais que define as propriedades de resistência de um sólido. Átomos estranhos em uma estrutura permanecem sem uma ligação química. Nesse caso, ocorre um defeito de estrutura, ou seja, um deslocamento (Figura 61). A ação de uma carga externa pode deslocar esse defeito de uma parte do cristal para outra. Finalmente, se no caminho do movimento os obstáculos não se encontram, o deslocamento aparece na superfície onde se forma um degrau em um átomo. Para tal deslocamento desimpedido de deslocamentos (de forma extremamente esquemática), um mecanismo de deformação dúctil é representado. Pela imposição de uma carga deformadora a um sólido no qual existem centros de frenagem de deslocamentos, o acúmulo de

deslocamentos é observado por obstruções que interferem com seu movimento. Nesses locais, aparecem altas tensões locais, que podem ser suficientes para a integração de alguns dos deslocamentos e a formação de uma microfissura embrionária (CALLISTER, 2014).

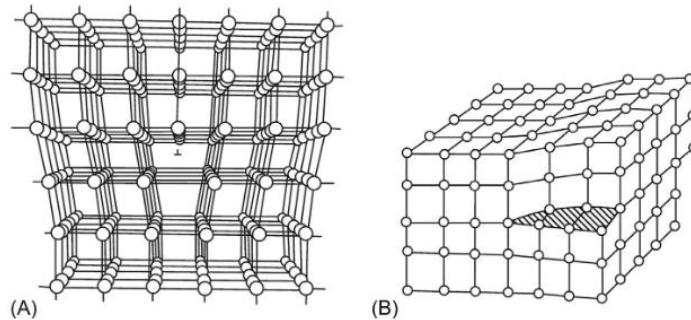


Figura 61 Esquema do deslocamento linear (A) e helicoidal (B) na estrutura cristalina
Fonte: Callister (2014)

O valor deste último é aproximadamente proporcional ao quadrado do comprimento da trinca ou sua profundidade de penetração no cristal. A energia necessária para formar duas novas superfícies é proporcional ao comprimento da fissura na primeira potência. Assim, uma pequena fissura, para seu crescimento, deve consumir mais energia superficial do que a liberada devido ao relaxamento das tensões que designam sua estabilidade. Porém, se uma fissura afetada pela tensão aplicada começar a se desenvolver, o estado do processo é alterado. Com um crescimento no tamanho da trinca, a energia liberada é aumentada rapidamente porque é proporcional à segunda potência do comprimento da trinca. Em um comprimento de trinca crítico definido, a trinca começa a liberar mais energia do que consome. Em seguida, ocorre uma mudança abrupta e a trinca pode propagar-se no corpo do metal em alta velocidade e se ramifica, formando uma superfície de quebra 1.000 MPa, diferem marcadamente dos dados teóricos calculados na força da ligação Inter atômica, valores de 10 a 100 GPa. A aplicação de forças compressivas aos sólidos pode aumentar significativamente a durabilidade dos sólidos ao prevenir o desenvolvimento de microfissuras. Portanto, a aplicação lenta de forças compressivas em sólidos é responsável pelo alto consumo de energia e baixa eficiência desta técnica. As microfissuras podem se desenvolver prontamente sob a influência de tensões de tração e cisalhamento.

Na fase de desenvolvimento das microfissuras, a adsorção de surfactantes tem grande importância. Sua penetração na boca da fissura enfraquece a ligação Inter

atômica e facilita a propagação da trinca, enquanto a adsorção nas superfícies recém-formadas impede seu fechamento (efeito Rehbinder). No entanto, a observância de uma série de condições é necessária para o aparecimento do efeito Rehbinder. Primeiro, a ação do surfactante se torna aparente quando um sólido está no estado estressado. A alta pressão ambiental promove a penetração do surfactante nas microfissuras embrionárias. A temperatura ótima na faixa de 373–423 K também é uma condição necessária, enquanto as flutuações térmicas intensas que ocorrem acima de um determinado limite podem resultar na dissipação de aglomerados de deslocamento e na estabilização de microfissuras. Os mecanismos do efeito Rehbinder, denominada redução induzida por adsorção da resistência dos sólidos (AIRS), baseiam-se na existência da relação entre a energia livre de uma superfície, que é formada como resultado da fratura do sólido, e a resistência do sólido. Em um caso idealizado de fratura frágil microscópica, esta relação é quantitativamente determinada pela relação de Griffith bem conhecida como equação 1 (Regularities and mechanisms of the Rehbinder's effect).

$$\sigma_s = A \left(\frac{E\gamma_s}{L_s} \right)^{1/2} \quad \text{Eq.1}$$

Onde é a resistência final (tensão de fratura), A é a constante numérica, E o módulo de Young, γ_s energia livre de superfície por unidade de área, e L_s é o comprimento de uma fissura superficial inicial. De acordo com a equação 2, a redução da resistência corresponde à queda de energia de superfície resultante da adsorção de componentes do ambiente na superfície fraturada (ou seja, quando um sólido é fraturado em contato com um ambiente de superfície ativa). Juntamente com a relação de adsorção de Gibbs, que se relaciona à mudança da energia livre de superfície para o valor de adsorção, a equação 2 representa a interpretação termodinâmica mais simples da redução de força induzida por adsorção. Quando a fratura tem um caráter quase elástico, ou seja, o tamanho característico de uma zona plástica é muito menor do que o tamanho de uma fissura, a deformação plástica residual e, no conjunto, os rearranjos estruturais irreversíveis estão localizados em uma camada fina na superfície fraturada. Tal condição permite, sem mudanças essenciais na abordagem

de Griffiths, modificar a equação 2 substituindo a energia livre de superfície pelo trabalho específico de fratura W_f como:

$$\sigma_s = \text{const} \left(\frac{EW_f}{L_s} \right)^{1/2} \quad \text{Eq.2}$$

A correspondência (equação 3), conhecida como relação de Griffith-Irwin-Orovan, fundamenta o conceito de fratura quase-frágil, que é aplicável, embora com diferentes precisões, a um espectro muito amplo de materiais e condições externas. O trabalho específico da fratura na equação 3 poder ser apresentado como a soma:

$$W_f = \gamma_s + W_p \quad \text{Eq.3}$$

onde o trabalho de deformação plástica W_p compreende perdas dissipativas. Normalmente, para materiais estruturais, o trabalho W_p é visivelmente maior do que a energia de superfície γ_s .

As relações de Griffith e Griffith-Irwin-Orovan são aplicáveis a fissuras macroscópicas. Nesse caso, a contribuição das forças superficiais de longo alcance para o balanço de energia da fratura pode ser, na maioria dos casos, ignorada. Quando a propagação da trinca ocorre em uma região nanométrica, o papel das forças de superfície pode parecer essencial.

Malkin, com base em regularidades fundamentais e conceitos contemporâneos dos mecanismos para o AIRS (*adsorption induced reduction of strength*), relatou que uma redução nas características de resistência de sólidos sob a influência de um ambiente externo ativo de adsorção é um fenômeno generalizado, o que é observado para sistemas de ambiente sólido com várias estruturas e composições químicas. Como relatou Malkin (2012), o AIRS é caracterizado por uma pronunciada seletividade química e sensibilidade à estrutura de um sólido, bem como as condições de teste e peculiaridade da fratura nas condições de AIRS é a interação não química entre um sólido e um ambiente ao longo das superfícies internas de uma fissura. Apesar dos grandes avanços na investigação de AIRS, o nível alcançado no entendimento dos mecanismos de fratura de sólidos em contato com um ambiente ativo de adsorção não pode ser reconhecido como satisfatório. Muitos aspectos importantes da AIRS,

incluindo a estimativa dos papéis dos fenômenos hidrodinâmicos, de difusão e capilar-osmótico, ainda precisam ser estudados. A forma geral da equação 4 de fratura, os modos de condução que resultam em falha catastrófica, são representados como:

$$\sigma_c = A \left(\frac{\gamma E}{c(1 - \mu^2)} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 4}$$

onde σ_c é a tensão na qual uma trinca se propaga dependendo do tamanho da trinca; A é a constante numérica que depende da geometria da trinca e sua localização, modo de carregamento e dimensões da partícula (por exemplo, A é $\sqrt{2}/\pi$ para a fenda da fenda em uma chuva infinita); c do tamanho de uma fenda; E é o módulo de Young; μ é o coeficiente de Poisson; e γ é a energia superficial da substância moída. Portanto, a resistência medida depende do tamanho da trinca, das propriedades elásticas e da energia superficial. Para materiais frágeis, γ é entre 10^2 e 10^3 MJ/cm². O estresse para a fratura de uma partícula é representada pela equação 5:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2Er}{L}} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde L é o comprimento da trinca e r é o raio da ponta da trinca.

Conforme breve descrição acima do mecanismo e racional do corte ou ruptura do material a ser processado no moinho de martelos, as principais variáveis de entrada para aquisição de um moinho de martelos são:

- Material a ser processado;
- Dimensão inicial do material a ser processado
- Dimensão final do material processado;
- Densidade do material a ser processado
- Produtividade por tonelada processada em uma hora;
- Grau de utilização do equipamento

2.2.2.7. Características do abrasivo corundum (Al_2O_3)

Para os metais como ferro, cobalto, cobre, zinco, molibdênio e tungstênio a oxidação procede de forma direta e aumento do óxido cristalino e no alumínio ocorre com um filme óxido amorfo na superfície do metal líquido onde dependendo da temperatura de oxidação, tempo e espessura é transformado em um óxido cristalino

A forma hexagonal do óxido de alumínio e também chamado de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, alumina (usualmente aplicada para materiais cerâmicos não muito densos), corundum (nome mineral), rubi vermelho (contendo cromo) ou safira (corundum azul, também frequentemente usado para denotar a pureza, cristal sintético). É duro com uma temperatura estável de fusão 2.045°C . A estrutura tem forma angular com arestas finas e cortantes com densidade 1.8 a 2 Kg/m^3 . A Figura 62 mostra de forma bem resumida a formação do óxido de alumínio no alumínio líquido em um sistema fechado (RESERCH GATE, 2002).

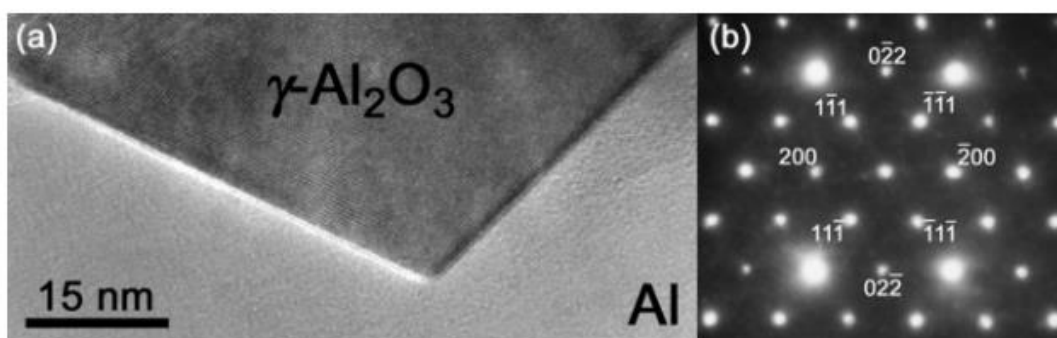
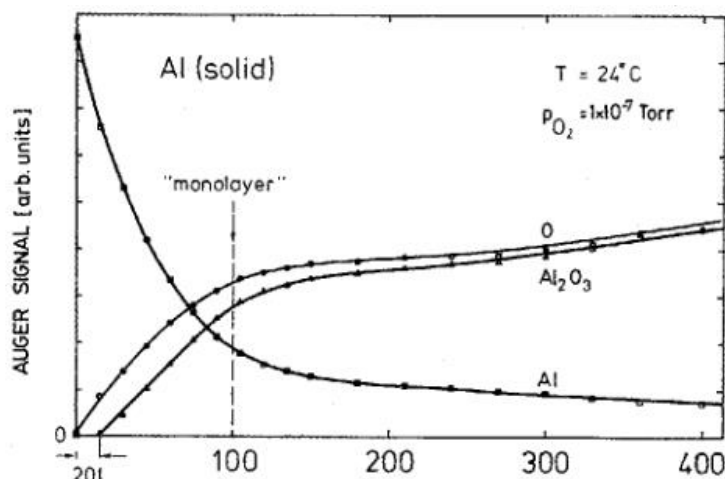


Figura 62 – (a) micrografia de elétrons em alta resolução da interface entre o $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ cristalina e o alumínio observado em “Cross section” (b) difração de elétrons de feixe convergente no padrão da $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ cristalina mostrado em (a) na direção $[0\ 1\ 1]_{\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3}$

Fonte: Reserch Gate (2002)

Óxido de alumínio em estudo é óxido gerado da própria lata de alumínio gerado no processo de refusão da sucata. Durante a formação da placa de alumínio descrito no item 2.2.2 o metal líquido de alumínio fica exposto ao oxigênio iniciando o processo de oxidação na superfície do metal, conforme Figuras 63 e 64 e Tabela 5 (CIST, 1987)



Variation of the Al (■), oxidized Al (▲) and oxygen (●) Auger peak-to-peak heights versus oxygen exposure on a clean polycrystalline Al surface at room temperature.

Figura 63 - Variação da oxidação do alumínio ao longo da adição de oxigênio
Fonte: CIST (1987)

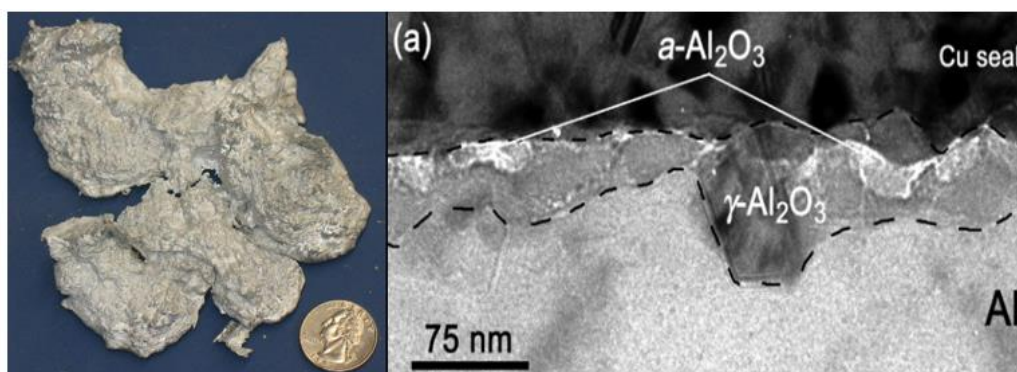


Figura 64 - Óxido de alumínio retirado da superfície do metal líquido e com 75 nm visto no microscópio eletrônico de varredura (MEV)
Fonte: Wikipédia (2017)

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da Al_2O_3 (Corundum)

Composição Química	-	Al_2O_3
Densidade	g/cm^3	3.9 – 4.0
Formato dos grãos	-	irregular com extremidades afiadas
Dureza	HV [42]	1.800
Dureza Knoop	K_{100} [39]	2.050
Tamanho Grãos	Mm	0.10

Fonte: Research Gate (2017)

2.2.2.8. Características do abrasivo quartzo ou dióxido de silício (SiO_2)

Segundo SZALA (2019), quartzo é um cristal trigonal composto de SiO_2 e impurezas de CO_2 , H_2O , NaCl e CaCO_3 . O quartzo é composto por uma grande variedade de rochas, permatitas e muitas formações hidrotermais. É resistente a intempéries químicas e mecânicas. Sua principal utilização é em arenitos

naturalmente ligados como abrasivos revestidos para lixar madeira, e como abrasivo solto para polir vidro e para jateamento de areia, conforme Figura 65 e Tabela 6 (RESEARCH GATE, 2014).



Figura 65 - Partículas de quartzo
Fonte: Reserch Gate (2014)

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da SiO₂ (Quartzo)

Composição química	-	SiO₂
Densidade	g/cm ³	2.0 – 2.12
Formato dos grãos	-	irregular com extremidades afiadas
Dureza	HV [42]	1.280
Dureza Knoop	K ₁₀₀ [39]	800
Tamanho Grãos	Mm	0.05

Fonte: Research Gate (2014)

2.2.3 Materiais para moinho de martelos

Os materiais dos martelos para moagem de metais que tenham uma resistência mecânica maior que que o material a ser processado (seção 2.2.2.5), isto é, possa ocorrer o cisalhamento do material.(BUDYNAS 2008). Ao longo do tempo foram desenvolvidos vários materiais com alta resistência ao desgaste mecânico, boa soldabilidade e que suportem altas temperaturas, com adições de elemento de liga, temperados ou até forjados para suportar a estes serviços.(CALLISTER 2018). Quanto ao desgaste abrasivo do entre os metais podem ser classificados de acordo com a razão entre o material abrasivo e o metal (H/H_A).

Os moinhos de martelo são usados há muito tempo para moagem ou com redução de materiais (Figuras 66 e 67). Um moinho de martelo típico compreende um rotor montado em um eixo de rotor dentro uma caixa. Um rotor de acordo com a técnica anterior é ilustrado em repouso e em movimento. Uma entrada de material é

geralmente localizada na parte superior do alojamento com um ou mais saídas de material localizadas perto da parte inferior da caixa. O rotor inclui um eixo de transmissão e filas de martelos, normalmente compreendendo barras de aço plano. O martelo é conectado de forma articulada ao rotor por meio de uma haste ou pino de aço. Em um moinho de martelo reversível, esta câmara de moagem compreende uma placa de corte montada em cada lado da entrada de material. Martelos são capazes de girar em qualquer direção, um recurso que aumenta a vida útil do martelo e grelha. As grelhas atuais compreendem uma seção superior, linear conectada com uma seção convexa, e não permite que as partículas escapem. A jusante da grelha corte, o interior da câmara de trabalho é definido por tela curva pratos. O diâmetro de abertura da tela é selecionado para corresponder ao tamanho da partícula final desejada. Partículas menores ou iguais ao tamanho desejado saem da câmara através da grelha o material maior do que o tamanho desejado é ainda mais reduzido pelos martelos rotativos (TRIBOLOGY INTERNATIONAL, 2017).

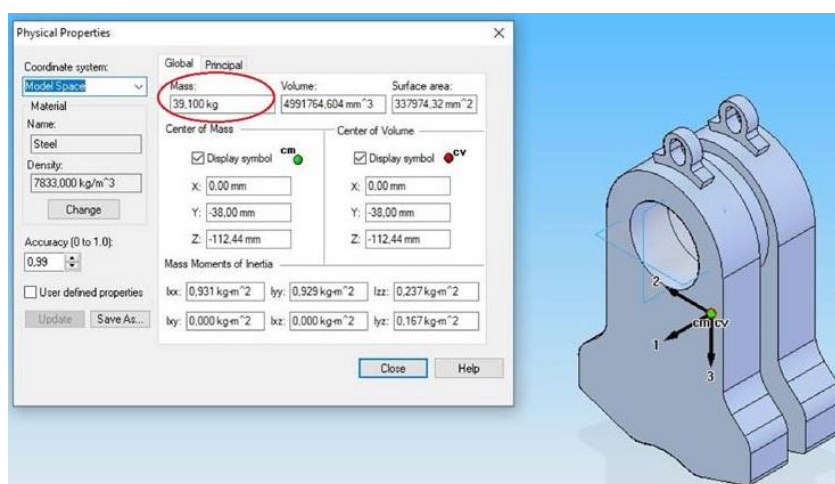


Figura 66 - Especificação do martelo para o moinho de martelos da Novelis do Brasil Ltda
Fonte: Próprio autor (2021)

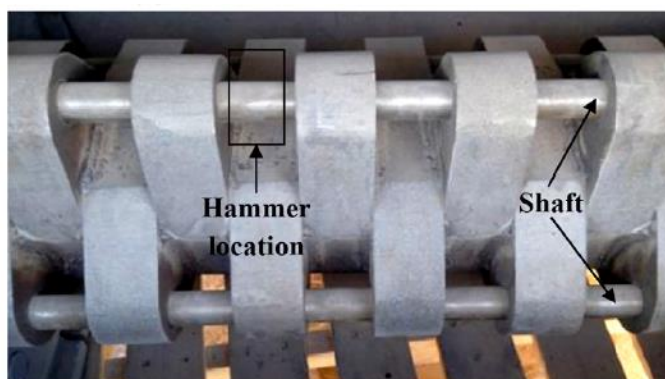


Figura 67 - Localização do martelo (*Hammer*) no moinho de martelos
Fonte: *Tribology international* (2017)

2.2.3.1. Aço Hardox 500

Os aços Hardox, que pertencem a um grupo de aços de baixa liga ao boro, são geralmente preferidos na indústria naval e de minas, equipamentos de construção pesada, trituradores e aplicações de transporte devido à sua tenacidade de alto nível, boa conformabilidade e soldabilidade. Rochas, areia, carvão, minerais, sucatas de metal e outros materiais hostis não são páreo para as chapas resistentes ao desgaste Hardox. Com a sua combinação de alta dureza, resistência e tenacidade, o aço Hardox já mostrou ser a escolha ideal em aço de alta resistência à abrasão para ampliar a vida útil dos equipamentos, peças e estruturas nos ambientes mais difíceis. O aço Hardox 500 é produzido pela empresa sueca SSAB é um aço de alta resistência à abrasão que pode ser dobrado e soldado e que possui uma dureza nominal de 500 HBW. Ideal para aplicações que exigem uma maior resistência ao desgaste. O aço Hardox 500 aumenta a carga e a vida útil das estruturas mantendo, ao mesmo tempo, uma boa capacidade de processamento e tenacidade conforme a Figura 68 e Tabelas 7 e 8 (SSAB, 2021).



Figura 68 - Martelos produzidos com a partir de chapas de aço Hardox 500
Fonte: SSAB, 2021

Tabela 7 - Composição química do aço Hardox 500

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B	CET*
0.30	0.40	1.30	0.020	0.010	2.20	2.0	0.40	0.005	0.60

*Carbono equivalente

Fonte: SSAB (2021)

Tabela 8 - Propriedades mecânica do aço Hardox 500

Espessura (mm)	Dureza (HBW)	Limite de Escoamento (MPa)	Teste de Impacto (Charpy) J (-40°C)
32 -103	450 - 540	1400	37

Fonte: SSAB (2021)

2.2.3.2. Aço Ravur 450

O aço RAVUR 500 é uma linha especial de chapas resistentes ao desgaste da classe 500 HBW de dureza superficial que oferece alta durabilidade em função da homogeneidade da dureza desde a superfície até o centro da espessura, de forma a possibilitar o incremento da vida útil de peças que sofrem desgaste, com excelente desempenho na resistência ao impacto e ao desgaste antiabrasivo simultaneamente. Especialmente desenvolvido pela empresa nacional Usiminas para encarar os trabalhos mais difíceis, o verdadeiro equilíbrio entre força e flexibilidade.

O material Ravur 450 é um aço temperado e não se destina a tratamento térmico adicional. As propriedades da condição de entrega não podem ser mantidas após a exposição a temperaturas superiores a 200°C. Devem ser tomadas as devidas precauções de saúde e segurança ao soldar, cortar, retificar ou trabalhar com este produto conforme as Tabelas 9 e 10 (USIMINAS, 2021).

Tabela 9 - Composição química do aço Ravur 500

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B	CET*
0.30	0.60	1.30	0.020	0.010	0.80	0.60	0.30	0.005	0,46

*Carbono equivalente

Fonte: USIMINAS (2021)

Tabela 10 - Propriedades mecânica do aço Ravur 500

Espessura (mm)	Dureza (HBW)	Limite de Escoamento (MPa)	Teste de Impacto (Charpy) J (-40°C)
32 -76	800	>1100	23

Fonte: USIMINAS (2021)

2.2.3.3. Cobertura em Rockit 706 (HC70)

O material Rockit 706 são projetados para melhorar o desempenho de componentes operando em ambientes onde ocorrem impactos e desgaste abrasivo severo. O desgaste abrasivo domina muitas aplicações e a solução industrial atual é usar MMCs (matriz de metal carbonetos) como NiCrBSi / WC com base de Ferro. No entanto, a resistência ao desgaste tende a ser baixa, como alto desgaste abrasivo os materiais resistentes são quebradiços por natureza. O material Rockit 706 tem uma estrutura martensítica com finamente carbonetos de vanádio duros dispersos dando-lhes excelentes características de desgaste e uma alta dureza consistente junto com uma boa resistência ao impacto. Em um depósito de camada única, a

dureza pode atingir cerca de 66 HRC ou 800 HBW. Os materiais pedidos por patente também podem ser aplicados em várias camadas e ainda reter a original dureza, bem como resistência ao desgaste uniforme em todo os depósitos, graças à distribuição uniforme dos carbonetos precipitados. O material Rockit 706 é a escolha para transferência de *Laser Cladding* (*Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition, 2020*), neste caso aplicamos o pó do Rockit 706 sobre a superfície do martelo do Ravur 500 conforme a Figura 69 e Tabelas 11 e 12 (HRC METALIZAÇÃO, 2020).

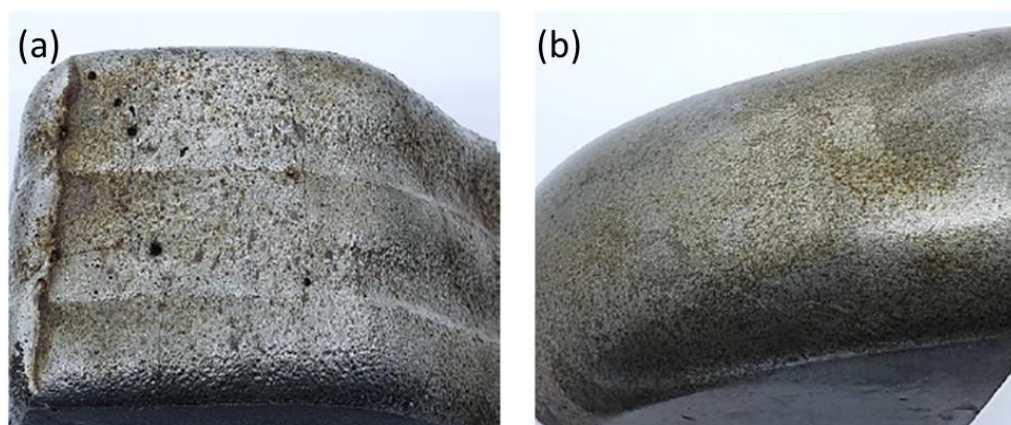


Figura 69 - (a) Ravur 500 revestido com Rockit 706 pela técnica *Laser Cladding* (b) Ravur 500 sem revestimento

Fonte: Próprio autor (2021)

Tabela 11 - Composição química do aço Ravur 500 como metal base e o Rockit 706 como cobertura

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%C	%Ni	%M	V	%B	CET*
Ravur 500	0.30	0.60	1.50	0.020	0.010	0.80	0.60	0.30	-	0.005	0,46
Rockit 706	2.60	1.00	-	-	-	5.00	-	-	6.00	-	-

Fonte: HRC Metalização (2020)

Tabela 12 - Propriedades mecânica do pó Rockit 706

Dureza (HBW)	Granulometria (µm)
800	53-180

Fonte: HRC Metalização (2020)

2.2.3.4. Cobertura em CB 70

A cobertura CB70 é um material a base ferro com estrutura refinada. A microestrutura deste material é de martensita com carbeto de vanádio, carbeto de

romo e boretos de molibdênio. A resistência da cobertura CB70, medida no teste de abrasão conforme a norma ASTM G65 apresenta desgaste de 8 mm³. Este nível de resistência coloca a cobertura do CB70 ao lado de materiais revestidos com carbeto de tungstênio. A resistência ao impacto da cobertura CB70 é similar aos aços ao manganês o que o torna grande candidato para aplicações sujeitas a alto impacto. Rockit 706 é a escolha para transferência de *Laser Cladding*, neste caso aplicamos o pó do CB70 sobre a superfície do martelo do Ravur 500 conforme a Figura 70 e Tabelas 13 e 14.

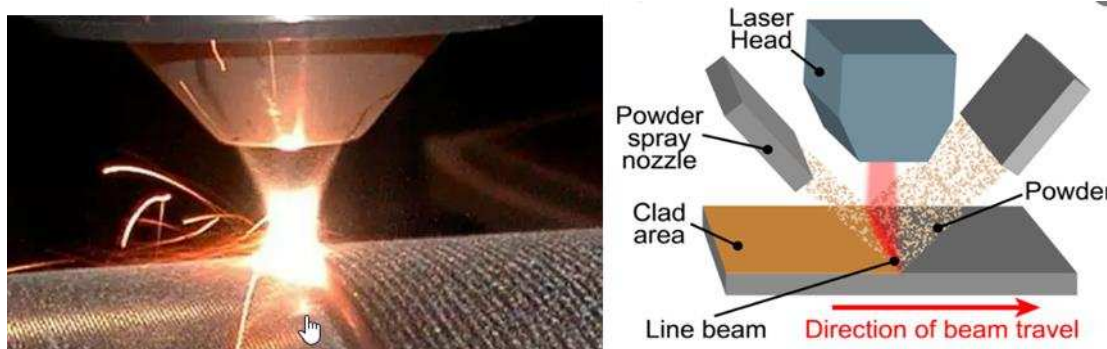


Figura 70 - Conceito do processo Laser Cladding
Fonte: HRC Metalização (2020)

Tabela 13 - Composição química do aço Ravur 500 como metal base e o CB70 como cobertura

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	V	%B	CE T*
Ravur 500	0.30	0.60	1.50	0.020	0.010	0.80	0.60	0.30	-	0.005	0,46
CB 70	3.5	<1.0	<1.0	-	-	<10.0	<5.0	<30.0	<20.0	<4.0	-

Fonte: HRC Metalização, 2020

Tabela 14 - Propriedades mecânica do pó Rockit 706

Granulometria (µm)	
730	53-180

Fonte: HRC Metalização (2020)

2.2.3.5. Aço Açoforja

Aço forjado são aços com base de sua composição de ferro-carbono com alto manganês, austenítico, solubilizado com contorno de grãos. Sua característica principal é o encruamento, isto é, a medida do seu uso, pancadas do martelo no processo, ele encrua, aumento sua dureza até 800HB melhorando as condições de

cisalhamento do material a ser processado e aumentando a durabilidade do material (Figura 71 e Tabelas 15 e 16). A fabricação que envolve a formação de metais usando forças de compressão localizadas, na qual golpes são feitos com um martelo, onde a primeira forma é um lingote obtido na aciaria que são transformados em placas ou tarugos e depois, forjados no perfil em martelos e prensas.



Figura 71 - Conjunto de martelos da Açoforja para consumo
Fonte: Próprio autor (2021)

Tabela 15 - Composição química do aço forjado da empresa Açoforja

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%B	CET*
1.20	-	19.0	-	-	2.0	-	-0	-	0,46

Fonte: Próprio autor (2021)

Tabela 16 – Propriedade mecânica do aço forjado da empresa Açoforja

Dureza (HBW)
200 - 230

Fonte: Próprio autor (2021)

2.2.4 Mecanismos de desgaste abrasivos

De todas as áreas onde o desgaste abrasivo é um problema, provavelmente o ambiente mais severo está na escavação, indústrias de movimentação de terras, mineração e processamento de minerais ou metais, onde a deterioração de componentes ocorre em uma ampla variedade de equipamentos, como lâminas de escavadeira, dentes de escavadeira, brocas de perfuração de rocha, trituradores, moinhos de bolas e moinhos de martelos, rampas, bombas de polpa e ciclones. No

entanto, o desgaste abrasivo não se limita a essas atividades. A abrasão apresenta problemas em muitos ambientes de desgaste em um ponto ou outro, embora possa não ser o mecanismo de desgaste primário para começar. Em qualquer tribossistema onde poeira e detritos de desgaste não são, ou não podem ser controlados e / ou excluído, o desgaste abrasivo é eventualmente um grande problema. O desgaste das peças, o custo do reparo e a substituição dessas peças, e o tempo de inatividade associado relacionado a essas atividades resultam em custos significativos para muitas indústrias.

Os fatores individuais que influenciam o comportamento de desgaste abrasivo são mostrados na Tabela 17. Tanto para o abrasivo quanto para material de desgaste, a maioria dos fatores que afetam o comportamento do desgaste abrasivo estão relacionados aos seus respectivos propriedades mecânicas. Também é importante o aspecto mecânico da interação abrasivo / material de desgaste (Figura 72). Os processos químicos, no entanto, também são importantes, ou seja, corrosão ou oxidação, pois influenciam diretamente a taxa de desgaste de um material no ambiente de interesse (OVAKO, 2020).

Tabela 17 – Fatores que influenciam o comportamento do desgaste abrasivo

Propriedade Abrasiva	Tamanho das partículas Forma da partícula Limite de escoamento Dureza Propriedade de rompimento Concentração
Condições de Contato	Nível de força e impacto Velocidade Ângulo de impacto Escorregamento / rolamento Temperatura Molhado / seco pH
Propriedade de Desgaste de Material	Dureza Limite de escoamento Ductibilidade Tenacidade Microestrutura Resistencia a corrosão

Fonte: Adaptado ASM Metals Handbook (1992)

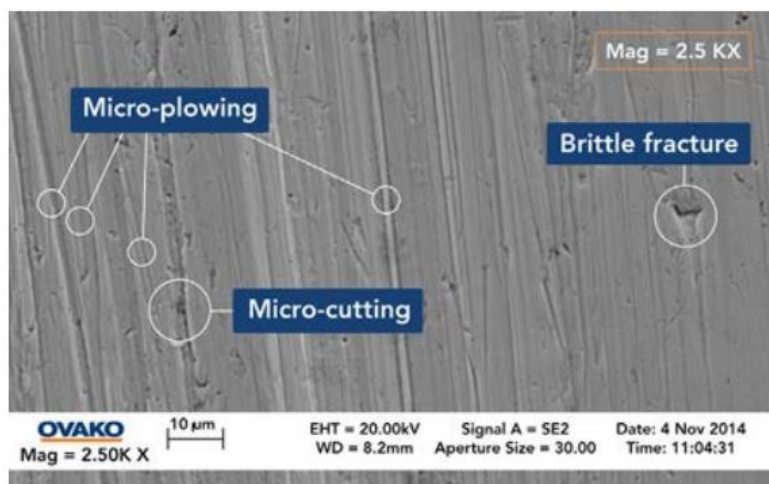


Figura 72 - Exemplos de desgastes abrasivos
Fonte: Ovako (2020)

2.2.4.1. Tipo de defeitos por *microplowing*

A deformação repetida causada por grãos deformando a área na superfície de um material também pode causar fadiga do metal. Um exemplo do mecanismo de deslocamento lateral de material é dado na Figura 73, que mostra uma seção transversal de uma ranhura de abrasão. O desgaste por deslocamento lateral repetido de material também seria uma forma relativamente suave ou lenta de desgaste abrasivo, uma vez que a deformação repetida é necessária para produzir uma partícula de desgaste (SEMANTIC SCHOLAR, 2020).

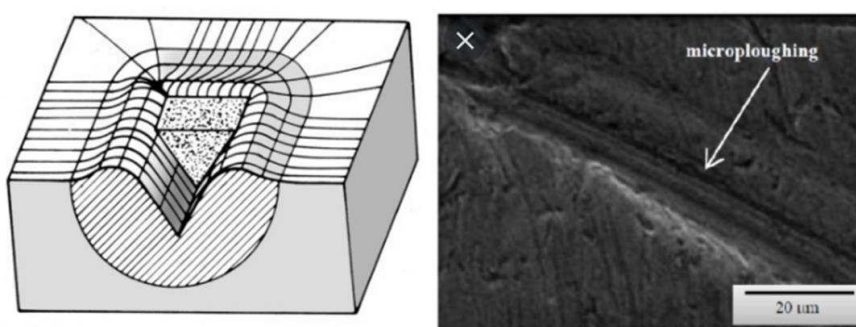


Figura 73 – Microploughing
Fonte: *Semantic scholar* (2020)

2.2.4.2. Tipo de defeito por *microcutting*

Muito dessa visão mais complexa do desgaste abrasivo é relativamente nova, uma vez que, como todas as formas de desgaste, os mecanismos de desgaste abrasivo são ocultados pelos próprios materiais. Até recentemente, demonstrações

diretas de mecanismos de desgaste abrasivo eram virtualmente inexistentes. O desenvolvimento do Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM) forneceu um meio de examinar alguns aspectos do desgaste abrasivo com mais detalhes. Em um estudo, um estilete arredondado foi feito para atravessar uma superfície durante a observação no SEM. Em outro estudo, uma plataforma de desgaste de um disco foi construída para operar dentro do SEM, para permitir observações diretas de desgaste. Dois mecanismos básicos foram revelados: um mecanismo de corte e um mecanismo de construção de cunha com detritos semelhantes a flocos. Este último mecanismo, chamado de "*plowing* (aragado)", foi considerado um modo menos eficiente de remoção de metal do que a "*microcutting* (micro corte)". Em um estudo separado com um aparelho semelhante, foi descoberto que detritos semelhantes a placas aleatórias foram formados por um ferro fundido de risco. É provável que, em uma situação real de desgaste, o efeito do corte por si só seja relativamente pequeno, pois muito mais material é perdido por um processo que tem características de corte e fadiga. A presença de um lubrificante também é um fator importante, pois pode encorajar o corte por abrasivo partículas. Quando um lubrificante está presente, o corte ocorre para uma proporção menor de penetração de areia para o diâmetro da areia do que no caso não lubrificado. Isso implica que se uma areia é rigidamente fixada, por exemplo, embutida em um metal macio, e é puxada sob carga contra um metal mais duro na presença de um lubrificante, então uma forma rápida de micro corte de desgaste abrasivo é mais provável de ocorrer do que quando nenhum lubrificante está presente. A geometria da areia também afeta o mecanismo de desgaste abrasivo. Foi observado que uma ponta com uma superfície fraturada contendo muitas "bordas de *microcutting*" remove muito mais material do que pontas piramidais ou esferoidais não fraturadas. Da mesma forma, uma areia originada de um material recentemente fraturado tem muito mais arestas de *microcutting* do que uma areia gasta que tem apenas bordas arredondadas conforme a Figura 74 (SEMANTIC SCHOLAR, 2020).

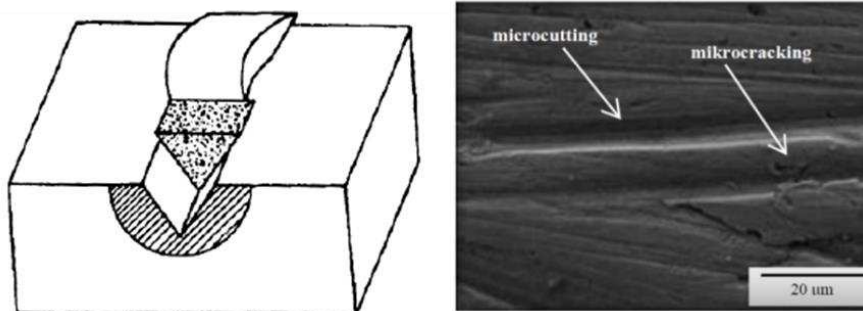


Figura 74 – Microcutting
Fonte: Semantic scholar (2020)

2.2.4.3. Tipo de defeito por *microcracking*

Evidências visuais de desgaste abrasivo por fratura frágil foram encontradas estudando-se a geração de fissura subsuperfície causada por um indentador afiado em um sólido transparente quebradiço, conforme ilustrado na Figura 75. Três modos de trinca foram encontrados: fissuras de ventilação propagando-se a 30° para a superfície, fragmentação localizada e uma fenda mediana profunda. Quando os grãos se movem sucessivamente pela superfície, o acúmulo de rachaduras pode resultar na liberação de grandes quantidades de material (Figura 76). A fratura do grão é favorecida por altas cargas atuando em cada grão e bordas afiadas no grão, bem como fragilidade do substrato. Uma vez que, na maioria dos casos, o endurecimento do material tem a desvantagem de reduzir a tenacidade, pode ser possível que um material endurecido que resiste ao desgaste abrasivo causado por grãos rombos levemente carregados se desgaste repentinamente muito rapidamente quando grãos muito carregados são substituídos. Portanto, um material que é resistente ao desgaste contra o movimento, grãos bem desgastados (por exemplo, areia de rio) pode ser totalmente inadequado em aplicações que envolvem partículas de arestas afiadas, como o esmagamento de quartzo recentemente fraturado (SCIENCE DIRECT, 2021).

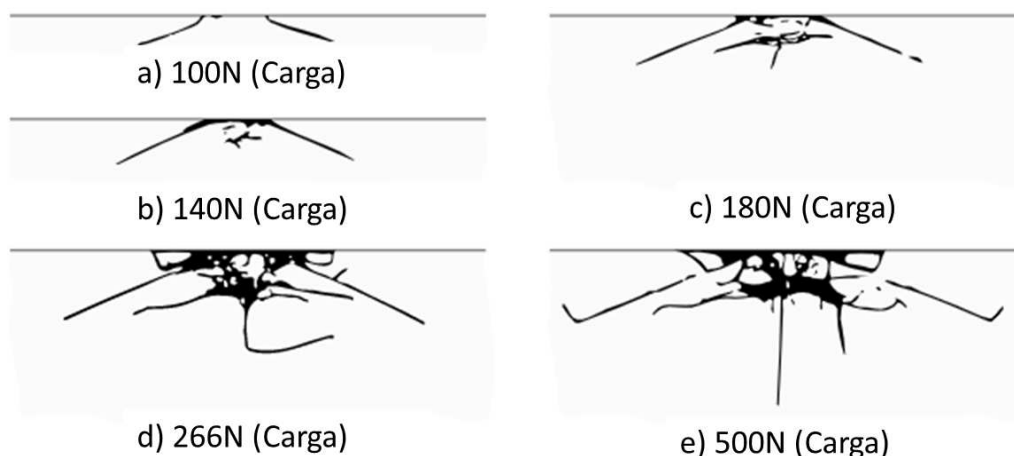


Figura 75 - Geração de rachaduras sob um indentador em sólidos quebradiços
 Fonte: Science direct (2021)

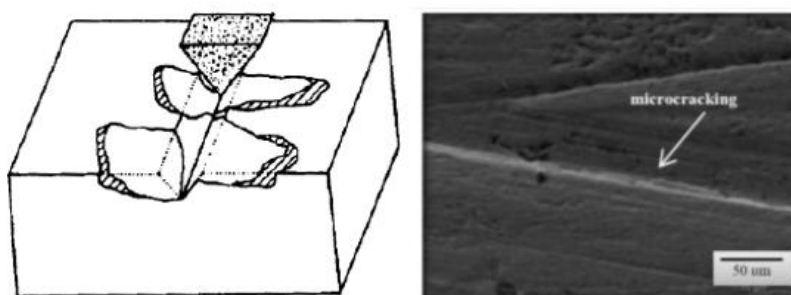


Figura 76 – *Microcracking*
 Fonte: Semantic Scholar (2020)

2.2.5 Análise de desgaste

Muitas técnicas bem estabelecidas para a medição e caracterização de materiais e suas superfícies foram aplicadas com sucesso em investigações tribológicas publicadas. Além disso, técnicas especializadas têm sido desenvolvidas em muitos casos para fornecer informações para questões únicas que surgiram em tais investigações. As análises a seguir discutem as técnicas de caracterização mais utilizadas, juntamente com métodos especiais selecionados, e fornecem exemplos e referências a aplicativos bem-sucedidos. O objetivo é dar ao leitor uma visão ampla das escolhas disponíveis entre as técnicas de caracterização laboratorial, além de fornecer breves descrições dos fundamentos envolvidos com cada técnica. A ênfase nas apresentações está nos próprios métodos. A maioria das técnicas de caracterização discutidas nesse artigo são razoavelmente bem desenvolvidas (microscopia leve, por exemplo); no entanto, sua aplicação a investigações de atrito,

lubrificação e desgaste introduziu novos e difíceis desafios. No entanto, a gama de questões associadas à tecnologia tribológica é tão ampla que os leitores são alertados para estarem atentos a diferenças significativas que podem existir entre sua aplicação e qualquer exemplo específico que está sendo discutido. As técnicas descritas a seguir seriam normalmente aplicadas em um ambiente laboratorial a amostras de laboratório de programas de teste ou pesquisa, ou a espécimes destinados ou removidos de serviço, ou seja, componentes reais em sistemas tribológicos. De qualquer forma, é essencial que todas as partes do sistema tribológico sejam consideradas. Há ampla discussão em outros lugares neste da complexidade do atrito, lubrificação e desgaste dos fenômenos. Tanto o tipo quanto a significância de cada processo envolvido no fenômeno tribológico global variam de caso a caso. A aplicação correta e útil das informações obtidas a partir das técnicas de caracterização aplicada depende de uma consideração completa e abrangente de todos os aspectos: os corpos sólidos, o meio ambiente e quaisquer produtos de dano da operação ou teste.

2.2.5.1. Análise de desgaste por perda de massa

O dano de desgaste que leva à perda substancial de material é talvez a situação mais simples de descrever quantitativamente. Exemplos comuns incluem o desgaste abrasivo no manuseio de materiais sólidos, como ocorre na indústria de mineração. A perda de desgaste pode ser determinada medindo a mudança de massa ou a mudança dimensional, que é discutida na próxima seção deste artigo. Como a maioria dos laboratórios tem acesso a equipamentos que pesam objetos, o método é simples. É necessário que uma peça ou espécime original (ou equivalente) seja pesado, e que o peso do objeto após a exposição ao desgaste seja determinado e subtraído do original para determinar a diferença de peso (isto é, mudança de massa).

À medida que as peças envolvidas se tornam menores e mais leves, ou a perda de desgaste se torna menor, será necessário usar equipamentos de pesagem cada vez mais sensíveis. Em algum momento, a mudança de massa será muito pequena para que o método seja viável. Outros problemas com esta abordagem incluem a necessidade de limpar a amostra cuidadosamente para evitar que a matéria-prima na superfície contribua para qualquer diferença de peso. É claro que todos os fluidos ou sólidos utilizados na limpeza devem ser completamente removidos ou secos. Outra consideração é que o material que foi plasticamente deslocado pelo processo de

desgaste, mas não realmente removido da peça, não será incluído na diferença de peso.

A quantidade de desgaste pode ser descrita pela quantidade absoluta de perda de massa (em gramas), ou pela taxa de perda de massa por unidade de uso (gramas por dia), ou por uma alteração fracionada na massa da peça envolvida (variação de 1% por 100 horas de operação). Em muitas áreas da engenharia, a escolha da unidade de reportagem é frequentemente convencional. Na maioria dos padrões de desgaste da ASTM, a unidade de relatórios de desgaste é um milímetro cúbico de volume, em vez de massa, para que materiais com densidades diferentes possam ser mais bem comparados. Um exemplo nesta categoria, a partir de medições laboratoriais, pode ser a aplicação de um teste de desgaste abrasivo padrão, ASTM G 65.

O teste envolve o carregamento de uma amostra contra uma roda rotativa de aro de borracha, enquanto um fluxo de areia abrasiva é direcionado para a zona de contato. Este teste é amplamente utilizado pela indústria para auxiliar na seleção de materiais para o serviço de desgaste abrasivo. Escolhas de cargas e distâncias deslizantes são detalhadas no método de teste. Uma fotografia de uma cicatriz de desgaste em um espécime típico é mostrada na Figura 77. Como o teste é um padrão, tem sido utilizado em muitos estudos Inter laboratórios de diferentes materiais (ASTM, 2012).

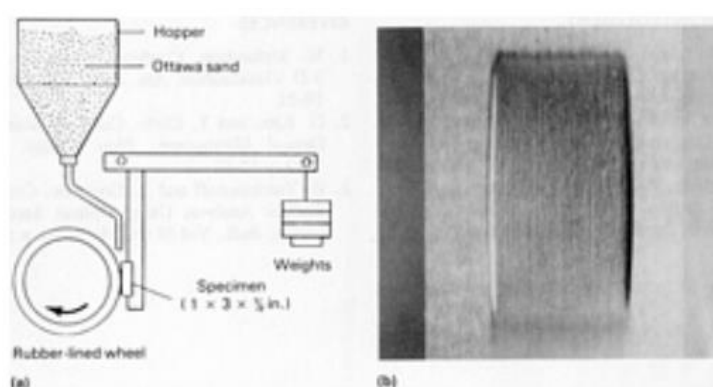


Figura 77 - Visão esquemática do teste de desgaste abrasivo ASTM G65
Fonte: ASTM (2012)

Um conjunto de resultados de um estudo do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) de uma ferramenta de aço, mostrado na Figura 78, é expresso em termos de perda de massa (em gramas) e desgaste da profundidade máxima da

cicatriz (em polegadas). Alguma ideia da variação observada do teste para o teste pode ser vista. A precisão *interlab* para este teste pode ser tão baixa quanto 3% (relativa), e precisão *interlab*, tão baixa quanto 5%. Dados adicionais sobre outros materiais podem ser encontrados no próprio padrão. A abordagem de medir a mudança de massa neste método de teste é geralmente rápida e barata, e os custos com amostras podem ser baixos. Materiais de sobreposição de solda, revestimentos, cerâmicas, compósitos e muitos outros tipos de materiais podem ser estudados usando este método (ASTM, 2012).

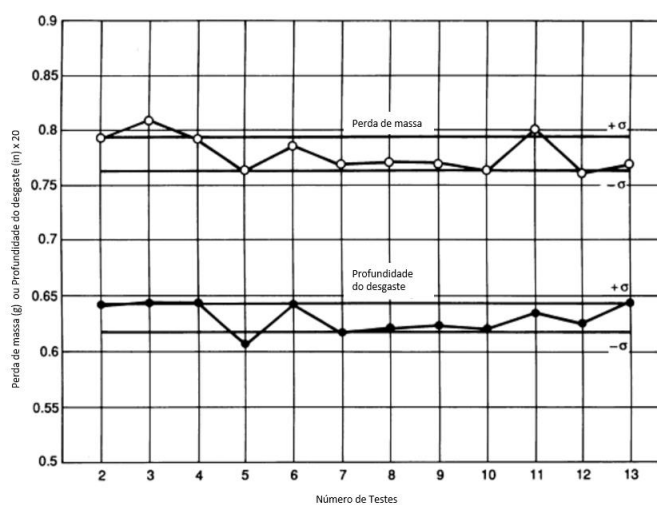


Figura 78 – Gráfico da variação da perda de massa e profundidade do desgaste de uma peça
Fonte: ASTM (2012)

2.2.5.2. Análise de desgaste por dureza

O teste de dureza é uma ferramenta importante para caracterizar as características próximas da superfície de materiais, tratamentos superficiais e revestimentos. É amplamente utilizado tanto em aspectos aplicados quanto em pesquisas de tribologia. É um subgrupo do campo geral de testes de dureza de penetração, mas as forças relativamente baixas aplicadas (tipicamente, 0,01 a 10 N, ou 1 a 1.000 gf) tornam-no particularmente sensível às propriedades mecânicas próximas à superfície dos materiais. Alguns usos comuns de testes de dureza (microdureza) incluem:

- Investigar as variações na dureza de penetração entre várias fases em uma microestrutura
- Caracterização inicial das superfícies dos materiais para aplicações de desgaste

- Controle de qualidade de tratamentos de superfície ou revestimentos
- Traçar o perfil da profundidade das camadas e revestimentos da superfície endurecida
- Avaliar a natureza dos danos subterrâneos em superfícies ou abaixo de usinadas
- Avaliar a natureza dos danos subsuperficial nas superfícies de desgaste ou abaixo

Além da determinação do número de dureza, existem outros usos especializados de técnicas de penetração em tecnologia de atrito e desgaste. Estes incluem:

- Uso de penetrador como marcadores de desgaste
- Uso de penetrador para gerar rachaduras para determinar a dureza da fratura de materiais frágeis

O desenvolvimento de equipamentos instrumentados de teste de chanfro nos últimos anos permite o monitoramento direto e o registro da força instantânea versus a profundidade de deslocamento para testes de dureza. Tais equipamentos oferecem a vantagem de não exigir medição óptica do recuo. No entanto, exige calibrações de profundidade de penetração muito precisas.

O objetivo do teste de dureza é obter um valor numérico que distingue entre a capacidade relativa dos materiais de resistir à penetração controlada por um tipo especificado de penetração que geralmente é muito mais difícil do que o material que está sendo testado (Figura 79). Uma exceção notável está no teste de dureza de materiais muito duros, como diamante, onde a penetração e a amostra de teste podem ser iguais ou quase iguais na dureza (ASTM, 1983).

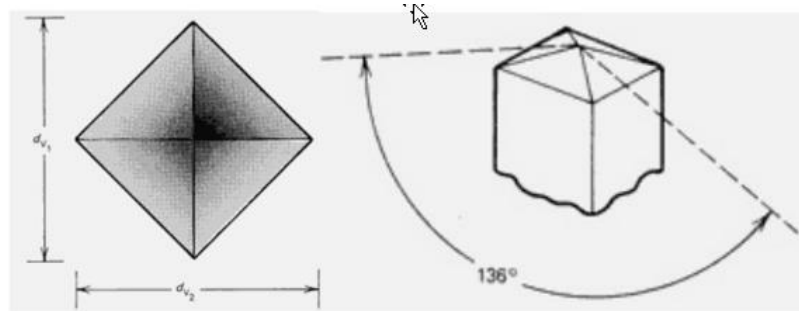


Figura 79 - dimensão de resposta e geometria para o tipo de penetração Vickers
Fonte: ASTM (1983)

2.2.5.3. Análise de desgaste por metalografia

O desgaste ocorre em três dimensões. Não só a superfície está envolvida, mas a zona de subsuperfície na região da cicatriz de desgaste também é significativamente alterada. A subsuperfície é submetida a uma deformação plástica muito alta e ocorrem alterações microestruturais. Vazios subsuperficial e laminações são gerados durante o uso de alguns materiais. A fase ferrita em ferro nodular tende a expulsar ao redor dos nódulos de grafite e fluir para a superfície. Durante a fadiga de contato de rolamento, as fases de decomposição de carbonetos e gravuras brancas se desenvolvem na zona máxima de tensão de estresse na região próxima à superfície. Padrões de trinca subsuperficial se desenvolvem em cerâmica como resultado de estresses de contato excessivos. Por causa dos fenômenos acima, o exame da região da cicatriz de desgaste subsuperficial geralmente é necessária para definir completamente o processo de desgaste conforme a Figura 80 e Tabela 18 (ASTM, 1983).

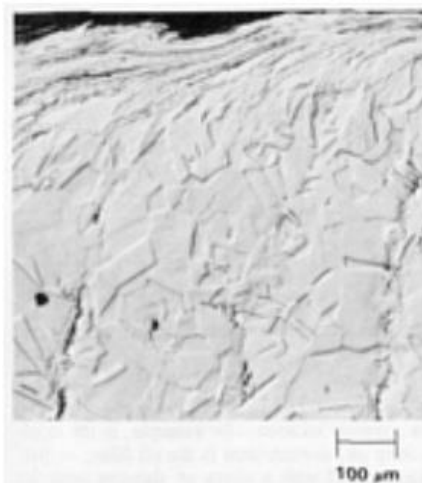


Figura 80 - Seção metalográfica através de uma cicatriz de desgaste que foi gerada por um teste de desgaste anel-no-bloco em um bloco de aço inoxidável tipo 304
Fonte: ASTM (1983)

Tabela 18 - Resoluções típicas obtidas por diversas técnicas de microscopia e olho humano

Microscopia					
Microscópios	Resolução aproximada ^(a)	Ampliação	Fonte	Requisito amostra	Cristalografia
Olho Humano	100 μm	---	Luz	Material (Volume)	Não
Microscópio de Luz ("Light Microscope")	100 nm	5-1500x	Luz	Material (Superfície) polida	Não
Microscópio eletrônico de varredura -MEV ("Scanning electron microscope - SEM").	10 nm	100-200,000x	Feixe eletrônico	Material (Volume)	Sim/Não dependendo modelo
Microscópio eletrônico de transmissão - MET ("Transmission electron microscope TEM").	0.5 nm	1,000-300,000x	Feixe eletrônico	Filmes finos (espessura ~100 nm)	Sim
Microscópio eletrônico de transmissão de alta resolução - MET ("High Resolution Transmission electron microscope HREM")	0.1 nm	3,000-1,000,000x	Feixe eletrônico	Filmes finos (espessura ~100 nm)	Sim
$\text{mm} = 0.001 \text{ m}$ $\mu\text{m} = 0.000001 \text{ m}$ $\text{nm} = 0.000000001 \text{ m}$ ^(a) $\text{mm} = 10^{-3} \text{ m}$; $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$; $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$; $\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$					

Fonte: Maliska, 2021

2.2.5.4. Análise de desgaste por MEV

Uma compreensão abrangente dos processos de desgaste requer um conhecimento completo da natureza e das mudanças vivenciadas pelas áreas de contato. A primeira etapa na investigação de um problema de desgaste consiste na coleta de todos os dados pertinentes sobre parâmetros de contato, taxas de desgaste, forças de atrito e meio ambiente circundante. O próximo passo é geralmente a observação das superfícies gastas por meio de um microscópio óptico. Na maioria dos laboratórios de pesquisa, isso é seguido rotineiramente por um exame mais extenso usando um microscópio eletrônico de varredura (SEM). A grande profundidade de campo e a alta resolução do SEM em comparação com o microscópio óptico, e sua capacidade de determinar a composição por meio de instalações associadas de análise de raios X, fizeram do SEM o principal instrumento utilizado no estudo de superfícies gastas. Quando são necessárias informações mais detalhadas sobre a microestrutura, um microscópio eletrônico de transmissão (TEM) pode ser empregado.

Em geral, existem três facetas diferentes na investigação do desgaste a que a microscopia eletrônica é aplicada (Figura 81). O primeiro envolve o estudo das superfícies de contato. Em uma situação em que a abrasão ou erosão de partículas sólidas é encontrada, o exame das partículas abrasadas ou erodindo também é quase sempre de vital importância. O tamanho das partículas, a forma, a composição e a

microestrutura muitas vezes têm uma influência controladora no processo de desgaste. Como as alterações na superfície causadas pelo desgaste são geralmente uma questão crítica, a análise normalmente incluirá um exame comparativo de uma região de superfície semelhante ou adjacente que não foi submetida ao desgaste. Deve-se notar aqui que o uso do termo "superfície" é um pouco ambíguo, referindo-se não apenas ao limite externo do corpo, mas também a um volume de material dentro do corpo abaixo do limite que foi afetado pelo contato tribológico. Isso pode incluir filmes de reação, material transferido e detritos compactados, bem como material original do corpo. Quando uma referência específica é feita à região abaixo do limite, o termo "subsuperfície" é frequentemente usado.

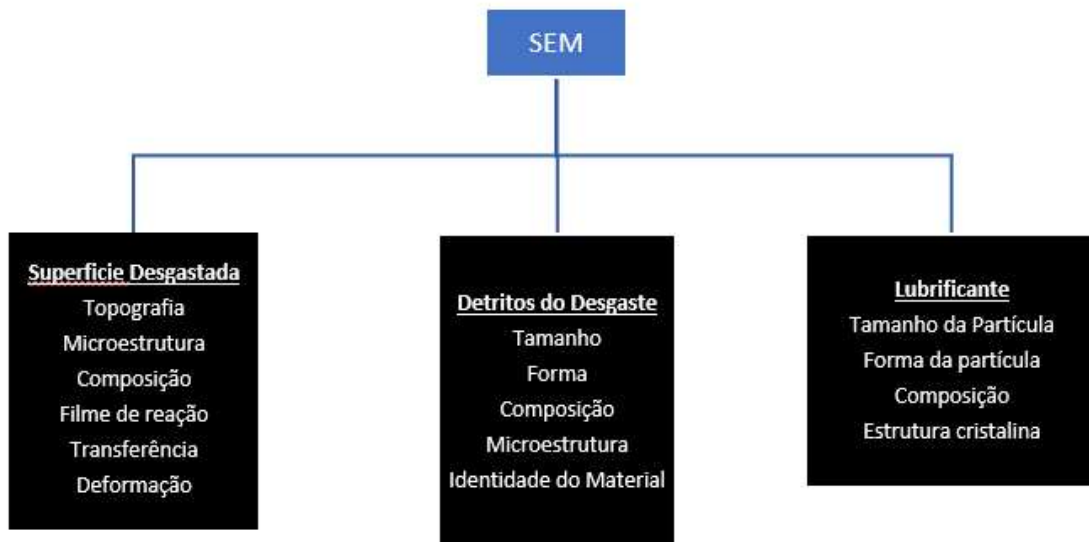


Figura 81 - Facetas do desgaste para aplicação no MEV (SEM)
Fonte: Próprio autor, 2021

No SEM um feixe de elétrons é direcionado para um local na amostra (*specimen*). As interações que podem ocorrer são retratadas esquematicamente na Figura 82. Cada uma dessas interações é uma fonte de informação que pode ser explorada para revelar propriedades dos espécimes. Através do controle do feixe de elétrons incidente e uso de um sistema de detecção adequado, informações únicas podem ser obtidas sobre topografia de superfície da amostra, estrutura cristalina, defeitos de latitude (por exemplo, luxações e falhas de empilhamento), distribuição e morfologia de fases, estrutura de domínio magnético, presença de carga elétrica, variações de tensão, composição atômica e ligação atômica. As informações podem

ser apresentadas na forma de uma imagem, um gráfico ou como dados tabulados (UFRGS, 2015).

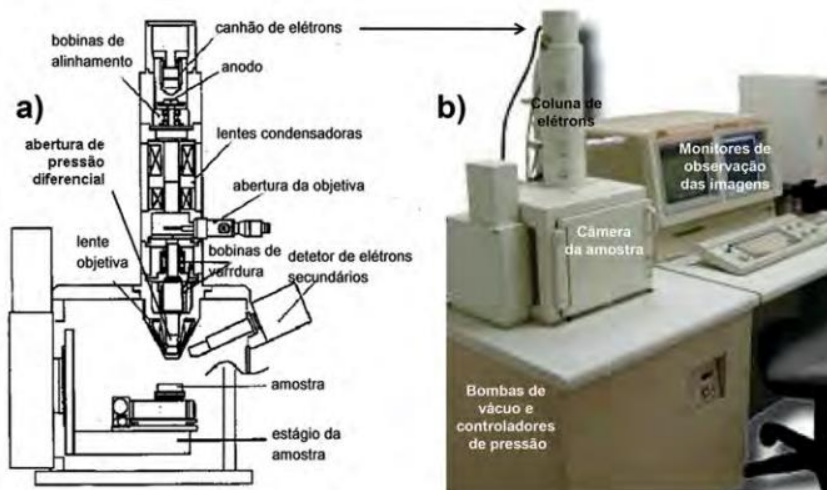


Figura 82- (a) Diagrama da coluna e câmera de um SEM (b) Fotografia de um SEM de baixo vácuo
Fonte: UFRGS, 2015

2.2.5.5. Análise de material impregnado na superfície por EDS

A utilização de raios X emitidos para determinar a composição da amostra é uma capacidade extremamente importante do SEM. A descrição do método como sendo uma microanálise é justificada pelo pequeno volume a partir do qual as informações são obtidas e pela sensibilidade da técnica. O tamanho pode ser aumentado pelo fato de que os raios X gerados dentro do volume de interação podem fluorescer raios X adicionais fora do volume antes de atingir a superfície (Figura 83). Para que a fluorescência ocorra, os raios X de saída deve exceder a energia de ionização da concha à qual pertence os raios X fluorescente. Dois tipos de espectrômetros de raios X são empregados. O espectrômetro dispersivo de comprimento de onda (WDS) separa os raios X emitidos de acordo com o comprimento de onda. Os raios X que entram no espectrômetro são Bragg difundido por um cristal único apropriado, e a intensidade é medida por meio de um contador proporcional. Ao girar e mover adequadamente o cristal e o contador, o espectro de raios X emitidos pode ser escaneado de forma serial. Para cobrir a faixa espectral completa, no entanto, pode exigir mais de um cristal. A concentração mínima de um elemento que pode ser detectado pode ser tão baixa quanto 0,01% em condições favoráveis.

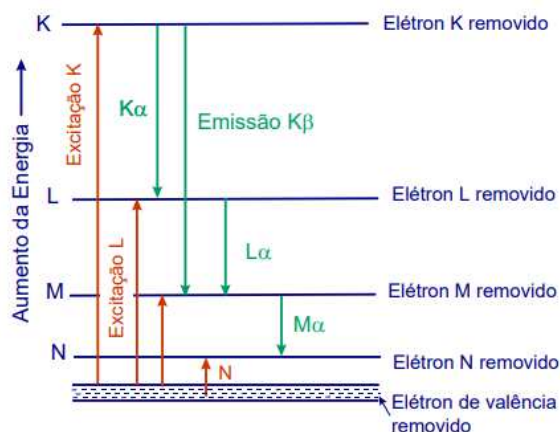


Figura 83 - Diagrama dos níveis de energia de um átomo mostrando a excitação das camadas K,L,M e N e a formação de raios X $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$ e $M\alpha$

Fonte: Maliska, 2021

O segundo tipo de espectrômetro de raios X que separa os raios X emitidos de acordo com a energia e é, portanto, referido como um espectrômetro de dispersão de energia (EDS). Um diodo semicondutor, na maioria das vezes silício no qual o lítio foi difundido (chamado detector de silício à deriva de lítio), é usado para medir os raios X. Algumas aplicações também são feitas de uma base de germânio devido à sua maior sensibilidade a raios X de baixa energia. Em ambos os casos, pares de elétrons-buracos produzidos por um fóton de raios X absorvido resultam em um pulso de carga proporcional à energia do fóton. Os pulsos são amplificados, moldados e classificados de acordo com a energia por meio dos componentes sucessores do sistema de análise. O número de pulsos, ou contagens, é uma indicação direta da intensidade de raios X emitida na energia dada. O resultado líquido é um espectro de intensidade de raios X que pode ser exibido em função da energia. Em contraste com o sistema WDS, o sistema EDS detecta raios-x de todas as energias à medida que são entregues ao detector — ou seja, efetivamente em paralelo, em vez de serial — resultando em um processo de aquisição muito mais rápido. Por outro lado, a resolução EDS de linhas de raios X próximas (150 eV) é (20 eV). O cristal do detector EDS deve ser mantido a uma temperatura de nitrogênio aproximadamente líquido em um vácuo elevado. A proteção contra o ambiente externo é fornecida por uma janela. A janela é geralmente construída a partir de um filme fino de berílio, mas filmes de polímero e diamante estão sendo cada vez mais usados. A absorção na janela diminui a sensibilidade do detector a raios X de baixa energia. Assim, um detector equipado com uma janela de berílio limita-se à detecção de elementos com números atômicos iguais ou maiores que os

de sódio ($Z = 11$). O carbono ($Z = 6$) e até boro ($Z = 5$) podem ser detectados quando janelas de polímero e diamante são usadas conforme a Figura 84 (CBQ, 2014).

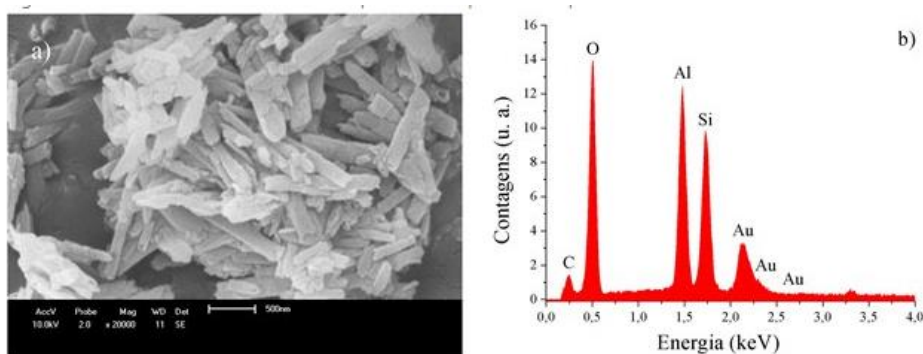


Figura 84 - (a) imagem de MEV (b) espectro do EDS amostra "a"
Fonte: CBQ (2014)

2.2.6 Desgaste em Metais

2.2.6.1. Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre devido as partículas duras ou protuberâncias duras que são forçadas contra e se movem ao longo de uma superfície sólida. O desgaste, por sua vez, é definido como dano a uma superfície sólida que geralmente envolve perda progressiva de material e é devido ao movimento relativo entre essa superfície e uma substância ou substância de contato. Por exemplo, um indivíduo subindo as escadas de um prédio seria mais propenso a pensar que seus sapatos, em vez das escadas, estavam experimentando desgaste abrasivo, enquanto a equipe de manutenção teria a opinião oposta. Na verdade, ambas as superfícies estão sendo submetidas a desgaste abrasivo. A taxa em que as superfícies se abram depende das características de cada superfície, da presença de abrasivos entre a primeira e a segunda superfícies, da velocidade de contato e de outras condições ambientais. Em suma, as taxas de perda não são inerentes a um material.

Em relação ao exemplo acima, mudar o material dos sapatos ou dos degraus poderia, e muitas vezes, alterar o desgaste no contraposto. A adição de uma abrasiva, como uma camada de areia, nos degraus mudaria ainda mais a situação, na medida em que a areia seria a segunda superfície que contata tanto os sapatos quanto os degraus. A abrasão é tipicamente categorizada de acordo com tipos de contato, bem como ambiente de contato. Os tipos de contato incluem desgaste de dois corpos e três corpos. O primeiro ocorre quando um abrasivo desliza ao longo de uma superfície,

e o segundo, quando um abrasivo é preso entre uma superfície e outra. Sistemas de dois corpos normalmente experimentam de 10 a 1000 vezes mais perdas do que sistemas de três corpos para uma determinada carga e comprimento de desgaste do caminho. Os ambientes de contato (Figura 85) são classificados como abertos (gratuitos) ou fechados (restritos) (ASTM, 1983).

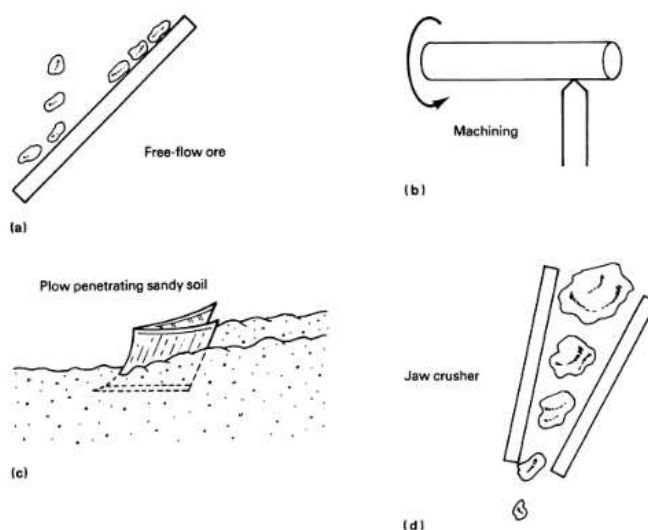


Figura 85 - Tipos de contatos abrasivos (a) alimentação em esteiras de mineração (b) usinagem em peças (c) pá de arado entre metal e terra (d) trituradores
Fonte: ASTM (1983)

2.2.6.2. Desgaste Adesivo e por transferência de material.

Desgaste deslizante e adesivo referem-se a um tipo de desgaste gerado pelo deslizamento de uma superfície sólida ao longo de outra superfície (Figura 86). Erosão, cavitação, contato de rolamento, abrasão, desgaste oxidativo, trastes e corrosão são tradicionalmente excluídos da classe de problemas de desgaste "deslizantes", embora algum deslizamento (deslizamento) possa ocorrer em alguns desses tipos de desgaste. Aparentemente, o desgaste deslizante é uma categoria de desgaste que é "sobra" quando todos os outros tipos de desgaste são identificados em títulos separados. O desgaste adesivo é tão ambíguo definido quanto o desgaste deslizante, embora os dois não sejam estritamente sinônimos. O desgaste adesivo denota uma ação de desgaste na qual nenhuma agência específica pode ser identificada como a causa do desgaste.

A adesão foi confirmada na década de 1930 como um dos principais contribuintes para a resistência deslizante (atrito) e foi inferida na mecânica pelo

menos para ser operada em desgaste também. Assim, se não forem encontradas substâncias abrasivas, se a amplitude do deslizamento for maior do que a do desgaste, e se a taxa de perda material não for regida pelos princípios da oxidação, e assim por diante, o desgaste adesivo é dito para ocorrer. A adesão é mais claramente demonstrada em sistemas deslizantes quando, por exemplo, um eixo se aproveita em um rolamento. Mais uma vez, a adesão está empregada na escoriação e na fricção (que alguns pesquisadores classificam como dano superficial em vez de desgaste) mesmo quando nenhum material é perdido do sistema. A partir desses exemplos, pode-se ver que a adesão não é a causa do desgaste, mas apenas a consequência do contato. O desgaste ocorre quando as interfaces em contato são feitas para deslizar e as regiões aderidas localmente devem se separar. Essa separação pode ocorrer por um ou dois dos modos de falha dos sólidos, resultando em uma ampla gama de taxas de desgaste. O objetivo na definição e estudo de modos específicos de desgaste é encontrar maneiras de prolongar a vida útil dos sistemas deslizantes. Cada modo de desgaste pode ser mais bem resistido pela escolha adequada do material, lubrificante e método de operação. Infelizmente, a fabricação de produtos de uso lento (velocidade) requer uma experiência considerável, pois há muitos poucos princípios fundamentais em atrito e desgaste para usar no processo de design.

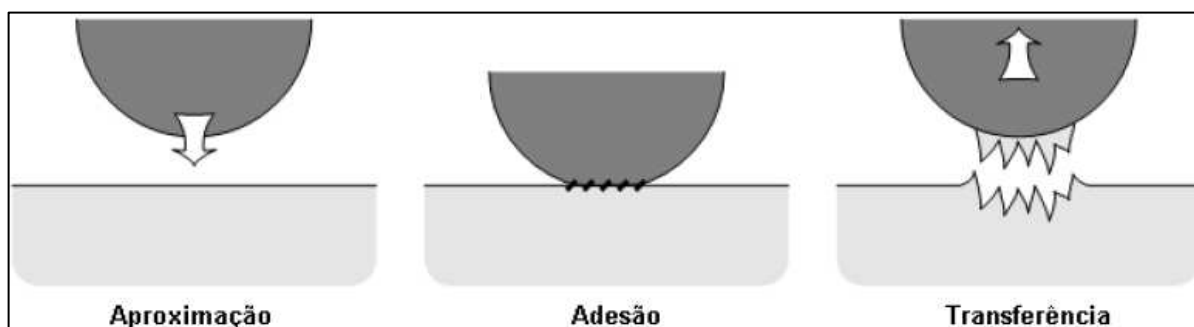


Figura 86 - Esquema de Desgaste Adesivo
Fonte: Teixeira (2012)

2.2.6.3. Desgaste triboquímico

Silva (2010) afirma que a formação de produtos de reações químicas é um fenômeno bem conhecido quando se fala em contatos de deslizamento. Zum Gahr (1987) menciona que este processo é classificado como moderado ou severo é devido a contato entre os corpos onde estão envolvidos eventos como adesão, deformação plástica, formação de junção e transferência de material. Este desgaste resulta em adesivo. Este ocorre apenas quando o contracorpo é “liso” e envolve a transferência

de material para o contracorpo mais duro e subsequente remoção como partícula de desgaste .

O desgaste corrosivo ocorre em uma vasta gama de situações. A causa fundamental desta forma de desgaste é a reação química que ocorre entre o material desgastado e um meio agressivo quimicamente, que pode ser tanto um reagente químico, um lubrificante ou mesmo ar. Desgaste corrosivo é um termo geral relacionado com qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo, conforme Figura 87. Ainda segundo os autores, nesta forma de desgaste a taxa de desgaste aumenta enquanto o coeficiente de atrito reduz. Esta contradição que ocorre entre atrito e o desgaste serve para identificar estes processos de desgaste (TEIXEIRA, 2012).

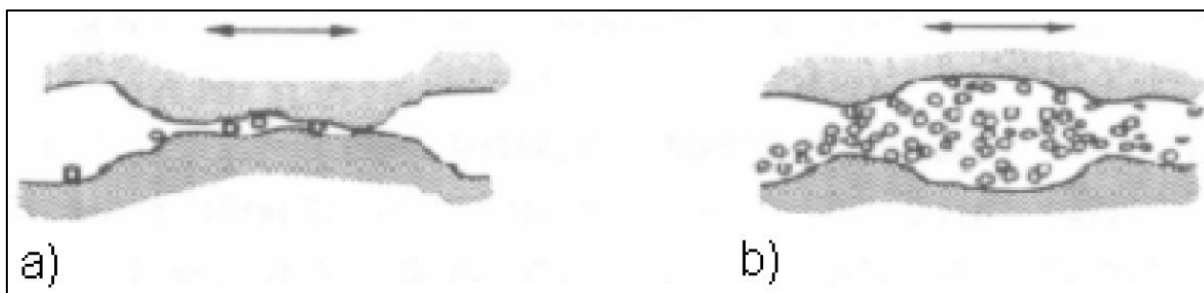


Figura 87 – (a) Desgaste corrosivo - início da reação química entre as superfícies; (b) Desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão

Fonte: Teixeira (2012)

ZUM (1987) define que o desgaste por reação triboquímica é caracterizado quando duas superfícies sólidas em contato reagem com o ambiente. E pode ser dividido em quatro categorias:

- a) O contato metálico entre as asperezas da superfície que promove a remoção de metal devido à aderência. Pequenos detritos do desgaste produzidos podem estar oxidados;
- b) Reação química de metais com o ambiente resulta em camadas de proteção superficial que reduz o contato metálico;
- c) Trincamento da camada superficial devido a altas pressões localizadas ou microfadiga resultando em detritos de desgaste não metálico;
- d) Detritos de desgaste metálico e não metálicos podem atuar como abrasivos nas superfícies em contato. A formação de uma nova camada de proteção pode levar ao amaciamento das superfícies novamente.

2.2.6.4. Desgaste por Fadiga

O desgaste devido à fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e destacamento de material causado pelo carregamento cíclico da superfície sólida. A fadiga localizada pode ocorrer em escala microscópica devido ao contato de deslizamento repetido das asperezas de uma superfície sólida em movimento relativo (Figura 88).

SCHEY (1984) menciona que a classificação do desgaste por fadiga separa os modos de ocorrência de acordo pelo modo como os esforços agem e como o material é removido.

SCHEY (1984) classifica da seguinte maneira

- *Pitting* se refere à formação de cavidades na superfície. Isto ocorre pela formação de trincas subsuperficiais causadas por deslizamento ou rolamento repetitivo; o crescimento destas trincas em direção à superfície produz uma fratura localizada. Concentradores de tensão no material, como carbonetos, aumentam a suscetibilidade ao problema.
- O *spalling* ou lascamento é a fratura e remoção de material da superfície na forma de escamas. O mecanismo causador é o mesmo que no *pitting*, porém a forma como ele se manifesta é mais intensa. É comum em peças revestidas ou com tratamento superficial.
- O desgaste causado por impacto em uma superfície é mais associado à deformação plástica, mas esforços repetitivos podem provocar falha superficial por fadiga. Neste caso, os repetidos choques entre superfícies ocasionam os mecanismos de surgimento e propagação de trincas, que desencadeiam os dois processos já abordados de *pitting* e *spalling*. Ocorre em ferramentas como martelos e furadeiras pneumáticas.
- O *brinelling* é o dano superficial que surge por carga excessiva em um elemento estacionário. O dano consiste em deformação plástica, e ocorre em um único evento. Embora a ocorrência em um único evento descaracterize à fadiga, este modo de falha é classificado neste grupo por que ele ocorre em componentes que são submetidos a cargas que ultrapassem a sua tensão de escoamento.

Na Figura 89, uma trinca primária é formada em algum ponto fraco da superfície (a) e se propaga (b). Uma trinca secundária pode ser desenvolvida a partir da trinca primária ou se conectar com uma trinca na subsuperfície. Quando a trinca desenvolvida encontra a superfície novamente, uma partícula de desgaste é liberada

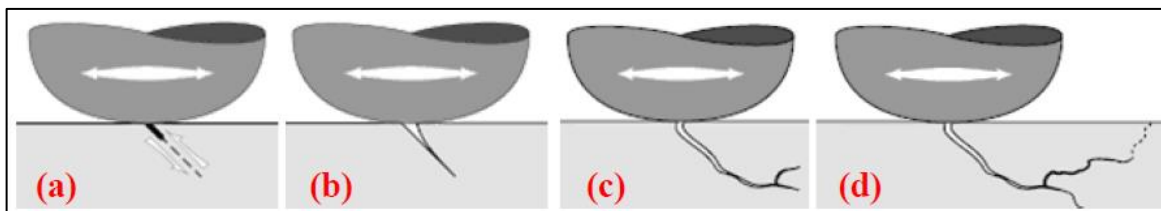


Figura 88 - Mecanismos de propagação de trinca durante o processo de fadiga
Fonte: Santana (2009)

2.2.6.5. Desgaste por atrito "*Fretting wear*"

Segundo Bhushan (2013), o desgaste por atrito "*fretting wear*", ocorre quando movimento oscilatório de amplitude baixa na direção tangencial (variando de um pouco de dezenas de nanômetros para um pouco de dezena de microns) acontece entre as superfícies de contato, que estão normalmente em repouso, conforme Figura 89. Isso é uma ocorrência comum, desde que muitas máquinas são sujeitadas a vibração, ambos em trânsito e operação. Ainda de acordo com o autor exemplos de componentes vulneráveis são encaixe justos, peças parafusadas e entalhes. Os contatos entre cubos, encaixe justo e prensado e caixas de rolamento em eixos rotativos com carga são particularmente propenso a causar danos por atrito (ASM, 1992).

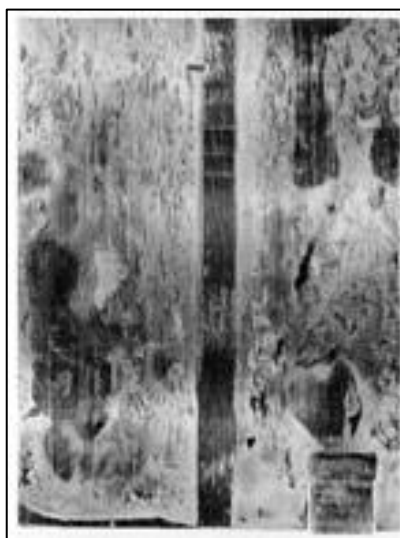


Figura 89 - Danificação por atrito "*fretting damage*" ocorrido no anel do rolamento por causa de pressão de contato insuficiente entre o anel e a caixa do rolamento.

Fonte: ASM (1992)

Sobre "definir" Bhushan (2013) afirma que

Basicamente, *fretting* é uma forma de desgaste adesivo ou abrasivo, onde os forças normais causam adesão entre as asperezas e os movimentos oscilatórios causam ruptura,

resultando em detritos do desgaste. Mais comumente, *fretting* é combinado com corrosão, do qual nesse caso o modo de desgaste é conhecido como atrito por corrosão. Por exemplo, no caso de partículas de ferro, o desgaste recente é nascente da superfície oxidada (corroída) para Fe_2O_3 , e a característica fina marrom avermelhada em pó é produzida conhecido como cacau.

2.2.6.6. Desgaste por erosão

Partícula sólida de erosão, é um típico modo de desgaste, é a perda de material resultante de um impacto repetitivo de pequenas partículas sólidas, conforme Figura 90. É esperado sempre que as partículas duras são arrastadas em um meio de gás ou líquido que invade um sólido a qualquer velocidade significativa. Em ambos os casos, partículas podem ser aceleradas ou desaceleradas, e o fluido pode mudar as direções de movimentação .

Apesar do processo principal ser o impacto mecânico, causado pelo choque das partículas sólidas no material em alvo, processos secundários, como térmico, químico, e reações físicas entre as contrapeças estão ocorrendo durante erosão. Ainda de acordo com os autores, estudos para desenvolver o entendimento dos mecanismos de um desgaste erosivo foi motivado por redução de vida útil e falhas mecânicas em componentes usado em ambientes erosivos, por exemplo tubulações transportando lixívia de areia, na refinação de petróleo, na turbo a gás de avião/lâminas de compressor, em bocais de cauda do motor do foguete, tubos de caldeira expostos a cinzas volantes.

Para WANG (2013), basicamente os mecanismos de desgaste na erosão por partículas sólidas são: o corte, sulcamento, deformação plástica, a fratura frágil e a fusão. O autor afirma, que os mecanismos de corte e sulcamento são semelhantes aos encontrados no desgaste abrasivo, desta forma o microsulcamento é definido como o deslocamento do material para o lado ou a frente da partícula abrasiva em deslocamento. Já quando há predominância de deformação plástica e da fratura frágil, as maiores taxas são encontradas com a incidência das partículas abrasivas em ângulos normais, caracterizando um comportamento frágil.

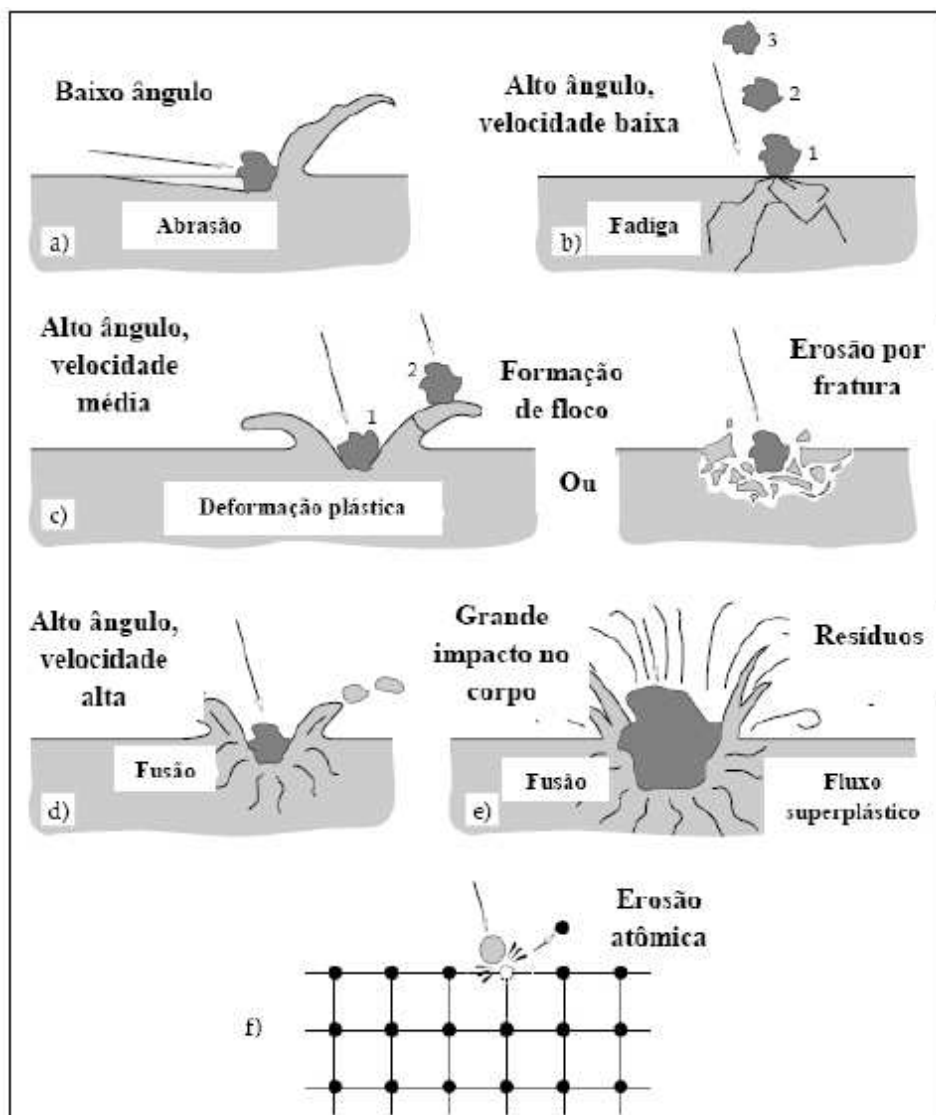


Figura 90 - Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo; d) fusão da superfície causada por altas velocidades de impacto; e) erosão macroscópica com efeitos secundários; f) degradação da rede cristalina por impacto de átomos
Fonte: Silva (2017)

2.2.6.7. Desgaste por delaminação

De acordo com Johnson (apud SILVA; SILVA; MEDEIROS, 2007) discutindo contatos mecânicos, mencionou que isto aparenta que as partículas do desgaste metálico comumente assumem a forma de plaquetas finas originado das trincas pertos da superfície paralela ou em um ponto agudo da superfície. Essa observação levou Suh a introduzir o termo desgaste por delaminação.

Para Suh (apud SILVA; SILVA; MEDEIROS, 2007) considerando que duas premissas poderiam ser feitas para o modelo de processo de desgaste por delaminação, conforme Figura 91. Na primeira premissa, Suh assumiu que, em

alguma fração do contato da aspereza, uma forte junção de escorregamento pode ser formada do qual pode causar o cisalhamento do material até a forma de uma folha desgastada. Na segunda premissa, foi assumido que a criação da folha desgastada pode ser um processo cumulativo, do qual resulta do material sendo cisalhado em pequenas quantidades a cada passagem pela aspereza. O criação da folha de desgaste ocorrerá somente depois de um grande número de asperezas da contraface que passou por cada ponto na superfície.

A espessura da folha desgastada é controlada pela localização do crescimento da trinca na subsuperfície, do qual é controlado pelos carregamentos normal e tangencial na superfície. Adicionalmente, comparado com a teoria do adesivo, a teoria da delaminação prediz que essa microestrutura afeta o comportamento do desgaste e demonstra que a dureza não é o único fator controlável (DASARI, 2009).

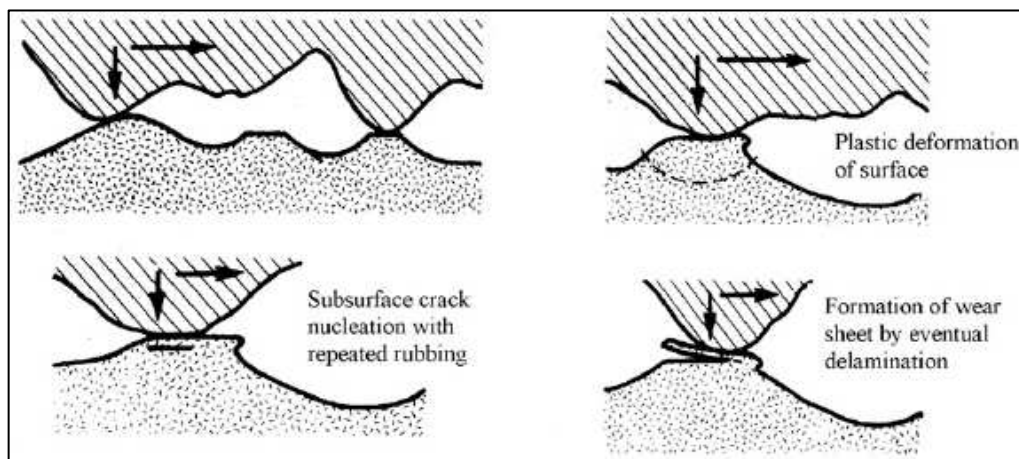


Figura 91 - Representação esquemática de vários estágios envolvidos na formação das folhas de desgastes por delaminação
Fonte: Dasari, (2009)

2.2.6.8. Coeficiente de Desgaste

De acordo com Kelly (2000 apud Klaas, 2013), em função de estudos arqueológicos, a humanidade reconhece a importância do desgaste dos metais por séculos. Ainda segundo o autor, as especificidades como a resistência ao desgaste de materiais duros em algumas situações apresentavam exceções e mostravam que partes do quebra-cabeça estavam faltando. Isso porque o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste são características do tribossistema e não propriedades intrínsecas dos materiais (KLAAS, 2013). Estudos afirmam que muitos tribossistemas já foram sugeridos, mais de 1000. Pela quantidade de pesquisadores que fizeram contribuições nessa área, é difícil citá-los (KELLY, 2000 apud KLAAS, 2013). A Figura 92 ilustra a classificação dos tipos de desgaste (por deslizamento, abrasivo, erosivo)

e posiciona-os quanto ao coeficiente de desgaste, onde são apresentados três mecanismos de desgaste que podem atuar separadamente ou em conjunto.

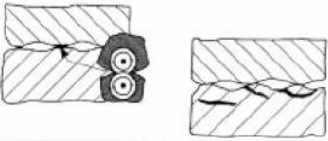

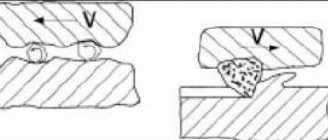
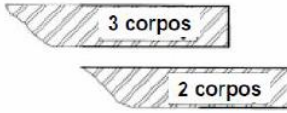
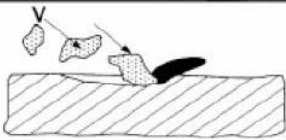

Modo de desgaste	Mecanismo de desgaste	Coeficiente de desgaste k								
		10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	
DESLIZAMENTO										
ABRASIVO										
EROSIVO										

Figura 92 - Valores do coeficiente de desgaste (k) para sistemas tribológicos sem lubrificação.

Fonte: Compilado de Klaas (2013)

O coeficiente de desgaste é, geralmente, determinada para as condições de atrito em regime estável, obtido após sucessivas passagens pela pista de deslizamento. Os parâmetros daí resultantes são frequentemente utilizados para descrever o comportamento do sistema tribológico. Equações 6 e 7 habitualmente utilizadas e são encontradas na literatura.

O Coeficiente de desgaste é dado pela equação:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot L} = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

W = coeficiente de desgaste (adimensional);

Δm = perda de massa;

ρ = a densidade do material;

A = área aparente de contato;

Δh = perda de espessura da peça ensaiada;

L = distância de deslizamento.

O Coeficiente de desgaste específico é obtido pela equação:

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} \left[\frac{mm^3}{N.m} \right] \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

W_s = Coeficiente de desgaste específico;

Δv = Volume do desgaste;

L = distância de deslizamento;

F_n = Carga normal aplicada.

2.2.7 Parâmetros tribológicos

Segundo Wang et al. (2008 apud Laranjeira, 2011), o comportamento tribológico de um dado par de materiais é influenciado por vários fatores, Figura 93. O coeficiente de atrito das poliamidas é bastante influenciado por factores como a carga, a velocidade de deslizamento, a temperatura. As propriedades do material, a umidade e a presença de lubrificação .

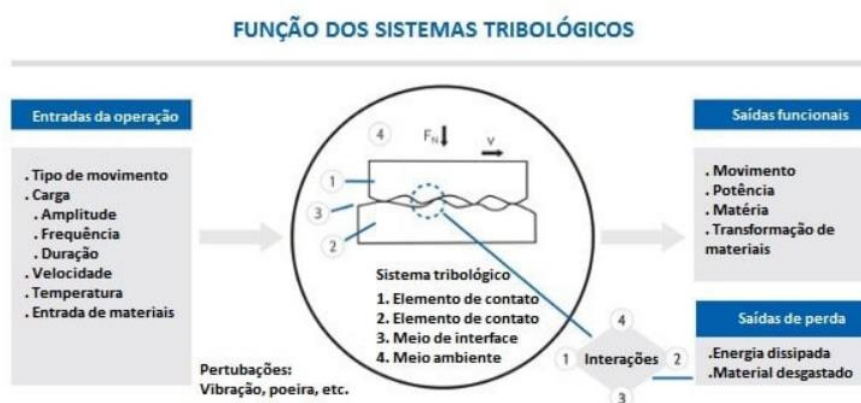


Figura 93 - Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico

Fonte: <https://www.abecom.com.br/tribologia/>

2.2.7.1. Rugosidade e Dureza

Os tribologistas estão preocupados com o que acontece quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra, em condições secas ou lubrificadas. Eles muitas vezes medem e comparam os parâmetros de textura e rugosidade da superfície antes do processo de desgaste após o desgaste, e em estágios intermediários também. Entender a relação entre propriedades de desgaste e textura de superfície pode levar à especificação de texturas de superfície otimizadas e processos de fabricação para várias necessidades de função superficial. O termo "textura superficial" refere-se às finas irregularidades (picos e vales) produzidas em uma superfície pelo processo de formação. Por convenção, a textura compreende dois componentes; rugosidade e ondulação (*waviness*). A rugosidade consiste nas características de irregularidades mais finas do processo em si, como o espaçamento de grãos de uma roda de moagem ou a alimentação de uma ferramenta de ponto único (Figura 94). A ondulação consiste nas irregularidades mais espaçadas que muitas vezes são produzidas pela vibração no processo de usinagem. Geralmente, no entanto, os termos "textura superficial" e "rugosidade" são usados de forma intercambiável, pois a rugosidade é especificada e medida com muito mais frequência do que a *waviness* (BORTOLETO 2015).



Figura 94 - Classificação de integridade superficial
 Fonte: Novaski, (2011) e Machado, et al. (2011)

A topografia superficial inclui esses componentes de textura superficial, bem como quaisquer outras irregularidades, como erro de forma. Existem dois tipos de técnicas de criação de perfil para textura superficial, dependendo se as medidas de altura são feitas simplesmente ao longo de uma linha (métodos de perfil) ou sobre

uma área (métodos de área raster). Ambos os tipos de técnicas desenvolvem conhecimento quantitativo dos picos e vales da superfície por medição ponto a ponto com uma sonda de alta resolução. Os perfis de superfície são geralmente medidos em toda a superfície, a direção de marcas de usinagem uniaxial causadas pela maioria dos processos de formação de superfície. O perfil pode ser produzido por uma caneta de contato que atravessa a superfície, por uma sonda não contatada, ou por franjas interferométricas ópticas. O método stylus tem sido amplamente utilizado por engenheiros, ópticos e tribologistas. Portanto, a técnica de estilete será discutida em alguns detalhes neste artigo como um importante exemplo de perfil superficial. Outras técnicas são discutidas em outros lugares conforme a Figura 95 (FUNDAMENTALS OF CONTACT BETWEEN SOLIDS, 2021) .

Centre line average roughness (CLA or R_z)	$R_z = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx$	
Root mean square roughness (RMS or R_q)	$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$	
Maximum peak-to-valley height (R_t)	Largest single peak-to-valley height in five adjoining sample lengths $R_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{max_i}$	
Ten-point height (R_t)	Average separation of the five highest peaks and the five lowest valleys within the sampling length $R_t = \frac{\sum_{i=1}^5 |p_i| + \sum_{i=1}^5 |v_i|}{5}$	

Figura 95 - Representação da rugosidade média R_z
Fonte: Fundamentals of contact between solids (2021)

Tratamentos térmicos para metais (Figura 96) podem ser necessários, contudo valores acima de 700 Vickers de dureza já são suficientes para considerar o contra corpo como rígido. Com isso praticamente, toda a deformação devido ao contato que acontece no metal, e o acabamento superficial contra corpo tem uma grande influência dos mecanismos do desgaste resultante do movimento (BOTH 2011).

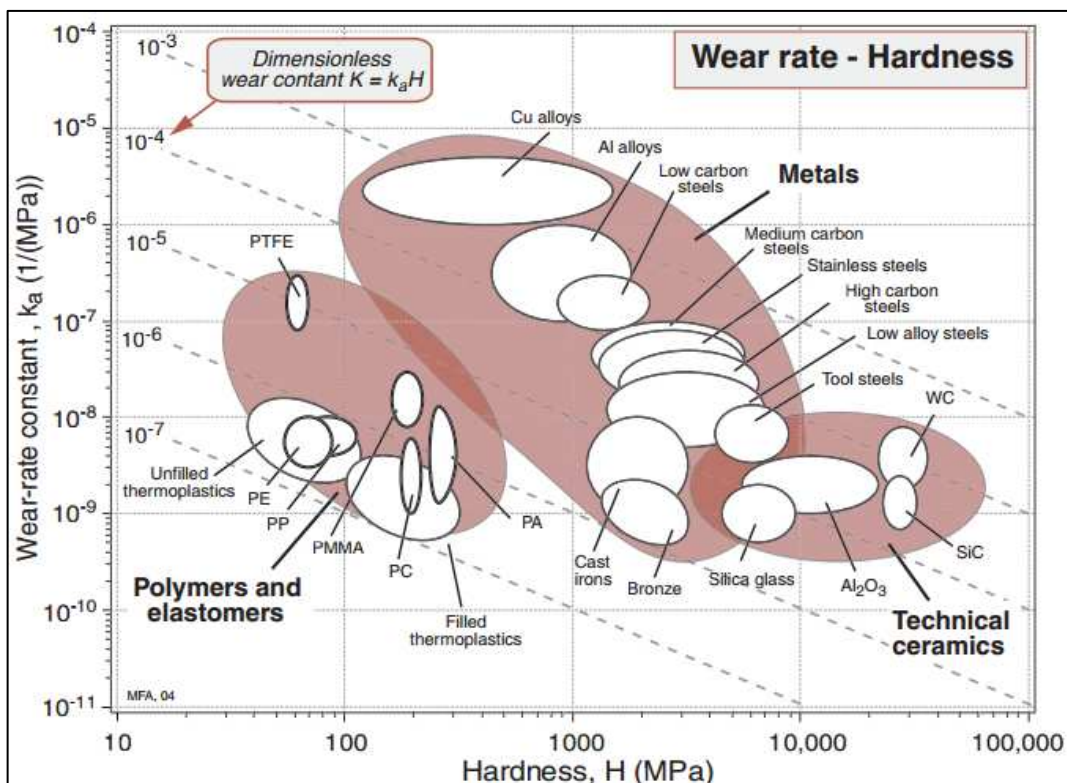


Figura 96 – A taxa de desgaste normalizada, K_a , comparado contra Dureza, expressado em MPa ao invés de Vickers (H in MPa = 10 HV). O gráfico mostra uma visão do caminho de quais materiais comuns de engenharia se comportam.

Fonte: Ashby (2005).

2.2.7.2. Velocidade, Carga e Temperatura

Ferramentas de corte desgastam porque as cargas normais nas superfícies de desgaste são altas e os *chips* (cavaco) de corte e a peça de trabalho que aplicam essas cargas estão se movendo rapidamente sobre as superfícies de desgaste da ferramenta. A ação de corte e o atrito relacionado nessas superfícies constantes aumentam a temperatura do material da ferramenta, o que acelera ainda mais os processos físicos e químicos associados ao desgaste da ferramenta. Para remover o material indesejado como chips, essas forças e movimentos são necessários; portanto, o desgaste da ferramenta de corte é uma penalidade econômica que deve ser contabilizada para a máquina da peça. A magnitude dessa penalidade econômica pode ser minimizada se o processo de corte for planejado e controlado com base no conhecimento sólido do processo de desgaste e sua dependência na seleção de condições de corte. As condições de corte normalmente controladas são o engajamento da ponta com a peça de trabalho, a velocidade relativa da ponta com a peça de trabalho e a velocidade de alimentação usada para manter a ferramenta envolvida em material sem cortes. Essas condições de corte são mais frequentemente

chamadas de profundidade de corte, velocidade de corte e taxa de alimentação. Durante a fase de planejamento do processo, deve ser feita uma avaliação sobre a dificuldade do material para a máquina, a ferramenta correta para a superfície a ser criada deve ser selecionada, o material da ferramenta apropriado deve ser selecionado e o tipo de fluido de corte necessário deve ser determinado. Para fazer tais escolhas, o ambiente de desgaste no corte de metal deve ser compreendido.

O desgaste da ferramenta de corte ocorre ao longo da borda de corte e em superfícies adjacentes. A Figura 97 mostra uma visão do processo de corte onde as superfícies de ancinho e desobstrução se cruzam para definir a borda de corte. A Figura 98 mostra uma visão semelhante, mas adiciona os estados de estresse e tensão que estão presentes no material e no chip. A ferramenta engaja o material para profundidade t e o vetor de força R ($R = R' = R''$) cria uma força componente, F_s , que tesoura o material ao longo da área do plano de tesoura, A_s , para formar um chip com espessura, t_c . A direção do movimento do chip é controlada pelo ângulo do ancinho, ϕ . A magnitude da velocidade do chip, V_c , é uma função da velocidade de corte, V , o ângulo do ancinho, ϕ e o ângulo da tesoura, α . Relacionando as Figuras 97 e 98, força F e velocidade V_c criam a zona de tesoura secundária, força F_s e velocidade V_s agindo ao longo Como criar a zona de tesoura primária, e forçar F_c e velocidade V criar a zona de tesoura terciária. São forças médias e velocidades idealizadas. O desgaste das ferramentas de corte é localizado em superfícies específicas onde estresse, tensão, velocidade e temperatura estão acima dos níveis críticos. É importante entender onde essas condições críticas existem e como elas interagem para causar desgaste de ferramentas (ASM, 1985).

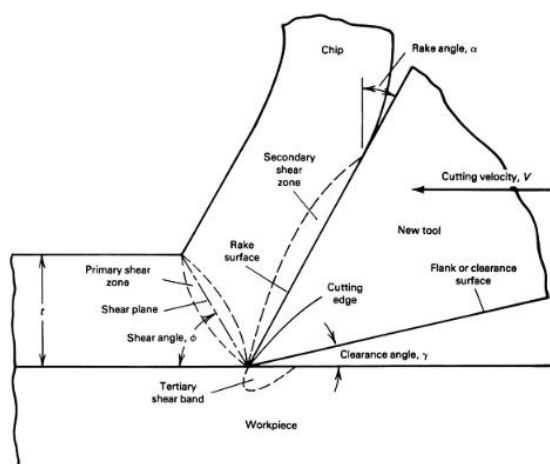


Figura 97 - A relação entre cavaco (chip), peça de trabalho e ferramenta
Fonte: ASM (1985)

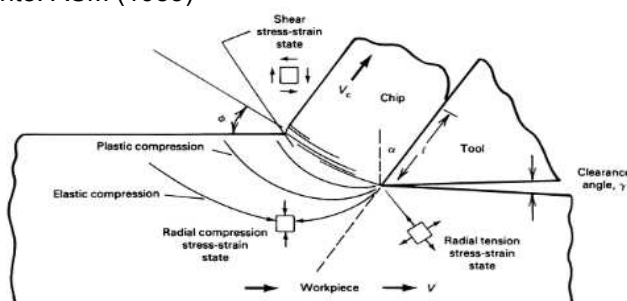


Figura 98 - Estado de estresse e deformação no momento do corte do material
Fonte: ASM, 1985

2.2.7.3. Seleção de materiais (ligas metálicas)

A resistência ao desgaste pode ser aumentada em equipamentos de mineração, trituração e processamento mineral através da seleção adequada de materiais e design de equipamentos, e através do uso de placas de desgaste, bem como deposição de face dura. O método selecionado dependerá do tipo e uso da peça e da economia associada à operação do equipamento.

A variedade de materiais que fornecem resistência ao desgaste disponível comercialmente. Alguns tipos de material são mostrados na Figura 99 em relação às necessidades de serviço e meio ambiente (ASM METALS HANDBOOK, 1992).

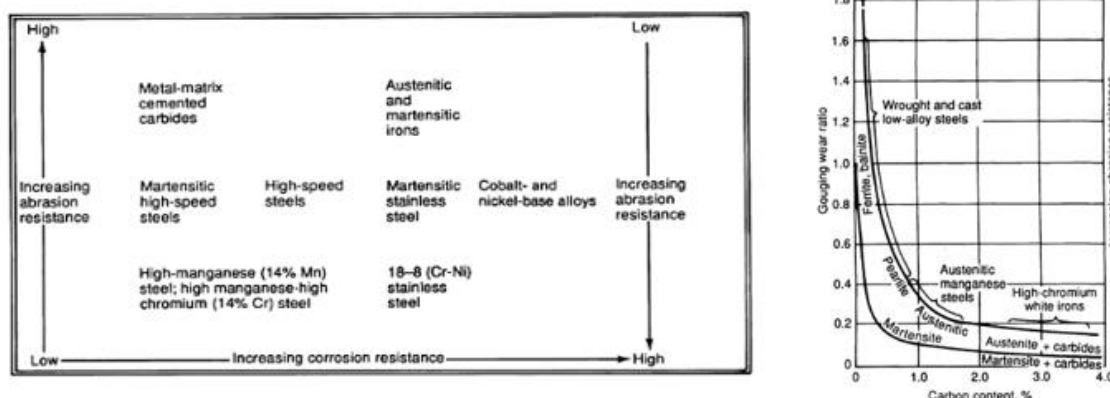


Figura 99 - (a) Seleção de ligas resistente ao desgaste entre os principais mecanismos de desgaste
(b) % de carbono em relação ao desgaste por abrasão

Fonte: ASM Metals Handbook (1992)

A resistência ao alto impacto com baixa resistência à abrasão e corrosão pode ser alcançada com ligas ferrosas de manganês altas. Uma liga *Hadfield* (14Mn-1C) é um material tradicional para resistência ao impacto. Tanto nas condições *as-cast* (fundido) quanto como soldada, a alusão *Hadfield* mostra boa ductilidade. Além disso, o trabalho de liga endurece (encruamento) com impacto e deformação, resultando em aumento dos níveis de força e dureza. Para ambientes mais corrosivos, a resistência ao impacto pode ser alcançada com os aços inoxidáveis 18-8 (18%Cr + 8%Ni). Aços inoxidáveis austeníticos, como os 18-8, também trabalham endurecer com o serviço, mas têm a desvantagem do alto custo do material. As chapas de aços resistentes à abrasão, semelhantes ao aço de grau de armadura, têm uma combinação única de propriedades desejáveis: alta dureza, boa ductilidade e soldabilidade. A resistência à abrasão é alcançada usando uma martensita e temperada, que muitas vezes é baixa o suficiente em teor de liga (ou seja, tem um equivalente de baixo carbono) para evitar as preocupações de soldar a rachadura com a prática adequada de soldagem. A desgaseificação e dessulfurização a vácuo durante a siderurgia é necessária para minimizar as inclusões e, assim, melhorar a dureza na curta direção transversal. À medida que a resistência à abrasão aumenta de uma aplicação de baixo estresse para alta tensão, o material selecionado deve aumentar a dureza do aço de liga martensítica para materiais de alto carbono, incluindo ferros brancos de liga.

A dureza é comumente usada como medida na seleção de materiais de *Hardfacing*, uma maneira amplamente usada na indústria para minimizar os efeitos

negativos do desgaste é agir na seleção do material da superfície exposta ao fenômeno. Em inúmeras aplicações a técnica de Revestimento Duro, também conhecida como *Hardfacing* é a melhor solução. Espera-se que a resistência à abrasão das alusões martensíticas aumente com o aumento da dureza, enquanto a resistência ao impacto seria obtida a partir de materiais de baixa dureza. Uma extensa lista de materiais de *Hardfacing* e de superfície é dada na Tabela 1, juntamente com suas vantagens específicas. As composições de aço de alusão e designações AWS para estes vários materiais de *Hardfacing* são dadas na Tabela 19 (ASM METALS HANDBOOK,1992).

Tabela 19 - Classificação e composição das ligas Hardfacing

Group and description	Typical composition, %										Hardness, HV	AWS specification A5.13-70	
	Fe	C	Cr	Mn	Mo	V	W	Co	Ni	B			
1. Iron-base containing less than 20% alloy additions													
Carbon steel	bal	0.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	250	...
Martensitic alloy steel	bal	0.1	1	0.7	...	...	...	...	...	...	...	250	...
Martensitic alloy steel	bal	0.1	3.5	1	...	...	...	...	...	...	...	350	...
Martensitic alloy steel	bal	0.25	1	1	0.3	...	...	...	...	...	...	350	...
Martensitic alloy steel	bal	0.35	3	1	...	...	...	...	...	...	...	450	...
Martensitic alloy steel	bal	0.45	5	1	5	0.75	...	...	...	...	...	650	...
Martensitic stainless steel	bal	0.1	12	...	...	...	...	...	...	...	...	400	...
Martensitic stainless steel	bal	0.25	13	...	...	...	...	...	...	...	...	450	...
High-speed steel	bal	0.8	4	0.5	5	2	6	...	...	...	...	650	Fe 5-A ⁽¹⁾
High-speed steel	bal	0.7	4	0.5	7	1	1.5	...	...	...	...	650	Fe 5-B ⁽¹⁾
High-speed steel	bal	0.4	4	0.5	7	1	1.5	...	...	...	...	600	Fe 5-C ⁽¹⁾
Austenitic Mn steel	bal	0.7	0.5	14	...	...	...	4	...	...	...	600 (max)	Fe Mn-A ⁽¹⁾
Austenitic Mn steel	bal	0.7	0.5	14	1	...	...	...	...	...	...	600 (max)	Fe Mn-B ⁽¹⁾
2. Iron-base containing more than 20% alloy additions													
Austenitic Cr-Mn steel	bal	0.35	14	14	1	0.4	...	...	...	...	...	600 (max)	...
High-speed steel	bal	...	10	...	...	...	15	...	2.5	...	...	750	...
Austenitic steel	bal	0.1	18	...	3	...	...	8	...	...	...	500 (max)	...
Austenitic iron	bal	4	30	6	...	...	...	...	...	...	...	700	Fe Cr-Al ⁽¹⁾
Martensitic iron	bal	2.5	28	1	...	...	...	...	...	...	...	600	...
3. Nonferrous													
Co-Cr-W	3	1	26	1	...	...	5	bal	3	...	...	400	Co Cr-A
Co-Cr-W	3	1.4	31	1	...	...	8	bal	3	...	...	500	Co Cr-B
Co-Cr-W	3	2.5	32	1	...	...	12	bal	3	...	...	630	Co Cr-C
Ni-Cr-B	3	0.4	11	...	...	...	...	1	bal	2.5	...	400	Ni Cr-A
Ni-Cr-B	4	0.6	13	...	...	...	...	1	bal	3	...	530	Ni Cr-B
Ni-Cr-B	4	0.8	15	...	...	...	...	1	bal	4	...	720	Ni Cr-C
Ni-Cr-Mo-W	5	0.06	15	...	16	...	4	...	bal	...	...	300	AWS A5.11-69

Fonte: ASM Metals Handbook, 1992

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Montagem do Sistema de Testes

Todos os testes foram planejados e realizados em produção, pois este objetivo principal do experimento, onde tudo deveria ser conforme a realidade da área fabril. Portanto, foi criado um cronograma (Tabela 20), uma matriz de responsabilidade e um fluxograma detalhado (Figura 100) para realização dos testes com toda a equipe envolvida.

Tabela 20 - Cronograma dos testes dos martelos e seus respectivos fornecedores

Fornecedor	Modelo	Local	ago/20		set/20		out/20		nov/20		dez/20		jan/21		fev/21		mar/21		abr/21	
			1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.	1ª Prev.	2ª Prev.
CAF	Hardox 500	Rec 2		Teste 1																
CAF	Hardox 550	Rec 2				Teste 2														
Açofoja	Martelo Duplo	Rec 2						Teste 3												
HRC	Ravur 450 - CB70	Rec 2											Teste 4	Teste 5						
HRC	Ravur 450 - RC70	Rec 2																Teste 6		

*Premissa : sempre iniciar os testes na 2ª preventiva do mês com a virada do martelo do debailer após 30 dias de uso.

Durante os meses que antecederam os testes foram realizadas reuniões com os fornecedores e seus respectivos especialistas na área de metalurgia e desgaste por abrasão listados na Tabela 20 com o propósito de entender objetivo e avaliar o melhor material para realização dos testes.

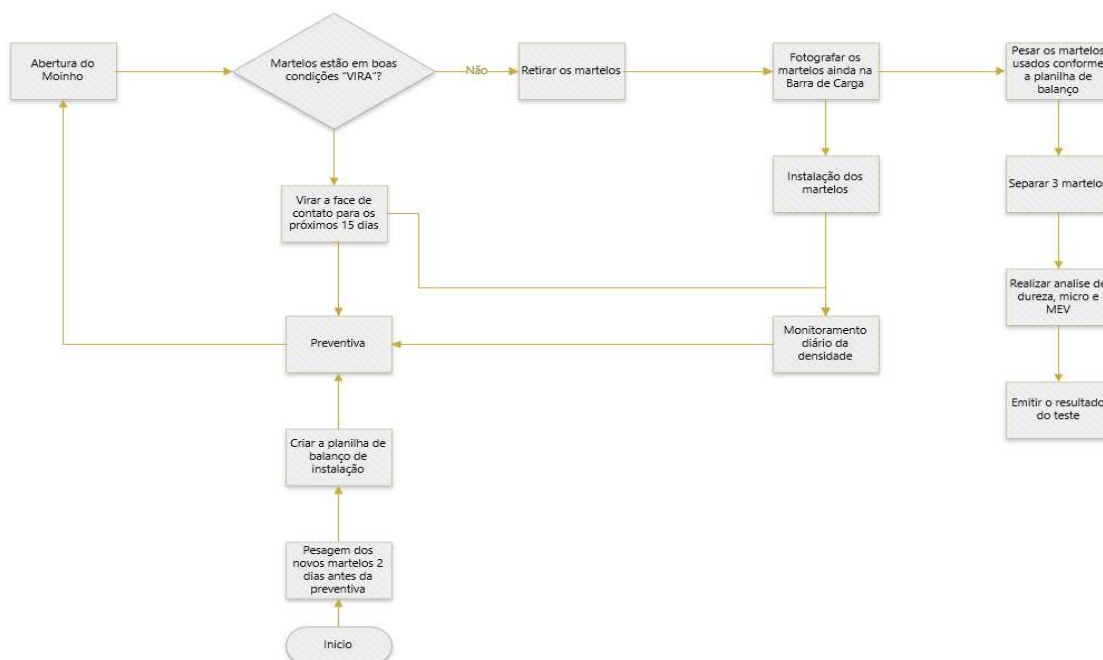


Figura 100 - Fluxograma para realização dos testes no moinho de martelo

A cada quinze dias ocorre uma preventiva de 12h na área fria da reciclagem para verificação de todos os equipamentos da linha conforme o plano de manutenção e a

troca dos martelos do moinho de martelos. Foi realizado um treinamento com os mecânicos responsáveis pelo moinho de martelos nas preventivas, operadores da área fria e processo para explicar todo o procedimento para realização dos testes. Esta ação foi muito importante, pois aumenta significativamente o comprometimento da equipe e a importância do papel de cada integrante do time (Tabela 21)

Tabela 21 - Matriz de responsabilidade dos testes

Etapas		Responsável
1	Pesagem inicial dos martelos / Dureza	Anderson
2	Foto Antes do teste (sequencia dos martelos)	Muller
3	Mapeamento do posicionamento (martelo e eixo)	Anderson
4	Execução (controle da densidade diária)	Dino
5	Foto depois do teste (evolução do desgaste)	Muller
6	Pesagem final dos materlos	Anderson
7	Análise Microestrutura Original - Micro	Dino
8	Análise da Dureza Anterior	Diogo
9	Análise Microestrutura do desgaste - MEV	Dino
10	Análise da Dureza Após Consumo	Diogo
11	Análise Microestrutura d encruamento - Micro	Dino
12	Resultados	Time

Ao término de cada experimento, foram realizados reuniões de alinhamento e apresentação dos resultados e próximos passos para que toda equipe pudesse entender a direção do projeto e manter uma boa comunicação, pois como eram testes em longo período se fez necessário manter a comunicação assertiva a cada momento. Antes da troca dos martelos, foi realizado a pesagem antes (Figura 101) e depois de cada teste (Figura 102) para o cálculo do desgaste e controle do balanceamento por eixo dos martelos sob o rotor do moinho de martelos.

BALANCEAMENTO MARTELOS MOINHO MARTELOS REC#2								
NUMERAÇÃO DOS MARTELOS								
	1	3	5	7	9	11	13	TOTAL
1	36,95	37	36,95	36,95	36,95	36,9	36,95	258,65
2		4	6	21	10	27	14	
2	36,95	37	37	36,9	36,95	36,9	36,95	258,65
3		15	17	19	22	23	25	12
3	36,95	36,95	36,95	36,95	36,9	36,95	37	258,65
4		16	18	20	8	24	26	28
4	37	36,95	36,9	37	36,9	36,95	36,95	258,65
TOTAL 4 CONJUNTOS								

Figura 101 - Controle de peso dos martelos

Entrada no equipamento dia 24/08							
Lado Oposto Motor			Lado Motor				
39,25	39,15	39,15	39,00	39,05	38,95	39,10	273,65
38,70	39,30	39,00	39,35	39,05	38,85	39,40	273,65
39,20	39,10	38,80	39,20	39,10	39,15	39,10	273,65
39,20	39,10	39,00	39,15	39,10	39,00	39,15	273,70
Total							1094,65
Retirada do equipamento dia 09/09							
Lado Oposto Motor			Lado Motor				
20,75	32,25	33,10	33,05	33,35	33,60	30,90	217,00
29,60	32,90	32,55	33,45	33,65	32,70	21,60	216,45
21,20	31,80	33,35	32,40	33,65	33,20	30,80	216,40
30,25	32,45	32,65	33,40	33,60	32,50	21,50	216,35
Total							866,20

Figura 102 - Pesagem dos rotores antes e depois da realização dos testes

As datas de entrada e saída foram importantes para a inclusão do cálculo de dias em produção para que cada teste independente do dia pudesse ter o mesmo desgaste específico (Tabela 22).

Além dos testes, para andamento do projeto foram criadas algumas fases e atividades para o suporte de todo projeto, como negociação com os fornecedores, aquisição, pedido de compra, aprovação da gerência da área etc.

Tabela 22- Matriz R.A.C.I. do projeto

	MATRIZ DE RESPONSABILIDADES – RACI					
	TIME					
	Gerente Programa	Gerente Projeto	Coordenador de Comunicação e Execução	Coordenador de escopo, tempo	Coordenador de custo e aquisição	Coordenador de qualidade e risco
	Elton Teixeira	Ewerton Chagas	Alexandre Muller	Diogo Silva	Juliana Vieira	Vitor Atáide Ewerton Chagas
Integrar os envolvidos do projeto, a organização executora estabelecer objetivos claros e alcançáveis	A	R	I	I	I	I
Desenvolver o plano de gerenciamento do projeto	/	R	I	I	I	I
Controlar e monitorar o trabalho do projeto	/	R	I	I	I	I
Realizar o controle integrado de mudanças	/	R	I	I	C	I
Encerrar o projeto	A	R	I	I	I	I
Desenvolver o plano de gerenciamento de escopo	/	A	C	R	I	I
Definir o escopo do projeto	A	R	C	R	I	I
Elaborar a Estrutura Analítica do Projeto (EAP)	/	R	C	R	I	I
Identificar as atividades	/	AC	C	R	I	I
Identificar dependências entre atividades	/	AC	C	R	I	I
Estimar os recursos necessários	/	AC	A	R	C	I
Estimar a duração das atividades	/	AC	A	R	I	I
Elaborar o cronograma	/	AC	R	R	I	I
Avaliar o desempenho Global da equipe	A	RA	I	I	I	I

3.2 Equipamentos utilizados para análise do desgaste dos martelos

3.2.1 Medição do desgaste pela perda de massa

Os valores para percentual de desgaste foram calculados com base nos valores de perda de massa (gramas) ,conforme a Figura 103, com a coleta de dados pré e pós teste e o volume produzido conforme a equação do desgaste específico do martelo em relação ao volume produzido, conforme a Equação 8.



Figura 103 - Balança suspensa Digitron ULD 200

$$\text{Desgaste específico em relação a Massa} = \left(\frac{\text{Massa Pré teste} - \text{Massa Pós teste}}{\text{Volume produzido}} \right) * 1000 = \text{kg/ton} \quad \text{Eq. 8}$$

3.2.2 Microdurômetro

Todas as amostras foram analisadas por meio do aparelho Microdurômetro da marca Future Tech – FM (Figura 104) com penetrador diamantado pirâmidal tipo Vickers, utilizando carga 200 gf por 15 segundos. Foram realizados 15 indentações no sentido da borda (face de contato com o material a ser triturado) até o centro do martelo (região não desgastada), como procedimento adotado para as medições



Figura 104 - Microdurômetro *Future Tech 310*

3.2.3 Análise das imagens

3.2.3.1. Preparação das amostras

A preparação das amostras para o ensaio ou análise metalográfica (chamada também de análise estrutural), isto é, livre de riscos, manchas ou corrosão. Para isto as amostras deverão: selecionar a secção, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e exame das imagens

3.2.3.1.1. Cortadora Metalográfica (*Cutt-Off*) – AROCOR 250

Para preparação das amostras metalográficas dos materlos, pré-consumo ou pós-consumo, todas foram antes cortadas por abrasão (disco de carbetto de silicio) com refrigeração líquida, em pequenas partes do sentido da borda (face de contato com o material a ser triturado) até o centro do martelo (região não desgastada) na Cortadora Metalográfica AROCOR-250 da empresa Arotec (Figura 105).



Figura 105 - Cortadora Metalográfica AROCOR-250

3.2.3.1.2. Prensa Embutidora *Buehler -SimpliMet 400*

É um equipamento utilizado para embutir as amostras dos martelos com resina fenólica, termoplástica ou resina acrílica (Figura 106). Após amostras cortadas, as mesmas embutidas em baquelites á quente sob pressão.



Figura 106 - Embutidora a quente sob pressão Buehler SimpliMet-400

3.2.3.1.3. Lixadeira Arotec – Aropol VV

Como mencionado no item 3.2.3.1 a qualidade da preparação da amostra é muito importante para análise do material a ser estudado. Esta operação tem o principal objetivo em remover todo risco profundo e planificar amostra para o processo seguinte de polimento. A lixadeira usada para preparação das amostras neste experimento foi a Arotec modelo Aropol VV (Figura 107).



Figura 107 - Lixadeira metalográfica Arotec (Aropol VV)

3.2.3.1.4. Politriz AutoMet 250

Como mencionado no item 3.2.3.1 a qualidade da preparação da amostra é muito importante para análise do material a ser estudado (Figura 108). Sistema de preparação de amostras metalográficas semiautomático, completo com lixadeira/politriz Automet 250 em base simples, velocidade variável da politriz de 10 a 500 rpm com incrementos de 10 rpm, velocidade do cabeçote de polimento de 30 a 60 rpm com incrementos de 10 rpm, com controle de sentido de rotação, carga de 1 a 10 lbs (5 – 45N) para aplicação por amostra e 05 a 60 lbs (20- 260N) para aplicação por força central, tempo selecionável de 20 segundos a 99 minutos com incrementos de 10 segundos.



Figura 108 - Politriz AutoMet 250

3.2.3.1.5. Metalizador Quorum (Q150R ES)

A camada condutora é geralmente ouro ou carbono, evaporados em vácuo. O ouro (ou ouro/paládio) são usualmente depositados pelo processo de "sputtering", embora possam também ser evaporados em alto vácuo (Figura 109). No sistema de "sputtering" o depósito do metal é bastante eficiente, mesmo em objetos muito irregulares, pois os átomos atingem sua superfície oriundos de todas as direções. Basicamente, no sistema de "sputtering", o metal é arrancado de um eletrodo recoberto com ouro, pelo bombardeio energético de íons positivos; o eletrodo de ouro é ligado ao potencial negativo de uma fonte de tensão da ordem de 1 a 2 KV. Os íons positivos são produzidos pela ionização do argônio, injetado na câmara de descarga. A espessura da camada de ouro deve ser suficientemente fina para não influir na resolução da imagem, mas suficientemente espessa, para garantir uma boa produção de elétrons secundários, que serão usados para formar a imagem. Para espécimes mais sensíveis pode-se aplicar uma camada de carbono, evaporado em alto vácuo, antes da cobertura com ouro¹.

¹ Processamento de Amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura – Embrapa, 2002



Figura 109 - Metalizador Quorum (Q150R ES)

3.2.3.2. Microscópio lupa estereoscópica Nikon – SMZ645

Este microscópio estereoscópico (Figura 110) tem a função principal em visualização de objetivos maiores (lente aumentada) como peças, moedas, flores, rochas, etc. Sua vantagem que não é necessário a preparação da amostra e ainda sua visualização pode ser em três dimensões.



Figura 110 - Lupa estereoscópica Nikon SMZ645

3.2.3.3. Microscópio óptico Zeiss

A objetiva projeta uma imagem ampliada no corpo tubular do microscópio e a ocular amplia ainda mais a imagem projetada pela objetiva (Figura 111). Por exemplo, a ampliação visual total usando uma objetiva de 10X e uma ocular 15X é 150X. Quando você olha para um microscópio, você não está olhando para o espécime (amostra), você está olhando para uma "imagem" do espécime. A imagem está "flutuando" no espaço cerca de 10 milímetros abaixo da parte superior do tubo de observação onde a ocular é inserida. A imagem que você observa não é tangível; não pode ser compreendido. É um "mapa" ou representação do espécime em várias cores e/ou tons de cinza de preto para branco. A expectativa é que a imagem seja uma representação precisa dos aspectos, precisa quanto aos detalhes, forma e cor/intensidade. As implicações são de que pode ser possível (e é) produzir (ou mesmo melhorar) imagens altamente precisas.



Figura 111- Microscópio Óptico Zeiss

3.2.3.4. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) FEI Company - Quanta 450

Como descrito o conceito deste equipamento nos itens 2.2.5.4 (MEV) e 2.2.5.5 (EDS) marcar FEI Company modelo Quanta 450 (Figura 112).



Figura 112 - Microscópio eletrônico de varredura da FEI Company®, modelo Quanta 450

3.2.4 Análise da composição química dos martelos

Para análise da composição química de cada material, seja a matriz ou o revestimento (Figura 113). Os raios X são produzidos pelo analisador e apontados para uma superfície amostral, na qual a energia faz com que elétrons de camada interna sejam ejetados. Os elétrons de camada externa preenchem as vagas deixadas pelos elétrons ejetados e raios X fluorescentes são emitidos. Então os raios X fluorescentes entram no detector e enviam pulsos eletrônicos para o pré-amplificador, que amplifica os sinais e os envia para o processador de sinal digital (DSP). DSP coleta e digitaliza os eventos de raios X e envia os dados espectrais para a CPU principal para processamento, onde analisa os dados espectrais para produzir análise detalhada da composição. Os dados de composição e outra identificação de grau ou valor são exibidos e armazenados na memória para recall posterior ou download em um PC externo.

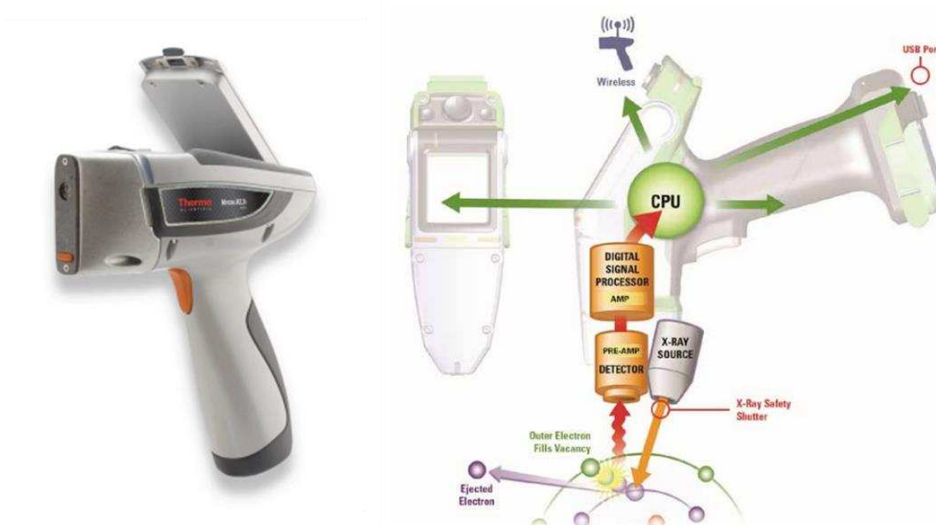


Figura 113 – Equipamento de fluorescência de raios X e princípio de funcionamento
 Fonte: *Thermo Scientific*,2021

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo para avaliação dos resultados, foram utilizados dados estatísticos da perda de massa dos martelos ao longo do processamento de UBC, análise dos defeitos em relação ao tipo de desgaste, composição química dos martelos, análise metalográfica e microestrutural via EDS.

4.1 Desgaste dos martelos

4.1.1 Perfil do desgaste

Na Figura 114 no momento da retirada dos martelos em todos os testes foram colocados todos em ordem por eixo para avaliação do desgaste em relação as suas posições. Então pode-se notar que os eixos 1 e 3 o maior desgaste ou perda ocorre no sentido da esquerda para a direita e nos eixos 2 e 4 o maior desgaste ocorre no sentido da direita para esquerda.

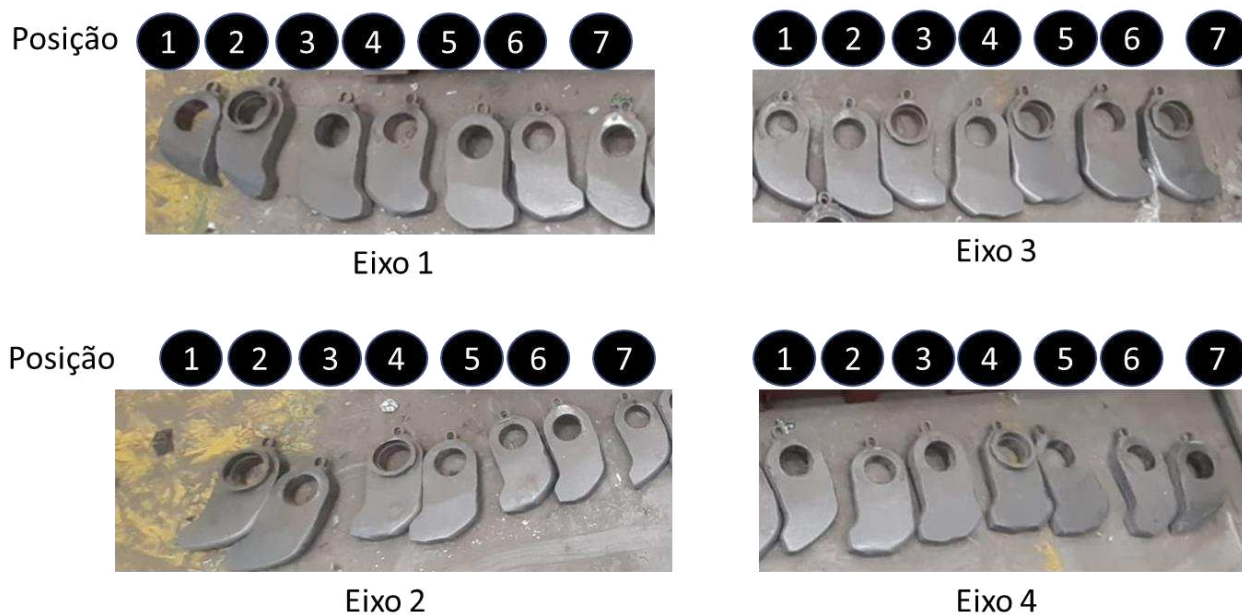


Figura 114 - Progressão do desgaste dos martelos

Então avaliando a estrutura do rotor pode-se notar que em todos os eixos onde possui o *cap spider* na lateral do eixo o desgaste não ocorrerá nesta posição do martelo, enquanto a outra extremidade que irá sofrer o deste conforme a Figura 115.



Figura 115 - Posição de montagem nos martelos nos eixos

4.1.2 Análise dimensional

Ao verificar que os martelos localizados nas extremidades dos eixos (posições intercaladas) sofrem o maior desgaste, onde realizou-se uma análise comparativa entre os fornecedores na posição 7 (maior desgaste e similar a posição 1) e uma amostra no centro do eixo na posição 4, comparando com o seu tamanho (formato) original (Figura 116).



Aço forja – Pos. 7

150mm de desgaste em relação ao martelo original

Aço forja – Pos. 4

27mm de desgaste em relação ao martelo original

Figura 116 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor Açoforja

Na Figura 116 quanto o martelo do fornecedor Açoforja o desgaste na posição 7 (similar posição 1 nos eixos intercalados), possui um desgaste de 82% em relação ao desgaste na posição 4, sendo o mesmo descartado e substituído por um novo conjunto de martelos.



Hardox – Pos. 7

102mm de desgaste em relação
ao martelo original

Hardox – Pos. 4

26mm de desgaste em relação
ao martelo original

Figura 117 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor SSAB (Hardox)

Na Figura 117 quanto o martelo do fornecedor SSAB (Hardox), o desgaste na posição 7 (similar posição 1 nos eixos intercalados), possui um desgaste de 74% em relação ao desgaste na posição 4, sendo impossível realizar a inversão do martelo para mais uma sequência de 15 dias.



Ravur 450 + CB70
25mm de desgaste em relação ao
martelo original

Figura 118 - Análise dimensional do desgaste dos martelos do fornecedor HRC

Na Figura 118 quanto o martelo do fornecedor HRC (Ravur 450 com cobertura CB70 usando a tecnologia *Laser Cladding*), somente foi medido o dimensional do desgaste na posição 4, apresentando o mesmo dimensional de desgaste comparado com os fornecedores Açoforja e SSAB (Hardox), conforme a Figura 119.

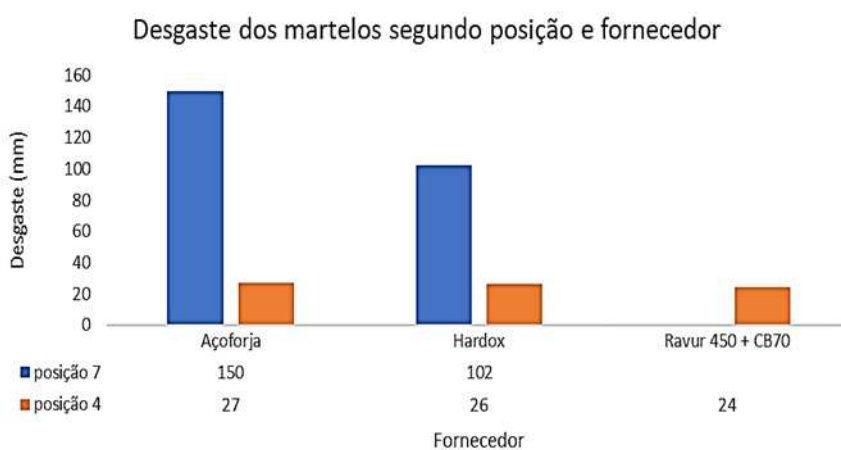


Figura 119 - Gráfico do dimensional de desgaste por posição e fornecedor

4.1.3 Análise do desgaste específico dos martelos

Para um melhor entendimento e avaliação, todos os resultados do desgaste ou melhor performance, foi criada uma métrica de consumo específico por toneladas de UBC processado pela linha de reciclagem ($\text{mm} \cdot 10^3 / \text{toneladas de UBC}$), esta unidade pode-se mensurar claramente o desgaste específico dos martelos independente do volume de produção total ou dias de processamento.

Nas Figuras 120 a 123 mostra a análise gráfica do desgaste específico por posição onde as extremidades são as regiões mais afetadas em todos os tipos de martelos, fornecedores e condição do teste.

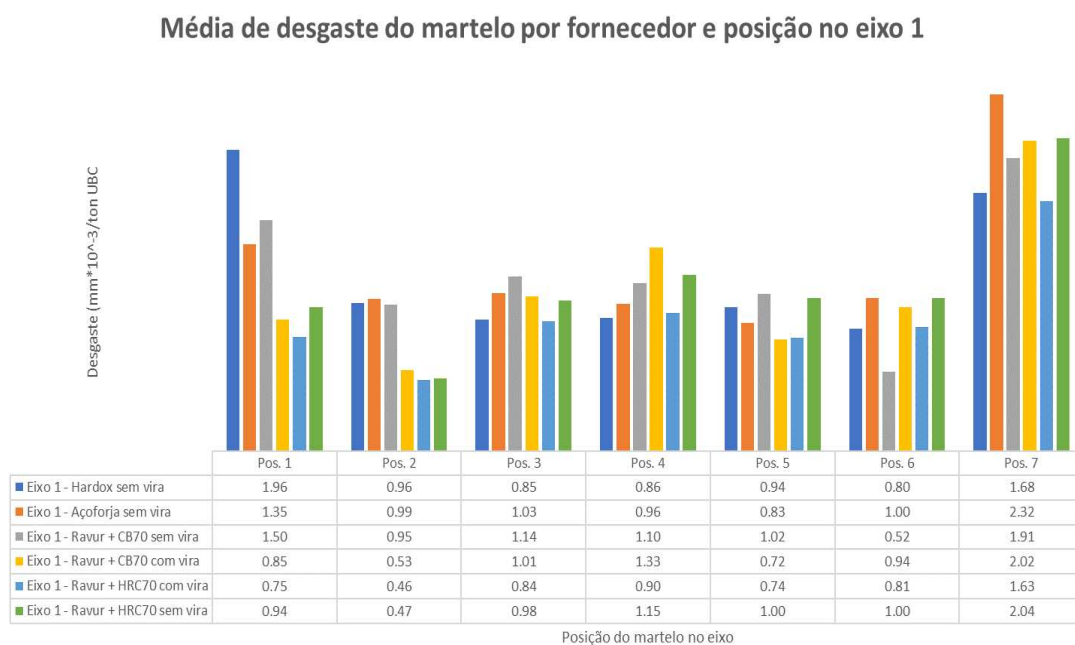


Figura 120 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 1

Média de desgaste do martelo por fornecedor e posição no eixo 2

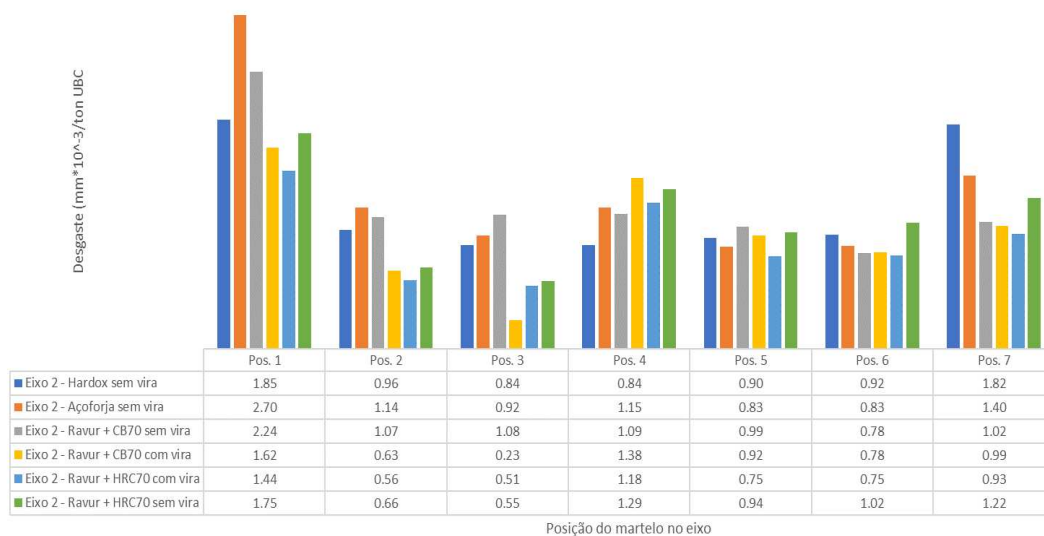


Figura 121 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 2

Média de desgaste do martelo por fornecedor e posição no eixo 3

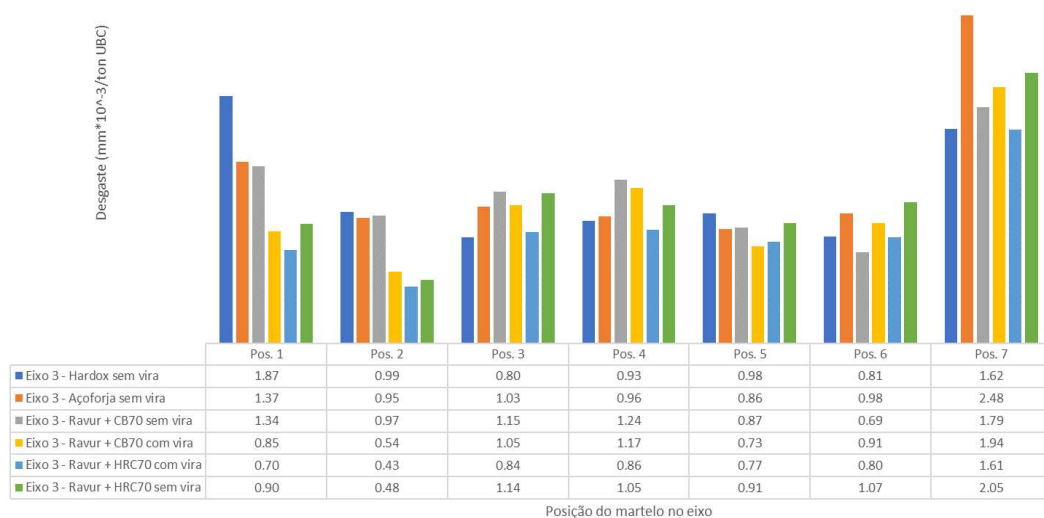


Figura 122 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 3

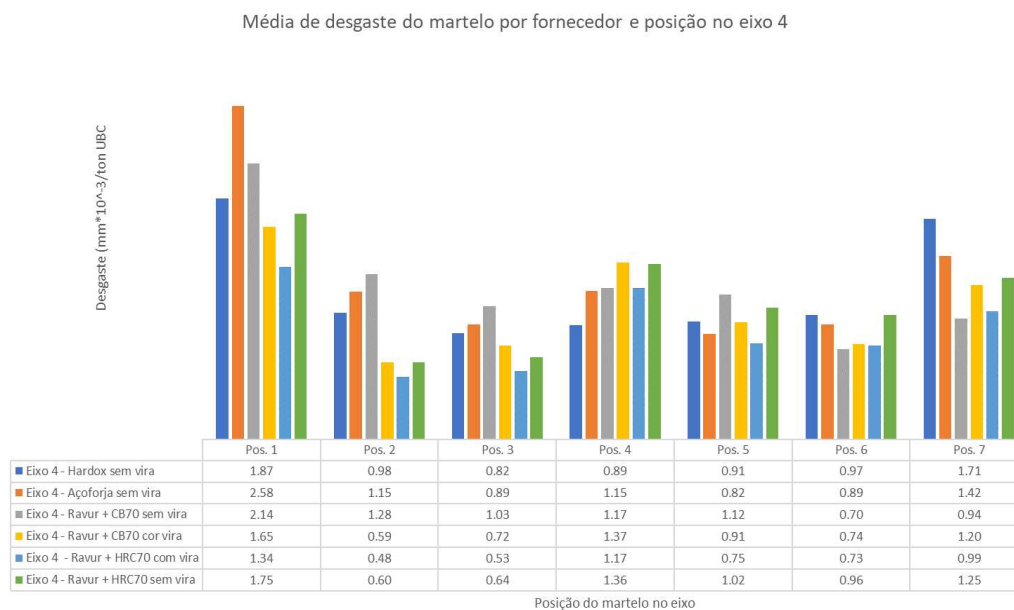


Figura 123 - Média do desgaste específico dos martelos (posição) por fornecedor e condição dos testes no eixo 4

Na Figura 124a para uma melhor clareza nos resultados pode-se notar que ambas as extremidades se desgastam até 76% em relação ao menor desgaste. Enquanto a Figura 124b nos mostra que a condição do material Ravur com cobertura CB70 na condição de inversão dos martelos no desfardador (*debaler*) mostra o menor desgaste específico. Outra importante informação que a maioria dos martelos revestidos também tiveram um menor desgaste em relação ao convencional, Hardox.

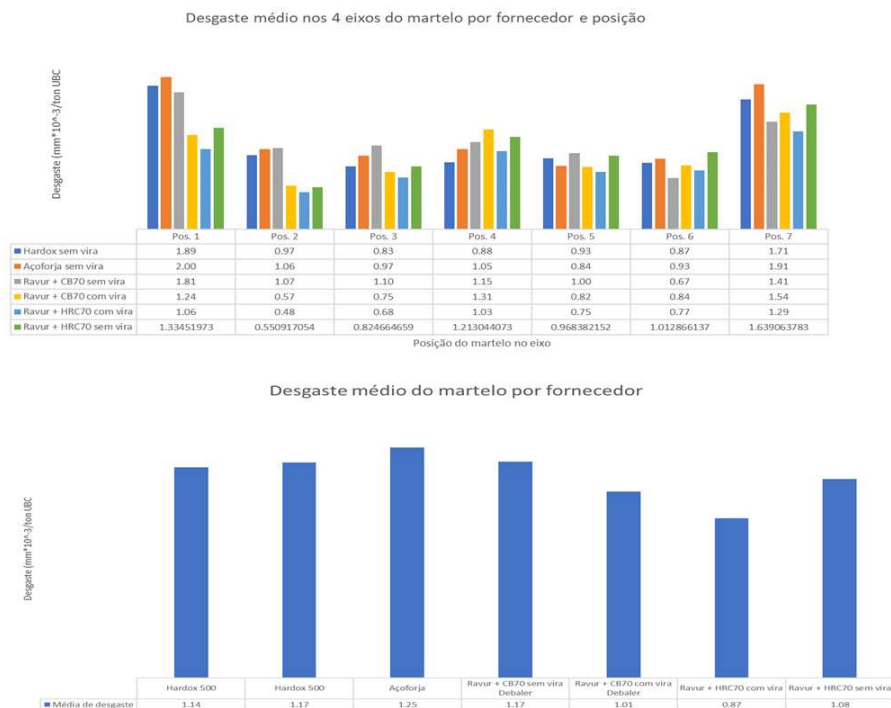


Figura 124 – (a) Média total do desgaste específico por eixo (b) desgaste médio total (eixo e posição) e condição dos testes

4.1.4 ANOVA do desgaste específico dos martelos

Análise de variância é um método estatístico com objetivo de avaliar e comparar as variâncias entre as medianas de grupos diferentes. No objeto em estudo foi realizado uma ANOVA (MONTGOMERY 2016) analisando a performance da produtividade (Figura 125) e desgaste dos martelos em sua posição. A Figura 125 pode-se notar que as médias estão próximas e sua variabilidade.

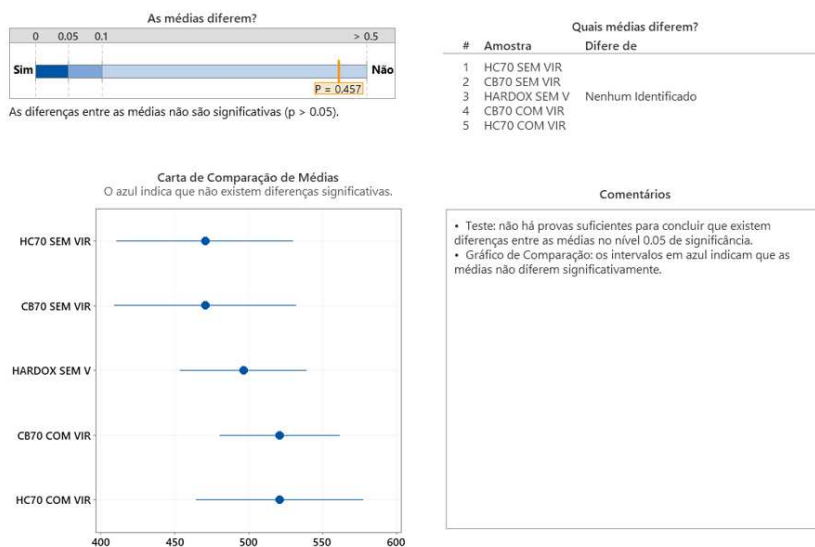


Figura 125 - ANOVA material em relação a produtividade diária

A Figura 126 nos mostra uma situação diferente entre os martelos, os martelos na posição 5,6,4 e 2 possuem médias e variação bem próximas, enquanto os martelos na posição 3,7 e 1 mostram um comportamento oposto.

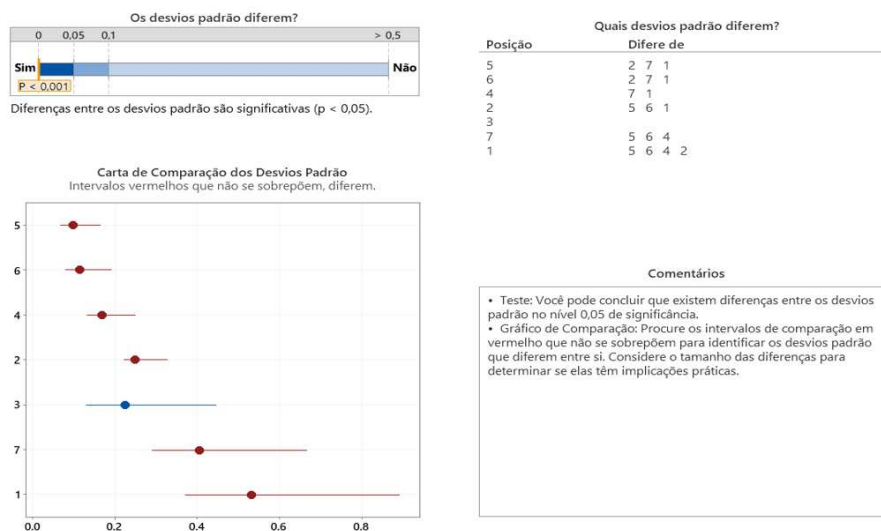


Figura 126 - ANOVA por posição do martelo

Na Figura 127, os efeitos de interação são bem dentro dos limites de decisão, o que indica que os efeitos de interação não são estatisticamente significativos, como mostra as interações das posições dos martelos, a posição 1 e 7 destoam das demais posições. Os dois gráficos inferiores mostram as médias para os níveis dos dois fatores. O efeito principal é a diferença entre a média e a linha central.

Esta condição indica que a diferença entre cada uma destas médias e a média global é estatisticamente significativa. É possível concluir que os as médias dos eixos não são significativas quanto as posições dos martelos para cada eixo.

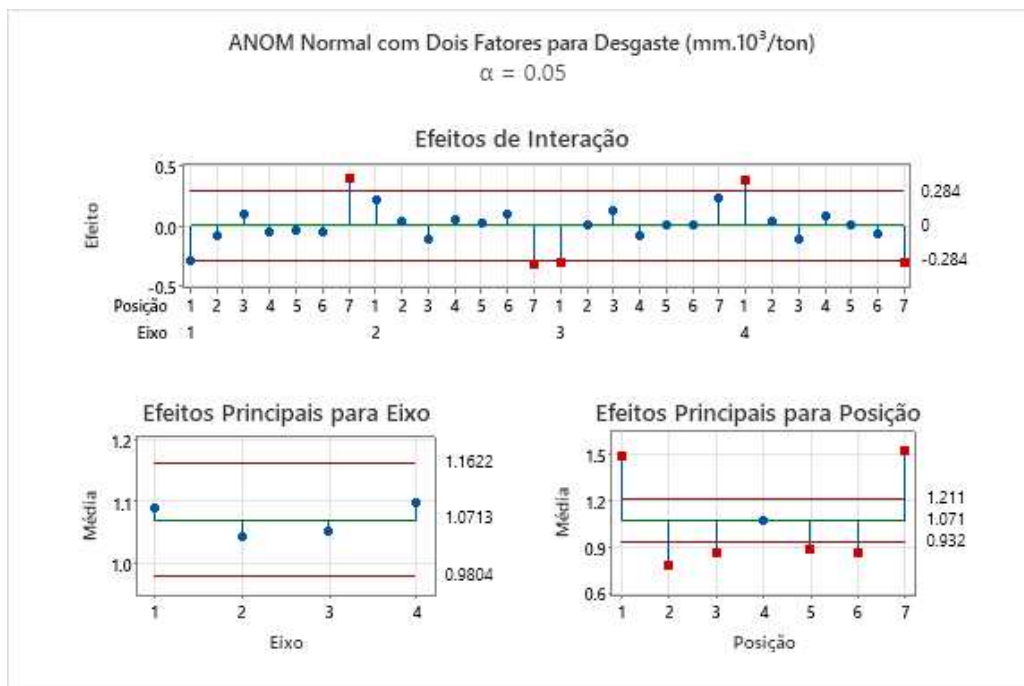


Figura 127 - Análise das médias do desgaste específico

4.1.5 Árvore de Classificação e Regressão - CART®

CART®, ele é um algoritmo baseado em árvore que funciona examinando várias maneiras de particionar ou dividir dados localmente em segmentos menores com base em diferentes valores e combinações de preditores. Esta ferramenta tem o poder de escolher as divisões com melhor desempenho e depois repete esse processo recursivamente até que a coleção ideal seja encontrada. O resultado é uma árvore de decisão representada por uma série de divisões binárias que leva a nós terminais que podem ser descritos como um conjunto específico de regras. Nesta análise foi usado o desgaste específico para obter o melhor modelo e a melhor opção de martelos.

A árvore de 3 nós terminais teve um custo de classificação errada menor do que o custo da árvore de 2 nós. Como a árvore de 3 nós terminais são semelhantes na complexidade, é possível usar a árvore maior com sua exatidão adicional de predição para estudar as variáveis importantes e fazer predições (Figura 128).

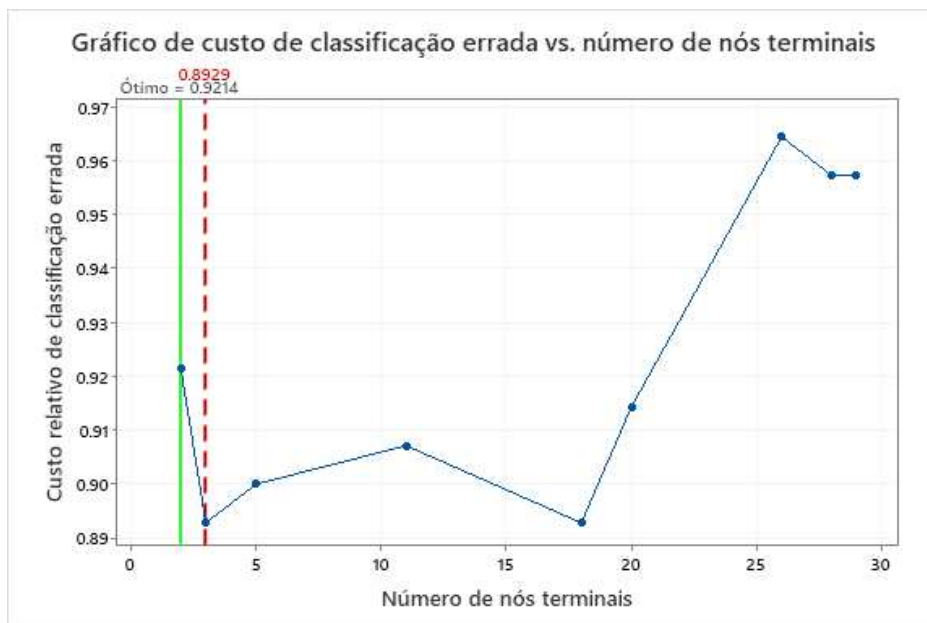


Figura 128 - Gráfico de Classificação errada versus números de nós terminais

A árvore de 3 nós terminais tem um custo de classificação errada menor do que o custo da árvore de 2 nós. Como a árvore de 3 nós terminais foi semelhante na complexidade, é possível usar a árvore maior com sua exatidão adicional de predição para estudar as variáveis importantes e fazer predições.

Na Figura 129 a resposta da árvore de decisão baseada na melhor resposta em 3 nós apresentamos que para o desgaste específico do martelo possa ser menor que $0.77 \text{ mm} \cdot 10^3 / \text{toneladas de UBC}$, a melhor martelo e a melhor condição é o NÓ terminal 1 no material Ravur com revestimento HC70 realizando a inversão do martelo do desenfundador (*debaler*). Como uma segunda opção também é possível usar o mesmo material na condição do martelo do desenfundador sem inversão. Quanto ao material Hardox e Açoforja possuem um desgaste superior $0.77 \text{ mm} \cdot 10^3 / \text{toneladas de UBC}$.

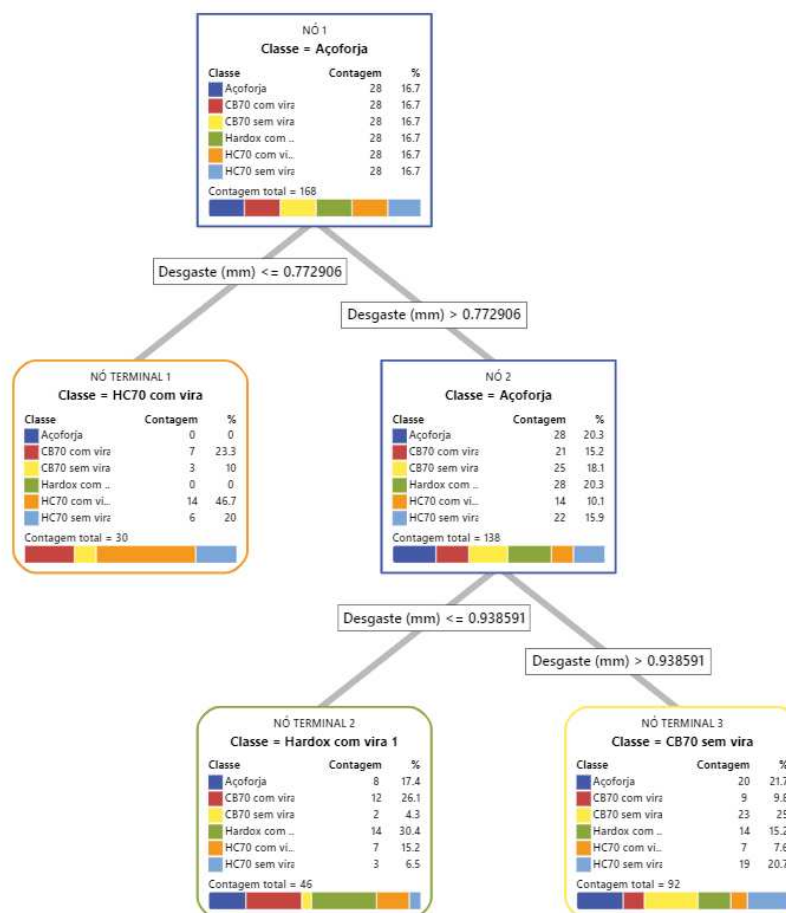


Figura 129 - Diagrama de árvore alternativa

4.2 Composição química dos martelos

4.2.1 Análise comparativa dos materiais dos martelos

Nesta seção tem objetivo principal de analisar cada tipo dos martelos em relação a sua composição química conforme a Tabela 23. Para cada amostra analisada foram realizados o comparativo do certificado do martelo com o resultado da análise realizado pelos raios X descrito no item 3.2.4.

Pode-se notar que o Hardox 500 em relação ao Ravur 450 tem a mesma composição química conforme apresentada na análise interna via raios X, mas quanto a especificação do fornecedor os teores de cromo e molibdênio são diferentes. O Açoforja por ser um aço forjado tem uma composição química bem diferente dos aços laminados como Hardox 500 e Ravur 450.

Tabela 23 - Composição química dos martelos

Martelo	Hardox 500		Aço forja		Ravur 450 - Bulk		Ravur 450 - Covering CB70		Ravur 450 - Covering Rockit 706	
	Análise (%)	Especificação (%)	Análise (%)	Especificação (%)	Análise (%)	Especificação (%)	Análise (%)	Especificação (%)	Análise (%)	Especificação (%)
Fe	96.37		74.72		96.14		60.67		85.87	
Si	1.39	0,7	1.86		1.20	0.70	11.59	1.00	2.80	1.00
Al			4.20				1.30			
Mn	1.04	1.60	17.20	19.00	1.22	1.50	0.83		0.60	<1
Ni			0.09		0.44		1.13		0.35	
S					0.09				0.05	
Cr	0.87	1.50	1.87	2.00	0.73	0.45	0.27	5.00	4.20	2.00
Mo	0.17	0.60	0.02	30.00	0.19	0.25	13.69		0.53	
Cu	0.12		0.03				0.10		0.03	
Mg			0.00							
Nb	0.01									
Mo	0.17		0.02							
V							10.42		5.56	
P	0.02	0.02				0.03				
Zn	0.01									
Nb	0.01									
Sn	0.01									

Quanto aos materiais de cobertura (CB70 e Rockit 706) sobre o metal base (Ravur 450) proposto pela empresa HRC são características bem diferentes, pois a proposta é ter materiais com diferente composição química com o objetivo de aumentar a dureza do martelo para o retardamento do desgaste e aumentar a vida útil dele. O Ravur 450 com cobertura CB70 (3 mm) tem como objetivo de endurecedor pelos elementos de liga silício, molibdênio e vanádio, enquanto a proposta do Ravur 450 com cobertura Rockit 706 tem como objetivo de endurecedor pelos elementos de liga cromo e vanádio.

4.3 Análise da microdureza Vickers (HV0.2) dos martelos

A metodologia microdureza como mencionada no item 2.2.7.1 tem como objetivo de avaliar a dureza o material e o impacto desta dureza em relação ao material a ser processado.

Na Figura 130 pode-se ver o perfil da dureza de cada material ao longo de 15 indentações revelando que os materiais Aço forja possui uma baixa dureza, Hardox 500 e Ravur 450 possuem uma dureza aproximada entre 500-600 HV e os materiais revestidos possuem uma alta dureza próxima no sobremetal e uma dureza similar ao Hardox 500 no metal base.

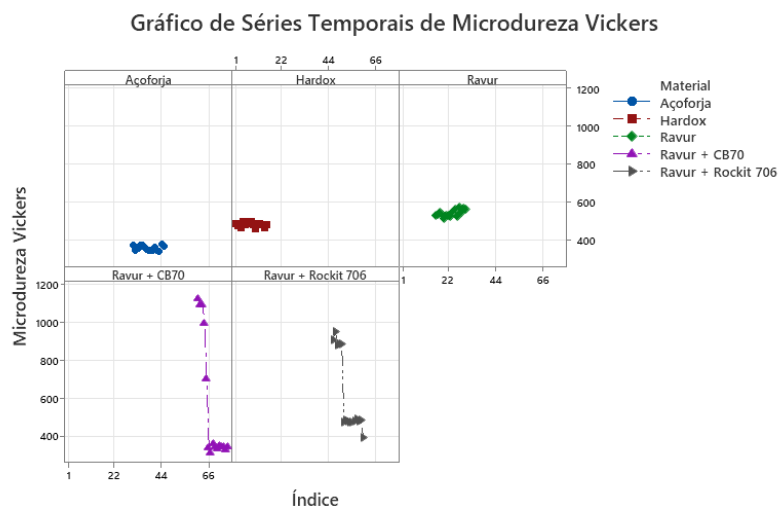


Figura 130 – Gráfico séries temporais da microdureza Vickers dos martelos

Na Figura 131 a usando a ANOVA avaliando a média total entre a medições de cada martelo nos mostra que o Ravur (metal base) com a cobertura do Rockit 706, possui a mais alta dureza, confirmando o melhor desempenho.

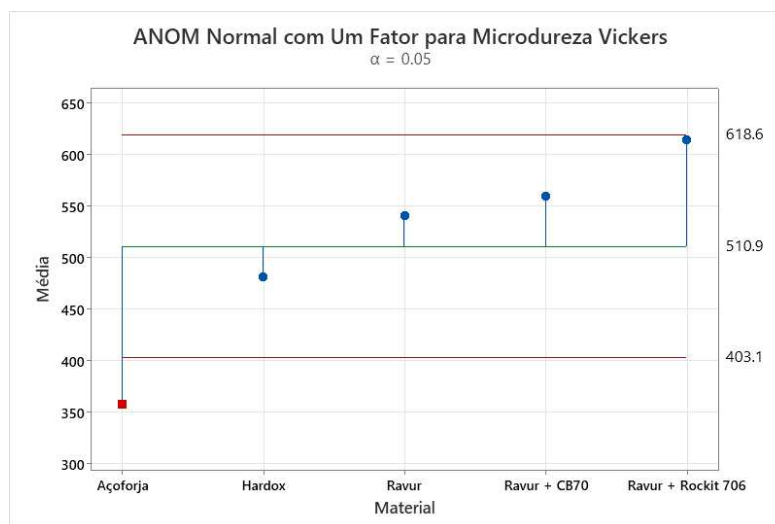


Figura 131 – Gráfico ANOVA Normal com um fator para microdureza Vickers dos martelos

Quando avaliado a relação entre dureza relativa entre o metal a ser processado versus o material a ser triturado pode-se entender que quando tem um sobre metal próximo aos materiais abrasivos de alta dureza como óxido de alumínio e quartzo (areia), conforme mencionado no item 2.2.7.1 pode-se concluir que os materiais revestidos iniciam com um desgaste plouging ao chegar no metal base o desgaste passa a ser *cutting*.

4.4 Análise macroscópica dos defeitos de superfície dos martelos

4.4.1 Aço Hardox 500

Conforme mostrado na Figura 132a apresenta um desgaste abrasivo por erosão e na Figura 132b um desgaste abrasivo tipo *cutting* sobre a superfície do martelo.

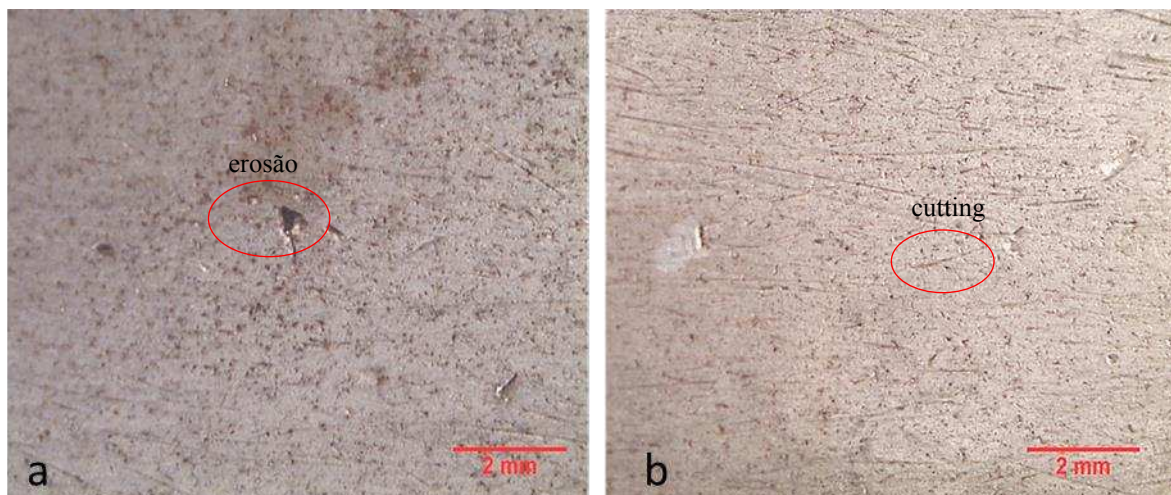


Figura 132 – (a) e (b) análise do desgaste superficial com diferentes morfologias no martelo Hardox via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x

4.4.2 Aço Ravur 450 (após o processamento e desgaste da cobertura em CB70)

Este material foi usado como metal base para os pós de cobertura na tecnologia *Laser Cladding*. Portanto esta análise revela o tipo do desgaste após todo o consumo do sobremetal sobre o metal base.

Outro tipo de desgaste abrasivo é a deformação plástica tipo *ploughing*, ação de um metal duro sobre uma superfície mais dúctil como mostra na Figura 133 uma predominância neste tipo de desgaste abrasivo.

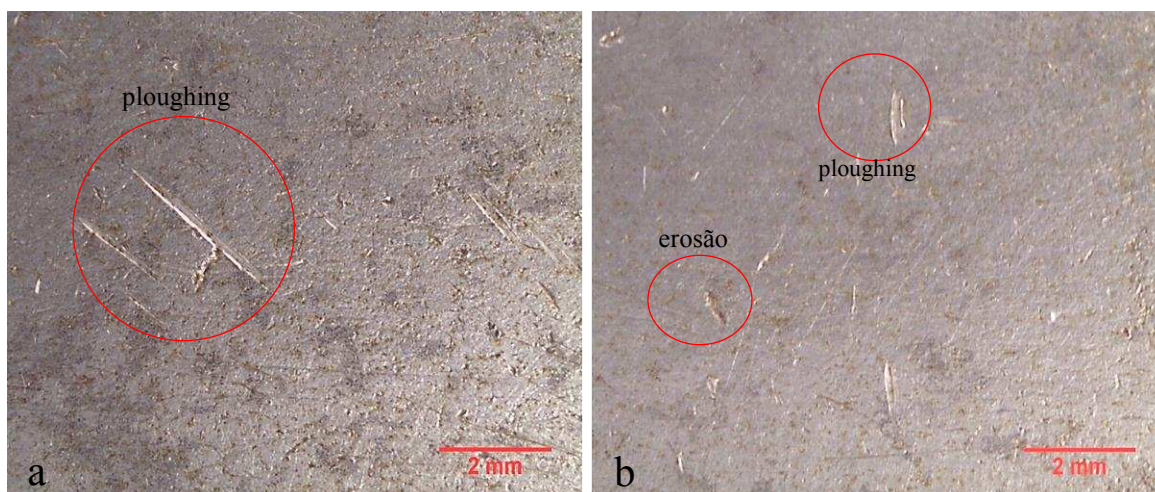


Figura 133 - (a) e (b) análise do desgaste superficial com diferentes morfologias no martelo Ravur 750 via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x

4.4.3 Aço Açoforja

No caso dos aços forjados por ser um material com uma menor dureza comparado aos demais materiais neste experimento, e a Figura 134 revela a predominância do desgaste abrasivo tipo *cutting* com cavidades bem profundas.

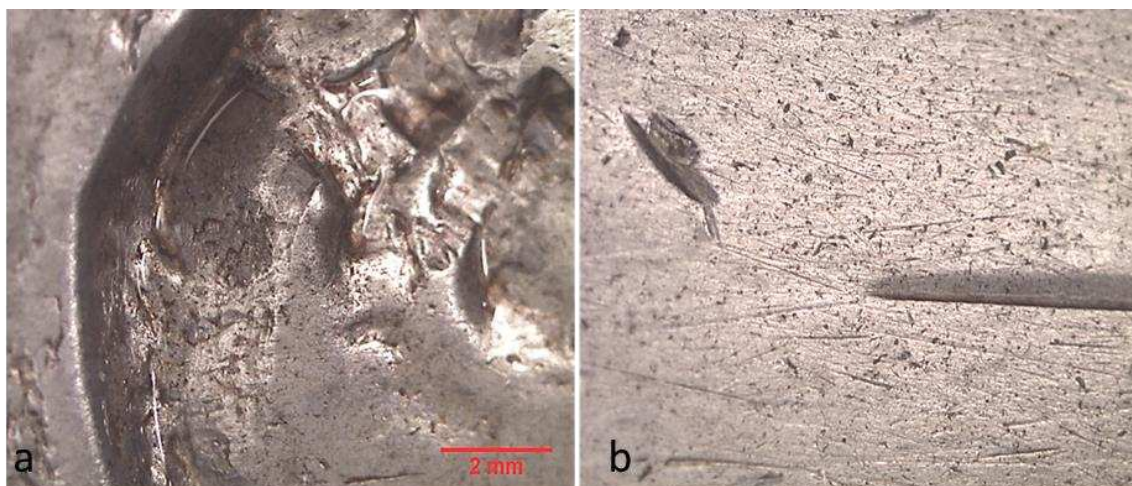


Figura 134 - (a) e (b) análise do desgaste superficial no martelo Açoforja via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x

4.4.4 Aço Ravur com cobertura Rockit 706 (antes do processamento)

Foi incluído neste item com intuito de mostrar e analisar a superfície do sobremetal após aplicação do pó de cobertura pelo processo tecnológico *Laser Cladding* para aumentar a dureza do material. A Figura 135 revela algumas erosões

na superfície do martelo gerado pela velocidade e temperatura da fusão do pó sobre o material base (Ravur 450). Este problema foi comunicado ao fornecedor que estará avaliando um novo procedimento para evitar este defeito superficial que ajuda acelerar o desgaste durante aplicação do material no moinho de martelos.

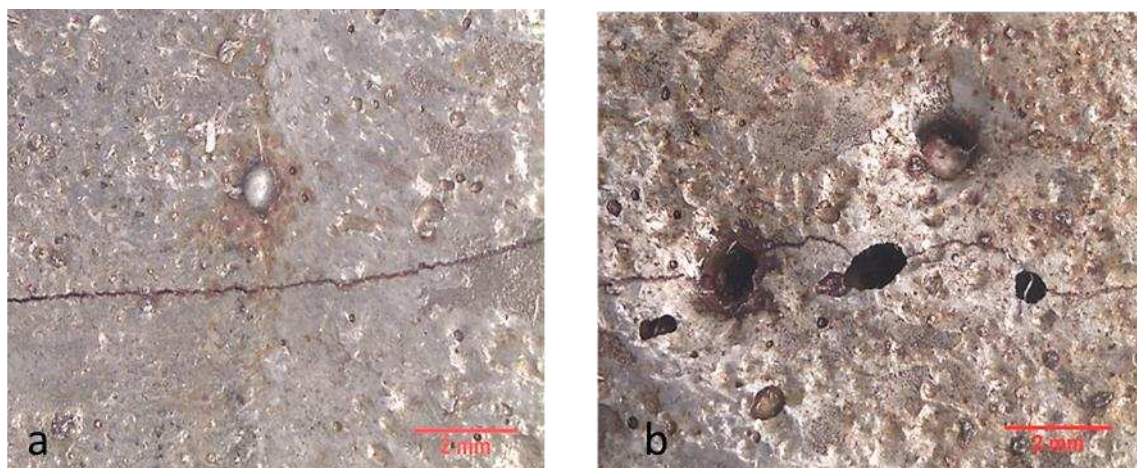


Figura 135 – (a) e (b) Análise da qualidade da aplicação do pó de coberbura Rockit 706 pelo processamento Laser Cladding no martelo Ravur 750 via lupa estereoscópica com aumento em 7.5x

4.5 Análise microscópica dos martelos

4.5.1 Microestrutura do Aço Hardox 500

Os testes de microscopia do aço Hardox 500 revelam que o material possui uma microestrutura uniforme martensítica revenida (revenimento em baixa temperatura) como mostra a Figura 136. Ao longo da microestrutura foram evidenciadas inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Quanto aos pontos escuros foram originados do próprio ataque Nital 5% deixando alguns resíduos na superfície da amostra, motivo desta afirmação foi devido análise do MEV conforme a Figura 138.

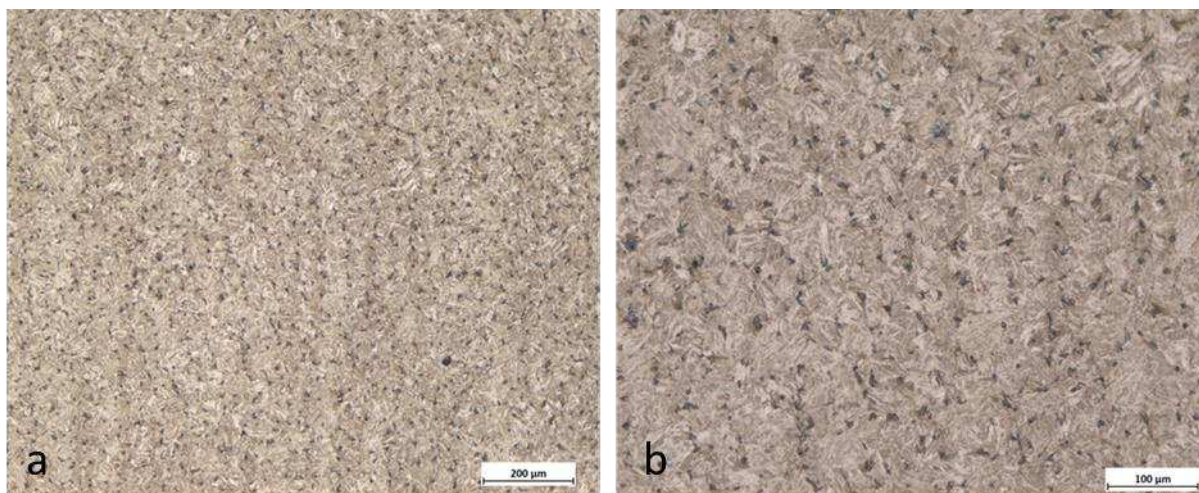


Figura 136 – *Cross Section* (seção transversal) da microestrutura do aço Hardox 500 com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Hardox 500 em 100x (b) microestrutura do material Hardox em 200x

4.5.2 Microestrutura do Aço Ravur 450

Os testes de microscopia do aço Ravur 450 revelam que o material possui uma microestrutura uniforme martensítica revenida (revenimento em baixa temperatura) como mostra a Figura 137. Ao longo da microestrutura foram evidenciadas inclusões de sulfeto de manganês (MnS).

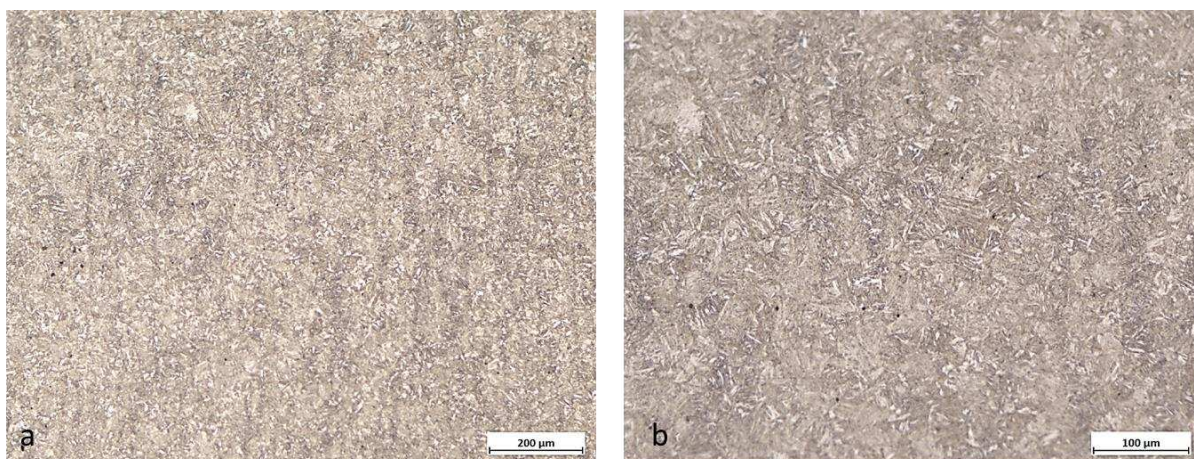


Figura 137 - *Cross Section* da microestrutura do aço Ravur 450 com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Ravur 450 em 100x (b) microestrutura do material Ravur 450 em 200x

4.5.3 Microestrutura do Aço Açoforja

Os testes de microscopia do aço Açoforja revelam que o material possui uma microestrutura uniforme austenita com presença de carbeto em contorno de grão como mostra a Figura 138. Ao longo da microestrutura foram evidenciadas inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Outro detalhe importante é a presença de inúmeros vazios ao longo da microestrutura (MEV)

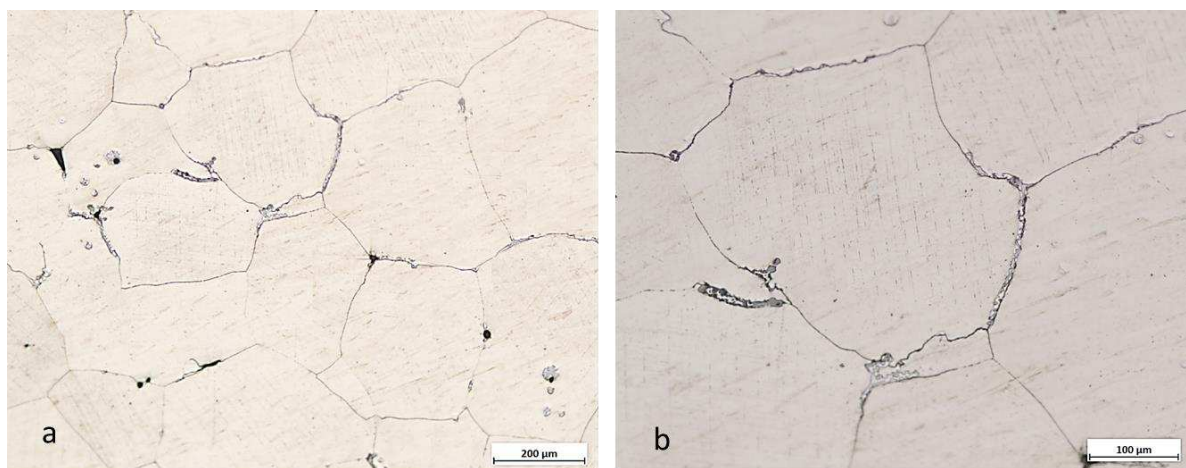


Figura 138 - *Cross Section* da microestrutura do aço Açoforja com aumento de 100x e 200x com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do material Açoforja em 100x (b) microestrutura do material Açoforja em 200x

4.5.4 Microestrutura do Aço Ravur com cobertura CB 70

Os testes de microscopia do aço Ravur com cobertura do material CB70 (Carbeto de vanádio, carbeto de cromo e boretos de molibdênio) revelam que o material possui uma matriz microestrutura uniforme martensítica revenida com presença de carbeto em contorno de grão como mostra a Figura 139a e com a cobertura do pó fundido pelo processo *Laser Cladding*. Na parte superior da Figura 139b a figura revela os pontos escuros do carbeto e boretos, fase clara revela a estrutura martensítica do pó de ferro fundido. Pode-se ver claramente na Figura 139c a ZTA (zona termicamente afetada) entre o metal base e a cobertura.

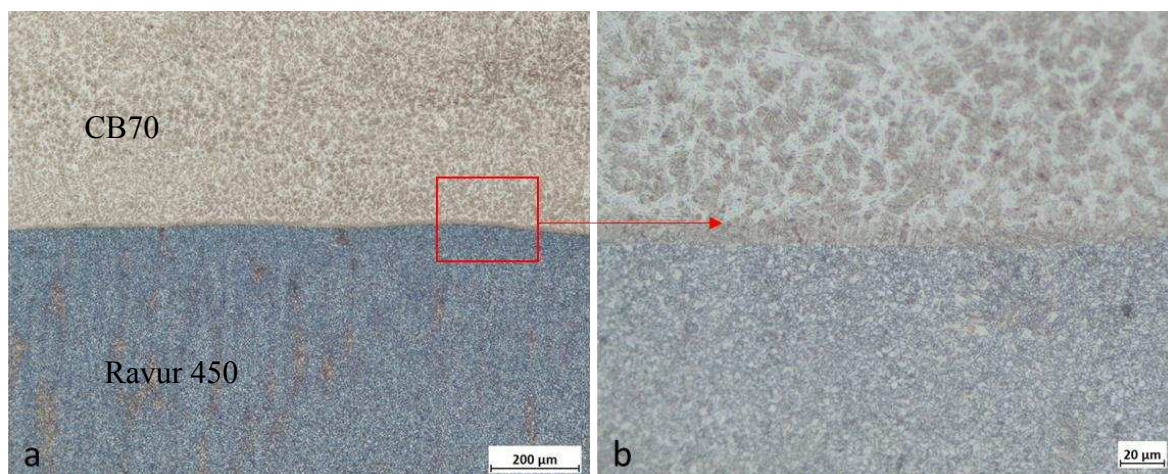


Figura 139 - *Cross Section* da microestrutura do aço Ravur 450 com cobertura em CB70 com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do metal base e revestimento CB70 em 100x (b) microestrutura do metal base e revestimento em 500x.

4.5.5 Microestrutura do Aço Ravur com cobertura Rockit 706

Os testes de microscopia do aço Ravur com cobertura do material Rockit 706 (carbetos de vanádio) revelam que o material possui uma matriz microestrutural uniforme martensítica revenida com presença de carbetos em contorno de grão como mostra a Figura 140b no metal base (Ravur 450) e com a cobertura do pó fundido pelo processo *Laser Cladding*. Na Figura 140A revela a presença de grão martensíticos na matrix com uma distribuição uniforme da fase dura do material precipitado. A Figura 140b também mostra que aplicação da cobertura sobre o metal base não tem uma espessura de camada uniforme, criando alguns entalhes na superfície do material a ser processado. Pode-se ver claramente na Figura 140c a ZTA (zona termicamente afetada) entre o metal base e a cobertura.

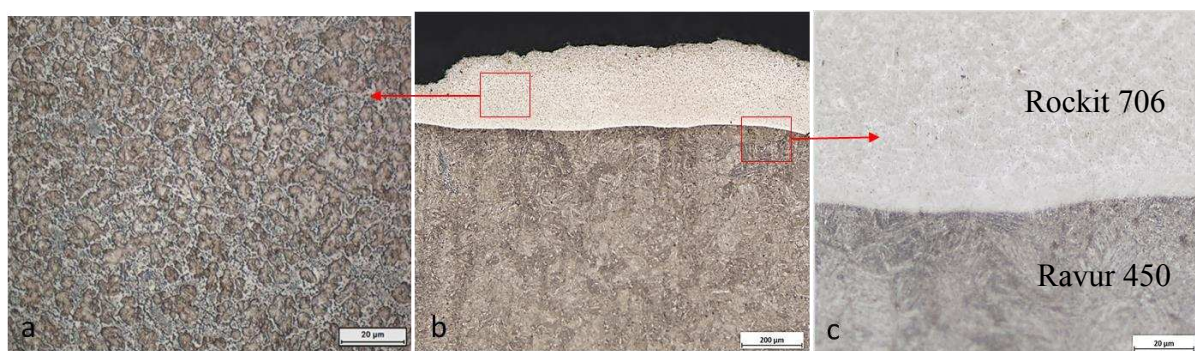


Figura 140- Cross Section da microestrutura do aço Ravur 450 com cobertura em Rockit 706 com ataque químico em Nital 5%, (a) microestrutura do revestimento Rockit 706 em 500x (b) microestrutura do metal base e revestimento em 100x (c) microestrutura do metal base e revestimento em 200x.

4.6 Análise MEV e EDS dos martelos

4.6.1 MEV e EDS do Aço Hardox 500

Como já foi mencionado na análise microestrutural do material, pode-se ver também na Figura 141a a morfologia martensítica uniforme revenida do material com melhor detalhamento dos contornos de grãos. Na Figura 141b revela o espectro da composição química do material em Fe-Cr-Si-C.

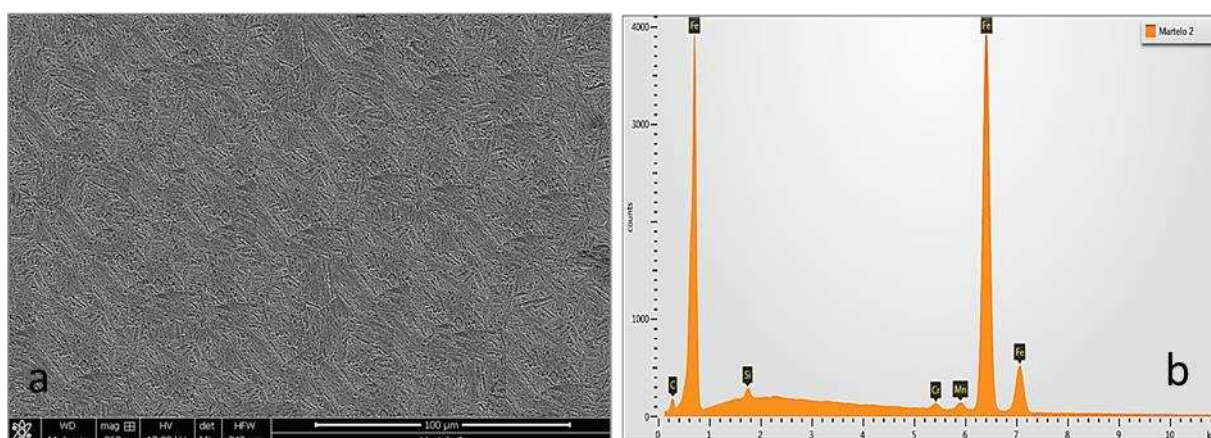


Figura 141 – Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM) e Espectro Energia Dispersiva (EDS) da análise do material Hardox 500 (a) SEM com 862x (b) EDS.

4.6.2 MEV e EDS do Aço Açoforja

No material Açoforja da Figura 142a revela carbeto em contorno de grão no aço com alto teor de Mn com morfologia austenítica com processo de solubilização para evitar o excesso de carbeto em contorno de grão. Nos espectros das Figuras 142b e 142c também revela o alto teor de Mn e traços de Cr-Si.

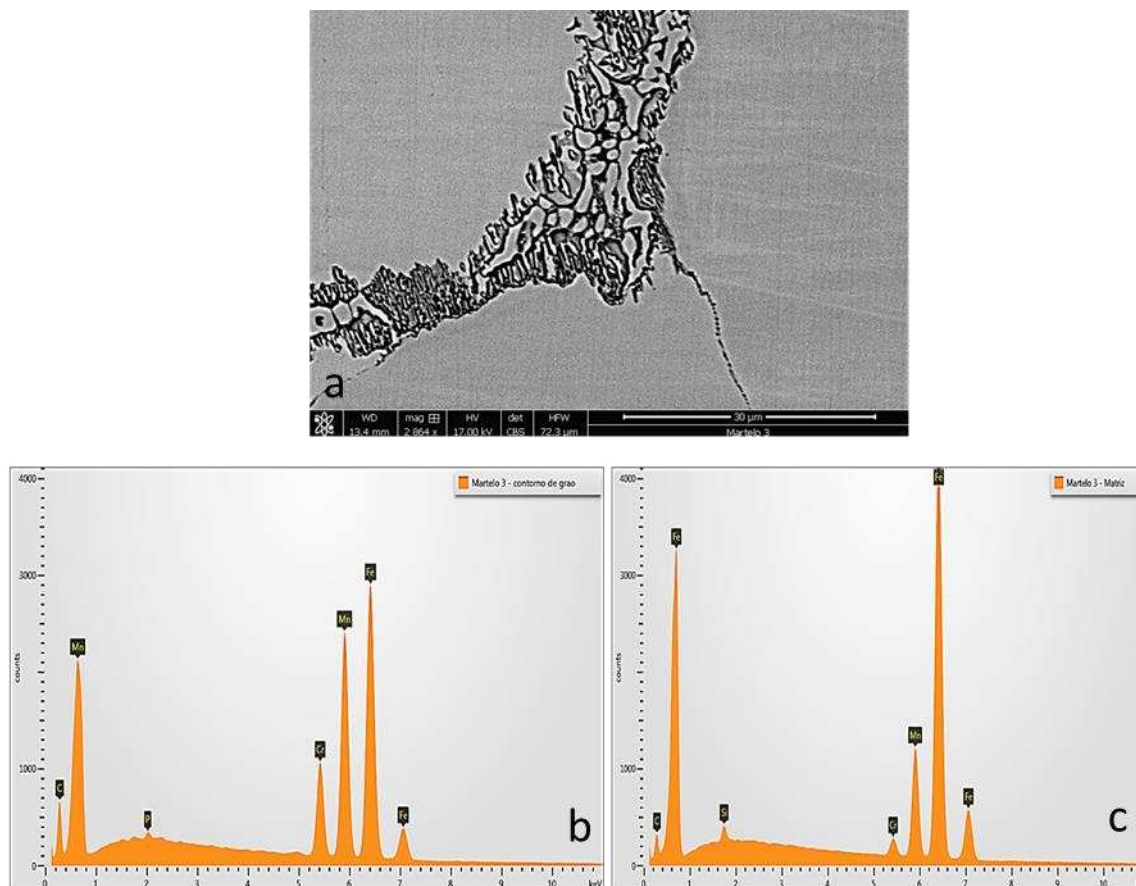


Figura 142- Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM) e Espectro Energia Dispersiva (EDS) da análise do material Açoforja 500 (a) SEM da estrutura do material 2664x (b) EDS no contorno de grão (c) EDS da matriz.

4.6.3 MEV e EDS do Aço Ravur com cobertura Rockit 706

As Figuras 143a e 143d revela tanto o *SEM* e *EDS* uma morfologia (martensítica) e composição química similar ao Hardox 500. Quanto a cobertura, proposta em aumentar a dureza do material, revela uma morfologia com a presença de partículas de segunda fase (WC) bem distribuídas na matriz e a composição química contendo W-C-Mo-V.

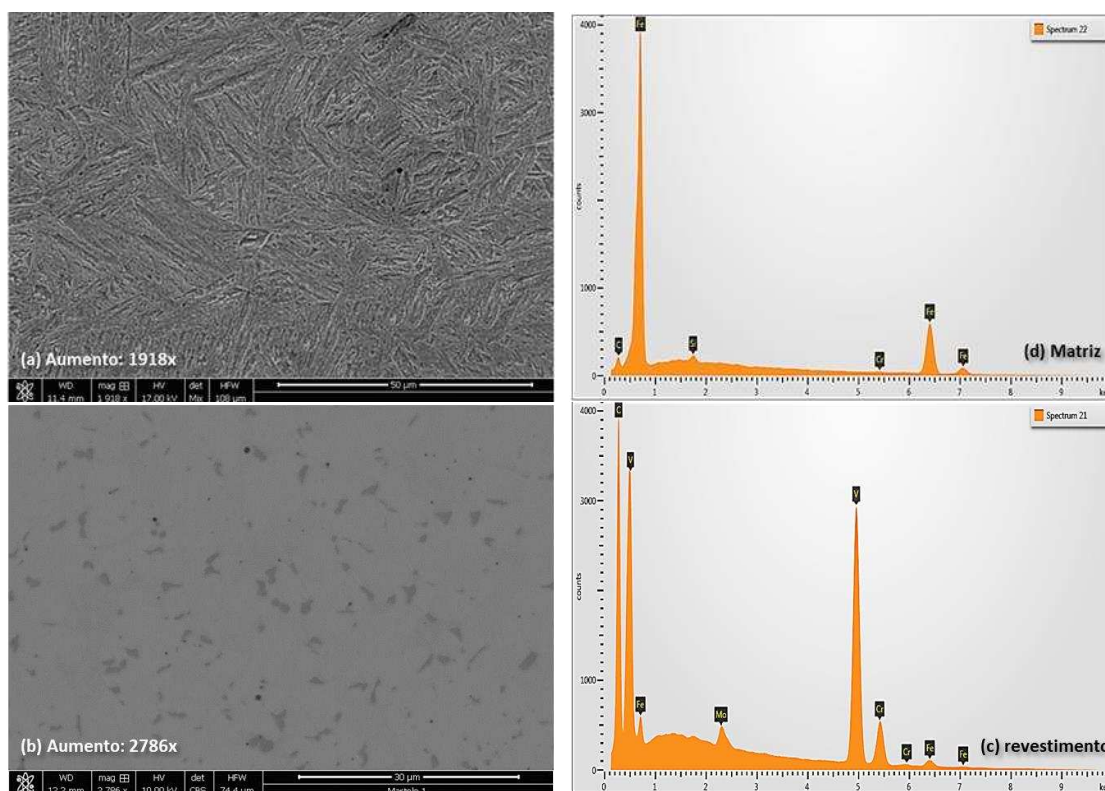


Figura 143- Microscópio Eletrônico de Varredura (*SEM*) e Espectro Energia Dispersiva (*EDS*) (da análise do material Ravur 450 com cobertura em Rockit 706 ((a) *SEM* no Ravur 450 com 1918x (b) *SEM* na cobertura em Rockit 706 com 2786x (c) *EDS* no Ravur 450 (d) *EDS* na cobertura em Rockit 706

4.6.4 MEV e EDS do Aço Ravur com cobertura CB70

As Figuras 144a e 144d revelam tanto o *SEM* e *EDS* uma morfologia (martensítica) e composição química similar ao Hardox 500, que devido à quebra do equipamento tivemos que realizar somente esta análise em um laboratório externo.

Quanto a cobertura, proposta em aumentar a dureza do material, revela uma morfologia com a presença de partículas de segunda fase (WC) lamelar dos carbeto e boretos bem distribuídas na matriz ferrítica com composição química contendo W-C-Mo-V.

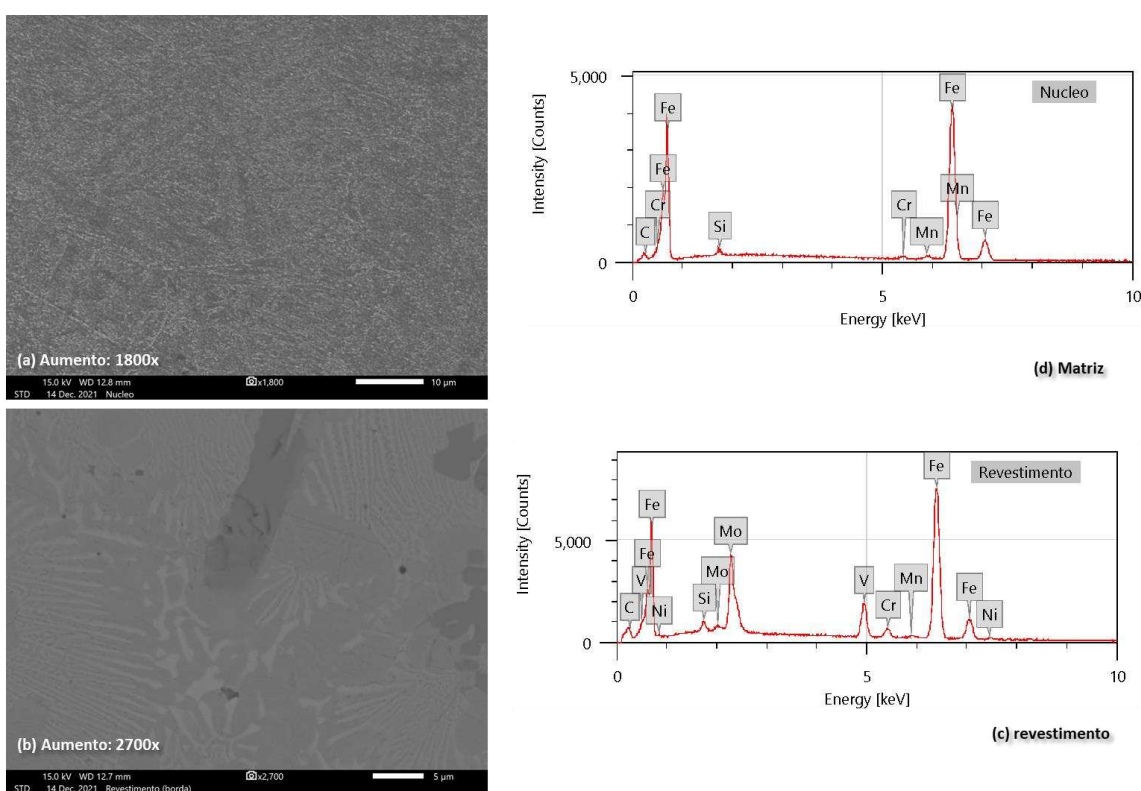


Figura 144 - Microscópio Eletrônico de Varredura (*SEM*) e Espectro Energia Dispersiva (*EDS*) (da análise do material Ravur 450 com cobertura em CB70 (a) *SEM* no Ravur 450 com 1800x (b) *SEM* na cobertura em CB70 em 2700x (c) *EDS* no Ravur 450 (d) *EDS* na cobertura em CB70.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho pode investigar e entender primeiramente o desgaste dos martelos no moinho de martelos na reciclagem na Novelis do Brasil Ltda no processamento do *UBC*.

Avaliando em uma perspectiva macro pode-se concluir que todo desgaste excessivo dos martelos nas extremidades dos eixos nas posições 1 ou 7 onde fica impossível reaproveitar a outra face do martelo para próxima preventiva (em torno de 15 dias). A primeira, é quando os martelos se desgastarem em que o desgaste atingir a outra extremidade do martelo, a manutenção poderia substituir por um novo martelo e fazer um novo balanço no sistema, onde não seria necessário a troca de todo o conjunto (28 unidades) e sim somente 4 unidades, gerando uma boa economia para área para empresa. Para estudo futuro será em realizar uma simulação em *CFD* para avaliar se a causa principal possa ser o excesso de latas (*UBC*) nas extremidades dos eixos, isto é, uma alimentação no equipamento não uniforme.

Todos os desgastes apresentados neste trabalho são desgastes abrasivos tipos *cutting*, *plowghing* e erosivo, devido o tipo de material processado, *UBC* contendo filme óxido de alumínio (Al_2O_3), como também as impurezas principalmente excesso de areia contida dentro dos fardos de *UBC* óxido de silício (SiO_2). Para a redução deste desgaste será preciso trabalhar com martelos que possam atingir uma alta dureza onde a razão do material processado em relação ao martelo seja mais próximo que 1.8, sendo assim pode-se reduzir este e aumentar a vida útil dos martelos.

Quanto aos testes realizados, o melhor martelo foi o Ravur 450, fabricado pela empresa Usiminas, com revestimento (cobertura) em Rockit 706, material com base em carbeto de tungstênio, podendo também avaliar esta nova tecnologia nos martelos do *Debaler*.

Avaliando em uma perspectiva micro, após avaliar as análises metalográficas, revelação que aplicação do revestimento (ou cobertura) em metal duro não está uniforme, discutido com o fornecedor HRC irá ajustar o processo *Laser Cladding*, reduzindo a velocidade e aplicação do pó. Esta ação poderá garantir a uniformidade da aplicação do revestimento e evitar as trincas superficiais. Agora quanto ao material fica bastante evidente que a morfologia martensítica é a melhor condição para este tipo de processo.

Outra discussão para um teste futuro será em aumentar a camada do revestimento de 3mm para 6mm e avaliar o quanto irá retardar o desgaste do metal base, isto é, não atingir a outra extremidade do martelo no prazo de 15 dias. Como também alterar o material do martelo Ravur 450 para Ravur 500, aumentando a dureza de ambos os materiais.

REFERÊNCIAS

BHUSHAN, Bharat. Introduction to Tribology: wear. In: BHUSHAN, Bharat. Introduction to Tribology. 2. ed. New York: Wiley, 2013. Cap. 7, p. 315-397.

BORTOLETO, Eleir Mundim. Comportamento tribo-mecânico e desgaste adesivo de materiais em nanoescala: análises por dinâmica molecular e mecânica do contínuo. 2015. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanical Engineering Of Design And Manufacture, Mechanical Engineering, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BOTH, Guilherme Brandes. Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio. 2011. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BUDYNAS, Richard Gordon et al. SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1109 p.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. 5. ed. Utah: Wiley, 2018. 960 p.

CHEN, G.X.; ZHOU, Z.R.. Study on transition between fretting and reciprocating sliding wear. *Wear*, [S.L.], v. 250, n. 1-12, p. 665-672, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00675-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00675-5).

DASARI, A.; YU, Z. Z.; MAI, Y. W. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 63, n. 2, p. 31–80, 2009.

ELLEUCH, Khaled; MEZLINI, Salah; FOUVRY, Siegfried; KAPSA, Philippe. Friction damage of aluminium alloys. *Industrial Lubrication And Tribology*, [S.L.], v. 55, n. 6, p. 279-286, dez. 2003. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/00368790310496428>.

HAWK, J.A.; WILSON, R.D.; TYLCZAK, J.H.; DOĞAN, Ö.N.. Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, [S.L.], v. 225-229, p. 1031-1042, abr. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(99\)00042-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(99)00042-3).

KALLEL, Mouna; ZOUCHE, Fatma; ANTAR, Zied; BAHRI, Amir; ELLEUCH, Khaled. Hammer premature wear in mineral crushing process. **Tribology International**, [S.L.], v. 115, p. 493-505, nov. 2017. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.025>.

KLAAS, L. S. Estudo da viabilidade de obtenção do metal patente por metalurgia do pó e comparação do desgaste com liga fundida e bronze sinterizado. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2013.

MYSHKIN, N. K.; PETROKOVETS, M. I.; KOVALEV, A. V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. **Tribology International**, v. 38, n. 11–12 SPEC. ISS., p. 910–921, 2005.

SHIPLEY, Roch J.; PARRINGTON, Ronald J.; DENNIES, Daniel P.. ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention: wear failures. 11. ed. Ohio: Asm, 1986. Cap. 4, p. 2002.

MONTGOMERY, Douglas C.. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 528 p. MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 629 p.

SCHEY, John A.. Tribology in Metalworking: friction, lubrication and wear. In: SCHEY, John A.. Tribology in Metalworking: friction, lubrication and wear. 2. ed. Ohio: Asm, 1984. Cap. 2. p. 94-120.

SCAPIN, Carlos Alberto. Análise sistêmica de falhas. 2. ed. Belo Horizonte: Falconi Editora, 2013. 249 p.

SILVA, C. H. DA. Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumínio. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

SZALA, Miroslaw; SZAFRAN, Michał; MACEK, Wojciech; MARCHENKO, Stanislav; HEJWOWSKI, Tadeusz. Abrasion Resistance of S235, S355, C45, AISI 304 and Hardox 500 Steels with Usage of Garnet, Corundum and Carborundum Abrasives. **Advances in Science And Technology Research Journal**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 151-161, 1 dez. 2019. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski (WNGB). <http://dx.doi.org/10.12913/22998624/113244>.

WANG, Jane; CHUNG, Yip-Wah. Encyclopedia of Tribology. 13. ed. New York: Springer, 2013. 4139 p.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. Microstructure and Wear of Materials. Oxford: North Holland, 1987. 10 v.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial desta obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Ewerton Firmino das Chagas

Taubaté-SP, 24 de janeiro de 2022