



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Rede Temática em Engenharia de Materiais
UFOP - CETEC - UEMG

TESE

“ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE BOMBARDEAMENTO ULTRA-SÔNICO”.

AUTOR: ERIVELTO LUÍS DE SOUZA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Gabriel S. Araújo

CO-ORIENTADORES: Prof. Dr. José Emanuel Lopes Gomes

Prof. Dr. Cristovam Paes de Oliveira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais do convênio entre a Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, CETEC e Universidade Estadual de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais, área de concentração: Processos de Fabricação.

Ouro Preto, fevereiro de 2006.

S729e

Souza, Erivelto Luis de.

Estudo e desenvolvimento de um processo de tratamento de resíduos siderúrgicos através de técnica de bombardeamento ultrassônico [manuscrito] / Erivelto Luis de Souza – 2006.

xvi, 119 f.: il. color., graf., tab.; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo.

Coorientadores: Prof. Dr. Cristovam Paes de Oliveira.

Prof. Dr. José Emanuel Lopes Gomes.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

1. Resíduos industriais - Teses. 2. Minérios de ferro - Teses.
3. Reciclagem - Indústria - Teses. 4. Meio ambiente - Teses.
5. Sustentabilidade - Teses. I. Araújo, Fernando Gabriel da Silva.
II. Oliveira, Cristovam Paes de. III. Gomes, José Emanuel Lopes.
IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU: 669.1:502.174

Catlogação: sisbin@sisbin.ufop.br



“Estudo e Desenvolvimento de um Processo de Tratamento de Resíduos Siderúrgicos Através da Técnica de Bombardeamento Ultra-Sônico”

Autor(a): Erivelto Luís de Souza

Tese defendida e aprovada, em 04 de abril de 2006, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo (Doutor) - Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT

Prof. Artur Pinto Chaves (Doutor)
Universidade de São Paulo

Prof. Jorge Alberto Soares Tenório (Doutor)
Universidade de São Paulo / REDEMAT

Prof. José Emanuel Lopes Gomes (Doutor) – Co-Orientador
Fundação Gorceix

Prof. Cristovam Paes de Oliveira (Doutor) – Co-Orientador
REDEMAT

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: meu pai, que sempre foi exemplo de hombridade e respeito, sem o qual eu jamais teria chegado até aqui. Minha mãe, quanta saudade, que sempre foi, e sempre será, o melhor exemplo de ser humano que eu podia ter.

À minha esposa, meu amor, exemplo de luta e perseverança, uma vencedora inata.

Ao meu irmão, meu melhor amigo, companheiro para toda e qualquer situação.

A minha outra família, minha segunda mãe, D. Lúcia, e minhas “irmãs”, pelo amor, carinho e confiança, sempre.

Ao meu filho, o maior motivo para vencer, e sem dúvida, o maior presente de Deus.

À minha princesa, Isabelle, coisa mais maravilhosa que Deus pôs no mundo, um pedaço do céu na Terra.

Aos meus amigos José Emanuel e Jaqueline, que sempre estiveram comigo nos momentos mais difíceis da vida, pelo apoio, incentivo e amizade incondicionais.

A outros tantos amigos que estiveram, estão e estarão presentes em minha vida e meus pensamentos, o tempo todo, a vocês, que aqui não descrevo individualmente, mas penso em cada um intensa e profundamente, acreditem, meu mais profundo sentimento de gratidão e amizade.

À minha escola, a Escola de Minas, por me ensinar, do alto de sua estampa, o significado de orgulho verdadeiro, de tradição honrosa, e de respeito profissional. No corpo de seu prédio, se projetando ao céu oculto pela neblina, numa noite fria de junho. Na presença sempre constante de meus irmãos e a quem admiro profunda e sinceramente, os ex-alunos que compõem nosso presente e nossa história.

Por fim, minha segunda casa, o lar que me acolheu e onde cresci em caráter e conhecimento, onde aprendi como vencer, e como reerguer nas derrotas. Aprendi que perde-se uma batalha, mas nunca a guerra. Minha casa, minha Aquarius. E meus irmãos aquarianos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo; Prof. Dr. José Emanuel Lopes Gomes; e Prof. Dr. Cristovam Paes de Oliveira;. A cada um de vocês devo a orientação, rumos certos neste caminho incerto; exemplo e modelo, imagens que me moldaram; companheirismo, apoio e palavras certas nos momentos de maior necessidade.

Ao Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira, por seu apoio, amizade e presenças marcantes sempre.

Aos professores da REDEMAT, que significaram, alguns desde a graduação, exemplos de profissionais e mestres ininterruptos, com ensinamentos eternos.

Ao engenheiro e amigo, Rogério Raimundo da Veiga de Souza, pelo apoio e boa vontade sem limites, que foram fundamentais na conclusão deste estudo.

Aos amigos, engenheirandos e bolsistas, Guilherme Santana e Carlos Centurion, por uma ajuda sempre bem disposta e eficiente.

À química Valdirene, por sua competência e profissionalismo.

À Fundação Gorceix, pelo apoio sempre, sem o qual eu não teria conseguido concluir este trabalho.

Aos funcionários do Núcleo de Inovações Tecnológicas da Fundação Gorceix – NUTEC/CT³/FG, ajuda sem hesitações, meu muito obrigado a vocês.

Ao Engenheiro Lorival e D. Sueli, que muito contribuíram para este trabalho.

À secretária da REDEMAT, Ana, pela simpatia e boa vontade sem par.

Aos saudosos ex-alunos e mestres: Dr. Walter Krüger, sempre um exemplo de vitória, capacidade e competência; e “Marajó”, sua influência e aconselhamento me ajudaram a definir o caminho. Minha mais respeitosa homenagem.

Às empresas que me apoiaram com materiais para efetivação de testes e análises: CSN, Belgo Mineira, Açominas e Mannesmann.

A todos os meus amigos que de uma forma ou outra me apoiaram, meu muito obrigado.

À minha família, que sempre esteve junto a mim, para sorrir comigo nos momentos de alegria e para me apoiar nos momentos de cansaço.

À minha mãe, pelo exemplo de coração. Meu pai, pelo exemplo de homem a seguir.

RESUMO

Este trabalho descreve um processo inovador de tratamento de resíduos siderúrgicos, principalmente lama grossa de aciaria, através de uma técnica inovadora e original que se baseia em uma associação de um bombardeamento ultra-sônico e uma agitação mecânica, com o objetivo de recuperar o conteúdo metálico desses resíduos. Tal processo já se encontra patenteado junto ao INPI. Durante o processo de fabricação do aço, em conversores LD, o ferro líquido projetado na atmosfera oxidante do conversor, solidifica-se sob a forma de pequenas esferas com uma gama variada de tamanhos. Entretanto, nem todas as esferas são perfeitas, pois algumas acabam por não conseguir completar sua esferoidização, devido às condições variadas de tamanho, velocidade de resfriamento e tensões superficiais. Quanto menor o tamanho das partículas esféricas, maior o grau de oxidação das mesmas, formando-se assim uma poeira que, em contato com a água de lavagem, gera um “cimento” ligante, que agrega as demais esferas, com partículas não metálicas inerentes à produção de aço (escória; coque; CaO; etc.). Esta “poeira” preenche inclusive as cavidades de algumas das esferas ocas. Após a lavagem dos gases, a “lama” formada conterá então microesferas de aço (completas e ocas) aglomeradas entre si e com as impurezas, através da ação agregante das partículas finas, aqui denominadas de “poeira”. Esta lama, considerada rejeito industrial, tem um certo custo de estocagem e manuseio. A técnica em questão consiste na aplicação de ondas ultra-sônicas sobre uma polpa, formada pela adição de água à lama grossa proveniente do classificador (parafuso). Este bombardeamento ultra-sônico, promove a dispersão das micropartículas ligantes da lama e, conseqüentemente, atua nas partículas maiores causando sua desagregação e limpando o interior das partículas ocas. Deve-se ressaltar que este processo mantém a integridade das partículas que compõem a lama. A aplicação de ondas ultra-sônicas em uma polpa constituída de materiais de diferentes densidades acelera a precipitação das partículas mais densas. Assim, torna-se necessário uma eficiente macroagitação desta polpa, de forma a manter as partículas em

suspensão, permitindo a ação do bombardeamento ultra-sônico e o escoamento completo da polpa, sem entupimento. Após a desagregação, as partículas que compõem a polpa estarão completamente liberadas. A polpa é então encaminhada a uma etapa de concentração gravítica para a recuperação das partículas esféricas de elevado teor metálico (90 a 96% Fe). Os produtos finais das mesas de concentração (concentrados, misto e rejeito) atuam como bons indicadores de controle do processo de fabricação de aço. Esse material quando recuperado evita um impacto ambiental pela descarga de teores de ferro metálico no ambiente, que pode alterar as propriedades físicas e químicas do solo, afetando drasticamente os microorganismos que nele habitam. Este trabalho apresenta também um estudo enfatizado nos microorganismos que compõem a biota e são responsáveis pela capacidade de gerar vida no solo.

Palavras-chave: bombardeamento ultrassônico; resíduos siderúrgicos; reciclagem de resíduos; meio-ambiente, sustentabilidade.

ABSTRACT

This Study describes an original recovery process for the metallic Fe present in the LD steel sludges through the application of ultrasonic waves. It is a very simple, economic and significantly efficient process. Its patent has been duly requested to INPI. During the steel manufacturing process utilizing LD converters, the liquid iron, which is shot into the oxidizing atmosphere of the converter, becomes solid under the form of small spheres widely ranging in size. Their spherical form is determined by a physical principle which rules liquid-gaseous interfaces: the bigger the mass, the smaller the surface area. However, not all spheres will be perfect, since they may not have their sphere-forming process complete, due to the varying conditions of size, cooling speed and surface tensions. The spherical particles bearing a size inferior to a critical value are submitted to a high oxidation degree, so forming dust which generates a bonding “cement” when it gets into contact with the wash water. This cement aggregates the other spheres with non-metallic particles, inherent to steel production (e.g. slag; coke; CaO; SiO₂; etc.). This “dust” also fills the cavities of the unfinished spheres. After the gases are washed out, the so formed “sludge” will contain steel microspheres (both complete and unfinished), merged together and also with impurities, through the aggregating action of fine particles, which we name here “dust”. That sludge, considered industrial waste, poses a certain cost for its disposal and handing. Our process consists in applying ultra-sonic waves on the pulp formed by the addition of water to the coarse sludge which comes from the classifier. Such an ultrasonic bombardment pro-motes the dispersion of the bonding particles of the sludge and, consequently, acts over the bigger particles, causing their disaggregation and cleaning the interior of the hollow particles. It should be emphasized that this process keeps the integrity of the particles which constitute the sludge. The application of ultrasonic waves on a pulp constituted by materials of different densities speeds up the precipitation of denser particles. An efficient pulp macroagitation is therefore necessary, in order to keep the particles in suspension and so allowing the ultrasonic bombardment to take effect, as well as the complete flowage of the pulp without any

choking. After the disaggregation, the particles which constitute the pulp will be completely liberated. The pulp is then taken to the spirals for concentration and washing out of the spherical particles bearing an elevated metallic content (90 a 96% Fe). The sludge composition and characteristics vary as the blow elapses and also according to the LD operation mode and the kind of steel manufactured. The final products from the concentrating spiral (concentrate, middlings and tailings) are good control indicators of the steel manufacturing process. This material when is recovered avoid an environmental impact that can be caused by discharge of high iron composition particles, that can change the physical and chemical properties of soil, attacking the microorganisms use to live in soil. These work piece show a soil microorganisms study, the biota, they are answerable for the capacity to bring life on the soil.

Key-words: *ultrasonic bombardment; waste steel; waste recycling; environment; sustainability.*

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objetivos do Estudo Realizado.....	5
3. Revisão Bibliográfica.....	7
3.1. Meio Ambiente – Solo.....	7
3.1.1. Bactérias do Solo.....	15
3.1.2. Fungos do Solo.....	20
3.1.3. Condições do Solo.....	22
3.1.4. Composição e Estrutura do Solo.....	22
3.1.5. Água e o Solo.....	22
3.1.6. Gases no Solo.....	23
3.2. Caracterização de Resíduos Pelas NBR's.....	24
3.2.1. Avaliação da Situação dos Resíduos Industriais.....	25
3.3. Estudos Sobre Reciclagem.....	27
3.3.1. Definição de 5R's.....	28
3.3.2. Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos.....	28
3.4. Princípios e Propriedades do Ultra-Som.....	39
3.4.1. Princípio de Operação do Ultra-Som.....	44
4. Parte Experimental – Cálculo, Projeto e Construção do Equipamento de Desagregação Ultra-Sônica.....	54
4.1. Análise dos Resíduos a Serem Tratados.....	55
4.1.1. Microesferas contidas na lama de aciaria.....	55
4.1.2. Carepas de laminação.....	56
4.2. Caracterização Inicial da Lama de Aciaria.....	57
4.2.1. Composição da Lama de Aciaria.....	57

4.2.2. Análise de Raios-X da Lama de Aciaria.....	58
4.2.3. Análise da Lama de Aciaria por Espectros Mössbauer.....	60
4.2.4. Origem das Partículas que Compõem a Lama de Aciaria.....	61
4.2.5. Formação das Microesferas no Ambiente do Forno.....	62
4.2.6. Composição Média das Lamas Grossas formadas nas Siderúrgicas Brasileiras.....	64
4.2.7. Arraste das Partículas e Lavagem dos Gases.....	64
4.2.8. Separação entre Lama Grossa e Lama Fina.....	65
4.3. Caracterização Inicial da Carepa de Laminação.....	66
4.3.1. Composição da Carepa.....	66
4.3.2. Origem da formação da Carepa Oleosa e Lama Fina de Laminação	67
4.3.3. Análises da Lama de Laminação.....	68
4.4. Escolha de Tratamento dos Resíduos por Bombardeamento Ultra-Sônico.	69
4.4.1. Definição do Método a ser Utilizado.....	69
4.4.2. Cálculo da Relação de Potência.....	74
4.4.3. Cálculo da Densidade da Polpa Formada.....	75
4.5. Projeto e Construção de um Sistema Piloto.....	77
4.5.1. Propagação de Ondas Acústicas no Interior do Tanque.....	79
4.5.2. Projeto do Equipamento.....	82
4.5.3. Construção da Planta Piloto.....	82
4.5.4. Análise dos testes na planta piloto.....	84
4.5.5. Construção da Planta Semi-Industrial.....	84
4.5.6. Construção da Planta Industrial Instalada na CSN.....	86
4.5.7. Aspecto dos Materiais Obtidos pelo Processamento da Lama Grossa de Aciaria.....	88
4.5.8. Construção da Planta Piloto na V&M Tubes para Tratamento de Carepa e Lama Oleosas.....	88
5. Resultados e Discussão.....	91
6. Conclusões.....	96
7. Contribuições Originais ao Conhecimento.....	98

8. Relevância dos Resultados.....	100
9. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
Bibliografia.....	106

Índice de Figuras e Tabelas

Figuras	Pg.
Figura 1.1 – Fluxograma resumido da geração de resíduos nas etapas de produção metalúrgica	2
Figura 1.2 – Fluxograma resumido da geração de resíduos nas etapas de produção siderúrgica	4
Figura 3.1 – Rotíferos: <i>brachionus angularis</i> e <i>lecanne sp.</i>	15
Figura 3.2 – Bactérias Nitrificadoras	17
Figura 3.3 – Bactérias Sulfurosas: (a) colônia de bactérias sulfurosas; (b) detalhe de uma única bactéria (curiosamente adaptou-se ao meio tornando-se pluricelular – cerca de mais de 20 células).	17
Figura 3.4 – Bactérias Autotróficas do gênero <i>Diatomaceae</i>	18
Figura 3.5 – Semelhanças básicas entre hemoglobina e clorofila.	19
Figura 3.6 – Algas Cianofíceas.	22
Figura 3.7 – Planta instalada pela Paul Wurth, em cooperação com a ProfilARBED Esch-Belval: Projeto inicial em três dimensões e foto.	30
Figura 3.8 – Fotos de satélite a 10.000 m de altitude das principais siderúrgicas brasileiras localizadas dentro de centros urbanos: (a) Açominas – Ouro Branco/MG; (b) Cosipa – Cubatão/SP; (c) CSBM – João Monlevade/MG; (d) CSN – Volta Redonda/RJ; (e) CST – Vitória/ES; (f) Usiminas – Ipatinga/MG.	31
Figura 3.9 – Uso de Escória de LD na formação de Gabiões de contenção.	34
Figura 3.10 – Utilização de escória de LD granulada em Rip-rap's de contenção.	35
Figura 3.11 – Utilização da lama grossa de aciaria para a fabricação de briquetes a serem reutilizados no Alto-Forno: por ser proveniente da aciaria, o ferro contido no material sob a forma metálica possui um grau de pureza (ligas e carbono) superior ao que resultará no produto final que é o gusa.	36
Figura 3.12 – Etapas de laminação de chapas de aço: entrada da chapa no trem de laminação; vapor formado pelo impacto do fluido refrigerante; imagem de uma camada de carepa remanescente após jateamento por injetores de pressão.	37
Figura 3.13 – Esquema descritivo de projeto e operação de injetores de pressão para jateamento de fluido resfriador sobre chapas laminadas, com detalhamento da distribuição e valores da pressão do jato na área de impacto.	39
Figura 3.14 – Curva mostrando a razão entre a intensidade do som na direção θ e a intensidade ao longo da normal para um disco vibrador de um pistão discreto em função da frequência angular ω .	42

Figura 3.15 – Detalhe da seleção dos transdutores piezelétricos cortados a partir de cristais de quartzo: a) Cristal de quartzo; b) pratos e placas de quartzo cortados a partir do cristal.	46
Figura 3.16 – Variação de dimensão de alguns metais magnetostrictivos em função da intensidade magnética do campo aplicado, percebe-se claramente o motivo da utilização do níquel como principal gerador de ondas ultra-sônicas magnetostrictivas.	46
Figura 3.17 – Sistemas de geração de ondas ultra-sônicas por magnetoestricção: a) cilindro transdutor com excitação axial, utilizado para emissões concentradas e altas frequências, com duas bobinas, L_1 e L_2 , de ressonância; b) disco transdutor com excitação radial, frequências intermediárias e baixas, menor intensidade, maior área de ação; c) detalhe das bobinas de excitação do disco transdutor.	47
Figura 3.18 – Movimento de onda plana.	48
Figura 3.19 – Atenuação da intensidade da onda ultra-sônica na água.	51
Figura 4.1 – Lama de aciaria: (a) fotografia da lama grossa original; (b) esquema descritivo das partículas da lama grossa; (c) descrição esquemática do agregado de partículas que compõe os grãos da lama grossa sem a presença dos finos ligantes.	56
Figura 4.2 – Trem de laminação onde, através do jateamento sobre a superfície, são geradas as carepas oleosas e lamas oleosas.	57
Figura 4.3 – Difractogramas de raios-X das amostras dos rejeitos de aciaria: Lama Grossa e Lama Fina. W → wustita (FeO), Mag → magnetita (Fe ₃ O ₄), C → calcita (CaCO ₃), P → portlandita (Ca(OH) ₂), Q → quartzo (SiO ₂).	59
Figura 4.4 – Microesferas solidificadas dentro do ambiente gasoso do Conversor LD.	60
Figura 4.5 – Momento da Geração das partículas que irão compor a lama de aciaria: (a) Banho metálico composto inicialmente de ferro gusa, com alto teor de carbono (>4%); (b) jato de oxigênio sobre o banho metálico, que promove a formação do gás (CO/CO ₂) e arrasta as partículas finas; (c) lança de oxigênio que leva o jato de oxigênio ao banho; (d) microesferas arrastadas juntamente com partículas não metálicas pelo fluxo de gás; (e) sistema OG, responsável pela tiragem controlada de gás, impedindo a entrada de ar externo e a saída de gás gerado, por onde o gás, carregando as partículas, será lavado, formando a lama de aciaria.	61
Figura 4.6 – Partículas de características diferentes formadas dentro do ambiente do conversor LD, arrastadas pelo fluxo de gás gerado.	62
Figura 4.7 – Exemplo de uma saia de coleta de gás na boca do Conversor LD do Sistema OG, todo o gás gerado é succionado para o Sistema de lavagem dos gases.	63
Figura 4.8 – Sistema OG de coleta de Gases: (1) Conversor LD; (2) Sistema de entrada da lança de O ₂ ; (3) Estrutura do sistema OG por onde o gás	64

é retirado; (4) Canal do venturi onde o gás é lavado; (5) Saída do gás lavado para a armazenagem ou queima; (6) Descarga da lama residual da lavagem dos gases.

- Figura 4.9 – Esquema do Classificador Parafuso – modelo *Akins*: 1) Vista em perspectiva isométrica sem carga; 2) Vista Frontal: ângulo de inclinação q ; 3) Vista frontal; 4) Vista superior; 5) Vista do projeto com detalhamento composicional; 6) Corte AA: distância de entre o parafuso e o leito – d , Velocidade angular do eixo – N . A eficiência, η , do corte de acordo com o tamanho da partícula escolhida a classificar é função das seguintes variáveis: $\eta = f(\theta, d, N, \rho)$, onde ρ é a densidade de sólido na polpa tratada. 65
- Figura 4.10 – Carepa formada logo após solidificação e quebra da camada fina exterior da placa quente laminada, por ação do choque térmico do contato com os cilindros e com o jato de resfriamento. 66
- Figura 4.11 – Esquema de distribuição de pressão do jato de impacto dos *sprinters* utilizados para remoção da carepa formada sobre as placas laminadas. 67
- Figura 4.12 – Efeito de um bombardeamento ultra-sônico nas interfaces sólido-líquido: (a) Placa de zinco polida exposta a ultra-som de 20 kHz; (b) e (c) Efeito do ultra-som sob platina em sistema plantina-água deionizada, (microfotografias eletrônicas), antes e depois da exposição ao ultra-som, respectivamente. (Imagens: DIETMAR PETERS, Ph.D., European Society of Sonochemistry) 70
- Figura 4.13 – Esquema de testes de bancada: a) montagem do equipamento de agitação mecânica pra trabalhar em conjunto com o transdutor de ultra-som; b) ondas ultra-sônicas aplicadas sobre a amostra. 71
- Figura 4.14 – Ultra-sons de mesa, utilizados nos testes de bancada: 30W e 75W. 71
- Figura 4.15 – Amostras de água de lavagem da lama após bombardeamento ultra-sônico, contendo os finos coloidais que são dispersos pelo bombardeamento ultra-sônico, com tempos diferentes de coleta, da esquerda pra direita: 1min, 7,5min e 15min. 72
- Figura 4.16 – Distribuição de ondas sonoras de 1.^a, 2.^a e 3.^a ordem dentro dos recipientes de acordo com a forma do tanque e posição do transdutor: (a) tanque de seção quadrada, transdutor aplicado no centro de uma face; (b) tanque de seção quadrada, transdutor aplicado em diagonal; (c) tanque de seção circular. 77
- Figura 4.17 – Esquema construtivo do transdutor ultra-sônico: (a) tanque de proteção do transdutor; (b) transdutor – placa magnetoestrictiva de níquel; (c) bobina do enrolamento de excitação magnética; (d) núcleo concentrador de alta permeabilidade magnética; (e) cabos de alimentação provenientes do gerador de ondas quadradas de frequência ultra-sônica; (f) furo de saída de ar da câmara interna da caixa de proteção do ultra-som; (g) furo de entrada dos cabos de 78

alimentação de pulsos elétricos.

- Figura 4.18 – Detalhe da propagação mecânicas do ultra-som (16kHz) dentro do tanque cilíndrico: (a) propagação das ondas diretas (desconsiderando-se as cilíndricas secundárias) definindo a ordem de reflexão das mesmas; (b) fotoluminescência de ondas planas de 1.^a ordem para ondas largas; (c) simulação de ondas planas e cilíndricas; (d) projeção espacial das ondas de até 5.^a ordem (4.^a reflexão) dentro do tanque, representando o efeito caótico de sua mecânica. 80
- Figura 4.19 – Projeto do tanque do protótipo de 300W. 81
- Figura 4.20 – Protótipo do Desagregador Ultra-Sônico, com potência de 300W. 82
- Figura 4.21 – Planta piloto inicial para tratamento de lama grossa de aciaria instalada no Núcleo de Tratamento de Resíduos da Fundação GORCEIX, com capacidade de tratamento de 35 t/mês. 82
- Figura 4.22 – Planta semi-industrial, capacidade: 1200 t/mês. 84
- Figura 4.23 – Projeto do tanque com dois transdutores ortogonais. 85
- Figura 4.24 – Planta Industrial, capacidade: 3.000 t/mês, instalada na CSN e operada pela K&K: (a) classificador parafuso retirando a lama grossa do espessador; (b) tubulação por onde a lama é bombeada para a planta de tratamento pelo D.U.S.; (c) planta de tratamento da lama de aciaria pelo processo D.U.S.; (d) forno de secagem onde o material é descarregado em tambores; (e) concentrado seco carregado em tambores; (f) vagão levando os tambores com o concentrado para alimentação na aciaria; (g) eletroímã carregando o tambor contendo o concentrado metálico na caixa de sucatas; (g) vista de frente da caixa de sucatas. 86
- Figura 4.25 – Aspecto da lama grossa nas várias etapas correspondentes ao processo: (a) lama grossa original seca; (b) após desagregação pelo D.U.S., com retirada dos finos coloidais; (c) concentrado metálico, rico em ferro, sob a forma de microesferas; (d) resíduo secundário do processo, rico em CaO, gerado pelas espirais de Humphrey. 87
- Figura 4.26 – Projeto de fluxograma da planta de tratamento de carepa instalada na V&M Tubes. 88
- Figura 4.27 – Planta piloto instalada na ETE da V&M Tubes: (a) polpa feita com material (carepa e lama) oleoso, pronto para bombeamento para a planta de tratamento; (b) vista da planta ao lado do tanque de mistura; (c) vista lateral do acesso da planta; (d) vista mais aproximada da planta; (e) detalhe do equipamento de dispersão ultra-sônica de óleo, ciclones, espirais de Reichert e forno de secagem; (f) detalhe do sistema de ciclones na alimentação do D.U.S.; (g) detalhe do forno de multicamadas concêntricas de secagem; (h) vista dos tambores de armazenamento do material 89

seco, em frente ao forno; (i) detalhe da “fluidez” do material seco; (j) tambor de carepa cheio (0,08% óleo, H₂O < H₂OAR); (k) resíduo secundário: óleo obtido no processo, a ser direcionado para floculação e recuperação.

Figura 4.28 – Projeto de planta industrial para instalação imediata na V&M Tubes.	90
Figura 5.1 – Tabela de distribuição participativa simples de acordo com a dureza analisada, em partículas de 150#.	92
Figura 5.2 – Tabela de distribuição participativa simples de acordo com a dureza analisada para a faixa granulométrica de 65#.	93

Tabelas

	Pg.
Tabela 3.1 – Teores de composição média para as escórias de LD e alto-forno.	32
Tabela 3.2 – Composição do cimento CP II E.	33
Tabela 3.3 – Composição do cimento CP III.	34
Tabela 3.4 – Absorção do ultra-som na água.	53
Tabela 4.1 – Valores médios de composição para as frações grossa e fina da lama de aciaria.	57
Tabela 4.2 – Análise do teor de ferro presente na lama fina de aciaria, global e por faixa granulométrica.	58
Tabela 4.3 – Fases majoritárias e minoritárias presentes nas lamas Fina e Grossa, respectivamente, segundo análise de raios-X.	59
Tabela 4.4 – Teores (% peso) das fases portadoras de ferro. A última coluna mostra apenas o teor de Fe ³⁺ em uma fase cuja composição não foi identificada.	61
Tabela 4.5 – Análise média das lamas com base em seus componentes principais.	64
Tabela 4.6 – Resultados da Classificação da Lama Oleosa V&M Tubes com relação aos componentes residuais.=	69
Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica antes e após desagregação de acordo com a potência específica utilizada.	74
Tabela 4.8 – Distribuição de massa e teores metálicos (valores médios) obtidos para os componentes da lama grossa obtidos após processamento na planta piloto.	84
Tabela 4.9 – Teores de recuperação de massa e teores metálicos da lama grossa de aciaria para a planta semi-industrial.	86

Capítulo 1

Introdução

Na evolução dos processos metalúrgicos, os mesmos passaram da escala manual, praticada por artífices e tomaram caráter industrial, com um aumento significativo da capacidade de produção, tanto quantitativa quanto qualitativamente, em resposta a uma necessidade cada vez maior de produtos melhores e em maiores quantidades. Se por um lado o desenvolvimento tecnológico foi se adequando aos desafios práticos mercadológicos, por outro a ação cada vez mais agressiva desses processos sobre o meio-ambiente, inicialmente ao redor das instalações e, em seguida, em função da soma desses impactos, em todo o ecossistema, vem chamando a atenção de estudiosos cada vez mais determinados a descobrir maneiras de se continuar o desenvolvimento tecnológico, mas agora com um mínimo, ou quase nada, de impacto ambiental. Contudo, embora o número de pesquisadores esteja a cada dia maior, ainda se encontram muitas dificuldades para se lidar com as situações que por aí se encontram no que tange ao comprometimento causado pelos processos ambientais e com a necessidade de correção dos impactos já causados, como é o caso da quantidade de carbono presente na atmosfera, que a cada dia intensifica o efeito estufa e põe o ecossistema em risco.

No processamento de bens minerais, nas indústrias metalúrgicas e no acabamento e confecção de produtos finais para o mercado, são gerados resíduos, que sofrem três formas de tratamento: **i)** descarte; **ii)** revenda; e **iii)** reciclagem. Ver **Figura 1.1**.

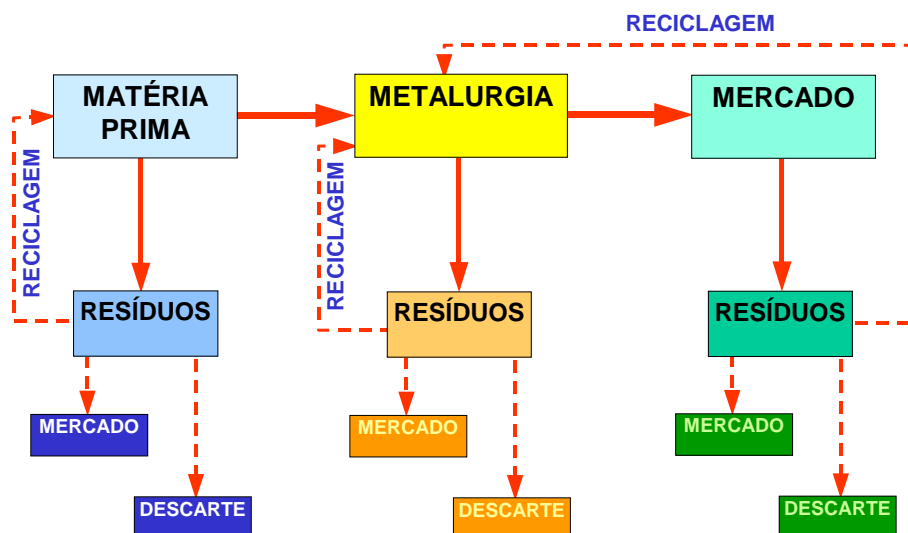


Figura 1.1 – Fluxograma resumido da geração de resíduos nas etapas de produção metalúrgica. Fonte: Autor.

A etapa de descarte contempla a maior parte do tratamento dado aos resíduos dos vários ramos da indústria, tais como a extração, o beneficiamento, a purificação e o refino e, por fim a conformação e venda no mercado.

A necessidade cada vez maior de se tratar esses resíduos visando minimizar o impacto causado pelos mesmos, e a necessidade de desenvolver processos que permitam o aproveitamento parcial ou total dos mesmos de forma economicamente viável, através de um processo que seja auto-sustentável, foram os principais motivadores do desenvolvimento do processo aqui apresentado.

Este processo inovador pode ser utilizado em cada uma das etapas apresentadas, com pouca, ou quase nenhuma, alteração de seu escopo estrutural e funcional básico, ou seja, o mesmo processo se aplica aos resíduos de mineração e siderúrgicos. Entretanto, este trabalho se dedicará a apresentar mais detalhadamente a aplicação deste processo em dois dos mais importantes resíduos siderúrgicos: *lama grossa de aciaria* e *carepa oleosa de laminação*.

A avaliação de um material como rejeito industrial está ligada à capacidade tecnológica disponível para o reprocessamento do mesmo. Uma vez que se encontre um método limpo, econômico e eficiente para o devido reprocessamento e recuperação deste rejeito, o mesmo deixa de ser rejeito e passa a ser caracterizado como matéria prima deste processo. Na verdade, no momento em que se pensa em tratar o rejeito de um processo, para a recuperação total ou parcial de quaisquer de seus componentes, o

mesmo deve ser considerado um resíduo, ou seja, um produto remanescente do processo que o gerou. Se o processo utilizado na recuperação é economicamente viável pode-se considerar esse resíduo como matéria-prima do mesmo.

Segundo as definições do Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa (Editora Objetiva, 1ª. Edição, 2001) existem diferenças significativas entre *rejeito*, *resíduo* e *matéria-prima*: **rejeito** (*s.m.*) – lat. *rejectus, a, um* ‘que é lançado, arremessado’, passando a ser usado nesse significado à partir de 1552 – pág. 2420; **resíduo** (*s.m.*) – aquilo que resta⁽²⁾, produto parcial⁽³⁾, qualquer substância que sobra de uma operação industrial e que pode ainda ser aproveitada industrialmente⁽⁶⁾ – pág. 2437; **matéria-prima** (*s.f.*) – substância principal que se utiliza no fabrico de alguma coisa – pág. 1868.

A maior parte dos resíduos industriais conhecidos é considerada rejeito até que se possa tratá-los devidamente, separando seus componentes principais, uma vez isso feito, passa a ser novamente considerado matéria-prima de outros processos.

A conceituação fundamental deste trabalho é, inicialmente, definir com clareza os conceitos de rejeito e resíduo, diferenciando-os e, assim, caracterizando-os como uma matéria-prima ainda não aproveitada. Este conceito se aproxima de ser uma verdade inquestionável, na medida em que os recursos naturais vêm se esgotando e obrigando as indústrias a uma adaptação de seus processos, operando com uma necessidade maior de reaproveitamento de seus descartes (resíduos ou rejeitos).

Nas usinas siderúrgicas integradas, onde se recebe o minério concentrado e fabrica-se o produto metálico, como é o caso das siderúrgicas de grande e médio porte, em sua maior parte, existem três etapas onde são gerados resíduos: i) A transformação do minério em gusa (liga de Fe-C com teor de carbono maior que 4%) nos altos-fornos; ii) o refino do gusa em aço nas aciarias; e finalmente, iii) a produção de chapas, placas e/ou trilhos de aço nas etapas de lingotamento e laminação.

O foco principal deste trabalho consiste na recuperação e tratamento dos resíduos gerados nas etapas de refino do aço e na produção de chapas laminadas, e este processo de recuperação apresenta dois fatores característicos importantes: a) o processamento de rejeitos e resíduos, tornando-os subprodutos do processo que os gerou, permitindo sua reutilização de forma economicamente viável; b) a reciclagem de um resíduo industrial impedindo, ou minimizando, sua ação contaminante sobre o meio ambiente.

Durante a operação de usinas siderúrgicas são gerados vários tipos de resíduos, em várias etapas diferentes. Dispondo-as em uma sequência lógica percebe-se com mais clareza em que etapa cada resíduo é gerado. A **Figura 1.2** ilustra, resumidamente, a geração de resíduos nas usinas siderúrgicas.

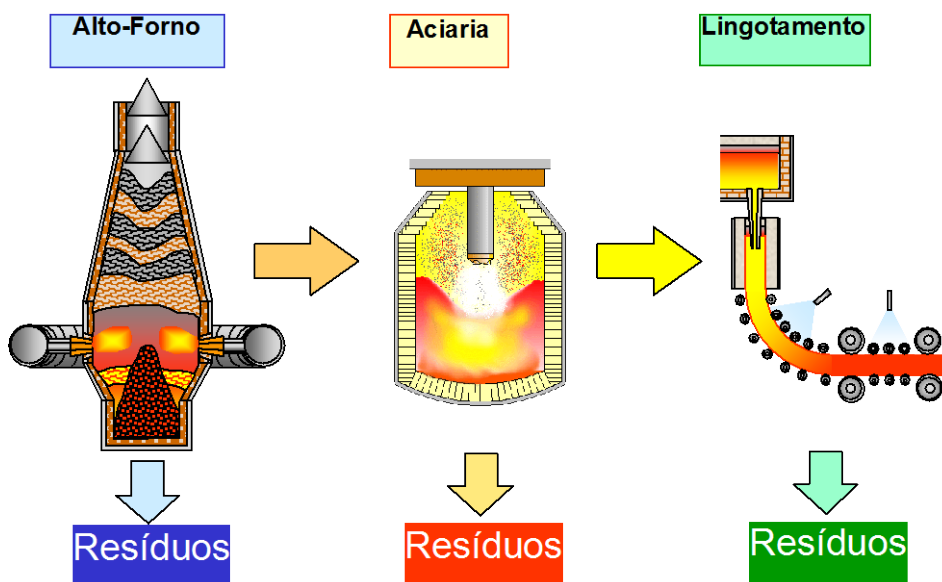


Figura 1.2 – Fluxograma resumido da geração de resíduos nas etapas de produção siderúrgica. Fonte: Autor.

Quando se estuda o impacto direto ou indireto causado por estes resíduos ao serem descartados no meio-ambiente, deve-se levar em conta três modos de análises: *alterações físicas*, onde o meio-ambiente sofre o impactos em função de alterações nas suas propriedades físicas; *alterações químicas*, onde são as propriedades químicas que são alteradas modificando o equilíbrio do meio-ambiente; por fim, embora ligada às duas primeiras, resta ainda analisar a mais importante das alterações causadas a um meio-ambiente, que são as *alterações microbiológicas* que sofre impactos em decorrência do desequilíbrio imposto à *biota* presente no solo, que consiste dos microssistemas biológicos de composição variada coexistindo em equilíbrio no solo. Uma alteração significativa imposta a esta biota pode causar desequilíbrios tão sérios que comprometam totalmente a vitalidade do solo em questão.

Neste estudo aborda-se a possibilidade de tratamento e recuperação dos resíduos gerados na aciaria e na confecção do produto final (lingotamento e laminação), bem como, da importância de se atentar para os riscos ambientais que estes resíduos venham a trazer.

Capítulo 2

Objetivos do Estudo Realizado

2.1. Objetivo Geral

Estudar um processo que viabilize a recuperação do conteúdo metálico presente nos resíduos gerados pelos processos siderúrgicos.

2.2. Objetivos Específicos

- Mostrar a possibilidade de se utilizar uma técnica inovadora, a base de bombardeamento ultra-sônico, desenvolvido especificamente para o tratamento destes resíduos siderúrgicos, de forma econômica, rentável e principalmente, ecologicamente viável;
- Analisar os resíduos siderúrgicos produzidos durante a fabricação do aço, suas propriedades, suas composições químicas e possibilidades de reciclagem;
- Mostrar a importância da reciclagem do conteúdo metálico obtido a partir da recuperação do mesmo, após o tratamento pelo processo aqui proposto;

- Apresentar o equipamento de Desagregação Ultra-Sônica desenvolvido: Princípios, Projeto, Planta Piloto, Planta Semi-Industrial e, finalmente, uma Planta Operacional Instalada em uma Siderúrgica;
- Analisar os impactos ambientais causados pelo descarte direto dos mesmos na natureza, classificar esses resíduos e principalmente seus efeitos;
- Redefinir os conceitos de Rejeito e Resíduo, diferenciando-os, e utilizando esses conceitos para caracterização operacional do processo que os gerar.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1. Meio Ambiente – Solo

Para se entender a extensão e o objetivo deste estudo é importante chamar a atenção para as questões relacionadas à composição microbiológica do solo e suas características e influência nas propriedades do solo. A composição ideal de um solo normal, segundo WAKSMANN (1954), se baseia numa associação de componentes sólidos, líquidos, gasosos e seres vivos inertes, nas seguintes proporções:

Substâncias minerais	45%
Ar (atmosfera)	25%
Água	25%
Matéria orgânica	5%

O solo pode, e deve, ser interpretado como a associação de fatores minerais e biológicos, que através do equilíbrio existente entre estes dois fatores e os fenômenos da natureza, ganha a característica de um organismo vivo e complexo, e não simplesmente uma massa inerte com composições latentes necessárias a formação de vida vegetal, pelo contrario, o mesmo pode ser avaliado como sendo um organismo maior onde os componentes minerais (ar, água, gases e sais minerais), devidamente metabolizados por microorganismos, favorecem o crescimento de vida vegetal superior, sendo a mesma, parte desse equilíbrio e, portanto, um componente ativo e imprescindível à vida deste solo. E, embora invisíveis, os microorganismos que compõem o solo são de fundamental ação nesse equilíbrio.

A definição do solo como um organismo vivo aborda a participação da natureza, dos microorganismos, dos compostos minerais, água, gases, vegetais superiores e até mesmo dos animais que nele se instalarem. Essas considerações passam a fazer sentido se interpretarmos

que é a dinâmica dos animais que determina muitas das mudanças físicas topográficas de pequeno perfil que o solo sofre (desgaste de rochas, eliminação de cobertura gramínea, amassamento, etc.). A interação entre os animais de grande, médio e pequeno porte, microorganismos, plantas e fenômenos naturais, cria o equilíbrio necessário para que um solo se sustente.

Ainda segundo WAKSMANN, como pode ser visto no texto MICROBIOLOGIA DO SOLO (2001), pode-se considerar que o solo é caracterizado por uma distinta população microbiana constituída por grupos específicos. Estes exercem uma variada gama de efeitos associativos e antagônicos uns sobre os outros, além de influenciarem de maneira marcante sobre a fertilidade do solo e o desenvolvimento das plantas cultivadas e silvestres. Muitos são cosmopolitas, enquanto outros são de ocorrência limitada na natureza.

A Resolução nº 001/86 do CONAMA, determina como *Indicadores de Impacto Ambiental do Solo* os seguintes itens:

I – Indicadores Biológicos

i.1. Percentual de recobrimento do solo: A exposição direta aos raios solares, ao impacto das gotas de chuva acaba por promover a desestruturação e desagregação do solo, resultando em erosão, daí a importância da cobertura vegetal mantendo a umidade do solo ajudando na decomposição da parte aérea e sistema radicular, por consequência, as partículas agregam-se mais facilmente, há aumento de matéria orgânica e nutrientes no solo.

i.2. Peso seco e composição química da serapilheira: Diferentes coberturas vegetais presentes no solo formarão serapilheira em quantidade e qualidades diferentes, o que resultará em diferenças no solo. Coleta-se então o material vegetal e encaminha-se ao laboratório para se determinar o peso seco, teores de lignina, celulose, relação carbono/nitrogênio, macro e micronutrientes e o grau de contribuição da serapilheira na fertilidade do solo.

i.3. Raízes distribuídas no perfil: Determina-se pelo método Siarcs (densidade e comprimento das raízes); a alteração do ambiente é detectada pela densidade do solo, distribuição de poros no perfil, umidade gravimétrica, colonização micorrízica, distribuição da mesofauna, entre outros.

i.4. População microbiana (avaliação): Visa verificar quantitativa e qualitativamente como e quais foram as alterações no meio, calculando-se o índice de diversidade, frequência de ocorrência de espécies etc., para que se possa comparar se o impacto aumentou ou diminuiu a diversidade nos ecossistemas.

i.5. Biomassa Microbiana: Estádio inicial do carbono dos resíduos em decomposição no solo, define-se como a parte viva da matéria orgânica do solo, excetuando raízes e grandes animais; representa aproximadamente de 1 a 4% do carbono total do solo.

i.6. Caracterização da mesofauna: Vermes, nematóides, traças, centopéias, gastrópodes, insetos, térmitas e formigas integram a mesofauna. Sua importância relaciona-se com a ingestão e decomposição da matéria orgânica no solo; os microorganismos distribuem-se no perfil conforme a distribuição de alimento, mais especificamente nos primeiros centímetros de solo, exceto as minhocas que vão às camadas mais profundas. Sua concentração varia de acordo com o ambiente, em solos bastante porosos e com boa fertilidade a mesofauna é maior.

II – Indicadores Físicos

ii.1. Perda de solo por erosão: Refere-se à estimativa de perda da camada superficial do solo correlacionada com a quantidade de cobertura vegetal (%) erodida. A partir deste levantamento é possível saber que tipo de vegetação será mais eficaz contra a erosão.

ii.2. Textura: É a mais estável característica física do solo e também a mais importante, tanto na identificação do solo como para prever seu comportamento. Em termos de manejo e fertilidade a textura influencia no parcelamento das doses de insumos agrícolas a serem aplicados no solo.

ii.3. Densidade de partícula (D_p): Relação massa de sólidos - volume de sólidos de um solo; depende da proporção existente entre matéria orgânica e parte mineral, como também da constituição mineralógica do solo. Ao se determinar a densidade de partícula contribui-se para o cálculo da porosidade total do solo.

ii.4. Densidade do Solo (D_s): Relação massa de sólidos - volume total ocupado pela massa, incluindo espaço ocupado pelo ar e pela água. Reflete o arranjo das partículas definindo as características do sistema poroso. A permeabilidade do solo, por sua vez, é inversamente proporcional a densidade do solo, sendo importante para indicar a capacidade de armazenamento de água para as plantas e para que se possa encontrar as melhores práticas de conservação do solo e água.

ii.5. Umidade gravimétrica: Estima-se pela umidade gravimétrica qual a capacidade que determinado solo tem de armazenar água, mantendo uma correlação com a vida microbiana e a mesofauna do solo.

ii.6. Avaliação da estrutura do solo: Diz respeito ao arranjo das partículas do solo e do espaço poroso existente entre elas. Para a agricultura, a estrutura do solo é uma das mais importantes propriedades, relacionando-se diretamente entre solo-planta. A estrutura do solo pode ser alterada em função do manejo inadequado – máquinas (aspecto físico) ou adubação incorreta (aspecto químico), além da influência climática e biológica.

III – Indicadores Químicos

iii.1. Macro e micronutrientes do solo: Indicam alterações no ecossistema natural; também servem para indicar os tipos de manejo que mais alteram o ambiente.

iii.2. Metais pesados: Analisa a quantidade de metais pesados presentes no solo estimando o grau de poluição do solo, lençol freático e cursos d'água.

iii.3. Carbono orgânico e matéria orgânica: Referencia a atividade microbiana nos diferentes ecossistemas, bem como a influência da cobertura vegetal na produção de matéria orgânica.

A presença de microorganismos no solo é de grande importância. Os microrganismos do solo podem prestar serviços de extrema importância, como a degradação de compostos tóxicos à natureza e ao homem. Agrotóxicos, resíduos industriais, solventes e combustíveis, podem ser degradados no solo por espécies capazes de quebrar as ligações químicas destes compostos. Em alguns casos, os compostos resultantes da degradação microbiana são mais tóxicos que a molécula original. Em outras situações, os microrganismos são capazes de degradar totalmente o composto tóxico.

Controle Biológico. O potencial da biodiversidade para o controle biológico de doenças e pragas da agricultura pode ser deduzido a partir do fato que em ecossistemas naturais raras vezes observam-se infestações de pragas ou doenças de plantas. O conceito de pragas e doenças é decorrência da atividade agrícola e só é aplicável em ecossistemas manejados pelo homem. Tais sistemas têm, via de regra, biodiversidade consideravelmente

reduzida em relação aos sistemas naturais, donde se conclui que o controle natural dos problemas fitossanitários é feito pela biodiversidade e seu equilíbrio ecológico.

Segundo FASSBENDER (1980) eliminando o oxigênio do solo, afetamos a pedogênese (Gênese dos Solos). Sem os organismos, os solos não seriam formados. A intemperização físico-química das rochas matrizes por si só resultaria em terrenos sem nenhuma fertilidade, visto que há necessidade de nitrogênio e esqueletos de carbono para que a vida se estabeleça. As algas são tidas como colonizadores primários do solo, pela sua capacidade de fixar carbono e nitrogênio da atmosfera através dos processos de fotossíntese e fixação biológica de nitrogênio, respectivamente. A partir daí, fungos e bactérias terão recursos para se desenvolver e liberar nutrientes dos minerais do solo, como o fósforo, cálcio e ferro. O solo formado, havendo a disponibilidade de água, permitirá o crescimento de plantas, que ao serem decompostas gerarão matéria orgânica que reterá nutrientes, liberando-os lentamente para os próximos colonizadores. Esta maneira simplificada de apreender o processo de pedogênese, do ponto de vista biológico, ilustra a importância da biodiversidade para a formação dos solos.

A Estrutura de Solos, seu grau de porosidade e agregação de solos é determinado fortemente pela diversidade de sua macrofauna. A atividade de raízes, formigas, cupins e minhocas geram canais, poros e agregados que terão forte influência no transporte de gases e água no solo. Outros organismos são influenciados por estas atividades, que resultam na criação ou modificação de microhabitats.

Segundo KINJO (1982) A manutenção do equilíbrio biológico é muito importante para a Ciclagem de Nutrientes. A decomposição da matéria orgânica resulta na quebra dos compostos orgânicos e liberação de elementos essenciais que estão presentes nas moléculas dos tecidos vegetais e animais. Bactérias e fungos são responsáveis por cerca de 90% da mineralização do carbono presente nos compostos orgânicos em decomposição. Antes da ação dos microrganismos, a matéria orgânica é atacada por ácaros, minhocas e cupins que trituram os resíduos e dispersam propágulos microbianos, facilitando a ação destes na mineralização do carbono. Pequenos predadores, como os protozoários e nematóides, regulam a atividade dos microrganismos. O ataque predatório mantém as populações microbianas jovens e com atividade metabólica alta. O nitrogênio é fixado biologicamente por bactérias do solo, que transformam a forma gasosa presente na atmosfera para amônio, íon assimilável pelas plantas. Nos solos tropicais o fósforo está normalmente em formas químicas indisponíveis para os outros organismos. Algumas bactérias podem solubilizar estes fosfatos, tornando-os

disponíveis para as plantas. Já alguns fungos, através de suas hifas e em associação com raízes, aumentam a área de absorção de fósforo e água para as plantas. Praticamente todos os nutrientes necessitam da ação de microrganismos em alguma fase de seus ciclos.^[4]

Outro efeito importante, que deve ser citado, com relação à deposição direta de resíduos com altos teores de ferro metálico no ambiente, consiste na capacidade de crescimento radicular da vida vegetativa num determinado solo. A troca de oxigênio pelas raízes se faz de grande importância durante este processo.

O ciclo do oxigênio ocorre em equilíbrio com a situação da vida vegetal daquele ecossistema, uma alteração na base fundamental cria fatores de descontrole biocinético nesse sistema. Este ciclo do oxigênio depende tanto das algas como das plantas e microorganismo presentes no solo.

Segundo pesquisas feitas nessa área, os microrganismos presentes no solo são idênticos aos presentes na água doce comum, com um detalhe maior, seu equilíbrio é mais delicado, uma vez que a mobilidade dos mesmos dentro deste ecossistema é mais limitada.

Segundo WAKSMAN (1954), e referenciado por KINJO (1982), vários microrganismos de água doce estão presentes no solo, cada um com uma função específica dentro do ecossistema equilibrado. A limnologia é a ciência que estuda a ecologia de Lagos e Corpos d'água continentais, estuda também as características, a dinâmica e as inter-relações dos principais parâmetros físicos, químicos e biológicos da água; avalia o nível de produção primária, eficiência fotossintética, taxas de assimilação, medidas de biomassa e composição inorgânica dos sedimentos; determinação das interfaces sedimento/água e suas influências sobre a biota; análise das adaptações e fatores limitantes à distribuição e crescimento da vegetação de áreas alagáveis, mecanismos adaptativos de macrófitas aquáticas, composição e dinâmica dos sedimentos e do ciclo de nutrientes; estudos de taxonomia de plantas, ecologia das comunidades de fito e zooplâncton e de técnicas de criação de organismos-alimento, inclusive dentro de ecossistemas presentes na umidade do solo. Os principais microrganismos de água doce presentes no solo, são protozoários. São organismos unicelulares eucariontes, cujas células realizam todas as funções vitais. Sua nutrição é principalmente heterótrofa, embora alguns elementos de seu grupo tenham uma nutrição autótrofa. Eles se dividem em vários grupos:

Amebas – Protozoários característicos por emitir pseudópodos e prolongações do citoplasma, que ajudam no desempenho e na apreensão do alimento. Ser de forma indefinida

cuja emissão de pseudópodos é variável no seu corpo. Se alimenta de bactérias e matéria orgânica do seu meio.

Suctores – Protozoários característicos pela presença de tentáculos. São organismos carnívoros que se alimentam de outros protozoários e pequenos metazoários. Esta espécie agrupa seres de forma cônica cuja célula se encontra rodeada por uma película. Os tentáculos agrupam-se, situados a ambos lados do seu corpo.

Ciliados Livres – Aqui se agrupam protozoários cujas células apresentam cílios fundamentais à sua locomoção e à captura de alimentos. Seu habitat fundamental é a água livre, desenvolvendo-se e alimentando-se de bactérias que se encontram no meio. Protozoário Gymnostômido com células em forma de garrafa, boca apical e penachos de cílios largos ao seu redor. Habita águas com contaminação orgânica, ajudando no controle biológico do meio.

Ciliados Fixos – Agrupa protozoários ciliados, cujas células se fixam a substratos mediante um pedúnculo, mesmo que existam também espécies móveis. Se desenvolvem de forma solitárias formando colônias. Alimentam-se de bactérias, por isso são importantes para equilibrar o meio ambiente, já que a sua falta pode causar o excesso de bactérias, infectando o meio, sendo prejudiciais aos possíveis seres que utilizem a água infectada. Protozoário colonial, fixo mediante a um pedúnculo contrátil, com um mionema contínuo, de onde todas as ramificações do talo de todos os seus indivíduos se contraem ao mesmo tempo.

Ciliados Reptantes – Protozoos ciliados que se espalham sobre as superfícies com focos de fungos, alimentando-se das bactérias que se encontram no meio. Apresentam estruturas ciliares chamadas cirros. Também se espalham livremente através da água livre (considerando água livre como um elemento desprovido do ecossistema, ex. água canalizada). Gênero de ciliados hipótricos com estrutura ciliar e de cirros sobre célula alongada, com uma prolongação posterior capaz de fixar-se em substratos. Habita águas com carga orgânica, tais como esgotos, mares e rios poluídos, etc., ajudando no seu equilíbrio biológico.

Microalgas – São seres unicelulares ou pluricelulares cujas células são independentes, realizando todas as funções vitais. Sua alimentação, em geral, é fotossintética, pois são seres autótrofos.

Cianofíceas – Conhecidas vulgarmente como algas verdes azuladas. Assim como as bactérias, são organismos procariontes cujas células não apresentam sistema de membranas internas que separem as organelas do citoplasma. Um talo formado por filamentos de até 2 cm

de longitude, com freqüentes pseudoramificações. As células são quadradas de cor verde-azulada.

Clorofíceas – São conhecidas como algas verdes, com cloroplastos de cor muito bem definida, com formas e localizações celulares diferentes. Os indivíduos desta espécie apresentam células marginais alargadas, com forma triangular e as células centrais se encontram unidas de forma compacta.

Criptofíceas – As células são unicelulares e flageladas, com cloroplastos geralmente de cor marrom por mais que existam verdes-amarelos e verdes-azulados. As células apresentam uma forma particular, com freqüência aplanadas e os flagelos quase iguais. Possuem células largas na parte anterior e mais finas na posterior, com abertura ventral plana e dorsal arredondada. Apresentam os cloroplastos e os flagelos de igual longitude.

Crisofíceas – Indivíduos unicelulares o coloniais, mas raramente filamentosos. Apresentam cloroplastos de cor amarela, marrom ou verdes, são conhecidos vulgarmente de algas de cor dourada. Existem múltiplas formas. Ser colonial de células solitárias com agrupamentos em forma de ramos. Os ramos se inserem umas as outras e se encontram dilatadas no centro, com a parte basal cônica.

Diatomeas – São microalgas unicelulares o coloniais, de cloroplastos marrons ou amarelos. As células se encontram impregnadas no silício formando valvas que se situam como caixa, que podem apresentar uma ornamentação característica de cada espécie. Microalga de duas extremidades iguais, com corpo ligeiramente ondulado, estrias transversais grossas que às vezes apresentam poros.

Dinofíceas – Em geral são células flageladas móveis, mesmo que haja espécies fixas. As células tendem a apresentar um vinco equatorial na que se inserem os flagelos, um transversal e o outro longitudinalmente. Espécie móvel formada por células esféricas, de seção sanfonada, dividida em placas características de cada espécie, que rodeiam a célula. Também pode apresentar espinhas. Os cloroplastos são de cor pardo.

Euglenofíceas – Incluem todas as formas unicelulares, solitárias, desnudas ou agrupadas, que nadam livremente, providas de flagelos dispostos de forma variada. Células intensamente retorcidas, com larga espinha caudal e membrana com estrias longitudinais. Os cloroplastos tem forma de placa.

Xantofíceas – Grupo de microalgas conhecido como algas verde-amarelas, como consequência da presença de xantófilas. Existe uma ampla variedade morfológica, que vai

desde formas unicelulares, móveis e imóveis até formas filamentosas. Habita as águas doces e salgadas, existindo algumas espécies marinhas. Microalga que apresenta numerosos cloroplastos. A membrana é fina e delicada apresentando apêndices em forma de H bem visíveis.

Rotíferos – São organismos pluricelulares, de pequeno tamanho, visíveis através de microscopia óptica. Apresentam um órgão rotatório, com cílios, de movimento giratório, criando fortes correntes de água que lhe servem para captar seu alimento. Rotífero que apresenta uma capa transparente e plana. Seu aparelho digestivo trabalha moendo e mastigando o alimento filtrado. Projeta um pé móvel com um penacho de cílios em seu extremo, 2 olhos e a musculatura longitudinal estriada. Estes seres são os catalisadores de reações entre os microorganismos que compõem a biota, direta e indiretamente. Diretamente quando se alimentam destes, indiretamente quando liberam substâncias que permitem que outros seres ataquem e se alimentem de microorganismos, permitindo assim que o equilíbrio biológico seja mantido. Para que promovam seu movimento necessitam do oxigênio presente na biota para efetivação das reações de liberação de energia metabólica, entretanto, na falta ou na pouca presença de oxigênio disponível passam a atuar de forma reduzida, ficando assim expostos aos microorganismos dos quais se alimentam, invertendo a ordem presa-predador.

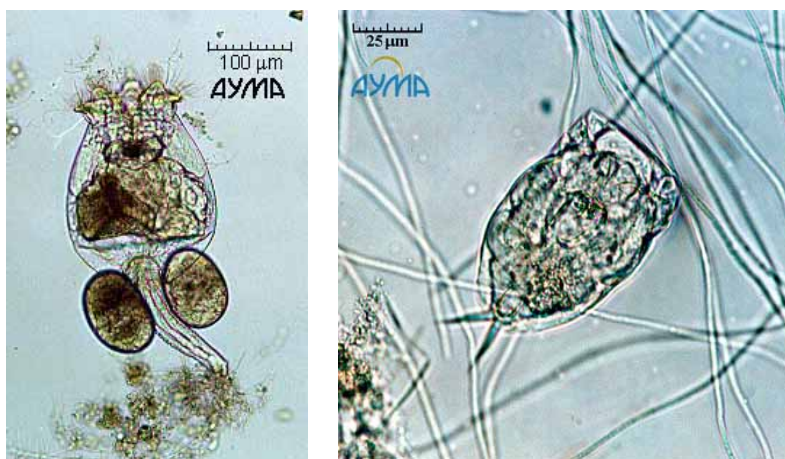


Figura 3.1 – Rotíferos: *brachionus angularis*; e *lecanes sp.* Fonte: Atlas de Microorganismos, Ayma (2004).

Estes são alguns dos microorganismos que mantêm o equilíbrio do sistema vivo presente no solo, a presença de oxigênio neste solo deve ser mantida na faixa de equilíbrio da biota, caso contrário, o excesso ou falta, fariam prevalecer predominantemente uma espécie aeróbica ou anaeróbica, respectivamente, com espécie predadora do biosistema.

3.1.1. Bactérias do Solo

Os seguintes grandes grupos constituem a população microbiana do solo:

Bactérias do solo – são encontradas no solo bactérias pertencentes a todas as ordens que formam a classe *bactéria*, sendo hoje universalmente empregado para a sua classificação, o sistema de Bergey. Sistemas de classificação de bactérias baseadas em suas atividades fisiológicas tem sido freqüentemente usados em estudos microbiológicos do solo. As bactérias do solo, incluem formas esporulantes e não esporulantes de bacilos, cocos, vibriões e espirilos, variando consideravelmente de tamanho e forma, de respiração aeróbia e anaeróbia e de nutrição autotrófica e heterotrófica.

BACTÉRIAS AUTOTRÓFICAS – apresentam as seguintes propriedades características. (MOREIRA e SIQUEIRA; 2002)

1. Desenvolvem-se na natureza em meio mineral particularmente eletivo, o qual contém substâncias inorgânicas elementos ou compostos simples específicas oxidáveis;
2. Sua existência está relacionada com a presença de tais substâncias que sofrem oxidação, como uma consequência natural das suas próprias atividades vitais;
3. A oxidação de substâncias minerais constitui a única fonte de energia para o seu desenvolvimento, não necessitando de nenhum nutriente orgânico para a edificação do seu material celular;
4. São sempre incapazes de decompor as substâncias orgânicas, e podem até serem detidas em seu crescimento pela presença de certos compostos;
5. Utilizam exclusivamente o CO₂ como fonte de carbono o qual é assimilado quimiossinteticamente.

Dentre as bactérias autotróficas destacam-se as nitrificadoras e as sulfurosas, essas bactérias por si só, evidenciam a preocupação com relação à variação do oxigênio dissolvido no substrato do solo.

Bactérias nitrificadoras – dada a importância dos processos de nitrificação no solo, nos compostos, nas águas servidas e nas águas doces e salgadas, as bactérias nitrificadoras tem recebido especial estudo por parte dos mais brilhantes pesquisadores no campo da Agronomia, da Ciência do Solo e da Microbiologia. Diversos tipos de bactérias nitrificadoras são encontradas em vários solos e foram classificadas por Vinogradsky em 2 grupos:

- I. Bactérias que oxidam sais de amônio produzindo nitritos: Nitrosomonas, Nitrosocystis, Nitrosospira e Nitrosoglaea.
- II. Bactérias que oxidam os nitritos a nitratos: Nitrobacter, Nitroglae e Nitroystis.



Figura 3.2 - Bactérias Nitrificadoras ou Nitrificantes. Fonte: <http://www.ojocientifico.com>.

Bactérias sulfurosas – usam enxofre e seus compostos inorgânicos simples como fonte de energia. Não formam um grupo morfológico ou fisiológico uniforme como as nitrificadoras. Apresentam-se na forma de pequenos bastões ou são filamentosas. Elas oxidam o H_2S e outros sulfatos, o enxofre elementar ou tiosulfato, agindo em meio ácido ou alcalino. Algumas são autotróficas obrigatórias e outras facultativas. São largamente distribuídas na natureza, ocorrendo nos solos, águas sulfurosas ou outros substratos naturais. As bactérias sulfurosas encontradas nos solos férteis, ou que se tornam ativas quando introduzidas em tais solos, são limitadas principalmente ao gênero *Thiobacillus*.

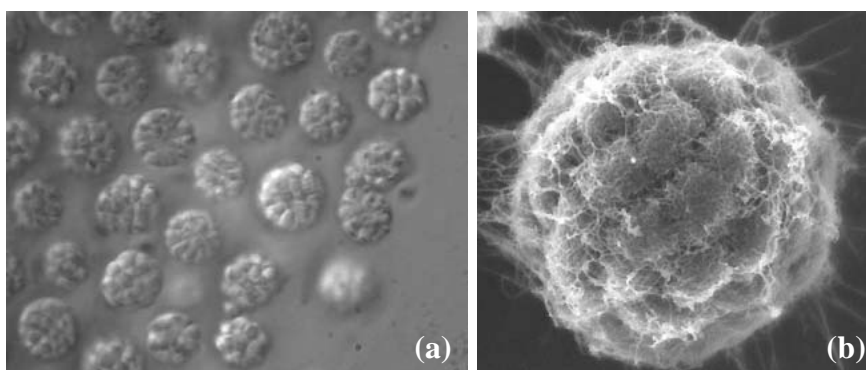


Figura 3.3 - Bactérias Sulfurosas: (a) colônia de bactérias sulfurosas; (b) detalhe de uma única bactéria (curiosamente adaptou-se ao meio tornando-se pluricelular – cerca de mais de 20 células). Fonte: URENHA e CHAVES (1992)

Bactérias autotróficas – além das descritas acima, podem ser encontradas bactérias ferrosas, que oxidam compostos de ferro; bactérias que oxidam o CO , bactérias que oxidam o CH_4 (metano) além de outras. Entretanto a capacidade de oxidação destas bactérias se refere a compostos de ferro, **o que é dificultado na presença de grandes quantidades do metal puro.**

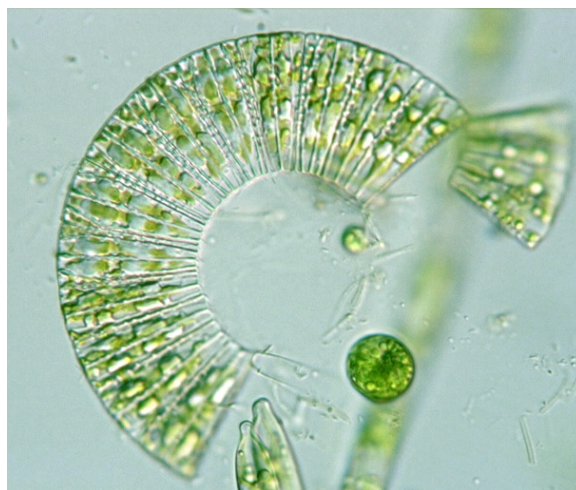


Figura 3.4 - Bactérias Autotróficas do gênero *Diatomaceae*. Fonte: FUKUSHIMA, 2005.

Bactérias heterotróficas – compreendem a grande maioria dos habitantes do solo. Usam substâncias orgânicas como fonte de energia e são primariamente relacionadas com a decomposição da celulose e hemiceluloses, gomas e açúcares, proteínas e outros materiais nitrogenados e gorduras.

Estas bactérias variam largamente quanto à estrutura e fisiologia, abundância e importância. Entre elas se encontram organismos aeróbios, esporulantes e não esporulantes, Gram (+) e Gram (-) fixadores do N atmosférico e não fixadores do mesmo.

Bactérias redutoras do sulfato – muitos organismos capazes de reduzir sulfato a H_2S têm sido descritos. O mais importante é o *Vibrio desulfuricans*, isolado do solo e de outros substratos. Trata-se de uma bactéria anaeróbia escrita, Gram (-), crescendo a 30-55°C, e capaz de usar ácidos orgânicos como fontes de energia.

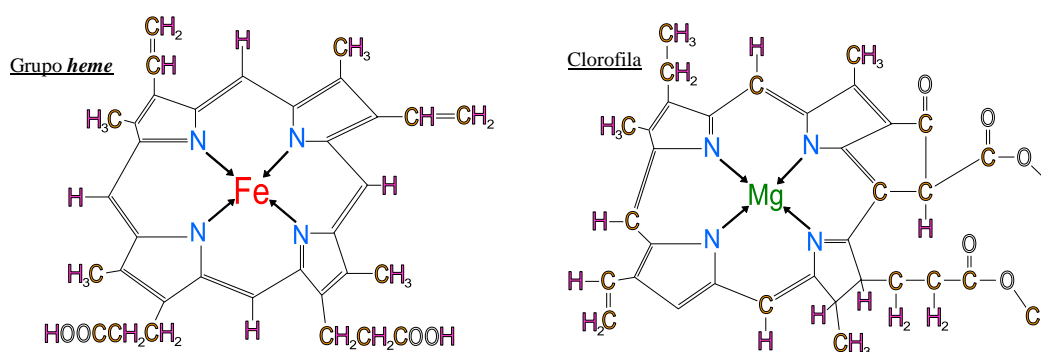
Bactéria desintegradoras da uréia – Pasteur foi o primeiro a reconhecer em 1860, que a formação de amônia, a partir a uréia, corria por conta de um organismo, por ele chamado *Trula ammoneacale*. Mais tarde, estabeleceu-se que microrganismos capazes de decompor a uréia eram encontrados em muitas famílias de bactérias, actinomicetos e fungos, porém que somente certas bactérias específicas, cujo metabolismo está estreitamente relacionado com a transformação dessa substância, são designados "uréia bactérias". Estas se dividem em cocos e bacilos: os primeiros são destruídos geralmente a 60-70°C, enquanto os últimos podem suportar temperaturas de 90-95°C por muitas horas, devido à possibilidade de formarem endosporos. O ótimo ficam em torno de 30°C. Esses organismos comportam-se melhor, usualmente, em meio contendo uréia (2%), de modo particular quando este se torna alcalino com carbonato de amônio.

Bactérias anaeróbias – estas bactérias desempenham um ativo papel na formação dos compostos nas pilhas de restos culturais, sempre que a aeração é insuficiente. O fenômeno da "putrefação" é, principalmente, um resultado de oxidação incompleta em face da aeração precária. A ausência de ar nas camadas profundas da pilha de esterco, a reação fracamente alcalina e a presença em grande quantidade de substâncias orgânicas indecompostas, criam condições propícias ao desenvolvimento das bactérias anaeróbias.

Várias bactérias anaeróbias patogênicas são capazes de sobrevivência no solo. *Clostridium welchii* foi encontrado em 100% dos solos examinados, *C. putrificus verrucosus*, em 71%, *amylobacter*, em 65% e *C. tetani*, em 11%. Assim, a eliminação do oxigênio dissolvido no solo favorece a capacidade de crescimento do número de bactérias anaeróbicas patogênicas, aumentando o impacto ambiental com relação à insalubridade do solo.

A importância de se preocupar com esse fator não é apenas com relação ao possível desenvolvimento de doenças secundárias, resultantes da variação da microbiologia do solo, mas da própria ação de algumas dessas bactérias sobre o organismo humano. Do ponto de vista químico a macromolécula da hemoglobina é baseada na mesma matriz de quelato na qual se baseia a clorofila. Sua diferença básica consiste na presença de um átomo de ferro no núcleo do quelato formado no caso da matriz do grupo prostético *heme*, enquanto a matriz da clorofila se baseia no magnésio para formar o núcleo do quelato vegetal.

A hemoglobina é um pigmento vermelho, heteroprostético, formado pelo grupo prostético *heme*, seus valores de composição estrutural variam de espécie para espécie. Já a clorofila consiste em um pigmento verde, muito semelhante estruturalmente ao grupo prostético da hemoglobina.



Exemplo de macromolécula de hemoglobina:
(C₇₃₈H₁₁₆₆O₂₀₈N₂₀₃S₂Fe)_n

Figura 3.5 – Semelhanças básicas entre hemoglobina e clorofila. Fonte: CAVALCANTI (1998).

Ou seja, um determinado microorganismo que venha a agredir o processo de formação estrutural polimérico molecular da clorofila pode, em algum caso, vir a ser agressiva e nociva para a biologia animal, afetando também as estrutura polimolecular da hemoglobina.

Bactérias desintegradoras da celulose – numerosos grupos de microrganismos decompõem a celulose na natureza. Dentre eles destacam-se as bactérias, notadamente as formas aeróbias. Nas turfeiras e no trato digestivo dos animais, contudo, as bactérias anaeróbias são mais ativas.

Bactérias Bioindicadoras – As bactérias são constituídas por células procariontes, onde as organelas celulares não apresentam sistemas de membranas capazes de separá-las do espaço celular que as rodeiam. Colônia bacteriana constituída por células retiformes, que na sua extremidade curva segue um hidróxido de ferro coloidal que dá lugar a pedúnculos muito delicados, facilmente quebrados, retorcidos a modo de trança. O indicador de ferro dissolvido e reduzido no meio conferindo caráter básico. Atuam como indicadoras de biodesequilíbrio da biota, liberando substâncias que eliminam a passividade de alguns predadores do meio biológico.

Bactérias Filamentosas – As bactérias podem se apresentar solitárias ou em colônias, de diversas formas, entre as que se encontram os filamentos típicos dos reatores biológicos de fungos ativados. Espécie de bactéria filamentosa pertencente ao grupo das microbactérias, constituída por filamentos curtos, irregularmente formados e muito ramificados. Não apresentam veia exterior. Filamentos Gram positivo e Neisser negativos. (MOREIRA e SIQUEIRA; 2002)

3.1.2. Fungos do Solo

Estão presentes no solo as quatro classes de fungos, a saber: Ficomietos, Ascomietos, Basidiomietos e Fungos Imperfeitos. Podem ser parasitas ou saprófitas, formam as conhecidas "micorrizas" e elaboram substâncias antibióticas. Embora não sejam representados no solo em grupos fisiológicos tão numerosos como as bactérias, milhares de espécies de fungos ali estão instalados de forma temporária ou permanentemente, e constituem um importante grupo de organismos do mesmo. Certas formas são características de determinados tipos de solo, os quais funcionam como um meio natural para o seu desenvolvimento. Os fungos são encontrados no solo nas formas de micélio e de esporos de

natureza sexual e não-sexual. Entre os fatores que controlam a abundância de fungos no solo, destaca-se a sua reação. Um meio ácido, ajustado a pH igual a 4, o é frequentemente usado em determinações de fungos do solo, sabido que nessas condições, a maior parte das bactérias e actinomicetos não se desenvolve. A reação ótima para o crescimento dos fungos ocorre sob condições de pH, 4,5 e 5,5. A presença de hidróxidos formados pela reação do ferro metálico e o oxigênio dissolvido no solo muda o valor do pH para uma escala mais básica, com o decréscimo da acidez do solo, cai o número de fungos e sobe o de bactérias e actinomicetos. Singh encontrou uma correlação direta entre a fertilidade do solo e o número de fungos e actinomicetos em campos cultivados permanentemente com beterraba forrageira e com trigo, em Rothamsted, na Holanda, o que evidencia o interesse prático do estudo das populações microbianas de solo.

- *Micorrizas* – constituem associações, geralmente simbióticas, entre certos fungos e as raízes de diversas espécies de plantas superiores favorecendo o equilíbrio do solo e facilitando a formação de vegetação superior.

Protozoários do solo – compreendem amebas, flagelos e ciliados, largamente encontrados no solo, sendo seu número e distribuição fortemente influenciados pelos fatores edáficos e do clima que atuam sobre as bactérias. Tem-se sugerido que protozoários funcionam no solo como inimigos naturais das bactérias; alimentando-se as custas delas, exercem controle sobre sua abundância, afetando, assim, vários processos solo. Os protozoários encontrados no solo são, geralmente, microscópicos e podem se apresentar sob formas vegetativas e encistadas.

As maiores quantidades de protozoários estão presentes no solo na primavera, após o degelo, ou no verão, depois de pesadas quedas d'água. Nos solos secos, são encontrados apenas formas encistadas. A fauna protozoária está quase toda confinada até a profundidade de 15 cm, sendo que nas regiões áridas, especialmente em solos arenosos, eles se acham em abundância, apenas na camada logo abaixo da superfície do terreno. A irrigação de solos áridos estimula consideravelmente o crescimento da população de protozoários e, quanto mais rico o solo em matéria orgânica, maior o teor de tais microrganismos, especialmente amebas.

Algas do solo – estão presentes: *Myxohyceae* (algas azuis), *Clorophyceae* (algas verdes, abundantes em solos ácidos) e *Bacillariaceae*, incluindo as *Diatomaceae*.



Figura 3.6 – Algas Cianofíceas. Fonte: www.enq.ufsc.br (2004).

3.1.3. Condições do Solo

Os processos desintegrativos essenciais, sem os quais a vida caminharia rapidamente para a completa estagnação, são desencadeados pelas bactérias, actinomicetos e fungos. Estes organismos saprófitas são, assim, de primordial importância na economia do mundo. Seu desenvolvimento está na dependência das condições existentes no solo, isto é, água, ar, substâncias minerais, PH e temperatura, assim como da matéria orgânica, tudo isto variando largamente em função do tipo de solo e da vegetação.

3.1.4. Composição e Estrutura do Solo

A composição química do solo, bem como a sua estrutura e outras características físicas do mesmo, influem sobre a população microbiana, tanto direta quanto indiretamente, aqui atuando sobre a vegetação que suporta.

O tamanho das partículas, a porosidade do solo e sua densidade, influem diretamente sobre a umidade e o teor em oxigênio do mesmo, com reflexos na população microbiana.

3.1.5. Água e o Solo

O espaço entre as partículas de solo é ocupado, parte pela água e parte pelo ar, sendo que a relação água/ar influí largamente sobre o desenvolvimento microbiano no solo. A quantidade d'água que adere á superfície de cada partícula varia com a natureza do solo.

Permanecendo constante outros fatores, o teor de água aumentará com a diminuição do tamanho das partículas, simplesmente porque, diminuindo o porte das partículas aumentará

a superfície para a água capilar ocupar. Assim, embora o espaço total dos poros seja independente do tamanho absoluto da partícula e dependa somente da heterogeneidade, como se viu acima, o espaço disponível para o ar decresce com a diminuição do porte das partículas. O solo argiloso é, por isto o mais úmido e o menos arejado dos solos. O teor em húmus também é um fator influente, pois uma de suas propriedades é aumentar o conteúdo de água no solo. O que se repete para solos que sejam utilizados para descartes de resíduos finos.

3.1.6. Gases no Solo

A porção de espaço vazio entre as partículas do solo que não está ocupado pela água, se acha preenchida por uma mistura de gases de composição aproximada ao do ar atmosférico. Análises de gases do solo realizados na estação experimental de Rothamsted, na Inglaterra, em solo arável, mostraram uma média de 0,25% de CO_2 e 20,6% de O_2 , contra 0,03% e 21% de CO_2 e O_2 , respectivamente, no ar atmosférico.

As variações de pH são reduzidas em magnitude em face do efeito "tampão" dos fosfatos, carbonatos e alguns ácidos fracos do solo. O CaCO_3 (cálcio) é de primordial importância no solo, como em meio artificial de cultura, mantendo o pH fracamente alcalino. Adicionado, ele floclula as partículas coloidais de argila e, assim, reduz a sua "stickness" e melhora a textura do solo. A incorporação de CaCO_3 ou dolomita é aconselhável para os solos ou argilas ácidas, ou no caso de terrenos onde se vem empregando adubos sistematicamente.

3.2. Caracterização de Resíduos Pelas NBR's

A Terminologia Brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os tipos de resíduos baseados nas seguintes normas:

- NBR 10004/87 – Resíduos sólidos – Classificação;
- NBR 10005/87 – Lixiviação de resíduos – Procedimentos;
- NBR 10006/87 – Solubilização de Resíduos Procedimento;
- NBR 10007/87 – Amostragem de resíduos – Procedimento;
- NBR 11174/89 – Armazenamento de resíduos classes II – não inertes e III – inertes – Procedimento;
- NBR 13221/94 – Transporte de resíduos – Procedimento;
- NBR 13463/95 – Coleta de resíduos sólidos Classificação; e
- NBR 13413/95 – Controle de contaminação em áreas limpas – Terminologia.

A NBR 10004/87 classifica os resíduos sólidos de três maneiras, com referência aos potenciais riscos dos mesmos ao meio-ambiente e à saúde pública, conforme é apresentado por JUSSARA SEVERO DA SILVA em seu trabalho “*Estudo do Reaproveitamento dos Resíduos Sólidos Industriais na Região Metropolitana de João Pessoa (Bayeux, Cabedelo, João Pessoa e Santa Rita) – PB*”, a NBR 10004/87 classifica os resíduos sólidos em três classes quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, determinando assim que manuseios e destinação são adequados aos mesmos.

A classificação proposta pela NBR 10004/87 é a seguinte:

- **Classe I - Perigosos:** São aqueles que apresentam substancial periculosidade real ou potencial à saúde humana ou aos organismos vivos e que se caracterizam pela letalidade, não degradabilidade e pelos efeitos cumulativos diversos, ou ainda por uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

- **Classe II – Não-Inertes:** São aqueles que não se enquadram nas classificações dos resíduos Classe I – Perigosos, ou dos resíduos Classe III – Inertes. Esses resíduos apresentam propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- **Classe III - Inertes:** São os resíduos que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água destilada deionizada, à

temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez e sabor.

3.2.1. Avaliação da Situação dos Resíduos Industriais

O gerenciamento dos resíduos sólidos industriais é hoje um dos principais problemas vivenciados pelas empresas na área de meio ambiente. Segundo o mais recente levantamento realizado pela Cetesb, que embora seja contestado por alguns, ainda é praticamente o único referencial que se tem sobre os quantitativos desse tipo de resíduos, somente no estado de São Paulo são gerados anualmente 535 mil toneladas de resíduos Classe I, perigosos, e 25 milhões de toneladas de resíduos Classe II, que são menos problemáticos em termos de potencial poluidor.

Pela legislação, a disposição estes resíduos dever ser acompanhada por quem o gera, independente de seu destino, ficando também responsável por seus riscos, se devidamente tratados ou temporariamente estocados. Porém, o que ocorre, de fato, é que boa parte desses resíduos está sendo depositada de forma inadequada.

Esta prática, no entanto, representa um grande perigo para o gerador, que afinal é sempre responsável pelo resíduo, esteja ele onde estiver. Ainda segundo os números da Cetesb, das 535 mil toneladas de resíduo Classe I, 53% são tratados, 31% são estocados e 16% são dispostos no solo. Quanto aos de Classe II, 35% vão para tratamento, 2% são estocados e 63% são dispostos. E nesse caso a dúvida mais inquietante, se efetivamente cerca de 284 mil t/ano de resíduos Classe I são tratadas, é onde isto ocorre. Por exemplo, atualmente, a principal forma de tratamento de resíduos Classe I, é a incineração.

Com a aprovação da Lei de Crimes Ambientais (decreto no 3179/99), a qual estabelece pesadas sanções para os responsáveis pela disposição inadequada de resíduos, as empresas que prestam serviços na área de resíduos sentiram um certo aquecimento do mercado – houve empresa que teve aumento de 20% na demanda por serviços logo após a promulgação da lei – mas tal movimento foi de certa forma arrefecido com a emissão da Medida Provisória que ampliou o prazo para que as empresas possam se adequar à nova legislação.

A esperança das empresas que investiram em tecnologia e instalações para tratamento e disposição de resíduos industriais está na disseminação da ISO 14000, pois as empresas que aderirem à norma terão que gerenciar adequadamente seus resíduos, e numa maior atuação fiscalizadora por parte dos órgãos de controle ambiental.

Pode-se dizer que a década de 70 foi a década da água, a de 80 foi a década do ar e a de 90, de resíduos sólidos. Isso não foi só no Brasil, nos EUA também se iniciou a abordagem relativa a resíduos sólidos somente no limiar da década de 80, quando foi instaurado o *Superfund*, que era uma legislação específica que visava recuperar os grandes lixões de resíduos sólidos que havia e ainda há espalhados nos EUA. Na verdade, uma diferenciação entre a legislação americana e a nossa foi que os resíduos foram divididos em três classes: Classe I, chamados perigosos, Classe II, chamados de resíduos não-inertes, e os Classe III, inertes. Os resíduos Classe I e III são a minoria. A grande quantidade de resíduos se enquadra na Classe II, por causa dos critérios adotados. Então há resíduos Classes II mais ou menos tóxicos ou mais ou menos perigosos, que não chegam a ser perigosos como define a Classe I, nem são inertes como definido na Classe III.

Para ser resíduo Classe I, como na legislação americana, o resíduo tem que ter a característica de inflamabilidade, corrosividade, de reatividade, de toxicidade e patogenicidade. Essa última já é uma criação da nossa legislação brasileira, embora a legislação americana também tenha colocado patogenicidade como critério para definir resíduo sólido perigoso.

Para caracterizar a inflamabilidade, a lei determina que o ponto de fulgor teria que ser menor que 60°C, que produzisse fogo por fricção (não sendo líquido) e que fosse um oxidante, liberando oxigênio. São três das condições para que um resíduo seja caracterizado como perigoso, por sua inflamabilidade.

Se o resíduo tiver característica de corrosividade, deve ter pH de 12 a 12,5 – aliás, é um dos poucos itens que na prática se avalia – e corroer aço na razão menor que 6,35 mm por ano (o único local onde se faz esse teste em São Paulo é o IPT).

Existe o critério de reatividade, que determina se o resíduo seria instável, reagindo violentamente com o ar e a água. Um exemplo é o carboneto de cálcio que, em contato com a água, gera acetileno; este critério avalia também se o resíduo forma misturas explosivas com a água, gera gases, vapores, fumos, libera gases à base de cianetos, sulfetos, produz reação

expressiva ou detonante e é explosivo. O critério da toxicidade já é mais ligado aos ensaios com organismos, ratos, coelhos e peixes etc. Há também o critério que avalia se o resíduo contém substâncias que lhe conferem periculosidade. Esses são os critérios utilizados na legislação americana e que foram adotados em São Paulo como base para classificar um resíduo como perigoso.

Os resíduos Classe III são aqueles que praticamente têm como característica um extrato solubilizado igual aos padrões de água potável, o que é muito raro. Então, o que não for classe I ou Classe III é, por exclusão, Classe II. Daí o motivo de ter sido mencionado antes, que o resíduo Classe II abrange todos os resíduos possíveis e que não estejam classificados nas outras classes.

Os critérios utilizados para classificar um determinado resíduo e sua fonte de origem, na verdade, se baseiam em consultas a listagens, que subsidiam essa classificação. Mas a prerrogativa para dizer se um resíduo é Classe I, II ou III é estritamente da Cetesb, que dá a palavra final. Pode até ser que um resíduo tenha sido caracterizado, pelos critérios existentes, como Classe II, e a Cetesb resolva interpretar como sendo Classe I, pelo fato de o resíduo ser potencialmente Classe I, estar naquele limite entre uma classe e outra. Porém, muito dificilmente um resíduo Classe II pode ser determinado como Classe III.

Após consulta às listagens, na prática, são feitos três tipos de análises que estão previstas na normalização brasileira, da NBR 10004 a NBR 10007. Analisa-se a massa bruta, o extrato lixiviado e o extrato solubilizado.

3.3. Estudos Sobre Reciclagem

A preocupação de se estudar os impactos ambientais sobre o solo, causado pelos resíduos siderúrgicos já é um assunto de importância significativa dentro do meio acadêmico e de pesquisas. Iniciaram-se em 1994, projetos para a determinação da capacidade suporte de solos de aterros industriais para o recebimento de resíduos siderúrgicos; estabelecimento de análise de rotina para determinação de metais pesados em solos, sedimentos, água e resíduos urbanos e industriais; desenvolvimento de bioensaios enzimáticos para detectar metais

pesados em plantas; maior entendimento sobre os processos de multiplicação e desenvolvimento de fungos micorrízicos em relação às variáveis ambientais.

Esta preocupação pode ser percebida em outros trabalhos. Neste trabalho aborda-se a necessidade de avaliar cuidadosamente cada resíduo, e a importância de se manter uma avaliação não definitiva, mas interativa, com relação à classificação destes resíduos. Segundo essa linha, a forma como um resíduo atinge o solo e os meios orgânicos que o compõem está relacionado à saturação não só deste solo mas de todo o meio-ambiente circundante do mesmo, e até mesmo com um processo de fadiga ambiental que o solo venha a sofrer. Em resumo, o impacto que um determinado resíduo cause hoje pode ser bem diferente do causado amanhã.

A preocupação com o tratamento para recuperação e reciclagem de resíduos tem vários níveis de importância, e como não poderia deixar de ser, tem também o caráter econômico. Empresas como a Paul Wurth e a British Steel Plc., têm procurado desenvolver processos viáveis de recuperação de resíduos.

3.3.1. Definição de 5R's

O termo 5 R's representa: *Reduce*, *Recover*, *Recycle*, *Re-use* and *Residual Management*, que pode ser interpretado como: **Reduzir** a geração de resíduos, **Recuperar** os resíduos que forem possíveis, **Reciclar** os produtos que forem adequados, **Reutilizar** a parte recuperada e **Remanejar** os resíduos remanescentes ou os que forem gerados do próprio processo de reciclagem.

3.3.2. Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos

A importância de se recuperar e reciclar os resíduos gerados pela indústria siderúrgica vem se tornando cada vez mais importante para as pesquisas industriais. O número de dissertações e teses que vêm sendo desenvolvidas e pesquisadas comprova essa preocupação. E embora ainda esteja muito aquém do realmente necessário, isto vem acontecendo cada vez mais com apoio técnico e financeiro crescente das indústrias.

A adoção de um comportamento ético, respeitando as normas ambientais e o enfoque na responsabilidade social passou a ser uma preocupação adicional dos empresários, que cada

vez mais encaram o respeito ao meio-ambiente como um investimento que gera retorno, contribuindo para o desenvolvimento econômico e melhorando a qualidade de vida da sociedade.

A criação de normas ISO voltadas para a legislação ambiental, bem como a imposição das mesmas pelo mercado internacional foram de grande motivação para a melhoria da qualidade da pesquisa científica ambiental por parte das empresas, bem como do estudo e desenvolvimento de processos industriais mais atentos ao meio-ambiente. A implementação de um *Sistema de Gestão Ambiental* (SGA), conforme a norma ISO 14001, determina a identificação, atualização e atendimento da legislação ambiental de uma forma estruturada pela organização. Mais do que a garantia do cumprimento dos requisitos legais, este *Sistema de Gestão Ambiental* objetiva a melhoria do desempenho ambiental da empresa, assim como a prevenção da poluição.

A importância de pesquisas com resíduos siderúrgicos cresceu significativamente nos últimos anos, trabalhos de pesquisa que envolvem a recuperação dos vários tipos de resíduos industriais têm tomado cada vez mais terreno no campo da pesquisa ambiental, dentre todas as indústrias analisadas a siderúrgica têm sido pioneira no foco dos estudos de recuperação e reciclagem de resíduo, seguida de perto pelas indústrias de não ferrosos, como alumínio, cobre, etc.

As indústrias siderúrgicas há muito geram e manuseiam resíduos que podem ser reutilizados e reciclados em sua própria operação, como é o caso das sucatas de aço, que hoje, inclusive, compõem parte já consagrada e importante da alimentação de fornos de fabricação e refino de aço, significativamente valorizada no mercado, com escalas de avaliação de sua qualidade e preço. Com o avanço das pesquisas outros resíduos têm alcançado posições significativas na importância da reciclagem e recuperação dentro do mercado siderúrgico, tanto direta como indiretamente, é este o caso das escórias.

A preocupação com o meio ambiente além de legítima com relação à situação da natureza que nos circula não é apenas referente às florestas e animais das áreas verdes, mas principalmente com relação ao ambiente em que vivemos, imediatamente próximo às indústrias e centros urbanos, nesse ponto podemos destacar dois tipos de preocupação, uma a nível local, preocupando-se com o efeito imediato que uma ação industrial pode ter nos arredores que a circunda, com efeitos mais imediatos tanto nos problemas causados como na

ação corretiva; outra a nível mundial, levando em conta todo o equilíbrio global, agora levando em conta a ação mais prolongada e a dificuldade de recuperação ou apenas amenização do efeito.



Figura 3.7 – Planta instalada pela Paul Wurth, em cooperação com a ProfilARBED Esch-Belval: Projeto inicial em três dimensões e foto.

A Paul Wurth instalou, em cooperação com a ProfilARBED Esch-Belval, uma planta piloto (1 a 2 t/h), operando com ótimos resultados desde Abril de 1999. O processo denominado PRIMUS® é um processo para a reciclagem de subprodutos sidero-metalúrgicos e finos de minério, obtendo-se um pré-reduzido (DRI) com alto grau de metalização. Como redutor, foi usado carvão fino. Ver **Figura 3.7**.^[49]

A British Steel Plc., um dos grandes produtores de ferro e aço, em processos integrados e a arco elétrico, tomou como objetivo dar resposta ao problema, cada vez maior, do impacto ambiental causado pelos resíduos emitidos por ela, percebido na política ambiental adotada pela empresa: promover sucessiva reciclagem de produtos e sub-produtos; e, minimizar o risco de todas as formas de poluição da água, ar e do solo. Dentre os resíduos gerados pela empresa estão os considerados ferrosos, ou seja, produtos das limpezas de gases, ou gerados em etapas de laminação ou lingotamento. No caso da carepa oleosa de laminação, um interessante desenvolvimento foi feito para este material. A carepa de laminação é normalmente reciclada ao acamamento de minério, mas isso pode ficar restringido pelo óleo presente em algum material. Tipicamente, não é usado material com teor de óleo de mais de 1%, devido aos problemas no processo de sinterização, em função disso. O material mais fino, como a lama fina oleosa de laminação, tem muitas vezes um teor de óleo que pode chegar a 15%. Os métodos tradicionais para tratamento desse material vem sendo a incineração e

extração com utilização de solvente. Ambos os métodos, entretanto, são caros, além de causarem problemas ambientais e elevado consumo de energia.

A maior parte das indústrias siderúrgicas no Brasil se situam no meio de grandes centros urbanos, como se pode ver nas imagens abaixo. Em todos os exemplos pode-se perceber a necessidade estratégica e logística de se instalar essas siderúrgicas próximas a rios, tanto para obtenção de água para processos dentro da siderurgia como para descarga de águas de processamento. O que na verdade tem sido modificado nos dias atuais, tem-se dado cada vez mais atenção a necessidade de tratamento das águas provenientes de processos industriais, ainda não se atingiram a seriedade e dedicação necessárias, mas já é um forte indicador positivo, essa iniciativa de preocupação com o meio ambiente.

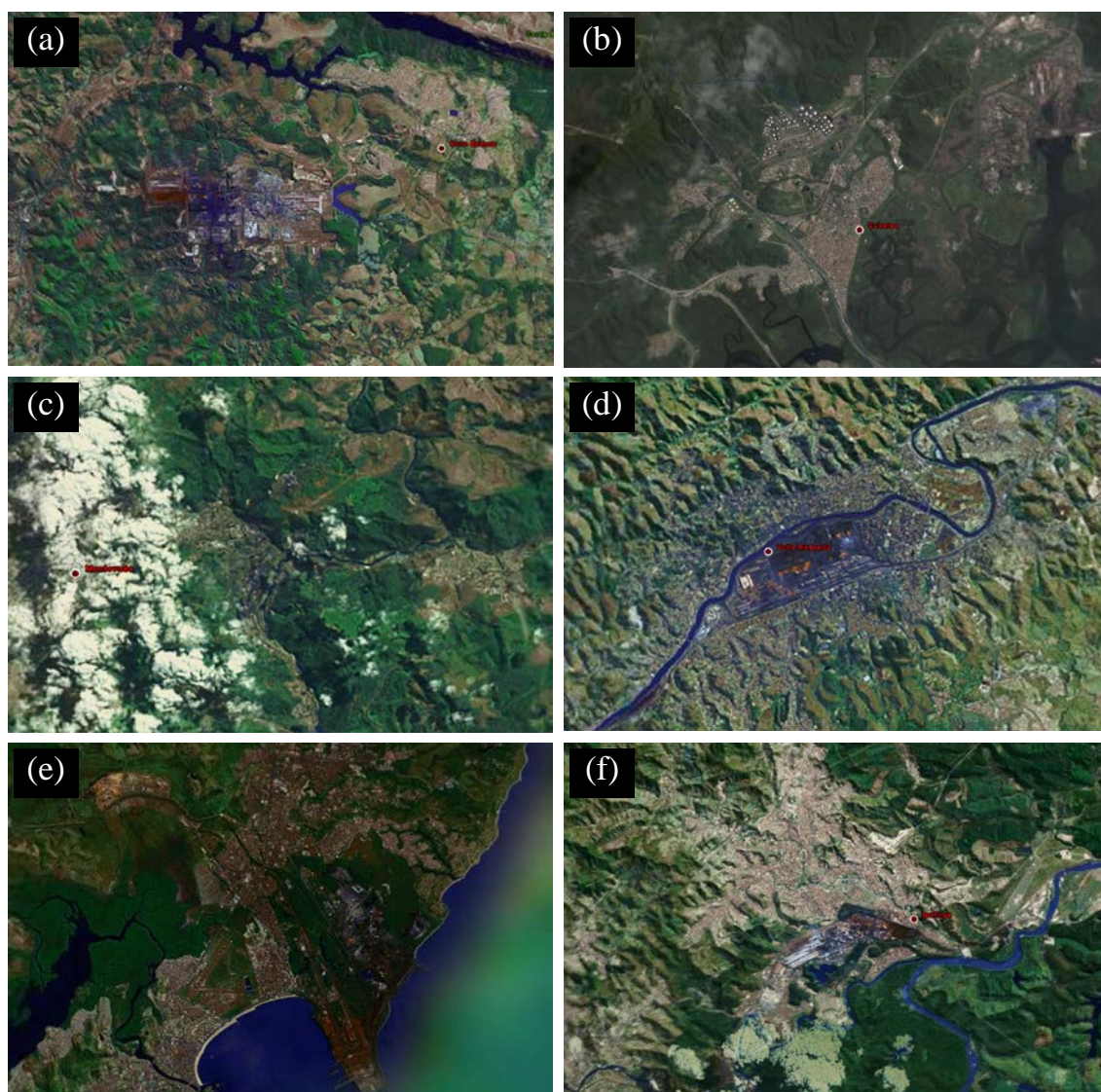


Figura 3.8 – Fotos de satélite a 10.000 m de altitude das principais siderúrgicas brasileiras localizadas dentro de centros urbanos: (a) Açominas – Ouro Branco/MG; (b) Cosipa – Cubatão/SP; (c) CSBM – João Monlevade/MG; (d) CSN – Volta Redonda/RJ; (e) CST – Vitória/ES; (f) Usiminas – Ipatinga/MG. Fonte: Google Earth.

As escórias geradas na siderurgia são, depois da sucata, o maior foco de recuperação e reciclagem de resíduos dentro da indústria do aço. As escórias de alto-forno, rica em SiO_2 , e assim predominantemente ácidas e com uma resistência significativa, foram utilizadas de várias formas: na fabricação de cimentos, na composição de lastro de leito de estrada, na área construtiva, etc., já as escórias de aciaria, inicialmente, por serem predominantemente básicas, ou seja, com alto teor de CaO em sua composição, foram inadequadas para utilização na formação de leitos de estradas, por sua higroscopicidade alta, a adsorção de água em sua estrutura provoca aumento de volume, rachaduras e rupturas, enfraquecendo sua resistência estrutural, mas na área de recomposição de basicidade de solo, bem como na de fabricação de fertilizantes as mesmas passaram a ter significativa atuação.

A composição química das escórias de alto forno produzidas varia dentro de limites relativamente estreitos. Os elementos que participam são os óxidos de: cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e magnésio (Mg). Temos ainda, em quantidades menores, FeO , MnO , enxofre, etc.

É importante ressaltar que essa composição vai depender das matérias primas e do tipo de gusa fabricado. A composição química é de extrema importância e vai determinar as características físico-químicas das escórias de alto forno.

Tabela 3.1 – Teores de composição média para as escorias de LD e alto-forno.^[6]

Material	% SiO_2	% CaO	% Al_2O_3	% FeT	% MgO	%S	% MnO	% TiO_2
Escória de conversor (LD)	13,80	44,30	1,54	17,50	6,40	0,07	5,30	1,50
Escória de Alto-Forno	33,65	41,60	12,42	0,45	7,95	-	-	0,73

- Escória de Alto-Forno

A escória de alto-forno tem bastante utilização na construção civil, principalmente na fabricação de cimentos. Os exemplos descritos se referem às escórias de alto-forno da CST e são descritos no *site* desta empresa.

A escória utilizada para a fabricação de cimento, GBFS (*Granulated Blast Furnace Slag*), é utilizada moída na composição do cimento CP II E (o mais produzido e consumido no Brasil) e o CP III. A escória substitui parte do clínquer na fabricação do cimento, devido as suas propriedades cimentantes (hidraulicidade), além de contribuir para a qualidade final do mesmo.^[4]

O CP II E é utilizado para concretos estruturais convencionais para lajes, vigas, pilares e fundações; argamassas em geral; concreto estrutural para pisos; concreto para contrapiso; fibrocimento (caixa d'água e telhas); etc.^[4]

A composição básica do CP II E é a que se segue na tabela abaixo:

Tabela 3.2 – Composição do cimento CP II E.^[4]

SIGLA	CLÍNQUER + GESSO	ESCÓRIA	MATERIAL CARBONÁTICO
CP-II E	56 ~ 94%	6 ~ 34%	0 ~ 10%

Obs.: segundo a norma NBR 11578.

O CP III apresenta uma resistência final maior e menor calor de hidratação, quando comparado com outros cimentos de mesma classe, e com menores teores de adição de GBFS, (fato comprovado por ensaios), com uma grande vantagem de produzir concretos menos porosos (melhor trabalhabilidade), fator que contribui para impedir o ataque de sulfatos (quando com 60% a 70% de escória na composição) e, conseqüentemente, deterioração da estrutura, além de ser recomendado para evitar a reação álcali-agregado.^[4]

Portanto, é recomendado para ambientes agressivos que requerem grandes resistências e qualidade do concreto, tais como:^[4]

- Obras de saneamento (canalização);
- fundações e lajes com concreto protendido e/ou nervurado;
- pisos industriais, rurais e sanitários;
- túneis e galerias;
- estação de tratamento de água;
- indústria química;
- obras marítimas (portos);
- concreto compactado a rolo em pavimentos;
- barragens;
- pontes, etc.

Tabela 3.3 – Composição do cimento CP III.^[4]

SIGLA	CLÍNQUER + GESSO	ESCÓRIA	MATERIAL CARBONÁTICO
CP-III	25-65%	35-70%	0-5%

Obs.: segundo a norma NBR 5735; CP-III RS (resistente a sulfatos), 60 a 70% escória (NBR 5737).

Vários estudos e experimentos estão sendo realizados no sentido de desenvolver novas aplicações alternativas para a GBFS. Um campo de grande interesse é o de artefatos de concreto, como exemplo, o de blocos pré-moldados de concreto, onde estudos já executados sinalizam a viabilidade da aplicação da GBFS, substituindo os materiais usuais.^[4]

- Escória de Conversor LD

Escórias de aciaria LD também são utilizadas em processos de reciclagem na construção civil, os exemplos abaixo descrevem o uso das escórias da aciaria LD da CST.

Gabiões: Devido a sua alta densidade torna-se muito eficaz a aplicação do referido co-produto siderúrgico neste tipo de obra de contenção. O peso próprio da escória LD NP chega a ser 70% maior que os agregados pétreos, executando um muro de arrimo de alta qualidade. Podemos citar também o baixo custo de implantação e manutenção, alto poder drenante, excelente aparência visual, além de preservar os recursos naturais.^[4]



Figura 3.9 – Uso de Escória de LD na formação de Gabiões de contenção. Fonte: www.geobrasil.com.br (2005).

Rip-rap: Outra aplicação da escória LD é na execução de rip-rap para a proteção de taludes e estabilização de encostas, apresentando obras de excelente qualidade e estabilidade devido sua alta densidade e seu poder cimentício. Para essa aplicação, pode-se utilizar a escória **LD NP** – Ela é formada a partir do resfriamento da escória líquida, proveniente da aciaria, que é colocada no pote de escória e transportada até um pátio, onde é resfriada. É

estocada no pátio, sem qualquer controle no peneiramento (NP) e sua granulometria varia de 0 mm a 500 mm –, ou a escória LD "In Natura". Sua maior densidade exige um menor volume de material, sendo mais econômica, preservando recursos naturais.^[4]



Figura 3.10 –Utilização de escória de LD granulada em Rip-rap's de contenção. Fonte: www.geobrasil.com.br (2005).

Entretanto, apesar da literatura abrangente diferenciar significativamente a utilização das escórias de forma bem detalhada, GEORGE e SORRENTINO apresentam em seu artigo uma informação significativa com relação à associação dessas escórias na confecção de pavimentos, onde já no Japão essa associação é regulada por norma (JIS A 5015, 1992) desde 1979. Conforme é colocado no artigo, esta norma prevê a produção de escórias para pavimentação através de diferentes formas de estabilização e com diferentes granulometrias, para empregos em leito superior e leito inferior de estradas, asfaltos misturados a quente, etc. Esta norma prevê que se a expansibilidade da escória for inferior a 2,5%, não existe perda na resistência do pavimento. O DNER desenvolveu normalização específica para o emprego no Brasil.^[5]

Tanto a reutilização como a reciclagem das escórias siderúrgicas ficam bastante evidenciadas por esses parágrafos, entretanto, as lamas de aciaria e alto-forno por sua vez são pouco citadas. No entanto as mesmas já são utilizadas em alguns processos e outros vêm sendo desenvolvidos para permitir sua recuperação.

Ainda outro tipo de resíduo siderúrgico de bastante interesse em sua reciclagem, tanto do ponto de vista econômico como ambiental, consiste nas lamas geradas durante a fabricação de aço, direta e indiretamente, respectivamente, lama de aciaria e lama de alto-forno.

Lama de Aciaria. Por seu alto teor de ferro contido, vem sendo aproveitada na fabricação de cerâmicas, onde a presença do óxido de ferro é fortemente utilizada como corante. Algumas empresas chegam a produzir um briquete com essa lama para reintroduzi-la

na fabricação do gusa. Contudo, a lama de aciaria LD pode ser dividida em duas partes, cerca de um terço de sua produção mensal (aproximadamente 2.500 t para siderúrgicas de grande porte – ex.: CSN, CST, Usiminas, Açominas, etc.) é composta por uma fração grossa, acima de 325# (> 45µm), com um teor de ferro **metálico** que em algumas dessas siderúrgicas chega acima de 65%, sendo assim, sua utilização para a fabricação de briquetes que serão realimentados na produção de gusa é um contra-senso, economicamente falando, pois estará sendo utilizado ferro para produzir ferro (com pureza inferior).

Outro fator que impõe um tratamento mais eficiente e cuidadoso dessa lama consiste no fato de que a mesma vem com teores de zinco e álcalis que, embora na faixa de PPM, podem causar engaiolamentos cíclicos dentro do alto-forno.

A presença desses elementos de baixíssimo ponto de fusão se dá pelo carregamento juntamente com fundentes e/ou como elementos de ligas que compõem as sucatas carregadas, principalmente no processo de fabricação e refino de aço.

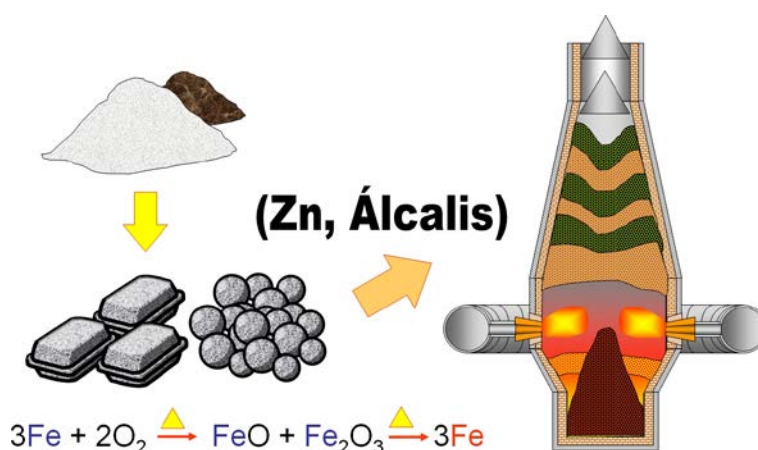


Figura 3.11 – Utilização da lama grossa de aciaria para a fabricação de briquetes a serem reutilizados no Alto-Forno: por ser proveniente da aciaria, o ferro contido no material sob a forma metálica possui um grau de pureza (ligas e carbono) superior ao que resultará no produto final que é o gusa. Fonte: Autor.

No caso da lama fina, que consiste dos outros dois terços da produção total de lama de aciaria LD e se encontra abaixo de 325#, a presença de ferro metálico é muito pequena, no entanto a mesma é rica em FeO, com cerca de 60% de sua composição em peso sendo deste óxido.

Lama de Alto-forno. No caso das lamas de alto-forno sua composição é basicamente, minério, sílica e finos de carvão (vegetal ou coque) e finos que são carregados pelos gases, onde, nesses finos se concentram os teores de álcalis e zinco. Uma vez separados os

extrafinos, a etapa seguinte consiste em se separar adequadamente os resíduos finos de carvão, o que consiste na maior dificuldade, o material restante, basicamente minério e sílica, são matéria prima para realimentação no alto-forno.

Os finos de carvão, uma vez separados por processo econômica, técnica e ambientalmente viável, consiste na parte mais valiosa desses resíduos, pois sua recuperação consiste na reciclagem de fonte de energia, além de minimizar consumo do equivalente em carvão “novo” no processo. Além disso, ao se recuperar esses finos estará sendo evitado que o mesmo seja descarregado no meio ambiente diretamente. Uma usina de grande porte produz em média cerca de 10 a 13 mil toneladas mensais desse resíduo.

Carepa de Laminação. Nos processos integrados, onde as usinas além de fabricar o aço, também fazem sua transformação mecânica em bobinas e chapas para sua comercialização, um resíduo com significativo teor metálico são as carepas (carepas grossas e lamas finas de laminação), sua reciclagem, entretanto, fica bastante comprometida em função de seu elevado teor de óleo contaminante.



Figura 3.12 – Etapas de laminação de chapas de aço: entrada da chapa no trem de laminação; vapor formado pelo impacto do fluido refrigerante; imagem de uma camada de carepa remanescente após jateamento por injetores de pressão. Fonte: ABM (2003).

Ao se proceder a laminação de qualquer tarugo ou chapa metálica o mesmo é feito em elevada temperatura, durante esse processo procede-se um resfriamento da camada externa dessa chapa, onde uma carepa é formada. Esse resfriamento é feito com uma mistura de água e um óleo semi-solúvel. A presença do óleo na água de resfriamento é importante pois o

mesmo aumenta a temperatura de evaporação da água, impedindo que uma atmosfera de vapor quente se forme ao redor dos equipamentos e assim ponha em risco a saúde dos operadores e a integridade dos equipamentos.

Ao sofrer o choque térmico do impacto sobre a chapa quente esse óleo muda sua estrutura, aumentando sua viscosidade após resfriar e envolvendo de forma pelicular as partículas da carepa.

A carepa é formada pelo choque térmico tanto quanto pelo impacto do jato de resfriamento sobre a superfície da chapa laminada. Na verdade esses injetores de fluido de refrigeração são preparados para trabalhar com pressões significativas no processo de resfriamento, promovendo a limpeza da superfície do tarugo ou chapa da carepa formada. Por ser basicamente composta por óxido metálico a presença da carepa na superfície da chapa a ser laminada é inconveniente ao processo de laminação, por vários fatores, mas principalmente pela qualidade da chapa após laminação.

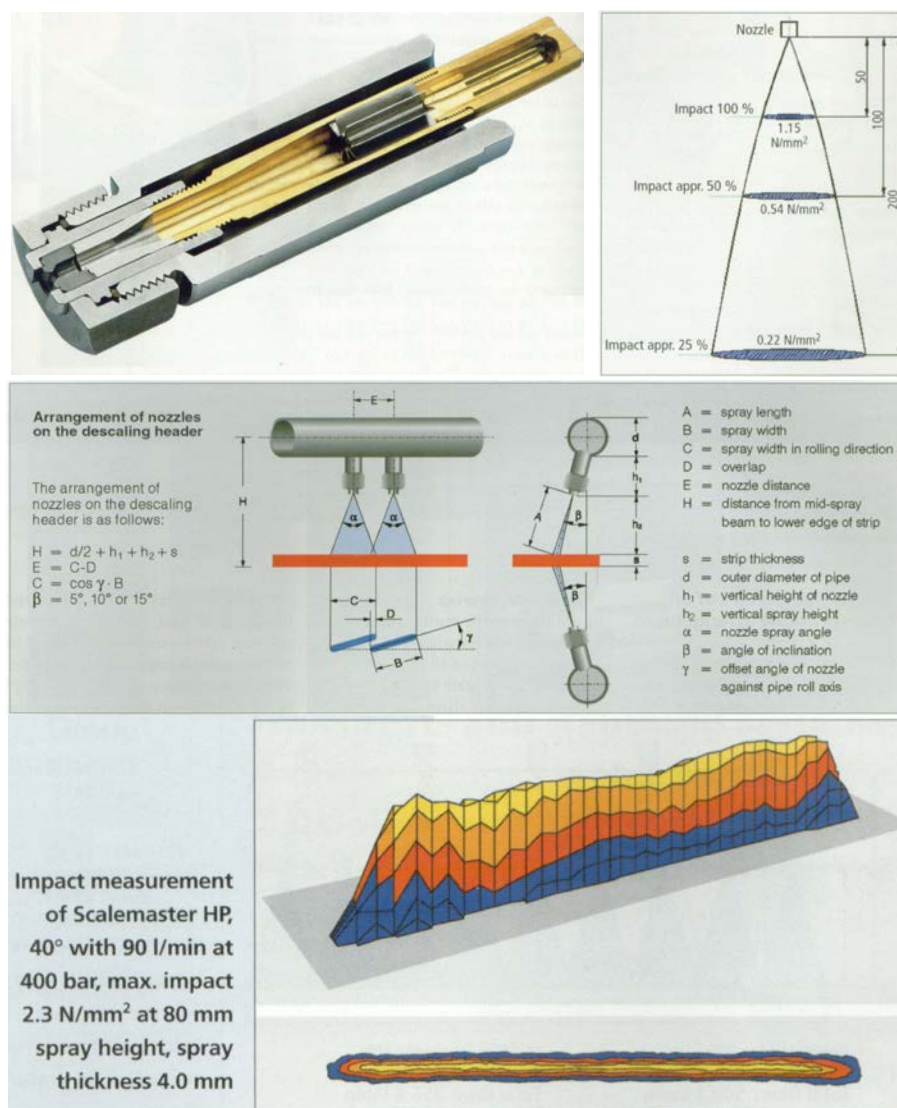


Figura 3.13 – Esquema descritivo de projeto e operação de injetores de pressão para jateamento de fluido para decarepação sobre chapas laminadas, com detalhamento da distribuição e valores da pressão do jato na área de impacto.

3.4. Princípios e Propriedades do Ultra-Som

A utilização de ultra-som de uma forma geral é conhecida e estudada já há muito tempo, entretanto, sua utilização se concentra, mais especificamente, em exames não destrutivos, na segurança de equipamentos móveis sob a forma de sonares, na medicina para sondagem de imagens internas e para “quebrar” pedras nos rins e vesículas, etc.

Segundo VIGOUREAU (1950), a geração de ultra-som em fluidos pode ocorrer pela excitação direta do fluido, tanto com sinal de Galton quanto jato de Hartmann, que são usados

somente para gases, ou pela excitação de um vibrador sólido, que colocado em contato com o líquido produz ondas ultra-sônicas no mesmo. Este método aplica-se aos líquidos tanto quanto aos gases, e é quase universalmente utilizado para medidas de velocidade ou atenuação, devido sua grande conveniência para trabalhos quantitativos. Apesar de operar puramente por métodos mecânicos ainda encontra uma aplicação em eco-sondagem e campos associados, algum método elétrico é quase sempre utilizado para promover a excitação do vibrador em pesquisas ultra-sônicas. O tipo eletromagnético, trabalhando como um alto-falante, pode ser usado, mas como os tipos magnetostrictivos e piezelétricos são de longe os mais convenientes, somente esses serão aqui descritos. Algumas considerações gerais de vibradores de pistão serão, contudo, dadas anteriormente.

Vibradores de Pistão. Apesar de outros vibradores além do tipo pistão serem empregados, o último é mais satisfatório para trabalhos em geral e também o mais comumente usado. Por vibrador de pistão entenda-se um disco ou retângulo achatado ou superfície plana de qualquer formato, que vibra com um todo na direção normal a esta superfície. No pistão ideal, todos os pontos da superfície se movem em fase a com a mesma amplitude. Como a excitação de uma frequência simples é em geral visada em função do tempo e implica em ondas senoidais de vibração, o pistão ideal supõe-se vibrará com uma velocidade v igual à função do tempo $v_0^{(j\omega t)}$ onde ω é a frequência angular.

Deve-se dizer que quando as dimensões do pistão são pequenas comparadas com o comprimento de onda, a intensidade do som é a mesma para todos os pontos de uma esfera imaginária tendo seu centro na posição do pistão e quando o raio dessa esfera é grande se comparado ao comprimento da onda sônica. Se, contudo, as dimensões do pistão forem comparáveis ao comprimento de onda, a distribuição da intensidade não será uniforme, mas existirá um máximo na direção normal à superfície componentes dessa máxima em outras direções. Fórmulas simples estão disponíveis para a distribuição para discos e retângulos, que são os únicos casos importantes aqui, e elas são dadas a seguir. (VIGOUREAUX, 1950)

Onde:

$\rho \rightarrow$ densidade do meio,

$s \rightarrow$ velocidade do som no meio,

$f \rightarrow$ frequência,

$\omega \rightarrow$ frequência angular, igual a $2\pi f$,

$\lambda \rightarrow$ comprimento de onda, igual a s/f ,

$k \rightarrow$ constante de propagação, igual ω/s ,

$A \rightarrow$ área do pistão,

$R \rightarrow$ distância, grande se comparada com o comprimento de onda ou com as dimensões do pistão, entre o centro do pistão e o ponto no qual a intensidade é analisada,

$p_N \rightarrow$ pressão do som na normal à distância R ,

$v \rightarrow$ velocidade da face do pistão,

Então para um pistão de qualquer formato plano:

$$p_N = \frac{\rho \cdot f \cdot A}{R} v \quad \text{Eq. 3.1}$$

Para um disco a intensidade é axialmente distribuída sobre a normal, onde:

$\theta \rightarrow$ ângulo entre a normal e a direção considerada,

$p \rightarrow$ pressão para R, θ ,

$a \rightarrow$ raio do disco,

$x \rightarrow$ sendo igual a $ka \cdot \sin\theta$ para abreviar,

$J_1 \rightarrow$ função de Bessel de primeira ordem,

temos:

$$p = \frac{2 \cdot J_1(x)}{x} p_N \quad \text{Eq. 3.2}$$

Para um pistão retangular a distribuição não é axial, mas se a direção considerada for a interseção de planos fazendo ângulos φ e ψ com os planos seguindo a normal e paralelos aos lados b e a , respectivamente, y e z sendo a abreviação para $ka \cdot \sin\varphi$ e $kb \cdot \sin\psi$, então:

$$p = \frac{\sin y}{y} \cdot \frac{\sin z}{z} p_N \quad \text{Eq. 3.3}$$

Nas fórmulas acima p , p_N e v são todas amplitudes ou todas valores r.m.s. como se desejar. A intensidade, ou potência transmitida através da unidade de área da superfície da esfera, é $p^2/\rho s$, onde p é a pressão r.m.s. No caso do disco a pressão no eixo pode ser expressa por uma fórmula válida quando a distância R não é grande comparada com o raio do disco. A fórmula é:

$$p = \rho sv.2\text{sen} \frac{k}{2}(R' - R), \text{ Eq. 3.4}$$

onde R' é a distância da borda do disco ao ponto em consideração. As fórmulas de Eq. 3.1 a 2.4 não levam em conta a atenuação, mas considera-se o descaimento na intensidade devido à expansão enquanto Eq. 3.2 e 2.3 dão a distribuição com a direção. Todas estas fórmulas são baseadas na suposição de que o pistão repousa num furo em um plano rígido infinito ou defletor e, contudo, tem significado somente para valores de θ não maiores que 90° . Na prática a construção do defletor pode ser uma complicação indesejável, mas isto pode significar que, as dimensões do pistão são algumas vezes o comprimento de onda, as medidas de valores de intensidade quando nenhum defletor é usado estão em acordo com as dadas pelas fórmulas.

A figura abaixo é um gráfico do quadrado de $2J_1(x)/x$ em função de x , que mostra que a intensidade alcança um valor de máxima, cada um sendo menos que o anterior. Assim a energia, em acréscimo por ser propagada dentro do cone central, é também propagada dentro do espaço intercônico, representado pelo lóbulo “secundário” na figura.

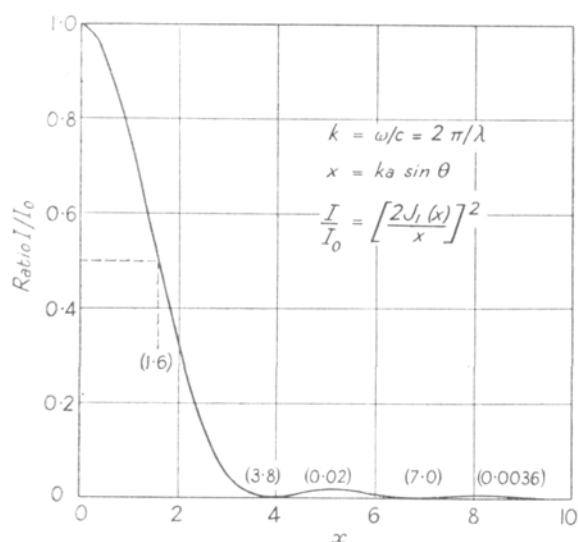


Figura 3.14 – Curva mostrando a razão entre a intensidade do som na direção θ e a intensidade ao longo da normal para um disco vibrador de um pistão discreto em função da frequência angular ω . Fonte: VIGOUREAU (1950).

A fórmula 2.4 mostra que para distâncias no eixo, pequenas, comparadas ao raio do disco, isto é, quando R é muito menor do que R' , a intensidade não cai gradualmente com R , mas oscila entre zero e $4\rho sv^2$. Como R cresce em seguida e finalmente fica grande comparada

com o raio do disco, $R' - R$ torna-se uma distância pequena, e a fórmula tende ao valor dado por 2.1. A conclusão é que as medidas de intensidade para o propósito de estimar a atenuação não devem ser feitas perto do vibrador. É aconselhável considerar as implicações da fórmula 2.4 um pouco favorecidas. De acordo com esta fórmula, a razão de pressão para psv é igual a $2\text{sen}\pi (R' - R)/\lambda$. No eixo da superfície do disco, R é zero e R' é igual ao raio a do disco, tanto que a razão é $2\text{sen}\pi a/\lambda$. Como o ponto considerado move-se ao longo do disco, o coeficiente de π no termo seno, isto é $(R' - R)/\lambda$, cai de a/λ para alcançar eventualmente um valor que é muito menor que a unidade, e tende a $a^2/2R\lambda$. Assim se a/λ é um número grande, o coeficiente passa através de um número de valores inteiros, correspondendo aos valores de R para os quais a pressão é zero. O número de pressões zero no eixo é de fato, dado pela parte inteira de a/λ ; estes zeros se manifestam próximos ao disco, mas a distância entre zeros sucessivos cresce gradualmente.

Para ilustrar a variação com um exemplo numérico, suponha-se que o disco radiador tenha 15mm de raio, e uma frequência de 10 MHz. Na água o comprimento de onda, λ , é em torno de 0,15mm, e a relação a/λ vale 100. A pressão é, contudo, zero no centro do disco, e existem ainda 99 outros valores zero, o último zero ocorre a uma distância igual a $a^2/2\lambda$ ou 750mm. Se o receptor for tão pequeno que possa ser considerado adimensional e, situado no eixo, que pode ser de 20m ou mais antes da variação de acordo com a expansão esférica ser estabilizada, e como para tais distâncias a pressão pode em alguns casos ser reduzida a praticamente zero por causa da atenuação por absorção, nenhuma medição será possível.

Na prática, entretanto, o receptor é algumas vezes maior do que o comprimento de onda, e isto pode ser mostrado, embora a prova seja muito complicada para ser dada aqui, que as superfícies de pressão zero cortando o eixo nos pontos determinados pela fórmula 2.4 são vazias na forma e cortam algum plano normal ao eixo em círculos concêntricos. Desde que o receptor registre a intensidade média sobre sua face, as flutuações são desconsideradas.

Outra forma de considerar o problema é quando o raio do pistão é múltiplo do comprimento de onda, o ângulo do feixe é bem pequeno, e a energia é confinada em um cone contendo a borda do disco e tendo seu vértice a uma considerável distância do lado oposto. Assim para distâncias em frente ao disco, muito pequenas se comparadas com aquela distância, virtualmente não existe nenhuma expansão, e assim, desconsidera-se a atenuação,

toda a energia será considerada, um receptor de área considerável registrará uma intensidade constante.

O ponto principal para se lembrar na conexão com o pistão radiador é que a precisão do feixe irradiado cresce quando o tamanho da face irradiadora cresce, e diminui na mesma proporção quando o comprimento de onda cresce. Para frequências muito altas uma pequena face irradiadora é suficiente, onde para baixas frequências tende-se a gerar uma grande escala sônica e conseqüentemente desajeitados radiadores tornam-se necessários se a técnica de observação requerer precisão de feixe.

Nas empresas seu uso, além de ensaios e exames não destrutivos, se concentra na limpeza de equipamentos, tais como peneiras, filtros, lentes, equipamentos de condução de fluidos com tubulações extrafinas, e assim, sempre, como uma ferramenta de suporte.

Uma pequena parte de seu uso é no auxílio a processos de soldagem e como acelerador de dinâmica de reações químicas. O ultra-som ainda é utilizado como agente de nebulizadores, criando vapor de água a baixas temperaturas pela agitação da água sem aquecimento, entretanto, o uso direto do ultra-som, como agente principal de tratamento e recuperação de resíduos, como o que é mostrado neste trabalho, não foi encontrado na literatura atual.

3.4.1. Princípio de Operação do Ultra-Som

O ultra-som consiste em vibrações mecânicas, ou acústicas, que se propagam nos três meios conhecidos, respeitando a velocidade normal do som nestes meios, como qualquer outra onda sonora.

O que diferencia o mesmo para que se destaque com relação às ondas comuns de som, consiste na frequência de atuação do mesmo, o ultra-som se situa entre os 20 kHz e 600 kHz, aproximadamente, ou seja, está numa faixa acústica fora do alcance humano.

Esta propriedade de frequência elevada dá à onda ultra-sônica uma energia específica significativa, respeitando o princípio similar das ondas eletromagnéticas, onde a energia contida numa onda é o produto de uma constante para esse tipo de onda pela frequência.

Existem dois modos de se gerar ondas ultra-sônicas. A primeira consiste na geração das mesmas pela vibração de um cristal de quartzo através de sua propriedade **piezelétrica**. A segunda consiste na propriedade de alguns metais e ligas de, quando expostos a um campo magnético pulsante, vibrante ou alternado, sofrerem uma microagitação de seus domínios magnéticos, causando uma ressonância entre essas vibrações causando uma vibração de escala maior, com frequência similar ou sub-harmônica dessa, de tal forma que essa onda emitida se situe na faixa do ultra-som, a essa propriedade chamamos de **magnetoestricção**.

i) Propriedade Piezelétrica

Para se definir a piezeletricidade devemos entender o que representa essa propriedade e como ela surge como propriedade intrínseca de alguns materiais cristalinos.

O primeiro material a ser profundamente estudado para a geração de ondas ultra-sônicas em função de suas propriedades piezelétricas foi o quartzo.

O cristal de quartzo, quando apresenta uma impureza específica, apresenta também a capacidade de sob ação de uma pressão gerar eletricidade em relação aos eixos opostos de simetria desse cristal, contudo, essa propriedade é comutativa, ou seja, quando submetido a um campo elétrico o cristal de quartzo apresenta uma vibração mecânica condizente com a intensidade da tensão aplicada, mas com uma frequência incomparavelmente superior, chegando aos níveis ultra-sônicos.

Transdutores Piezelétricos. Um sólido é considerado piezelétrico se cargas elétricas são liberadas no mesmo quando está sujeito a tensões mecânicas. Quando o sinal da tensão é revertido, a polaridade das cargas elétricas são também revertidas. Este fenômeno é chamado “efeito piezelétrico direto”. Todas as substâncias piezelétricas apresentam outro fenômeno relacionado, chamado de “efeito de conversão piezelétrica”, de acordo com o qual a substância sofre variações de tamanho quando um força elétrica é aplicada ao mesmo, o sinal da variação é revertido quando se reverte a direção da força elétrica. Em todos os sólidos dielétricos existem também um mudança em suas dimensões proporcionais ao quadrado da força elétrica; esta mudança é devido às tensões mecânicas produzidas pela força elétrica, e em todos os materiais de algum interesse para a presente aplicação, são muito menores que as variações piezelétricas.

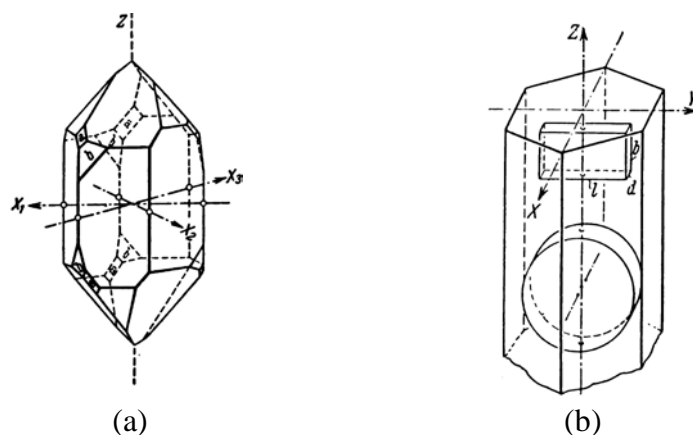


Figura 3.15 – Detalhe da seleção dos transdutores piezelétricos cortados a partir de cristais de quartzo: **a)** Cristal de quartzo; **b)** pratos e placas de quartzo cortados a partir do cristal. Fonte: DANA (1978).

ii) Propriedade Magnetoestrictiva

Transdutores Magnetoestrictivos. O níquel, juntamente com outros metais ou ligas, variam de dimensão quando sujeitos a uma variação de campo magnético. Este efeito, conhecido como magnetoestrictão, não é linear, como o efeito piezelétrico: para pequenas variações dB na densidade do fluxo magnético a partir de um valor inicial B_0 , a tensão S é proporcional a $B_0 dB$. Se a densidade de fluxo é expressa em *weber* ($Wb = volt.s = 10^8$ linhas) por metro quadrado, o esforço é dado aproximadamente pela fórmula

$$S = - 0,002 B_0 dB. \text{ Eq. 3.5}$$

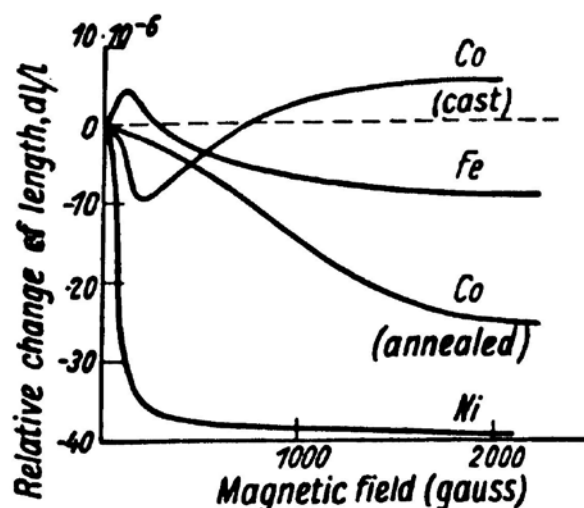


Figura 3.16 – Variação de dimensão de alguns metais magnetoestrictivos em função da intensidade magnética do campo aplicado, percebe-se claramente o motivo da utilização do níquel como principal gerador de ondas ultra-sônicas magnetoestrictivas.

Por outro lado, se o níquel for polarizado com uma densidade de fluxo B_0 , estará sujeito a uma tensão T , a força magnetizante é acrescida de uma quantidade dH dada por

$$dH = - 0,002 B_0 T. \text{ Eq. 3.6}$$

É, contudo, possível utilizar o efeito da magnetoestricção para a produção de transdutores eletroacústico da mesma forma que o efeito piezolétrico é usado. Os únicos dois pontos de diferença são que a força magnetizante toma o lugar da força elétrica, e que o níquel deve ser inicialmente polarizado. O coeficiente 0,002 das fórmulas (7) e (8) não é realmente “constante” como a constante piezolétrica correspondente. Ela depende de B_0 , por causa da não linearidade do fenômeno magnético, e o valor dado considera um B_0 grosseiramente de $0,5 \text{ weber/m}^2$. As fórmulas (7) e (8) mostram, contudo, que a sensibilidade do equipamento cresce com a polarização. Apesar de estudos de BERGMANN (1938), WOOD, SMITH and McGEACHY (1935), aqui será apresentada a versão de CAMP (1948), que se concentra na energia radiante em líquidos.

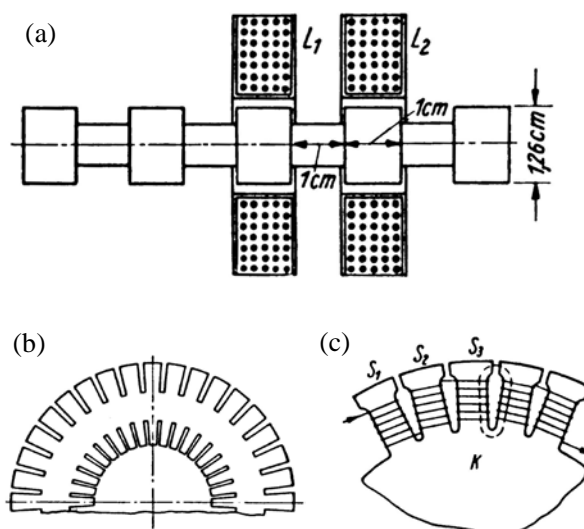


Figura 3.17 – Sistemas de geração de ondas ultra-sônicas por magnetoestricção: **a)** cilindro transdutor com excitação axial, utilizado para emissões concentradas e altas frequências, com duas bobinas, L_1 e L_2 , de ressonância; **b)** disco transdutor com excitação radial, frequências intermediárias e baixas, menor intensidade, maior área de ação; **c)** detalhe das bobinas de excitação do disco transdutor.

iii) Fenômenos de Deslocamento da Onda

Movimento de Onda Plana. Como as medidas de velocidade e absorção do ultra-som são na maioria dos casos feitas em ondas planas, as equações de movimento de ondas planas serão as descritas neste trabalho, mas a expressão para velocidade funciona para ondas esféricas também, levando-se em consideração a condição de que a amplitude é menor comparada com o comprimento de onda também para este caso. Muitos livros de mecânica dos fluidos dão uma derivação da equação geral do movimento de onda.

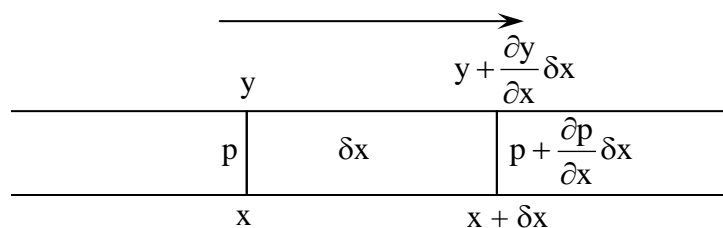


Figura 3.18 – Movimento de onda plana.

Ainda segundo VIGOUREAUX (1950), no caso de ondas planas, todas as partículas do fluido se movem de um lugar para o outro na mesma direção, como é mostrado na Figura 3.18, isto já é suficiente para considerar o movimento dentro de um cilindro perfeito. O equilíbrio da massa de fluido quando em repouso para as seções em x e $x + \delta x$ deve ser considerado para o mesmo tempo t , quando o deslocamento das partículas originalmente para x é dito y , o deslocamento das partículas para $x + \delta x$ é então $y + \frac{\partial y}{\partial x} \delta x$, e uma vez que a massa não varia com o tempo, a densidade ρ no tempo t e a densidade ρ_0 no estado inicial ainda não perturbado pelas oscilações se relacionam pela equação de massa em duas condições, assim:

$$\rho_0 \delta x = \rho \left(1 + \frac{\partial y}{\partial x} \right) \delta x . \text{ Eq. 3.7}$$

Por outro lado, uma relação geral entre pressão e deslocamento é obtida pela equação do produto da aceleração e massa do cilindro de fluido entre os extremos dos impulsos sonoros. Se a pressão é representada por p , a relação então é:

$$\rho_0 \delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial x} \delta x . \text{ Eq. 3.8}$$

A pressão varia com a densidade, mas em função do tempo nenhuma lei particular de variação necessita ser considerada; é suficiente escrever:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial \rho} \cdot \frac{\delta \rho}{\delta x} \text{ Eq. 3.9}$$

No qual $\partial p / \partial \rho$ depende da lei particular que pode ser aplicada. O valor de $\partial p / \partial x$ pode ser tirado da Equação 3.7; a aproximação será feita de tal forma que considera-se $\delta y / \delta x$ muito pequeno se comparado com o valor unitário. Assim

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{\partial y}{\partial x} \right) \text{ ou}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \text{ Eq. 3.10}$$

Substituindo 2.9 e 2.10 em 2.8 temos

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial p}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \text{ Eq. 3.11}$$

ou

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = s^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \text{ Eq. 3.12}$$

onde $\partial p / \partial \rho$, que tem a dimensão do quadrado da velocidade do som, é substituído por s^2 . A solução geral desta equação é

$$y = F_1(x - st) + F_2(x + st) \text{ Eq. 3.13}$$

onde F_1 e F_2 são funções arbitrárias escolhidas de acordo com as condições de contorno.

Em todos os casos tratados aqui, o movimento é caracterizado por uma onda senoidal em função do tempo, em outras palavras, expressões para deslocamento, velocidade, pressão, etc., todos contêm o fator $e^{j\omega t}$, onde ω é a frequência angular. Conseqüentemente, se k for escrito como ω/s , a expressão para y toma a seguinte forma:

$$y = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)}. \text{ Eq. 3.14}$$

onde A e B são constantes determinadas pelas condições de contorno.

A Equação 3.13 mostra que o movimento pode ser representado por duas ondas viajando na mesma direção x mas com sentidos opostos, e com a mesma velocidade s . A segunda onda é causada pela reflexão de algum obstáculo, e se não houver reflexão, existirá somente uma progressão simples de onda de amplitude A. A condição de que $\partial y/\partial x$ seja pequeno comparado com o valor unitário é então equivalente a Ak sendo menor comparado com a unidade (LAMB, 1910), e isto significa que a amplitude deve ser menor em comparação com $\lambda/2\pi$, onde λ é o comprimento de onda. Quando esta condição não é cumprida as ondas apresentam uma amplitude finita.

Nos líquidos, A sendo a amplitude do deslocamento da onda, $A\omega$ a velocidade e $\rho s A^2 \omega^2$ a potência P cruzando uma seção transversal unitária, a condição $A^2 k^2$ deve ser bem menor que 1 e deve se aproximar do valor de $Pk^2/\rho s \omega^2$ ou $P/\rho s^3$ que por sua vez é bem menor que 1. É desejado manter-se Ak menor que 10^{-4} , então, para valores da água de 1000 kg/m^3 e 1500 m/s de velocidade do som, P alcança valores de 30.000 W/m^2 ou ainda 3 W/cm^2 . Isto se aproxima de 10 vezes o valor limite de cavitação para a pressão atmosférica, e é muito maior que as intensidades que normalmente são empregadas.

Atenuação. O decréscimo da intensidade da onda ultra-sônica é devido, inicialmente, ao crescimento do raio da esfera plana de impacto mecânico que a onda gera em função da irradiação do feixe sonoro. Além dessa causa puramente geométrica, outros fatores são causadores da diminuição da intensidade sonora da onda, alguns bem conhecidos e outros ainda não totalmente elucidados, mas todos se combinam para produzir uma decréscimo exponencial na intensidade. Viscosidade, condução térmica, discordâncias (partículas no meio condutor) e processos de interação intramolecular, etc., têm sua ação sobre a atenuação da onda, que é, em geral, muito maior que o valor calculado quando se leva em conta somente a viscosidade por exemplo. É comum indicar o decréscimo exponencial na amplitude da onda por um coeficiente, α , tanto que as intensidades para pontos em uma distância x ao longo da direção de propagação estão em uma razão de 1 para $e^{(-2\alpha x)}$.

Experimentos mostram que no caso de líquidos, embora α seja normalmente algumas vezes maior que o valor calculado a partir dos coeficientes conhecidos de viscosidade e

condutividade térmica, ele é, para as frequências aqui empregadas no corpo deste trabalho, com raras exceções quase exatamente proporcional ao quadrado da frequência, como previsto pela viscosidade e efeitos térmicos.

Um modo alternativo de expressar a atenuação para fins práticos é em dB por unidade de comprimento, que é 10 vezes $2\alpha \log$ e ou $8,686\alpha$ por unidade de comprimento. Este coeficiente é denominado α' . Ele tem a vantagem de remover todas as incertezas que aparecem referentes à pressão e a intensidade. Na forma como esta questão é vista em função dos variados valores de frequência utilizados, a, quando comparado para estas diferentes frequências, especialmente em líquidos, pode ser plenamente calculado como α'/f^2 .

Se o comprimento de onda λ é dado em unidades de comprimento, a distância x deve ser escrita $n\lambda$, onde n é o número de comprimentos de onda em x , e a atenuação é dada pela expressão $e^{(-2\alpha\lambda n)}$. Para alguns propósitos é conveniente usar a constante A ou $2\alpha\lambda$ no lugar de α/f^2 . A atenuação por comprimento de onda vale então $4,343A$ ou $\alpha'\lambda$ decibéis.

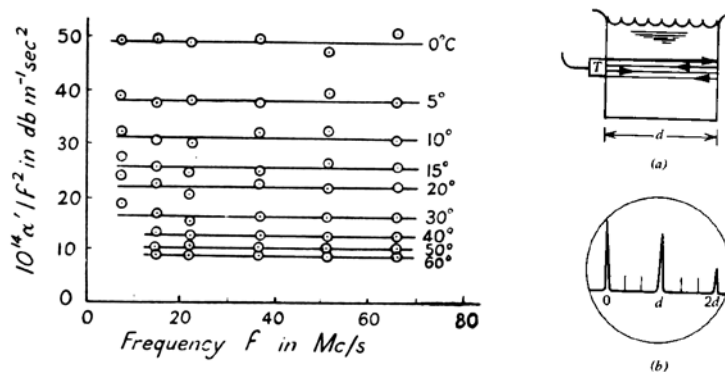


Figura 3.19 – Atenuação da intensidade da onda ultra-sônica na água.

Atenuação pela presença de discordâncias. Outra possível causa da atenuação são as discordâncias presentes dentro do meio líquido de propagação do ultra-som, estas discordâncias, geralmente partículas em suspensão, atuam como obstáculos ou “centros de discordância” mais ou menos uniformes distribuídas ao longo do fluido. Isto foi tratado por LAMB (1910) e constatou que obstáculos esféricos de raio a muito pequenos comparados ao comprimento de onda, atuam com uma interferência $\frac{7}{9}(ka)^4$ da energia incidente na partícula. Assim se existem N destas esferas por unidade de volume, e se P representa a intensidade, a variação na intensidade em uma pequena distancia dx na direção da propagação é

$$dP = -\frac{7}{9}(ka)^4 PN\pi a^2 dx . \text{ Eq. 3.15}$$

Para abreviar

$$\frac{7}{9}(ka)^4 N\pi a^2 = 2\alpha_s . \text{ Eq. 3.16}$$

Assim, a Equação 3.15 se reduz a

$$\frac{dP}{P} = -2\alpha_s dx , \text{ que integrando,}$$

$$P = P_o . e^{-2\alpha_s x} . \text{ Eq. 3.17}$$

Se P_o é a intensidade para uma dada posição para a qual x é zero. A Equação 3.17 identifica α_s com o coeficiente de atenuação para a amplitude. É conveniente expressar o número de partículas N por unidade de volume em termos da razão v do volume ocupado pelo número total de partículas, dessa forma

$$\alpha_s = \frac{14\pi^4 a^3 v}{3\lambda^4} . \text{ Eq. 3.18}$$

Uma idéia da intensidade da atenuação envolvida pode ser conseguida pela atribuição de valores razoáveis para v e a . Supondo que v valha 0,001 e o raio de cada partícula, a , em torno de 0,015mm, então para a água em uma frequência de 10 MHz, α_s deve ficar em torno de 3m^{-1} ou ainda 26 dB/m. Para efeito de comparação, o valor de α_v , coeficiente de atenuação por viscosidade, pode ser estimado, para 10 MHz, grosseiramente, em torno de $0,8\text{m}^{-1}$, correspondendo a uma atenuação em torno de 7 dB/m.

Entretanto, VIGOUREAUX (1950), em seu trabalho, acreditava que a utilização de ultra-sons de baixa frequência ($f < 60\text{ kHz}$) não teriam eficiência suficiente para qualquer tipo de atuação pratica significativa, podendo ser dispensados de um estudo mais aprofundado. O trabalho aqui mostrado desenvolveu-se na faixa de frequência entre 25 e 45 kHz, chegando aos resultados que serão apresentados mais à frente. Embora a literatura considerasse os ultra-sons de baixa frequência como úteis apenas para fins de auxilio em processos de limpeza e outras coisas de menor impacto funcional, os resultados aqui apresentados mostrarão que esta faixa de frequência de trabalho será útil para tratamento de resíduos de acordo com o que foi

aqui desenvolvido. Sendo assim, mesmo com essa consideração de baixa relevância aos ultrasons de baixa frequência, os estudos e proposições de VIGOUREAUX mostraram-se aplicáveis para o processo desenvolvido neste trabalho.

Tabela 3.4 – Absorção do ultra-som na água (PINKERTON, 1949).

Temperatura (°C)	$10^{14} \alpha / f^2$ (dB/m.s ²) Observado	$10^{14} \alpha / f^2$ (dB/m.s ²) Calculado	Observado/Calculado	Erro Provável %
0	49,40	14,83	3,33	0,60
5	38,30	11,63	3,29	0,60
10	31,10	9,85	3,15	0,86
15	25,90	8,33	3,11	0,90
20	22,00	7,09	3,10	1,35
30	16,60	5,34	3,11	1,70
40	12,70	4,21	3,01	0,50
50	10,40	3,46	3,01	0,40
60	8,83	2,92	3,02	0,80
70	7,57	2,53	2,99	
80	6,85	2,24	3,06	
90	6,29	2,01	3,13	
100*	5,97	1,83	3,26	

(*) Extrapolado de 95°C.

Absorção e reflexão da pressão acústica. Quando as ondas sonoras são totalmente ou parcialmente absorvidas ou refletidas por uma chapa elas exercem uma pressão na mesma. Numerosos autores estudaram este efeito, e durante muito tempo essa questão lançou dúvidas sobre a equação correta para analisar esse fenômeno. SCHAEFER (1939) estabeleceu que a pressão exercida na placa é igual à média da densidade de energia em frente à mesma, e posteriormente HARTMANN and MORTENSEN (1948) apresentam uma verificação experimental deste resultado. Se as ondas da densidade média de energia, E , incidem normalmente sobre a placa, com uma taxa de reflexão α e uma taxa de absorção β , a pressão na placa é igual a diferença entre as densidades de energia nos dois lados da placa, que vale $(2\alpha + \beta)E$. O valor máximo dessa quantidade é $2E$, e isto ocorre quando a placa é um refletor perfeito, isto é, quando α vale 1 e β é desprezível.

Capítulo 4

Parte Experimental

Cálculo, Projeto e Construção do Equipamento de Desagregação Ultra-Sônica

Para se calcular o equipamento de desagregação ultra-sônica apresentado neste trabalho, foram utilizadas os princípios de comportamento acústicos do ultra-som conforme apresentado no capítulo 3. Tanto o projeto quanto a construção foram de caráter totalmente original, sendo os dados apresentados nestes trabalho pertinentes a um trabalho iniciado em 1997, que culminou em uma planta de tratamento de lama de aciaria, instalada junto à Companhia Siderúrgica Nacional, pela K&K Estruturas e Equipamentos Ltda., através da viabilidade técnica e intelectual desenvolvida durante o avanço das pesquisas deste processo.

O trabalho de estudo e desenvolvimento deste equipamento resultou em 1997 e 1998 no registro dos pedidos de patente PI9701670-5 e PI9800134-5, e culminou no trabalho de Tese aqui apresentado.

A idéia de utilizar o bombardeamento ultra-sônico para efetivar a recuperação de resíduos siderúrgicos, tanto na desagregação da lama grossa de aciaria como na dispersão de óleos de carepa, partiu da idéia de que esse fenômeno físico, o ultra-som, é amplamente utilizado em processos de limpeza, tratamento de lentes, e outras utilizações práticas. E, além disso, seus princípios de funcionamento são amplamente utilizados com enorme eficiência no tratamento de enfermidades relativas ao tratamento de pedra nos rins, vesículas, etc., tudo isso levou a formação da idéia de que o mesmo princípio pudesse ser utilizado para o tratamento de resíduos que fossem compostos por partículas agregadas ou sujas, semelhantes às que se apresentavam na lama grossa de aciaria e carepa de laminação.

4.1. Análise dos Resíduos a Serem Tratados

A análise dos resíduos apresentados pelas siderúrgicas, pertinentes à lavagem dos gases da aciaria e carepas de laminação, indicou a presença de partículas metálicas, especificamente aço, sob a forma de microesferas, com composição idêntica ao aço confeccionado no convertedor na hora da formação das esferas pelo sopro de oxigênio, para a lama de aciaria; e indicou a presença de partículas irregulares compostas por óxidos de ferro no caso de carepas de aciaria.

4.1.1 – Microesferas contidas na lama de aciaria

Estas esferas são resultado da solidificação das gotas de metal líquido projetadas no meio gasoso, e estas gotículas ao se solidificarem, o fazem sob a forma de microesferas, de tamanhos variados, seu formato esférico se dá pelo fato de que a forma esférica apresenta de acordo com a termodinâmica de superfície a forma com maior estabilidade termodinâmica de distribuição de líquido em meio gasoso. Dentre as formas geométricas regulares a esfera tem uma das maiores relações entre massa e superfície, só perdendo para o icosaedro, este último, entretanto, por possuir variações no raio da partícula formada e descontinuidades de comportamento, apresenta uma

energia livre de formação menor do que o formato esférico, o que leva a esfera a ser o formato objetivado em um equilíbrio dinâmico na tensão superficial de formação de partículas por solidificação em meio gasoso.

Figura 4.1 – Lama de aciaria: **(a)** fotografia da lama grossa original; **(b)** esquema descritivo das partículas da lama grossa; **(c)** descrição esquemática do agregado de partículas que compõe os grãos da lama grossa sem a presença dos finos ligantes.

4.1.2 – Carepas de laminação

A carepa de laminação é formada durante o jateamento que a placa a ser laminada sofre. Este jato é de alto impacto, serve para através do choque térmico quebrar a camada de óxido que reveste a placa aquecida, e ao mesmo tempo, retirar essa camada por abrasividade do jato impactante.

O jato é constituído, na maior parte das vezes, de água combinada com um óleo semissolúvel, que acaba por impregnar o resíduo final. A carepa se apresenta sob duas formas: *carepa oleosa* e *lama oleosa*, esta última em média com tamanhos inferiores a 200# (75 μm). O resíduo aqui abordado será a carepa de laminação, que se apresenta com um teor de óleo inicial no resíduo, de cerca de 30 a 40% em peso.



Figura 4.2 – Trem de laminação onde, através do jateamento sobre a superfície, são geradas as carepas oleosas e lamas oleosas.

4.2 – Caracterização Inicial da Lama de Aciaria

4.2.1 – Composição da Lama de Aciaria

A lama de aciaria é composta por duas frações diferentes, *lama grossa*, >325 # (>45µm), e *lama fina*, <325 # (<45µm). A fração grossa correspondendo a cerca de 30% da lama total, e a fração fina com os 70% restante.

A separação da lama em parcela grossa e fina foi feita baseada na composição do seu teor metálico, ou seja, percentagem de ferro metálico presente na lama. A tabela a seguir identifica valores de composição média claramente para esses rejeitos.

Tabela 4.1 – Valores médios de composição para as frações grossa e fina da lama de aciaria.

Composto	Lama Grossa	Lama Fina
Fe _{Total}	82,10 %	60,26 %
Fe - Metálico	68,70 %	4,90 %
Fe ₂ O ₃	-	5,25 %
FeO	16,40 %	66,48 %
SiO ₂	3,65 %	4,25 %
CaO	8,40 %	12,90 %
Al ₂ O ₃	1,70 %	-
MgO	0,50 %	5,60 %
C	1,70 %	-

Apesar de se apresentar praticamente abaixo de 325#, após sua separação em classificadores parafusos (Classificador Atkins) a lama fina sofre uma agregação, apresentando grãos agregados com granulometrias acima de 325#. Sua análise e composição médias são apresentadas na **Tabela 4.2** a seguir.

Tabela 4.2 – Análise do teor de ferro presente na lama fina de aciaria, global e por faixa granulométrica.

Granulometria	Massa (g)	Retida simples (%)	Fe _{total}	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{met} ^(*)
Global	10.000	100,00%	60,26%	66,48%	5,25%	4,90%
65#	4.887	35,51%	59,68%	66,50%	5,96%	3,81%
100#	2.251	16,36%	60,04%	68,36%	4,22%	3,94%
150#	418	30,37%	59,71%	64,78%	5,07%	5,80%
200#	836	6,07%	61,68%	68,87%	3,11%	5,96%
270#	772	5,61%	62,92%	66,41%	6,08%	7,04%
325 #	322	2,34%	63,70%	68,76%	6,60%	5,63%
400#	289	2,10%	64,33%	68,38%	5,04%	7,64%
< 400#	225	1,63%	61,00%	64,84%	7,03%	5,67%

4.2.2 – Análise de Raios-X da Lama de Aciaria

Quatro amostras de rejeito de aciaria foram enviadas para serem caracterizadas por difração de raios-X e espectroscopia Mössbauer. Os teores de Fe, Ca e Mg também foram determinados por via úmida e absorção atômica. Os espectros Mössbauer foram obtidos à temperatura ambiente em um espectrômetro operando no modo de aceleração constante. Os espectros foram ajustados numericamente como uma superposição de sextetos e o dupletos simétricos, e os teores das fases mineralógicas identificadas foram calculados a partir das áreas relativas de cada componente e dos teores de ferro total.

Os difratogramas de raios-X foram obtidos em um difratômetro Shimadzu modelo XRD-6000, equipado com tubo de Co e filtro de ferro. As varreduras foram feitas a 1°/min no intervalo de 10-70° (2θ). Os difratogramas foram analisados com o programa JADE. Os teores de ferro total e de Fe²⁺ foram determinados em triplicata por titulação com dicromato de potássio, enquanto que os teores de cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Embora a difração de raios-X (Figura 4.1) mostre a presença de carbonato e hidróxido, os teores de cálcio e magnésio foram expressos como óxidos porque não foi feita a determinação dos ânions correspondentes. O teor de Fe²⁺ está relacionado à dissolução do ferro metálico que

preferencialmente permanece neste estado de oxidação e também da wustita e da magnetita eventualmente presentes. Durante o processo de dissolução da amostra ocorre uma oxidação parcial do íon ferroso, de modo que os teores de Fe^{2+} listados na Tabela 1 devem ser considerados como uma estimativa. O erro relativo máximo estimado para estas análises é de 1%.

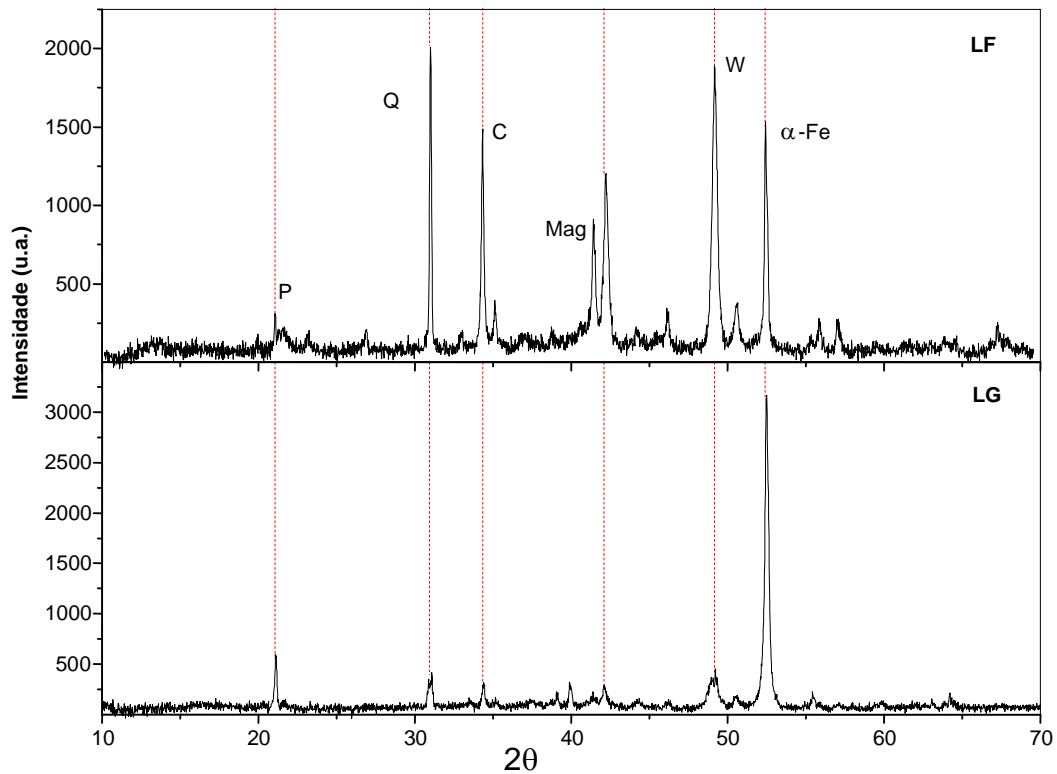


Figura 4.3 – Difratogramas de raios-X das amostras dos rejeitos de aciaria: *Lama Grossa* e *Lama Fina*. W → wustita (FeO), Mag → magnetita (Fe_3O_4), C → calcita (CaCO_3), P → portlandita (Ca(OH)_2), Q → quartzo (SiO_2).

Tabela 4.3 – Fases majoritárias e minoritárias presentes nas lamas Fina e Grossa, respectivamente, segundo análise de raios-X.

Amostra	Fases majoritária	Fases minoritária
LF	Wustita, α -ferro, calcita, quartzo	Magnetita, portlandita
LG	α -ferro, wustita	Magnetita, quartzo, calcita, portlandita, periclásio.

Após a análise das duas lamas, fina e grossa, percebeu-se que o teor metálico contido na lama grossa era significativamente superior ao da lama fina, este fato, aliado a sua melhor manuseabilidade, em função, principalmente, de sua granulometria e

diferença de densidade entre seus componentes metálicos e não-metálicos, fez da mesma o objeto foco do trabalho inicialmente desenvolvido. Análises ulteriores confirmaram a avaliação de possibilidade de recuperação da lama fina, entretanto, tais processos não fazem parte do objeto de estudo deste trabalho de pesquisa.

4.2.3 – Análise da Lama de Aciaria por Espectros Mössbauer

Os espectros Mössbauer obtidos à temperatura ambiente estão mostrados na Figura 4.2, e os resultados numéricos derivados dos permitiram confirmar a presença de magnetita, α -Fe e wustita. Entretanto, existe uma outra fase cuja fórmula não foi identificada e que possui Fe^{3+} em sua estrutura. Uma outra possibilidade é que este duplete de Fe^{3+} seja devido à presença de íons férrico na estrutura da wustita. A partir das áreas relativas de cada sub-espectro, do teor total de ferro, e considerando a mesma fração livre de recuo para todas as espécies, calculou-se as percentagens (em peso) para as fases identificadas (Tabela 4.4).

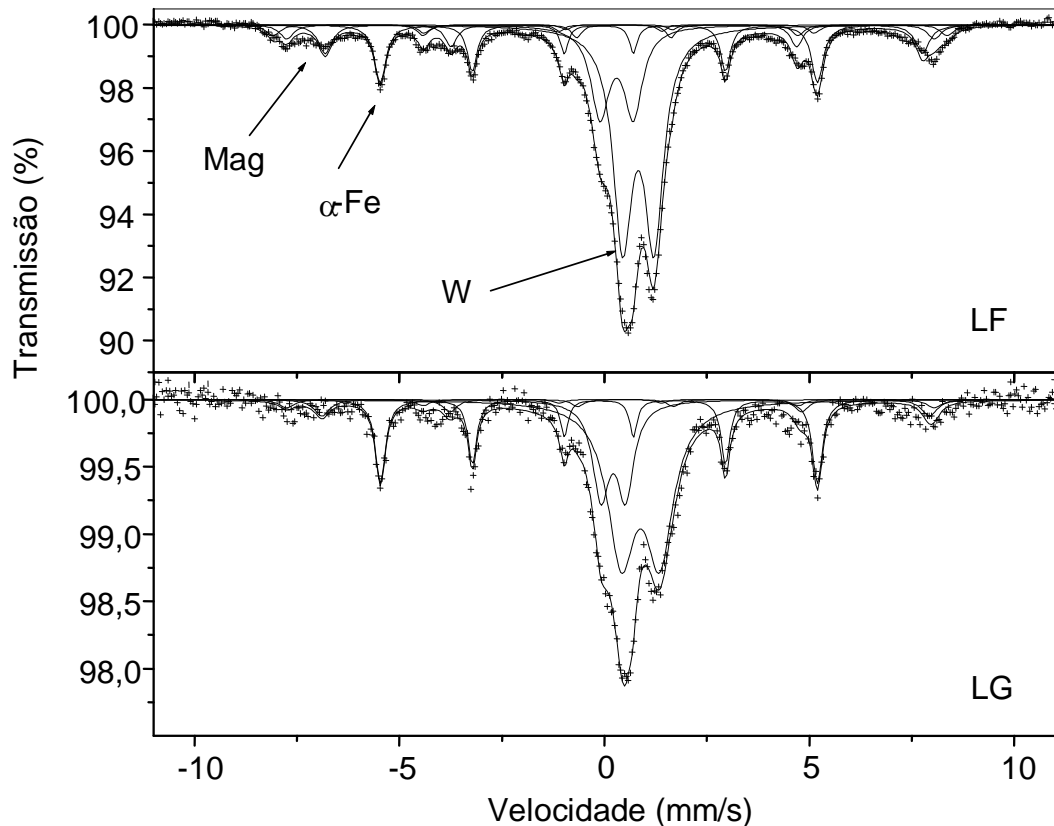


Figura 4.4 – Espectros Mössbauer à temperatura ambiente das amostras de rejeito.

Tabela 4.4 – Teores (% peso) das fases portadoras de ferro. A última coluna mostra apenas o teor de Fe^{3+} em uma fase cuja composição não foi identificada.

Amostra	$\alpha\text{-Fe}$	Magnetita	Wustita	Fe^{3+}
LF	8	10	33	9
LG	17	10	55	15

Obs.: A análise apresentada pelo Espectro Mössbauer não coincidiu com as análises químicas analíticas efetuadas na lama grossa com relação ao teor de ferro metálico presente na mesma, apresentando um valor inferior ao verificado na prática.

4.2.4 – Origem das Partículas que Compõem a Lama de Aciaria

As propriedades do resíduo denominado *lama grossa de aciaria*, ou simplesmente LGA, ou LG, podem melhor ser entendidas se analisarmos os fenômenos que geram seus componentes durante o processo de fabricação e refino do aço em conversores LD.

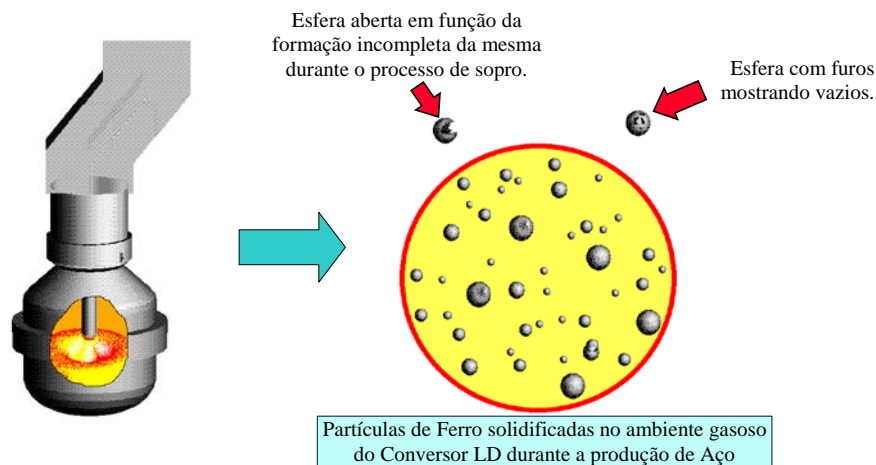


Figura 4.5 – Microesferas solidificadas dentro do ambiente gasoso do Conversor LD.

As lamas grossa e fina são geradas pelo mesmo processo no interior do conversor LD durante o refino de aço, mais propriamente durante o processo de sopro de oxigênio para o refino do aço. O jato de oxigênio sobre a superfície do gusa líquido, com alto teor de carbono, promove em primeira instância, a oxidação do silício, transformando-o em sílica, SiO_2 ; em seguida, na segunda etapa de sopro, ocorre a oxidação do carbono, gerando o CO/CO_2 . A oxidação do silício é responsável pelo

início do aquecimento do forno para operar as demais reações além de fornecer o volume de SiO_2 para formar a escória necessária ao equilíbrio do processo; o CO/CO_2 gerado durante toda a segunda etapa de oxidação promove a continuidade desse processo de aquecimento, além de ser o objetivo do processo de refino. As esferas menores que 400# (38 μm), em contato com o oxigênio dentro do forno, acabam por oxidarem-se completamente ou em sua quase totalidade, este fator é o principal determinante do teor metálico da lama fina se apresentar na forma de óxido de ferro.

4.2.5 – Formação das Microesferas no Ambiente do Forno

As microesferas são geradas e arrastadas pelo fluxo de CO/CO_2 gerado dentro do convertedor, como o gás gerado possui uma relação CO/CO_2 é muito alta, geralmente 9/1, o gás é armazenado para consumo posterior em *gasômetros*. Não só pelo motivo de reuso, mas hoje em dia esse armazenamento se dá, também para outros gases combustíveis gerados dentro da siderurgia, por motivos óbvios de proteção ao impacto ambiental.

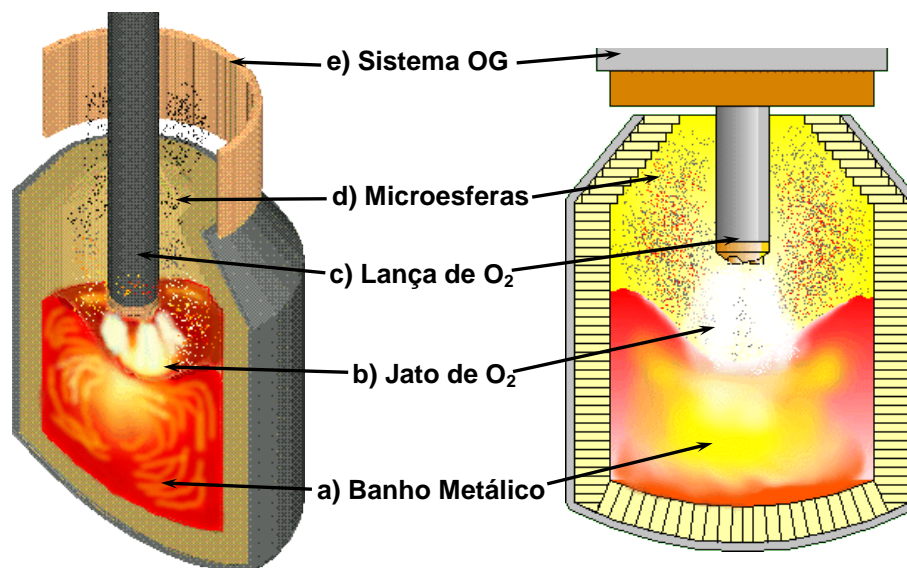


Figura 4.6 – Momento da Geração das partículas que irão compor a lama de aciaria: (a) Banho metálico composto inicialmente de ferro gusa, com alto teor de carbono (>4%); (b) jato de oxigênio sobre o banho metálico, que promove a formação do gás (CO/CO_2) e arrasta as partículas finas; (c) lança de oxigênio que leva o jato de oxigênio ao banho; (d) microesferas arrastadas juntamente com partículas não metálicas pelo fluxo de gás; (e) sistema OG, responsável pela tiragem controlada de gás, impedindo a

entrada de ar externo e a saída de gás gerado, por onde o gás, carregando as partículas, será lavado, formando a lama de aciaria.

Para impedir que um significativo volume de ar entre juntamente com o gás gerado, ou que, o gás gerado venha a vaziar (o CO é extremamente venenoso, formando a carboxihemoglobina, causando a inutilização da hemoglobina, assim impedindo o organismo de respirar) utiliza-se um sistema de captura de gás, denominado Sistema OG, que atua com controles pressostáticos, ou seja, a vazão do gás produzido é toda absorvida pelo sistema sem, no entanto, permitir a entrada de ar ou saída de gás.

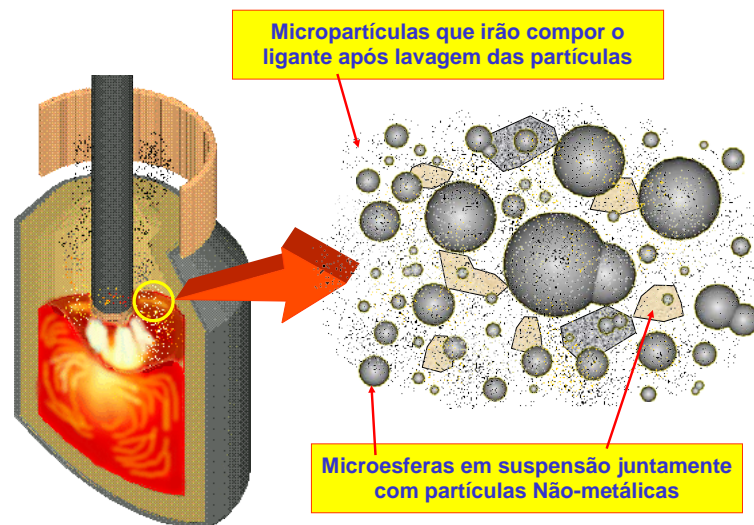


Figura 4.7 – Partículas de características diferentes formadas dentro do ambiente do conversor LD, arrastadas pelo fluxo de gás gerado.

A intensidade do gás gerado promove o arraste das partículas em suspensão dentro do forno, nesse caso, não só as microesferas solidificadas, mas também as partículas não-metálicas provenientes de minérios, fundentes, escória, coque, etc., carregados no forno durante o refino do aço.

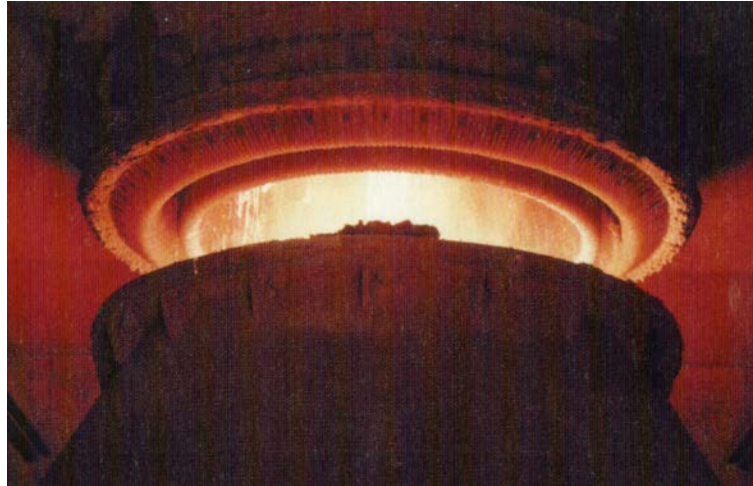


Figura 4.8 – Exemplo de uma saia de coleta de gás na boca do Conversor LD do Sistema OG, todo o gás gerado é succionado para o Sistema de lavagem dos gases.

4.2.6 – Composição Média das Lamas Grossas formadas nas Siderúrgicas Brasileiras

A tabela a seguir mostra a composição média das lamas produzidas em 3 grandes empresas brasileiras

Tabela 4.5 – Análise média das lamas com base em seus componentes principais.

	Al ₂ O ₃	C	CaO	Fe	MgO	Fe _{Total}	SiO ₂
CSN	1,700%	1,153%	9,900%	67,092%	1,960%	84,209%	3,650%
Açominas	1,702%	1,700%	10,950%	64,700%	0,350%	81,402%	2,000%
Belgo-Mineira	1,240%	0,980%	9,604%	62,570%	1,790%	78,506%	1,910%
Cosipa	0,164%	0,822%	5,195%	68,793%	1,358%	84,536%	0,815%

4.2.7 – Arraste das Partículas e Lavagem dos Gases

Durante a lavagem dos gases pelos venturís que compõem o sistema OG de coleta de gases, forma-se a lama de aciaria, liberando o gás lavado para estocagem ou queima. Essa lama ainda não tem separação específica, contendo cerca de 30% de lama grossa (elevado teor metálico e tamanhos maiores que 325#, 45 µm) e os outros 70% composta pela lama fina (rica em óxido de ferro, FeO, com tamanhos inferiores a 325#, 45 µm).

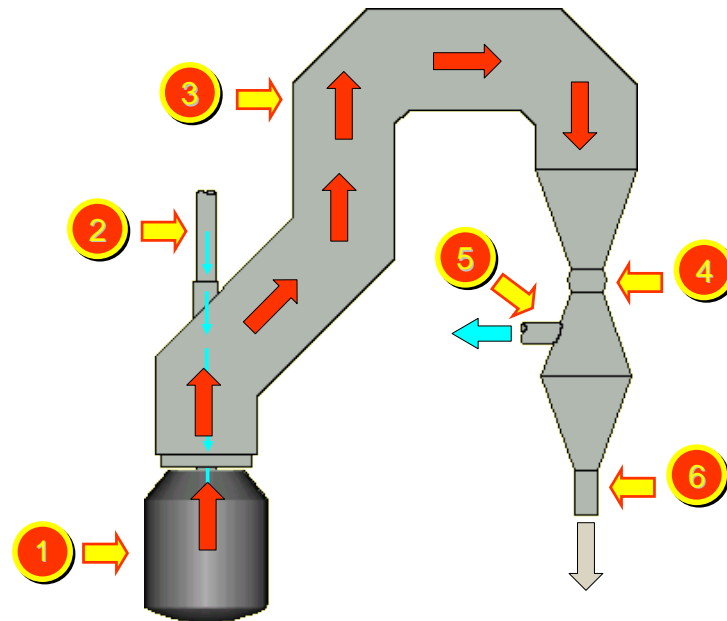


Figura 4.9 – Sistema OG de coleta de Gases: (1) Conversor LD; (2) Sistema de entrada da lança de O₂; (3) Estrutura do sistema OG por onde o gás é retirado; (4) Canal do venturi onde o gás é lavado; (5) Saída do gás lavado para a armazenagem ou queima; (6) Descarga da lama residual da lavagem dos gases.

4.2.8 – Separação entre Lama Grossa e Lama Fina

A separação entre as lamas grossa e fina se dá pura e simplesmente pela ação de um classificador parafuso do tipo Akins, onde as partículas maiores que 325# (45 μm) são selecionadas como lama grossa, e as menores como lama fina.

A escolha dessa faixa granulométrica para corte foi feita com base no teor de ferro metálico que se apresentava para cada faixa de corte, percebeu-se então, que o corte em 325# (45 μm) não era o de teor metálico mais rico, mas permitia uma lama fina com o teor metálico menor. Outro fator significativo foi que praticamente todos os processos gravimétricos de separação física conhecidos trabalham significativamente bem até próximo de 400# (38 μm), abaixo disso, mesmo desagregadas as partículas têm uma certa dificuldade em serem separadas por processos gravíticos comuns.

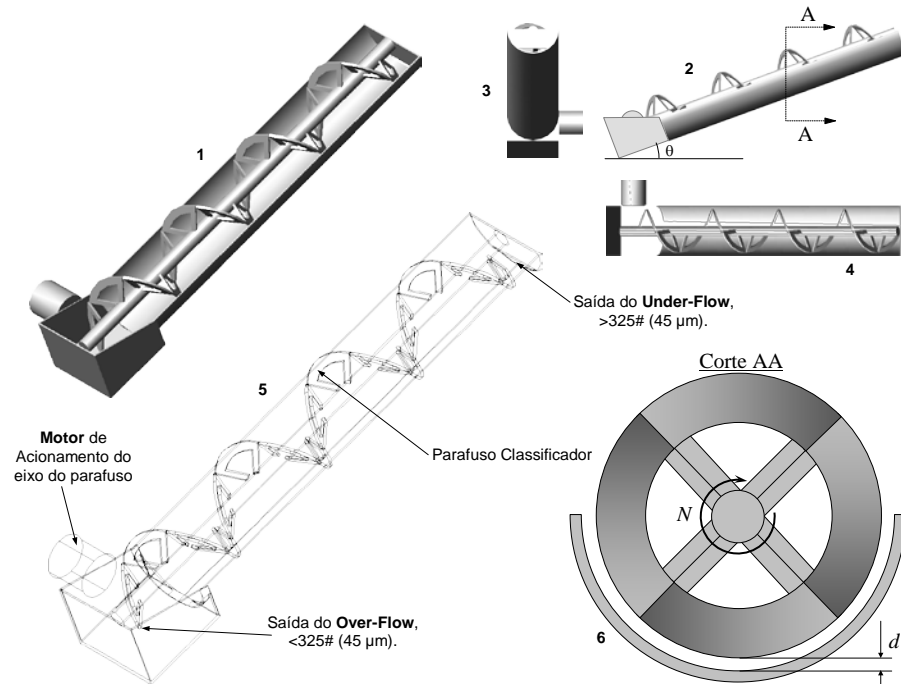


Figura 4.10 – Esquema do Classificador Parafuso – modelo Akins: **1)** Vista em perspectiva isométrica sem carga; **2)** Vista Frontal: ângulo de inclinação q ; **3)** Vista frontal; **4)** Vista superior; **5)** Vista do projeto com detalhamento composicional; **6)** Corte AA: distância de entre o parafuso e o leito – d , Velocidade angular do eixo – N . A eficiência, η , do corte de acordo com o tamanho da partícula escolhida a classificar é função das seguintes variáveis: $\eta = f(\theta, d, N, \rho)$, onde ρ é a densidade de sólido na polpa tratada.

4.3 – Caracterização Inicial da Carepa de Laminação

4.3.1 – Composição da Carepa

A carepa de laminação possui uma composição média onde o teor de compostos de ferro (FeO e Fe_2O_3) é predominante, teores de metais de liga são inferiores aos apresentados pelos aços que geraram a carepa, seu teor de óleo revestindo a carepa varia de 3 a 8%, sua umidade gira em torno de 6 a 12%. A geração de carepa grossa de uma empresa de porte da V&M Tubes é de cerca de 1.100 t/mês.

A lama oleosa gerada na laminação, também predominantemente composta por óxidos de ferro (FeO e Fe_2O_3), possui um teor de óleo contaminante que se situa na faixa de 20 a 30%, com uma umidade em torno de 30%. Muito fina, esta lama fina

apresenta um tamanho médio cerca de 40% abaixo de 400# (38 μm). A geração de lama fina de laminação na V&M Tubes é de cerca de 300 t/mês.

4.3.2 – Origem da formação da Carepa Oleosa e Lama Fina de Laminação

Durante o processo de retirada da lama de laminação dos tanques onde são recolhidas durante a laminação o material é esfriado, gerando um engrossamento do óleo que antes revestia as partículas grossa e fina da carepa de laminação.

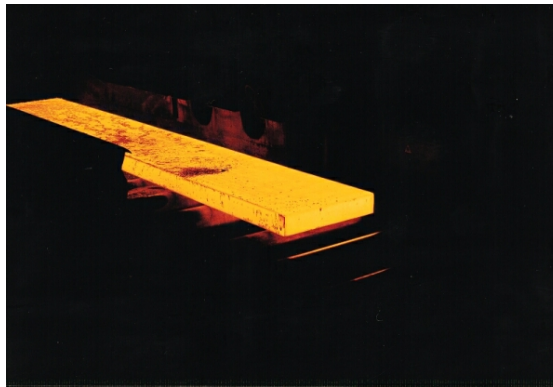


Figura 4.11 – Carepa formada logo após solidificação e quebra da camada fina exterior da placa quente laminada, por ação do choque térmico do contato com os cilindros e com o jato de resfriamento.

O choque térmico a que são submetidos esses óleos graxos modifica sua estrutura, criando um composto precipitado e mais grosso, menos solúvel que o original, entretanto, com maior aderência à superfície oxidada da carepa. A separação entre lama fina e carepa oleosa se dá por passagem da mesma em um classificador, que as separa em maior e menor que 400# (38 μm).

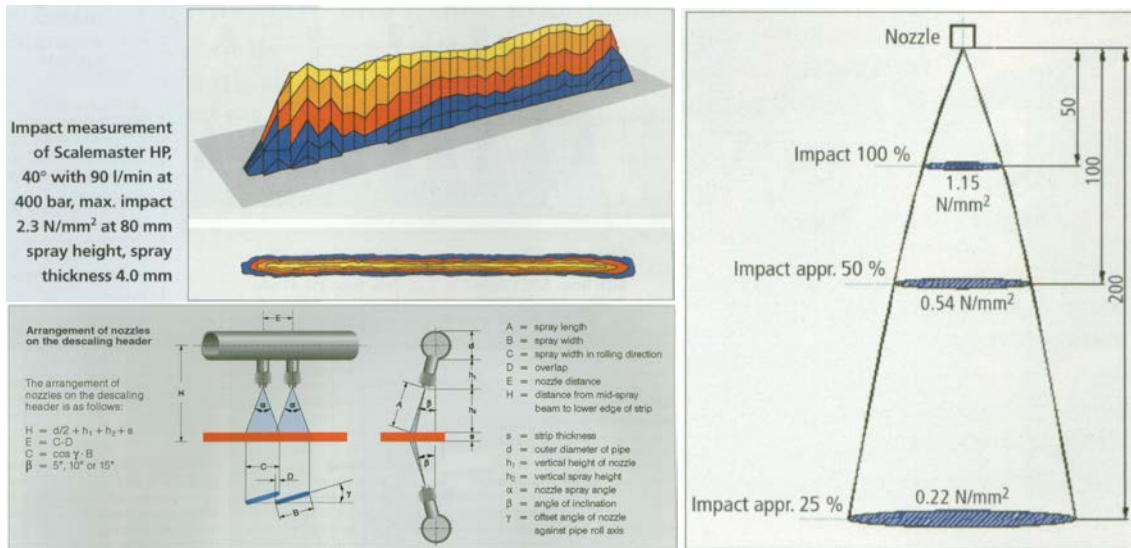


Figura 4.12 – Esquema de distribuição de pressão do jato de impacto dos *sprinters* utilizados para remoção da carepa formada sobre as placas laminadas.

O material grosso tem um grau de revestimento por parte deste óleo mais pesado formado, já o material fino, acaba sendo arrastado juntamente com este óleo, criando uma lama oleosa, que tem um teor de óleo significativamente maior que o da carepa.

4.3.3 – Análises da Lama de Laminação

Pelo fato de ser formada por material mais fino, a lama fina acaba por arrastar impurezas mais agressivas ambientalmente. Uma análise dos teores limites em comparação aos apresentados por esta lama é apresentado abaixo.

Tabela 4.6 – Resultados da Classificação da Lama Oleosa V&M Tubes com relação aos componentes residuais.

Parâmetros	Unidade	Resultado	Limite Máximo
ABS	mg/L	0,16	0,2
Alumínio total	mg Al/L	0,4	0,2
Arsênio total	mg As/L	0,15	0,05
Bário total	mg Ba/L	< 0,01	1,0
Cádmio total	mg Cd/L	< 0,001	0,005
Cianeto	mg CN/L	< 0,01	0,1
Cloretos	mg Cl/L	21,0	250
Cobre total	mg Cu/L	< 0,01	1,0
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	18,0	500

Cromo total	mg Cr/L	0,01	0,05
Chumbo total	mg Pb/L	< 0,01	0,005
Fenóis	mg/L	0,003	0,001
Ferro total	mg Fe/L	0,14	0,3
Fluoreto	mg F/L	< 0,1	1,5
Manganês total	mg Mn/L	0,01	0,1
Mercúrio total	mg Hg/L	< 0,0002	0,001
Nitrato	mg N-NO ₃ /L	0,23	10
Prata total	mg Ag/L	0,01	0,05
Selênio total	mg Se/L	< 0,01	0,01
Sódio total	mg Na/L	0,5	200
Sulfato	mg SO ₂ ⁻⁴ /L	6,0	400
Zinco total	mg Zn/L	0,04	5

Obs.: Valores em amarelo representam faixas onde a lama ultrapassou limites aceitáveis ambientalmente.[Tese Olídio]

Por serem geradas simultaneamente, com as duas únicas diferenças sendo, a separação das mesmas por tamanho e por apresentarem teores de óleo diferentes, a Carepa Oleosa apresenta valores significativamente inferiores aos apresentados pela Lama Oleosa, ficando muito abaixo dos limites vigiados ambientalmente, pela tabela acima.

4.4 – Escolha de Tratamento dos Resíduos por Bombardeamento Ultra-Sônico

4.4.1 – Definição do Método a ser Utilizado

A escolha do bombardeamento ultra-sônico como ferramenta de desagregação das partículas que compõem os resíduos siderúrgicos analisados, baseou-se na eficiência desse princípio em vários outros fatores de atividade, como limpezas de peneiras, tratamento de pedras nos rins e vesículas, quebrando-as, etc. Esses princípios forneceram a idéia inicial da possibilidade de funcionamento das ondas ultra-sônicas como ferramenta de processamento de resíduos que pudessem ser recuperados,

minimizando seu impacto no ambiente e possibilitando uma recuperação significativa de teores de ferro reutilizáveis.

A escolha do ultra-som como ferramenta de desagregação dessas partículas se deu após a análise das características físicas e químicas das partículas que compunham a lama grossa de aciaria. A lama consiste basicamente em um aglomerado, agregado, de partículas esféricas de ferro e óxidos (CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, etc.), revestidos por finos desses óxidos de tamanhos coloidais, que por pontes de hidrogênio e higroscopicidade, formam um “cimento ligante” após a exposição desses resíduos à umidade durante a lavagem dos gases.

Essa associação de partículas de propriedades físicas e químicas diferentes por ação de agregação por um coloidal higroscópico ligante, levou a análise de que o princípio de ação do ultra-som em superfícies definidas de materiais diferentes, dentro de um meio líquido, poderia atuar significativamente na dispersão desses particulados ligantes, e na desagregação das partículas que compunham a lama, permitindo a recuperação do ferro metálico contido nessa lama.

Segundo MAURO KORN, em seu artigo APLICAÇÕES ANALÍTICAS DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS, Os efeitos da sonificação nos sistemas heterogêneos metal-água, apresentados na Figura 4.16, são relacionados com os jatos de alta velocidade produzidos pela cavitação acústica nas proximidades das superfícies dos metais e que interagem com esta, produzindo alterações significativas no material.

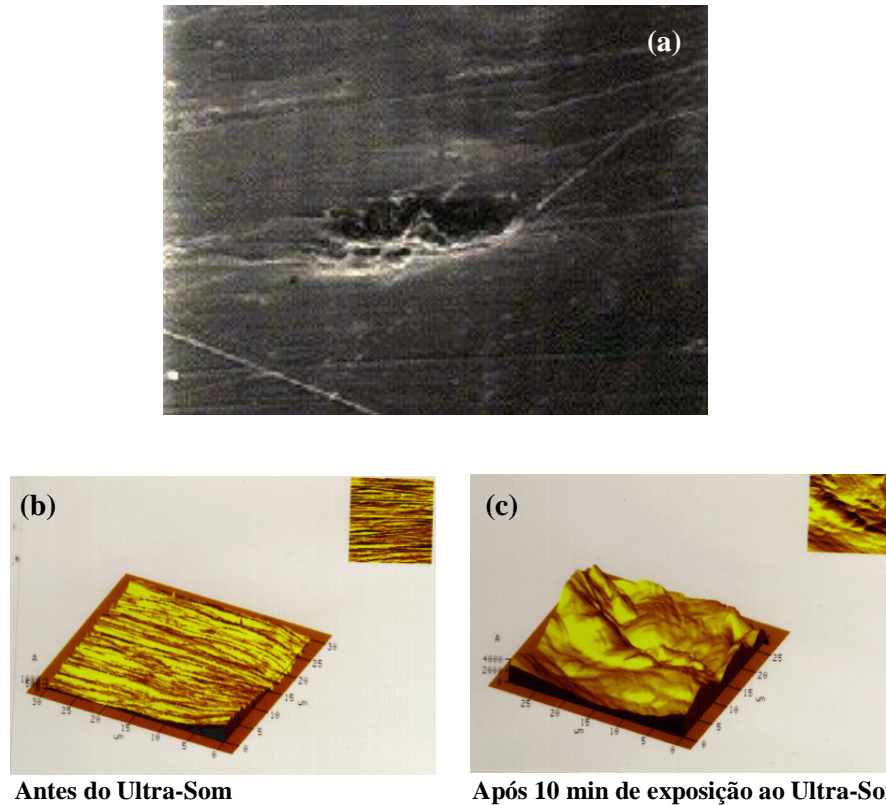


Figura 4.13– Efeito de um bombardeamento ultra-sônico nas interfaces sólido-líquido: (a) Placa de zinco polida exposta a ultra-som de 20 kHz; (b) e (c) Efeito do ultra-som sob platina em sistema platina-água deionizada, (microfotografias eletrônicas), antes e depois da exposição ao ultra-som, respectivamente. (Imagens: **DIETMAR PETERS**, Ph.D., European Society of Sonochemistry)

O material sofreu desagregação completa de suas partículas maiores, que se constatou, após a desagregação, constituírem-se de agregados de partículas metálicas e não-metálicas, simulando grãos maiores, conforme previsto pela análise inicial feita na lama grossa. Após o processo o sistema era composto por partículas metálicas, não-metálicas e ultrafinas coloidais, individualizadas, contudo, sem qualquer dano a sua integridade. O sistema inicial utilizado para testes em bancada é ilustrado no esquema a seguir.

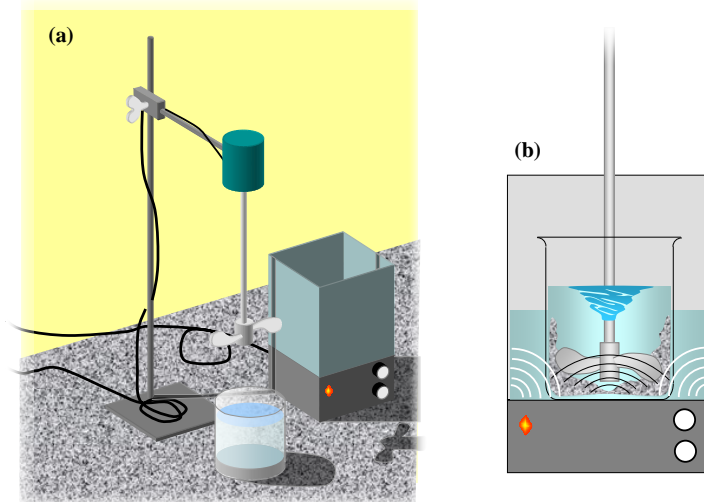




Figura 4.16 – Amostras de água de lavagem da lama após bombardeamento ultra-sônico, contendo os finos coloidais que são dispersos pelo bombardeamento ultra-sônico, com tempos diferentes de coleta, da esquerda pra direita: **1min, 7,5min e 15min.**

O que permite que o fino decante de forma tão imediata (se comparado a outros finos siderúrgicos gerados em processos de limpeza de gases) consiste no fato de que todo o procedimento não tem a adição de qualquer produto químico, isto é, não ocorre a utilização de hidrofóbicos ou hidrofílicos, nem alteração significativa no pH da água, uma vez que os produtos da desagregação são componentes gerados por ação de um efeito físico, o bombardeamento ultra-sônico, e que por sua vez, são fracamente solúveis na água. Os compostos solúveis sofrem sua solubilização no início da formação da polpa e, portanto, não têm alterada sua concentração à medida que o processo se desenvolve.

Durante os testes feitos em bancada com os ultra-sons de baixa potência, as várias tentativas que permitiram a desagregação completa através do processo de bombardeamento ultra-sônico foram as apresentadas na tabela a seguir, para uma concentração média de cerca de 25% de sólido na polpa em peso.

Tabela 4.7 – Distribuição granulométrica antes e após desagregação de acordo com a potência específica utilizada.

Malha	Mm	Original		5W/L		10W/L		15W/L		20W/L		25W/L		30W/L	
		% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada	% Simples	% Acumulada
48#	296	26,18	26,18	23,00	23,00	13,44	13,44	7,66	7,66	7,56	7,56	7,56	7,56	7,56	7,56
65#	210	16,10	42,28	16,69	39,69	20,26	33,70	21,12	28,78	20,42	27,98	20,42	27,98	20,42	27,98
100#	150	17,86	60,14	18,05	57,74	18,44	52,14	19,02	47,80	19,45	47,43	19,45	47,43	19,45	47,43
150#	105	14,90	75,04	14,61	72,35	14,35	66,49	13,78	61,58	13,32	60,75	13,32	60,75	13,32	60,75
200#	74	11,28	86,32	10,78	83,13	9,74	76,23	8,84	70,42	9,03	69,78	9,03	69,78	9,03	69,78
270#	53	4,38	90,70	4,22	87,35	3,90	80,13	3,44	73,86	3,83	73,61	3,83	73,61	3,83	73,61
400#	44	4,52	95,22	4,22	91,57	3,57	83,70	3,00	76,86	3,24	76,85	3,24	76,85	3,24	76,85
< 400#	< 44	4,78	100,00	8,43	100,00	16,30	100,00	23,14	100,00	23,15	100,00	23,15	100,00	23,15	100,00

Obs.: Os valores para 25 e 30W/L praticamente não apresentaram mudanças significativas em comparação aos valores obtidos para a densidade de potência de 20W/L, que por sua vez apresentou muito pouca variação na eficiência de desagregação em comparação à densidade de potência de 15W/L.

4.4.2 – Cálculo da Relação de Potência

Com base na relação potência e volume de polpa obtido nos testes de bancada, calculou-se uma relação de consumo e potencia para o tratamento de 1 tonelada de material. Aqui se descreve apenas o custo energético para operação da desagregação ultra-sônica.

- A Densidade medida do sólido por picnômetro ultra-sonado: $d = 5,35 \text{ g/cm}^3 = 5,35 \text{ kg/dm}^3 = 5,35 \text{ kg/L}$.
- Para o tratamento ultra-sônico em equipamento de bancada, 25 kHz, a polpa formada teve uma relação de massa **sólido/polpa** em torno de **25%**, sendo assim:

$$P_{\text{POLPA}} = \frac{1.000}{0,25} = 4.000 \text{ kg}$$

- Cálculo do volume de Polpa tratada:

$$V_{\text{POLPA}} = V_{\text{SÓLIDO}} + V_{\text{ÁGUA}} \quad \text{onde:}$$

$$V_{\text{SÓLIDO}} = \frac{P_{\text{SÓLIDO}}}{d_{\text{SÓLIDO}}} = \frac{1.000}{5,35} = 186,92 \text{ L}$$

$$V_{\text{ÁGUA}} = \frac{P_{\text{ÁGUA}}}{d_{\text{ÁGUA}}} = \frac{P_{\text{POLPA}} - P_{\text{SÓLIDO}}}{d_{\text{ÁGUA}}} = \frac{4.000 - 1.000}{1}$$

$V_{\text{ÁGUA}} = 3.000 \text{ L}$, assim :

$$V_{\text{POLPA}} = 186,92 + 3.000 = 3.186,92 \text{ L}$$

- Considerando uma potência específica (π) ideal ao processo de **15 Watts/litro**:
- A potência gasta em uma tonelada de lama (P), será:

$$P = \pi \times V_{\text{Polpa}}$$

$$P = 15 \frac{\text{W}}{\text{L}} \times 3.186,92 \text{ L}$$

$$P = 47.803,74 \text{ W}$$

- Como o tempo de ultra-sonagem durante a desagregação máxima, a partir do qual praticamente não ocorreram mudanças na eficiência do processo, foi de **3 min**, tomaremos o mesmo como tempo de referência. Assim a energia gasta em uma tonelada de lama (E), será:

$$E = P \cdot t = 47.803,74 \text{ W} \times 3 \text{ min} = 47,80 \text{ kW} \times \frac{1}{20} \text{ h} = 2,39 \text{ kWh}$$

$$E = 2,39 \text{ kWh}$$

- Energia por unidade de lama ultra-sonada, obtida nos testes de bancada:

$$\bar{E} = \frac{2,39 \text{ kWh}}{1,0 \text{ kg}} = 2,39 \text{ kWh / t}$$

4.4.3 – Cálculo da Densidade da Polpa Formada

A densidade média desse resíduo (lama grossa de aciaria) inicial se situa em torno de $5,1 \text{ g/cm}^3$ e umidade em torno de 6,4%. A densidade da polpa formada é função da percentagem de sólido em suspensão na mesma.

A densidade é calculada pela massa de polpa dividida pelo volume de polpa:

$d_p = \frac{m_p}{V_p}$, onde o cálculo da densidade da polpa formada é dado pelo

desenvolvimento a seguir:

$$d_p = \frac{m_s + m_L}{V_s + V_L} = \frac{m_s + m_L}{m_s/d_s + m_L/d_L}$$

$$d_p = \frac{(m_s + m_L) \cdot d_s \cdot d_L}{d_L \cdot m_s + d_s \cdot m_L}$$

Eq. 4.1

onde:

$d_p \rightarrow$ densidade da polpa, g/cm^3 .

$d_s \rightarrow$ densidade do sólido, g/cm^3 .

$d_L \rightarrow$ densidade do líquido, g/cm^3 .

Levando a equação a ser função somente das densidades e do teor de sólido na polpa, temos:

$$m_L = m_p - m_s = \frac{m_s}{x} - m_s, \text{ onde:}$$

$x \rightarrow$ fração de sólido na polpa.

$$d_p = \frac{(m_s + m_L) \cdot d_s \cdot d_L}{d_L \cdot m_s + d_s \cdot m_L} = \frac{\left(m_s + \frac{m_s}{x} - m_s\right) \cdot d_s \cdot d_L}{d_L \cdot m_s + d_s \cdot \left(\frac{m_s}{x} - m_s\right)} = \frac{\frac{m_s}{x} \cdot d_s \cdot d_L}{d_L \cdot m_s + d_s \cdot \frac{m_s}{x} - d_s \cdot m_s} =$$

$$= \frac{m_s \cdot d_s \cdot d_L}{x \cdot d_L \cdot m_s + d_s \cdot m_s - x \cdot d_s \cdot m_s}, \text{ simplificando, temos:}$$

$$d_p = \frac{d_s \cdot d_L}{x \cdot d_L + d_s(1-x)}$$

Eq. 4.2

Nesse caso, uma polpa feita com uma percentagem de sólidos de 30% em peso, $x = 0,3$; utilizando a água como meio líquido, $d_L = 1 \text{ g/cm}^3$; e uma densidade média do sólido (medido em picnômetro a água ultra-sonado e picnômetro a hélio) em torno de $5,35 \text{ g/cm}^3$, apresenta uma densidade:

$$d_p = \frac{d_s \cdot d_L}{x \cdot d_L + d_s(1-x)} = \frac{5,35 \cdot 1}{0,3 \cdot 1 + 5,35(1-0,3)} \cong 1,32$$

aproximada $d_p = 1,32 \text{ g/cm}^3$.

4.5 – Projeto e Construção de um sistema piloto

Uma vez estudada a possibilidade de se tratar a lama grossa pelo sistema de desagregação ultra-sônica, em testes de bancada, esta viabilidade foi dimensionada para um sistema maior, em escala piloto.

Para se projetar o sistema de Desagregação Ultra-Sônica piloto, tomou-se como referência os testes efetivados nos sistemas de bancada, entretanto, uma análise mais detalhada, com testes de decantação do material em tanbores, mostrou que a velocidade de decantação do material era maior em tanques de seção quadrada, se comparados a taques cilíndricos, mesmo quando se mantinha um agitador de hélice funcionando durante os testes. O canto vivo da seção quadrada acabava por se tornar uma “zona morta”, acumulando material durante a agitação, embora a decantação rápida seja vantajosa no processo de segregação dos finos que compõem a água final do processo no, permitindo sua reutilização, o mesmo não é vantajoso durante o processo de desagregação devido ao risco de que esses precipitados prejudicam o desempenho da desagregação, principalmente por se acumularem no fundo do tanque de processamento, podendo inclusive travar a hélice de agitação ou ainda entupir o sistema de descarga, quando o mesmo for praticado pelo fundo do tanque. A agitação também não deve

formar vórtices significativos dentro do volume líquido, uma vez que o mesmo atua como obstáculo para a propagação das ondas ultra-sônicas dentro da polpa.

A análise da Figura 4.17 mostra o efeito do formato da seção transversal do tanque na distribuição de ondas ultra-sônicas dentro do volume de controle.

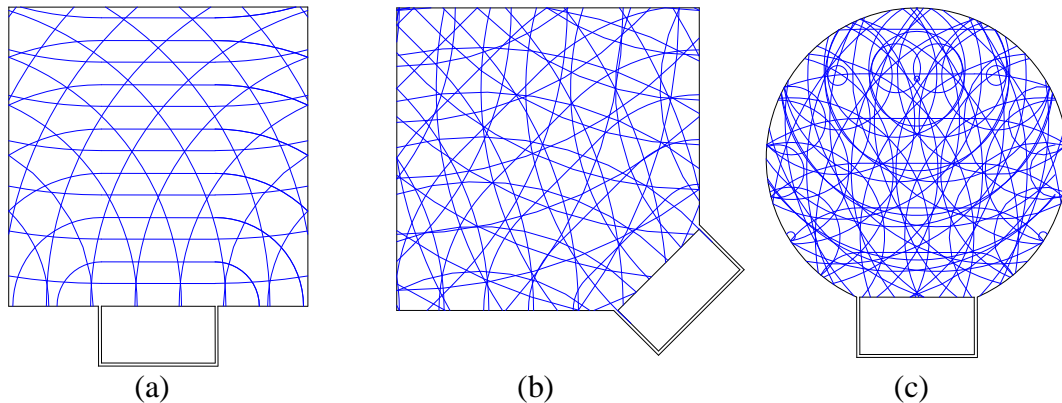
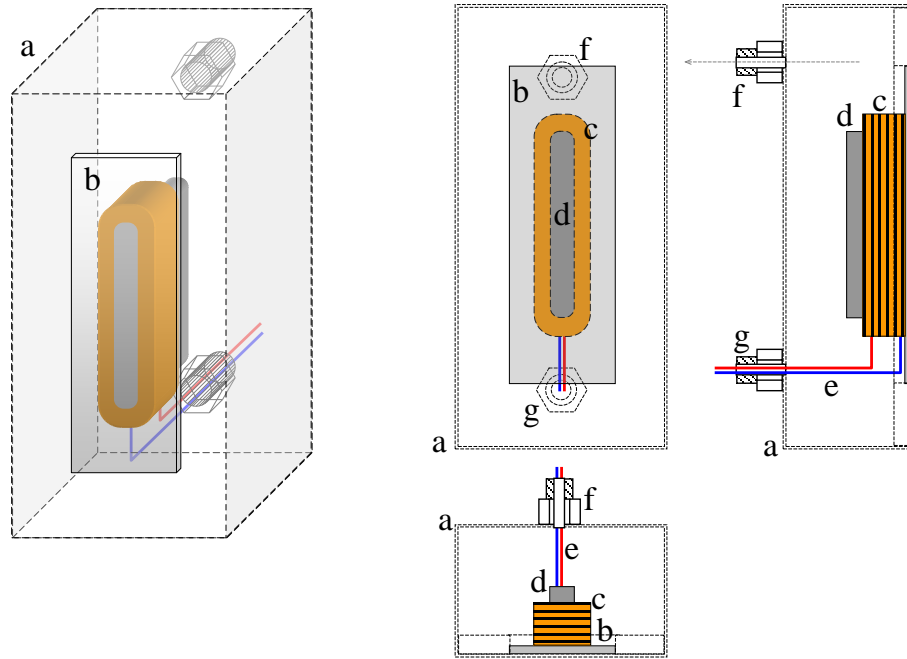


Figura 4.17 – Distribuição de ondas sonoras de 1.^a, 2.^a e 3.^a ordem dentro dos recipientes de acordo com a forma do tanque e posição do transdutor: **(a)** tanque de seção quadrada, transdutor aplicado no centro de uma face; **(b)** tanque de seção quadrada, transdutor aplicado em diagonal; **(c)** tanque de seção circular.

Pode-se perceber claramente que a complexidade das ondas é maior no tanque de formato cilíndrico, isto representa um efeito de desagregação de maior eficiência neste formato de tanque. Este aspecto levou à escolha de um tanque para o protótipo da planta piloto no formato cilíndrico.

O projeto construtivo dos transdutores utilizados foi feito pela *Lewis Corporation, Co.*, onde o perfil de emissão ultra-sônica consiste em uma fração da área frontal do corpo do equipamento transdutor, como pode ser visto na Figura 4.18.



$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

onde ρ é a densidade do meio em que a onda se propaga. Como o módulo de rigidez da água é igual a zero, as ondas do tipo S não conseguem se propagar neste meio.

Segundo ARTHUR AYRES NETO (2001), num meio líquido como a água, as ondas acústicas se propagam com uma velocidade média aproximada de 1500 m/s. A variação da velocidade na água depende basicamente da presença de solutos salinos dissolvidos na mesma, não sofrendo muita influência da pressão e da temperatura. A velocidade de propagação nos particulados sólidos sedimentados dentro do tanque, por sua vez, depende basicamente de duas das constantes relacionadas acima, os módulos de compressão e rigidez. De acordo com WOODS (1991), os fatores que controlam estes parâmetros nesses particulados são: porosidade, pressão de confinamento, grau de saturação e temperatura. Os resíduos sedimentados por serem no total uma massa inconsolidada, são materiais com mais de uma fase (sólida = grãos, líquida = fluido intersticial). Em alguns casos pode ocorrer a presença de ar fazendo com que o sedimento seja constituído por três fases. Por isso suas propriedades elásticas medidas são um valor resultante das propriedades elásticas de seus componentes, relativo a sua presença e volume. TAO et al. (1995) mostrou que a propagação de ondas P (longitudinais) em sedimentos marinhos está ligada ao módulo de compressão do fluido intersticial. Esta comparação é válida para a análise que aqui se propõe dos resíduos tratados pelo processo proposto.

Este fato é claramente observado ao se comparar a velocidade de propagação em resíduos sedimentados saturados com água e outro, com o mesmo conteúdo de sólidos, mas contendo gás. Devido ao módulo de compressão muito baixo do gás quando comparado ao da água, a sua presença, mesmo em pequenas proporções, domina o módulo de compressão final do sistema, reduzindo a velocidade de propagação das ondas acústicas nos sedimentos. A velocidade de ondas P pode variar entre 800 m/s em particulados sedimentados saturados com gás e 4000 m/s em particulados sedimentares finos depositados no fundo do tanque.

É justamente a variação nas propriedades dos materiais que permite a aplicação dos métodos acústicos: quando uma frente de ondas se desloca e encontra uma interface entre dois meios físicos com propriedades elásticas diferentes parte da energia será transmitida para o segundo meio, parte será refletida de volta para cima e parte será absorvida. A quantidade de energia refletida e transmitida, assim como o grau de absorção é resultado de uma série de fatores que atuam simultaneamente e de maneira complexa. A escolha da forma cilíndrica fica claro quando analisamos a Figura 4.17, essa análise fica ainda mais detalhada observando-se os efeitos em três dimensões das ondas propagas dentro do volume de controle escolhido.

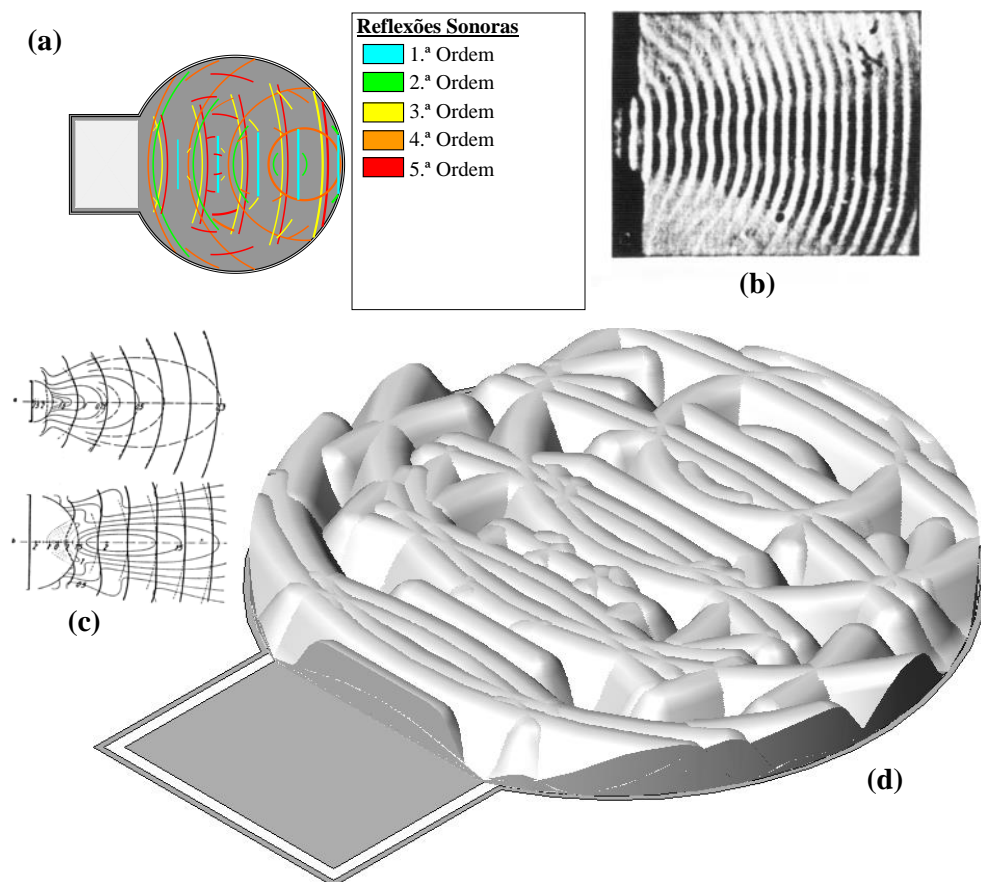


Figura 4.19 – Detalhe da propagação mecânicas do ultra-som (16kHz) dentro do tanque cilíndrico: **(a)** propagação das ondas diretas (desconsiderando-se as cilíndricas secundárias) definindo a ordem de reflexão das mesmas; **(b)** fotoluminescência de ondas planas de 1.ª ordem para ondas largas; **(c)** simulação de ondas planas e cilíndricas; **(d)** projeção espacial das ondas de até 5.ª ordem (4.ª reflexão) dentro do tanque, representando o efeito caótico de sua mecânica.

4.5.2 – Projeto do Equipamento

Para o projeto do Desagregador Ultra-Sônico foram analisados os resultados obtidos pelo efeito da forma na propagação das ondas dentro do volume de controle.

O primeiro projeto foi feito para uma vazão de polpa de aproximadamente 10 L/min, para uma polpa com concentração de sólido de cerca de 30%, e um desagregador com uma potência de trabalho de 300W, com um tanque de cerca de 20 L de volume útil.

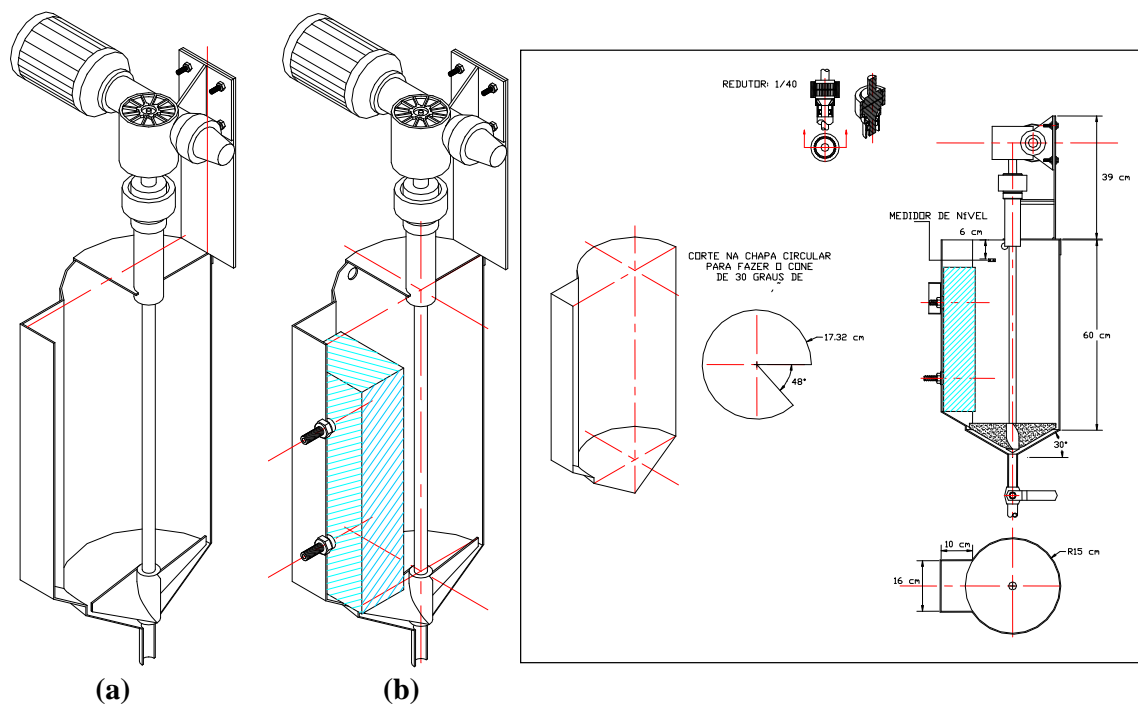


Figura 4.20 – Projeto do tanque do protótipo de 300W.

4.5.3 – Construção da Planta Piloto

Para a construção da planta piloto foram utilizadas, inicialmente, as instalações internas de um laboratório da Fundação GORCEIX, situado no NUTEC/CT³, ao lado esquerdo do galpão de metalurgia.

Nesse primeiro projeto o material alimentado no D.U.S. é descarregado diretamente numa mesa concentradora. Mais tarde essa planta foi relocada para a parte

externa ao galpão de mineração, e atualmente foi instalada em frente ao galpão de mineração do NUTEC, com melhorias em sua capacidade e autonomia de água.



Figura 4.21 – Protótipo do Desagregador Ultra-Sônico, com potência de 300W.



Figura 4.22 – Planta piloto inicial para tratamento de lama grossa de aciaria instalada no Núcleo de Tratamento de Resíduos da Fundação GORCEIX, com capacidade de tratamento de 35 t/mês.

4.5.4 – Análise dos testes na planta piloto

O material tratado na planta piloto apresentou a seguinte distribuição de massa em relação ao seu teor metálico.

Tabela 4.8 – Distribuição de massa e teores metálicos (valores médios) obtidos para os componentes da lama grossa obtidos após processamento na planta piloto.

Produto	Massa (g)	Fe Metálico (%)	Distribuição	
			Massa (%)	Fe – Metálico (%)
Alimentação	15.000,00	72,03	100,00	100,00
Concentrado	10.949,48	95,21	73,00	96,49
Rejeito	3.501,39	10,65	23,34	3,45
Finos (Poeira)	549,13	1,21	3,66	0,06

4.5.5 – Construção da Planta Semi-Industrial

A partir dos resultados obtidos pelo processamento do resíduo na planta piloto, que operou durante uma semana, 8 horas por dia, com alimentação manual, e processo de concentração em mesas vibratórias, partiu-se para a construção de uma planta semi-industrial, com capacidade de até 1200 t/mês.

Esta planta operava com carregador contínuo tipo caneco e um preparador de polpa, que injetava a água até a proporção de 70% em peso, a polpa era então carregada num homogeneizador, que alimentava o Desagregador Ultra-Sônico. O desagregador descarregava num misturador de onde a polpa, já desagregada, era carregada em espirais de Humphrey, atuando como *cleaner*, onde o concentrado era carregado numa segunda espiral atuando como *recleaner*, e o rejeito sendo direcionado para uma espiral atuando como *scavenger*.

O concentrado obtido da segunda espiral de recuperação de teor metálico é direcionado a um parafuso desaguador, e por fim a um forno rotativo de múltiplas camadas concêntricas, de onde o concentrado metálico sai seco.

O rejeito obtido da primeira espiral é direcionado a espiral operando como *scavenger* e de lá vai para um ciclone desaguador, onde o grosso é separado, com alto teor de óxido de cálcio, e a água é direcionada a tanques de decantação para ser reutilizada no processo. Veja planta na Figura 4.22.



Figura 4.23 – Planta semi-industrial, capacidade: 1200 t/mês.

O material tratado na planta semi-industrial apresentou uma concentração de teores menores que a da planta piloto, entretanto ainda com significativo teor metálico, e com elevada taxa de recuperação de massa. Foram tratados 1.000 toneladas ao longo de 3 meses (trabalhando em um único turno) e o resultado foi o apresentado pela Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Teores de recuperação de massa e teores metálicos da lama grossa de aciaria para a planta semi-industrial.

Produto	Massa (kg)	Fe Metálico (%)	Distribuição	
			Massa (%)	Fe Metálico (%)
Alimentação	1.000,00	72,15%	100,00%	100,00%
Concentrado	704,89	93,15%	70,49%	91,01%
Rejeito	221,28	27,71%	22,13%	8,50%
Finos (poeira)	73,83	4,86%	7,38%	0,50%

4.5.6 – Construção da Planta Industrial Instalada na CSN

A partir dos resultados obtidos pelas operações nas plantas piloto e semi-industrial, tornou-se possível o projeto e construção de uma planta operacional a nível industrial, sendo a primeira instalada e operada dentro da Companhia Siderúrgica Nacional, Usina Presidente Vargas, em Volta Redonda, RJ.

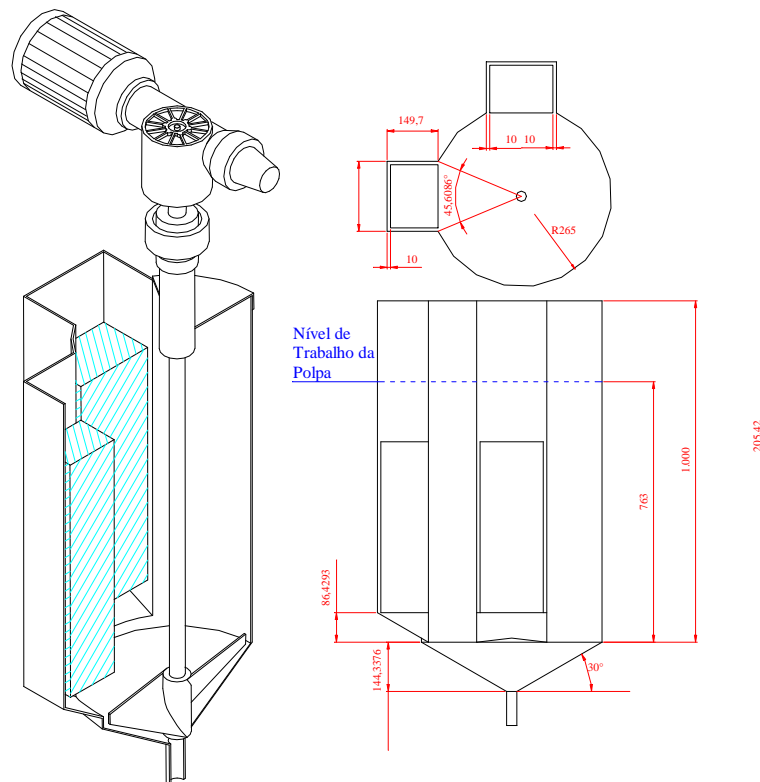


Figura 4.24 – Projeto do tanque com dois transdutores ortogonais.

Para a planta instalada na CSN, em Volta Redonda, RJ, utilizou-se um D.U.S. com algumas alterações significativas além das dimensões. A principal mudança se

destaca na alteração de um transdutor ultra-sônico por dois, de frequências diferentes. Foram instalados um transdutor de 16kHz e um de 20kHz, ortogonalmente entre si, para assim, gerarem ondas de ressonância não destrutivas dentro do volume de controle.

Pode-se acreditar que todos os efeitos de superposição e propagação caóticos apresentados para o transdutor de 16kHz, também terão lugar para o de 20kHz, com a característica de que a associação de ambos permite uma caoticidade sobre o volume da polpa muito maior e mais eficiente.



Figura 4.25 – Planta Industrial, capacidade: 3.000 t/mês, instalada na CSN e operada pela K&K: **(a)** classificador parafuso retirando a lama grossa do espessador; **(b)** tubulação por onde a lama é bombeada para a planta de tratamento pelo D.U.S.; **(c)** planta de tratamento da lama de aciaria pelo processo D.U.S.; **(d)** forno de secagem onde o material é descarregado em tambores; **(e)** concentrado seco carregado em tambores; **(f)** vagão levando os tambores com o concentrado para alimentação na aciaria; **(g)** eletroímã carregando o tambor contendo o concentrado metálico na caixa de sucatas; **(h)** vista de frente da caixa de sucatas.

4.5.7 – Aspecto dos Materiais Obtidos pelo Processamento da Lama Grossa de Aciaria

Aspecto dos materiais: alimentação (lama grossa original); lama desagregada (após passagem pelo D.U.S. e retirados os finos); concentrado (microesferas); rejeito secundário (após concentração em espirais de Humphrey).

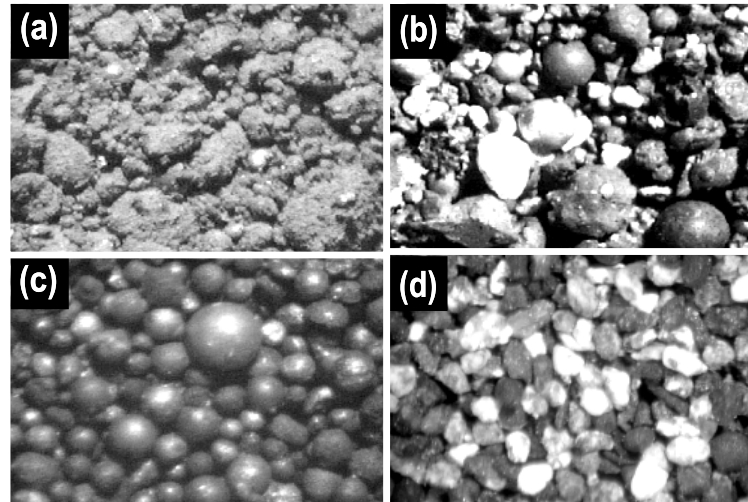


Figura 4.26 – Aspecto da lama grossa nas várias etapas correspondentes ao processo: (a) lama grossa original seca; (b) após desagregação pelo D.U.S., com retirada dos finos coloidais; (c) concentrado metálico, rico em ferro, sob a forma de microesferas; (d) resíduo secundário do processo, rico em CaO, gerado pelas espirais de Humphrey.

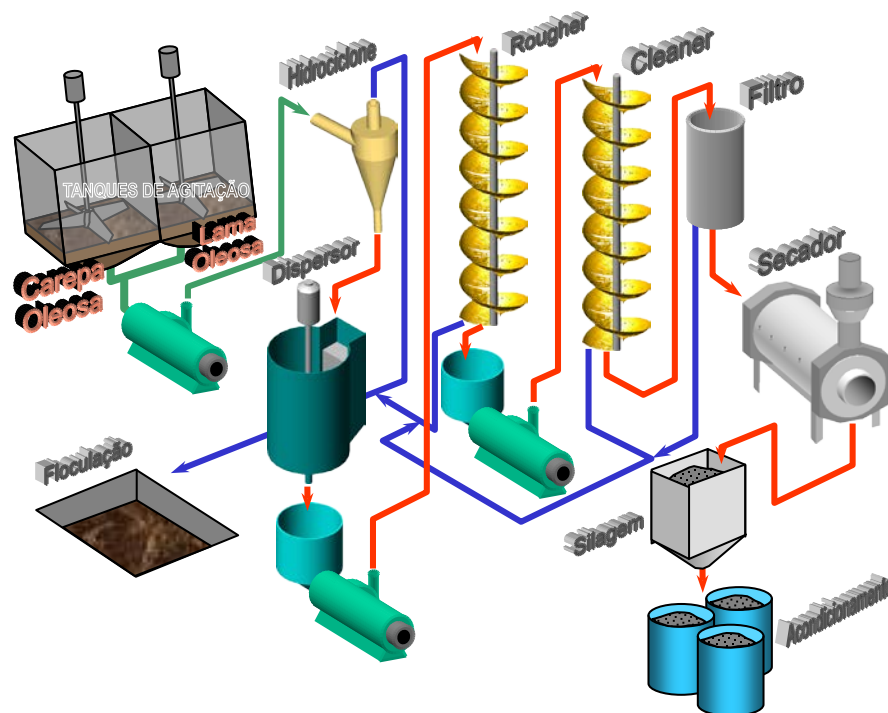
4.5.8 – Construção da Planta Piloto na V&M Tubes para Tratamento de Carepa e Lama Oleosas

O mesmo princípio utilizado no tratamento da lama grossa de aciaria foi aplicado no tratamento de uma carepa de laminação, obtendo resultados significativos sobre a recuperação do produto.

A carepa, que é resultante do processo de laminação, como mostra o capítulo 2, é rica em óxido de ferro, podendo ser recuperada para reutilização em fornos como material recuperado.

A análise dos rejeitos de laminação bem como sua composição inicial além de sua composição final após o tratamento na planta piloto, agora utilizada para dispersão do óleo contaminante, foram apresentadas no início deste capítulo.

O tratamento da carepa permitiu que se obtivessem os seguintes produtos: carepa seca (teor de oleosidade em torno de 0,08%, em comparação a um teor inicial de 20% para a carepa oleosa e 40% para a lama oleosa); o óleo retirado é direcionado para tanques de floculação, e assim, o mesmo pode ser reconduzido a reutilização como complemento de combustíveis em caldeiras, etc.; e por fim, após a floculação do óleo e retirada do mesmo da água que é utilizada no processo, essa água passa a se tornar recuperável para tratamento em outras etapas, minimizando o consumo de água ao mesmo tempo em que impede que qualquer descarte da mesma seja agressivo ao meio ambiente.



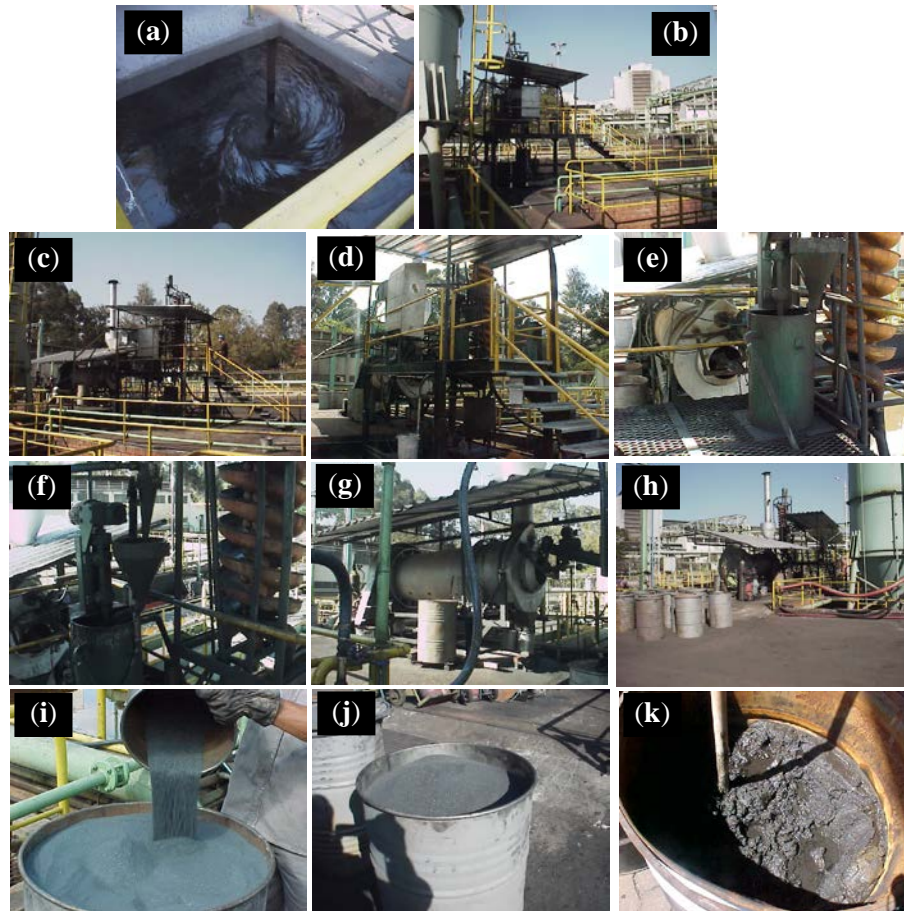


Figura 4.28 – Planta piloto instalada na ETE da V&M Tubes: **(a)** polpa feita com material (carepa e lama) oleoso, pronto para bombeamento para a planta de tratamento; **(b)** vista da planta ao lado do tanque de mistura; **(c)** vista lateral do acesso da planta; **(d)** vista mais aproximada da planta; **(e)** detalhe do equipamento de dispersão ultra-sônica de óleo, ciclones, espirais de Humphrey e forno de secagem; **(f)** detalhe do sistema de ciclones na alimentação do D.U.S.; **(g)** detalhe do forno de multicamadas concêntricas de secagem; **(h)** vista dos tambores de armazenamento do material seco, em frente ao forno; **(i)** detalhe da “fluidez” do material seco; **(j)** tambor de carepa cheio (0,08% óleo, $H_2O < H_2O_{AR}$); **(k)** resíduo secundário: óleo obtido no processo, a ser direcionado para floculação e recuperação.

A planta piloto operou por cerca de quatro meses aproximadamente, fornecendo dados suficientes para o projeto operacional e de pronta instalação de uma planta de maior porte, com capacidade para tratar toda a produção de carepa e lama oleosas, e lama de aciaria da V&M Tubes.

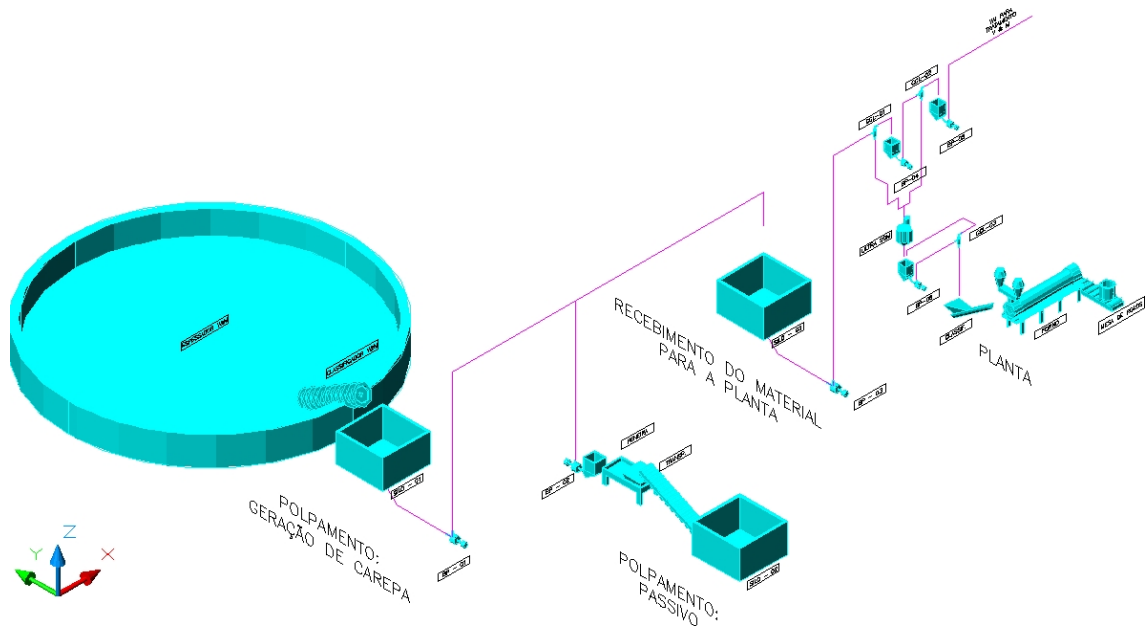


Figura 4.29 – Projeto de planta industrial para instalação imediata na V&M Tubes.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos durante os processamentos da lama grossa de aciaria, bem como das carepas e lamas oleosas de laminação, permitem uma definição bastante conclusiva da capacidade funcional e da eficiência do processo apresentado.

No que se refere à lama grossa de aciaria, o processo de utilização do D.U.S. para o tratamento da mesma apresenta os seguintes resultados:

- O consumo de energia por tonelada de lama tratada é consideravelmente pequeno, se levarmos em conta que em processos convencionais de liberação de partículas, a média de consumo de energia para uma etapa somente de moagem é de cerca de 15kWh/t contra os aproximadamente 3kWh/t de todo o processo de D.U.S.;
- O material obtido após a utilização do D.U.S. no tratamento da lama de aciaria tem várias possibilidades de uso. O uso do mesmo como sucata é talvez uma das menos nobre forma de usá-lo, entretanto, mesmo nesse caso o mesmo apresenta características que o torna muito melhor que as sucatas convencionais:
 - i) não possui elemento de liga, pois as microesferas são geradas durante o refino do aço, e ainda não tem contaminação pelos aditivos da panela;

- ii) por se encontrar sob a forma de microesferas, esse material se funde mais rapidamente que qualquer outro pedaço de sucata maciça que porventura tenha substituído, melhorando o desempenho do forno, e evitando perdas de energia desnecessária;
- iii) utilização do mesmo para a confecção de uma pasta condutora conforme foi mostrado na dissertação de mestrado “*Estudo de pares metálicos e bimetálicos associados por material condutor – ênfase na condutividade elétrica*”, apresentada em 7 de março de 2001, na REDEMAT, pelo autor: *Erivelto Luís de Souza*. Este trabalho analisa a possibilidade de melhorar a condutividade elétrica na interface de juntas metálicas e bimetálicas, com o objetivo de minimizar as perdas que ocorrem na transmissão de corrente elétrica por estas juntas. A aplicação prática deste estudo reside na economia de energia elétrica em instalações industriais, onde este insumo representa um dos itens mais importantes na planilha de custos de produção de bens e serviços.
- iv) Essas microesferas podem ser utilizadas como granalhas, pois já apresentam um formato esférico natural e dureza martensítica conforme mostrado nos gráficos da Figura 5.1;

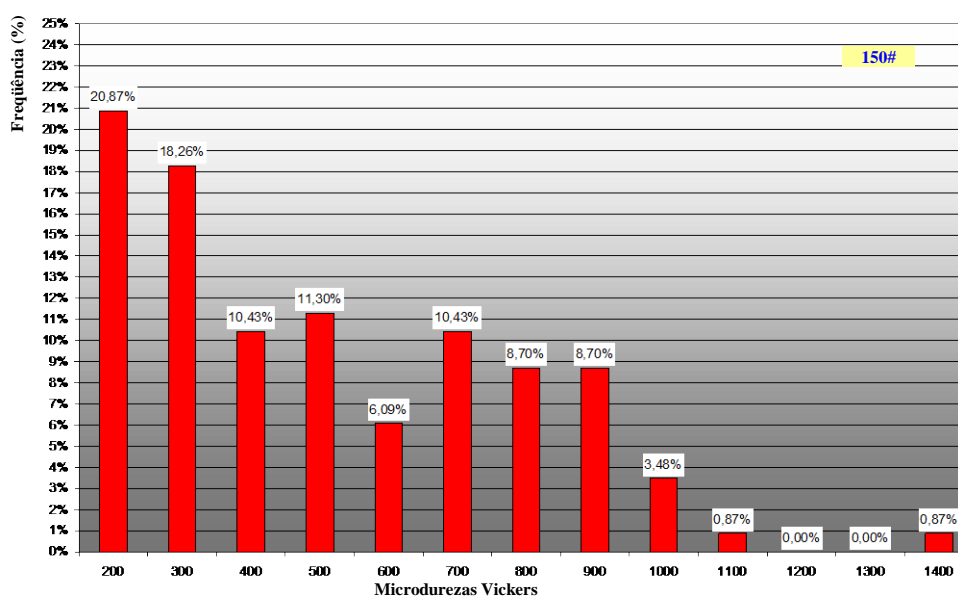


Figura 5.1 – Tabela de distribuição participativa simples de acordo com a dureza analisada, em partículas de 150#.

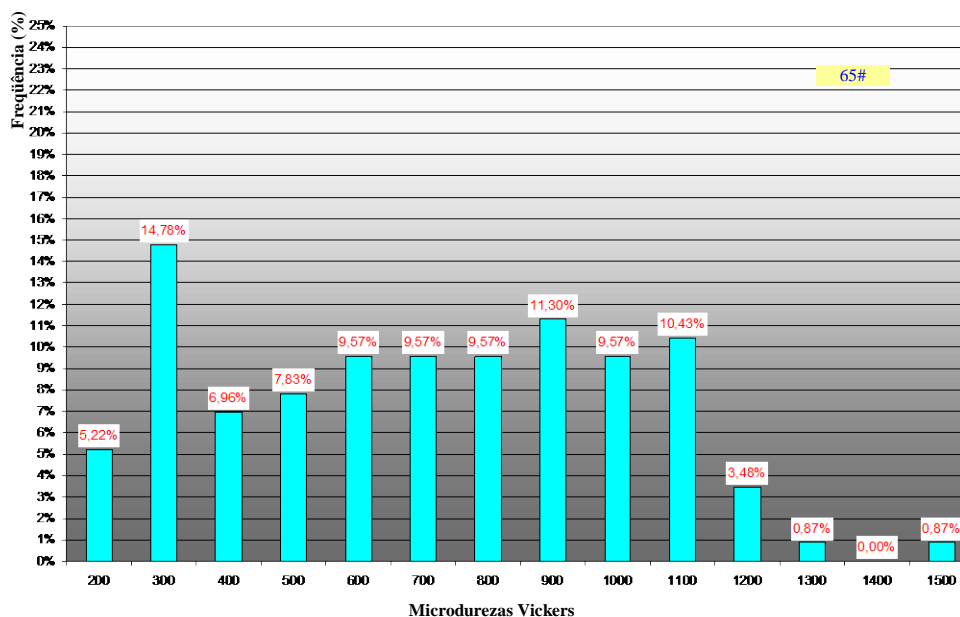


Figura 5.2 – Tabela de distribuição participativa simples de acordo com a dureza analisada para a faixa granulométrica de 65#.

- v) O resíduo secundário gerado na concentração do D.U.S. por sua vez deixa de ser totalmente um resíduo e pode ser utilizado em outras áreas como corretivo de solo, seqüestro de carbono, e fabricação de cimento. Este último foi apresentado em dissertação de mestrado denominada “*Obtenção de Cimento do Tipo Portland, Quimicamente Modificado, Utilizando-se Lama de Aciaria com Baixo Teor de Ferro Metálico*”, desenvolvida pela Eng.^a Flávia Valéria Oliveira Resende, Professora do CEFET-OP, na área de Edificações, na data 26 de julho de 2004, que estudou a possibilidade de se utilizar esse resíduo secundário em proporções que lhe permitam fabricar um cimento economicamente viável;
- vi) A carepa produzida pelo tratamento ultra-sônico também encontrou uso direto no processo de reutilização deste resíduo, estudado na dissertação intitulada “*Estudo da Aplicação da Carepa Gerada em Processos Siderúrgicos e Tratada por Processos de Desagregador Ultra-Sônico*”, apresentada pelo Eng. Olídio Carlos Blanc Gomes, em 22 de dezembro de 2003. Esta dissertação foi referenciada no trabalho e projeto aqui apresentados para tratamento de carepa de laminação através de bombardeamento ultra-sônico;

- Ainda deve-se levar em conta, conforme é explicado no capítulo 3 deste trabalho, que a descarga de partículas de ferro no meio ambiente, simplesmente, pode causar impactos significativos na biota, desequilibrando-a e gerando aumento em bactérias patogênicas;
- O processo de D.U.S. em si, consiste em um processo de baixo custo operacional, e com um investimento relativamente baixo, se comparados a outros existentes, além de possuir uma resposta relativamente rápida de investimento.
- O processo de tratamento através do D.U.S. não é operacional e eficiente apenas para lama grossa de aciaria, na verdade, sua ação no tratamento de carepas e lamas de alto-forno e lama fina de aciaria mostraram-se de grande eficiência, sendo o fator de concentração e separação desses componentes o principal empecilho até o momento, mas essas lamas, uma vez tratadas com esse processo apresentam um grau de desagregação tão elevado em suas partículas que resta apenas encontrar um método operacional de separá-las e concentrá-las.

GOMES, O.C.B. (2003) em sua dissertação afirma que diante da crescente necessidade de aproveitar resíduos de qualquer natureza, muitos estudos têm sido desenvolvidos no mundo inteiro. Neste caso específico, a pesquisa do resíduo siderúrgico tratado pelo processo de separação em Desagregador ultra-sônico (D.U.S.), agregados aos processos de separação gravimétrica, secagem e acondicionamento dos subprodutos gerados, visa a aplicação da carepa gerada no processo D.U.S., em conversores LD, com ganhos de qualidade, principalmente com redução do teor de fósforo de patamares de 0,018% para patamares de 0,008%, da redução de custo com substituição parcial e/ ou total da sucata adquirida, além do foco ambiental, no qual propicia a transformação de resíduo em matéria. As etapas envolvidas são: adequação do produto gerado no processo D.U.S., manuseio da carepa gerada, procedimentos do carregamento de sucata, influência na qualidade do aço obtido, influência no rendimento do aço por carga metálica e avaliação econômica do processo. As principais conclusões obtidas foram: a transformação de borra oleosa de laminação (resíduos siderúrgico) em matérias primas e insumos, adição de carepa no conversor LD da V&M Tubes sem perda de rendimento metálico e temperatura, redução do teor de fósforo do aço com adição de carepa do patamar de médio de 0,018% para 0,008%, redução do

desvio médio do teor de fósforo de 0,0040 para 0,0006, ganhos econômicos com a aplicação da carepa limpa complementando a caga metálica e outras aplicações possíveis da carepa tratada como pigmentos para tintas, óxidos para moldagem em fundição, lixas, jateamento (limpeza) de peças e ferrita para ímã, com valores agregados mais altos.

Muitos outros estudos ainda estão para ser feito sobre novas formas de utilização desse material concentrado, bem como de seus resíduos secundários. O importante é entender que qualquer utilização que se queira dar destino a esse material, o simples fato de que o processo de obtenção do concentrado metálico já viabilizou economicamente qualquer outro subproduto derivado desse processo.

Um exemplo de uso social e nobre consiste na confecção de obras de arte, onde uma liga de material resinoso é feita misturando-se massas plásticas com porções significativas desse material. O resultado é surpreendente. Um escultura com peso e aspecto de ter sido feita em metal, no entanto, com a trabalhabilidade de uma peça de resina. Esse foi o trabalho testado e desenvolvido pela artista plástica mineira, Luma Ramos.

Capítulo 6

Conclusões

- O processo de tratamento da lama grossa de aciaria pelo sistema de Desagregação Ultra-Sônica (D.U.S.) se mostrou de grande eficiência para a recuperação do teor metálico contido nessa parcela grossa da lama de aciaria.
- O D.U.S. tem uma eficiência significativa pois seu consumo de energia em uma planta industrial (referência à planta instalada na CSN, VR, RJ) não ultrapassa, em todo o processo, 3kWh/t lama, em comparação aos processos convencionais de cominuição, tais como moagem, que uma única etapa consome por volta de 15 a 20kWh/t.
- O aspecto ambiental é notavelmente preservado pois, o processo inteiro decorre por ação unicamente física, sem qualquer tipo de contaminação química tanto da polpa quanto da água utilizada, permitindo que essa água, após decantação de seus particulados suspensos, retorne ao processo caso seja necessária.
- O sistema transforma resíduo sem fim específico, que em alguns casos vai direto para aterros, em subprodutos utilizáveis: o teor metálico é recuperado e reutilizado na aciaria; o resíduo secundário por sua vez, rico em CaO, pode ser direcionado para a fabricação de cimentos, fertilizantes e outros processos; o fino segregado nos tanques de decantação, em função de seu teor de CaO, FeO e

ZnO, podem ser direcionados para a fabricação de corretivos de solo, ou ainda, para processos de recuperação de zinco.

- O D.U.S. também atua significativamente em outros resíduos siderúrgicos tais como lama fina de aciaria, lama de Alto-forno (na própria CSN já foi instalada uma planta para tratamento de recuperação de lama de alto-forno, tomando como base de projeto o estudo aqui apresentado), carepa oleosa e lama oleosa de laminação.
- Em função de um custo razoavelmente baixo de instalação e da simplicidade da operação constitui um projeto de alta resposta financeira, viabilizando-se técnica e economicamente.
- O processo de tratamento de lamas de aciaria pelo processo de D.U.S. minimiza o impacto causado pelo descarte direto desses resíduos diretamente no solo, pois até mesmo os resíduos secundários gerados são menos agressivos tanto quantitativa quanto qualitativamente.
- Por trabalhar sem utilização de produtos químicos adicionados ao processo e por utilizar como ferramenta principal de operação o ultra-som, o processo de D.U.S. não agride de forma alguma a saúde dos operários que atuam em sua operação, pois os sons gerados são de cunho praticamente inaudíveis a maior parte das pessoas, não causando assim, qualquer tipo de risco a sua saúde.
- As microesferas obtidas no processo de D.U.S. podem ser utilizadas de várias maneiras mais nobres que somente como sucata, tais como na confecção de uma pasta condutora como já apresentado em dissertação de mestrado na REDEMAT, como granalhas, como matéria prima de artes plásticas, etc., aumentando significativamente o valor agregado, e tornando ainda mais viável o processo de recuperação desse resíduo.

Capítulo 7

Contribuições Originais ao Conhecimento

- Todo o processo de tratamento ultra-sônico apresentado aqui foi elaborado, desenvolvido e projetado, desde sua concepção teórica até sua construção industrial durante os estudos que levaram a este trabalho. Embora esta tese tenha sido iniciada em 2001, o estudo de possibilidade teórica feita em bancadas, passando por plantas piloto, semi-industriais e chegando finalmente, nas plantas industriais instaladas em usinas, teve início em 1998, e os resultados obtidos ao longo desses praticamente 8 anos, permitiram a conclusão deste estudo.
- O projeto de desenvolvimento do Desagregador Ultra-Sônico, como equipamento, também foi criado e desenvolvido durante os estudos que viabilizaram este trabalho, principalmente no que se refere às relações entre frequência, potencia e dimensões utilizadas durante o processamento de variados tipos de resíduos.
- O desenvolvimento desse trabalho criou um impacto tão significativo dentro do mercado siderúrgico industrial brasileiro que algumas empresas que antes pagavam para a retirada dos resíduos de seus pátios de estocagem, passaram a vendê-los a outras que perceberam nos

mesmos uma oportunidade de recuperação do teor metálico.

- O material obtido aqui, sob a forma de microesferas de ferro, apresentam uma forma inédita de recuperação destes resíduos, pois, ao serem carregadas no conversor, através de tambores, permite que o aço funda essa carga metálica mais rapidamente do que seria caso o mesmo peso fosse carregado sob a forma de sucata, por serem microesferas de ferro, sua fusão é mais rápida, e com maior tempo de fusão, diminuem as perdas térmicas, aumentando a eficiência do processo.
- Outro fator importante na utilização dessas esferas como sucata consiste no fato de que uma vez que são produzidas dentro do conversor, durante a fabricação e refino do aço, não possuem elementos de liga contaminantes, como ocorrem com sucatas convencionais.
- A utilização dessas esferas como elementos de diagnóstico de operação do forno, pois, o tamanho, pureza e quantidade de esferas formadas durante uma corrida, determina a intensidade, eficiência e temperatura de operação, permitindo-se ajustar com mais detalhes os parâmetros do forno, bastando para isso um estudo correlacionando essas características.

Capítulo 8

Relevância dos Resultados

Os resultados obtidos durante os processamentos dos resíduos, desde a planta piloto inicial, passando pela planta semi-industrial, até a planta industrial final instalada na CSN, em Volta Redonda, RJ, permitem concluir que o tratamento da lama grossa de aciaria é consistente com o investimento feito, sendo, na verdade, um processo de resposta rápida e eficiente.

O concentrado metálico obtido, em sua mais pobre utilização, substitui, quilo por quilo, a melhor sucata de mercado com grande eficiência, não obstante, a diminuição de um resíduo industrial no processo de contaminação do solo, bem como a ação de evitar que fosse descarregado no solo ferro metálico, o que causaria um certo impacto em suas propriedades químicas e físicas, destacam significativamente a importância de se tratar devidamente a lama grossa de aciaria.

A utilização de um sistema que promove a desagregação ultra-sônica nesse rejeito, sem nenhum outro tipo de elemento desagregante a não ser fenômenos físicos, sem utilizar-se de quaisquer métodos de contaminação química, além de ser de grande eficiência, mostrou-se bastante promissora em outros resíduos, tais como carepa e lama oleosas de laminação, além de lama de alto-forno (esse último tipo de resíduo, embora tenha tomado como referência o processo de tratamento com bombardeamento ultra-

sônico, não chegou a ser descrito aqui nesse trabalho, por estar se aprimorando durante a finalização do mesmo). Isso permite que esses resíduos, anteriormente descartados ou processados de forma a serem vendidos por baixíssimos preços a empresas reprocessadoras dos mesmos, agora podem ser tratados de forma mais eficiente, mais ecologicamente viável e com um rendimento econômico maior, gerando mais empregos e tecnologia.

Um concentrado com um teor médio de ferro metálico por volta de 65 a 70%, com um teor de componentes não metálicos com cerca de 30 a 35%, é processado com um consumo em torno de 2,5 a 3kWh/t, obtendo-se um concentrado com uma pureza que circula o valor médio de 92% de Fe metálico, e com um rendimento de massa de cerca de 70 a 75%. Esse processo transforma um resíduo industrial em um subproduto, fornecendo um outro ponto de vista sobre processos de recuperação de resíduos industriais.

No caso da carepa de laminação, a mesma não poderia ser utilizada sem antes passar por um incinerador que queimasse o seu teor de óleo (cerca de 20 a 30%), pois sem a retirada do mesmo, não poderia ser reutilizada com sucata. Este processo de queima, além de ser extremamente energético, do ponto de vista de seu consumo, promovia a necessidade de um manuseio da carepa, promovendo-se sua secagem antes de utilização no forno, pois a presença de água promoveria um consumo maior de energia. O descarte por sua vez era desconsiderado em função das propriedades físicas da carepa e lama oleosa, e da composição do óleo que revestia as partículas componentes da carepa. Seu impacto ambiental poderia causar sérios danos ao ecossistema.

A utilização do processo de dispersão do óleo por ação do D.U.S. promoveu a oportunidade de se recuperar a carepa, que após o processo apresentava um teor de óleo de cerca de 0,08%, permitiu também que o óleo recuperado por um processo de floculação do mesmo seja utilizado em caldeiras e outros fins, a água obtida desse processo de floculação, por sua vez, possui limpeza suficiente para ser reutilizada, minimizando assim a necessidade de reposição de água nova ao processo.

A análise final indica que este processo possui a característica de trabalhar estes resíduos de forma a obter-se o maior rendimento possível dos mesmos, com um mínimo

de consumo energético, sendo ainda a tecnologia totalmente brasileira, somente os componentes de origem estrangeira, permitindo que o Brasil se destaque no quesito tratamento de resíduos, e contribuindo para o cuidado ao meio-ambiente.

O processo de amadurecimento ambiental é lento, mas certo. Todo país que queira ser respeitado industrialmente deverá se integrar e se inteirar das necessidades que o meio-ambiente impõe hoje em dia, e para tanto, é necessário que todo trabalho nesse sentido seja salientado e estudado a fundo. O trabalho aqui proposto tem o grande potencial de contribuir com isso, e, indiretamente, até com créditos de carbono, pois, se os resíduos utilizados como sucata promovem uma certa economia de energia, um volume menor de coque será utilizado e, conseqüentemente, um volume menor de gases serão gerados, além de que, como a taxa de oxidação desse concentrado metálico é menor, necessita menos carbono para reduzi-lo, gerando menos gás novamente.

Ao recuperarmos as carepas através deste processo, evitamos as etapas de incineração das mesmas e, portanto, da geração desnecessária de gases resultantes da queima do óleo.

Capítulo 9

Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns temas não puderam ser desenvolvidos durante este estudo, em função de que estes temas, por si só cada um, já seriam uma tese em particular. Tais temas são aqui sugeridos como um provável foco de um trabalho de mestrado e doutorado a ser desenvolvido por outros pesquisadores. Sugerimos então:

- Estudo e desenvolvimento de uma forma de concentração da lama fina de aciaria, pois embora a mesma seja desagregada pelo processo de D.U.S., sua concentração, por outro lado, em função de sua granulometria significativamente pequena, consiste em um problema a parte. Como é composta, basicamente, de óxido de ferro (FeO – 60%) sua recuperação seria significativa para reutilização nas indústrias.
- Um estudo mais aprofundado do uso da lama fina após sua concentração, pois, uma vez concentrada, deve-se estudar a forma mais adequada de utilizá-la, com maior eficiência e maior retorno econômico.

- Aprofundamento no processo de recuperação do óleo gerado durante a limpeza da carepa, descobrindo onde o mesmo pode ser reutilizado significativamente.
- Procura por usos outros, que não os aqui apresentados, para as microesferas obtidas pelo tratamento da lama grossa de aciaria.
- Um correlacionamento entre a operação do forno LD e as características da lama gerada, permitindo um diagnóstico direto, logo após a coleta dessa lama.

- Pesquisa da possibilidade de uso do D.U.S. no tratamento de resíduos de minério de ferro, como agente deslamador, permitindo que o material seja tratado com um teor menor de lamas, aumentando o rendimento das etapas que se seguem ao seu processamento.

Bibliografia

1. ALVES, F.; “*O Que Está Sendo Feito Com os Resíduos Industriais?*”; Revista Saneamento Ambiental, nº 54. Novembro/Dezembro de 1998. Disponível em: www.bsi.com.br. Acesso em: 12/03/2003.
2. AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; Interação dos Metais Pesados de Resíduos Siderúrgicos com um Solo Podzólico Vermelho-Amarelo. Tese de Doutorado. UFRRJ, 1993. Disponível em: www.ufrj.br. Acesso em: 15/12/2002.
3. AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M.; DIAS, L.E.; BARROS, N.F.; Aplicação de Resíduo Siderúrgico em um Latossolo: Efeitos na Correção do Solo e na Disponibilidade de Nutrientes e Metais Pesados. Rev. Bras. Ci. Solo, Campinas, v.17, n.2, p.299-304. 1994. Disponível em: www.ufrj.br. Acesso em: 15/12/2002.
4. AUMÔNIER, J.; JUCKES, L.M.; TRAICE, F.B.; A Caminho da Eliminação Total de Bota-Foras. Seminário sobre Processamento, Utilização e Descarte de Resíduos na Indústria Siderúrgica. Balatonszéplak, Hungria. 1996.
5. AYRES DA SILVA, L.A.; STELLIN JUNIOR, A.; BORN, H.; Some considerations on the present situation of underground waste disposal in Brazil and its perspectives. In: International Conference on Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production, 2, Calgary, 1992. Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production: Proceedings. Rotterdam: Balkema, 1992. v.1 p.659-63. EP/USP 0402.
6. BANWELL, C.N., McCASH, E.M.; Fundamentals of Molecular Spectroscopy, McGraw Hill, New York (1994).
7. BASSALO, J.M.F.; *Crônicas da Física. Tomo 1-4*. Belém: Gráfica e Editora Universitária (1987).
8. BEISER, A.; *Modern Physics: an introductory survey*. London: Addison-Wesley (1968).
9. BERGMANN L.; HATFIELD, H.S.; Ultrasonics and their scientific and technical applications, John Wiley and Sons, New York, 1938.
10. BORN, H.; AYRES DA SILVA, L.A.; SOARES, L.; Environmental and waste disposal aspects of hydro-power projects in Brazil. In: International Conference on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, 3, Perth, 1994. Proceedings. Perth: Curtin University of Technology, 1994. p.119-28. EP/USP 0406.
11. British Steel and the Environment. British Steel Plc., 9 Albert Embankment, Londres, UK, SE1 7SN.
12. CAMPOS, M.M.; Fundamentos da Química Orgânica, Ed.Edgard Blücher LTDA, São Paulo (1980).
13. CARDOSO, E.J.B.N.; Microbiologia do Solo., Tsai, S.M. & Neves, M.C.P. SBCS. 1992.
14. CARRIER, W.D.; BECKMAN, J.F.; MELLO, L.G.F.S.; Optimization of mine-waste disposal and reclamation in the Amazon Region. In: International Conference

- on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, 1, Brasília, 1985. Proceedings. São Paulo: ABMS, 1985. v.2 p.123-30. EP/USP 0411.
15. CASTRO NETO, P.P.; Modelo para avaliação qualitativa e quantitativa de resíduos sólidos industriais. São Paulo, 1987. + anexos. Dissertação (Mestrado) - orientada por Pereira, Helena A dos S Lima, FSP/USP 0389.
 16. CAVALCANTI, J.E.; A Década de 90 é dos Resíduos Sólidos; Revista Saneamento Ambiental, nº 54. Novembro/Dezembro de 1998. Disponível em: www.bsi.com.br. Acesso em: 12/03/2003.
 17. CAVALCANTI, R.; Mitos da Água. São Paulo. São Paulo. Ed. Cultrix. 264 p. 1998.
 18. CHMILENKO, F.A.; BAKLANOV, A.B.; SIDOROVA, L.P.; PISKUN, Y.M.; J. Anal. Chem., 49:494, 1994.
 19. CHRISTINA G.D., O'REILLY, J.E.; Instrumental Analysis, Allyn and Bacon, Inc., Massachussetts (1986).
 20. EISBERG, R.; RESNICK, R.; Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas, Editora Campus, Rio de Janeiro (1979).
 21. FASSBENDER, H.W.; Química de suelos – com ênfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, Editorial IICA, Série: Libros y Materiales Educativos Nº. 24, 1980. 398p.
 22. FIELD, F.W., KEALEY, D.; Principles and Practice of Analytical Chemistry; 4th Ed.; 1983.
 23. FILEV, R.; http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm.
 24. GEORGE, C. M.; SORRENTINO, F. P.; "Valorization of basic oxygen steel slags". In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7. Paris, 1980. Anais. v. II, theme III, p. 46-50.
 25. HARRIS, D.C.; Análise Química Quantitativa. 5.^a, LTC Editora, 2000.
 26. HOTCHKISS, R.; Selman Abraham Waksman – Biographical Memoirs. Volume 83. Published by the National Academy Press. Washington, D.C.; 2003.
 27. http://www.cst.com.br/frame.asp?t=/flashEspeciais.shtml&c=/produtos/especiais/aplicacoes/construcao_civil/teconstrucao_civil.shtml.
 28. HUA, I.; HOFFMANN, M.R.; Environ. Sci. Technol., 31:2237, 1997.
 29. I.E. Élpiner 1964. Ultrasound Physical, Chemical and Biological Effects, Consultants Bureau Enterprises, New York, pp - 371
 30. JAUNCEY, G.E.M. The Birth and Early Infancy of X-Rays. *American Journal of Physics*, 13, 362-379 (1945).
 31. KARAPETIANTS, M.J., DRAKIN, S.I.; Estructura de la sustancia. Moscou: Editorial MIR (1974).
 32. KESTENBACH, H.J., BOTTA Fº, W.J.; Microscopia Eletrônica – Transmissão e Varredura. ABM/SP. 1994.
 33. KINJO, T.; Conceitos de acidez dos solos. In: B. van Raij., (Coord.). Simpósio sobre Acidez e Calagem no Brasil, Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, Campinas, SP, 1982, p. 23-31
 34. MADEY, T. E., BROWN, W. C.; (Eds.) *History of Vacuum Science and Technology*. New York: American Institute of Physics (1984).
 35. MANES, G.I.; The Discovery of X-Ray. *Isis*, 47, 236-238 (1956).

36. MASON, T.J.; Chemistry with Ultrasound, in A.R. Burkin, Critical Reports on Applied Chemistry, v. 28, Elsevier Science Publishers, London, UK. pp – 195, 1990.
37. MASON, T.J.; LORIMER, J.P.; Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry, Ellis Horwood Ltd., Chichester, UK, pp – 252, 1988.
38. MASON, T.J.; LUCHE, J.L.; Ultrasound as a new tool for synthetic chemists, in van R. Eldik and C.D. Hubbard, Chemistry under extreme or non-classical conditions, John Willey & Sons, 1996.
39. MATOS, S.V.; Proposta de minimização de resíduos sólidos industriais: estudo de caso com areia de fundição. São Carlos, 1997. + anexos. Dissertação (Mestrado) - orientada por Schalch, Valdir, EESC/USP 0393.
40. MATOS, S.V.; SCHALCH, V.; Alternativas de minimização de resíduos da indústria de fundição. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19/Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental, 2, Foz do Iguaçu, 1997. Trabalhos técnicos. Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1742-1753. EESC/USP 0432.
41. MAZARIEGOS PABLOS, J.; SICHIERI, E.P.; Utilização do resíduo sólido gerado pelas areias de fundição aglomeradas com argila no setor da construção civil. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 12, Águas de Lindóia, 1996. Anais. São Paulo: Abm, 1996. p.13-6. EESC/USP 0433.
42. MAZARIEGOS PABLOS, J.; Utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila no setor de construção civil. São Carlos, 1995. Dissertação (Mestrado) - orientada por Sichieri, Eduvaldo Paulo, EESC/USP 0394.
43. Mellor's Modern Inorganic Chemistry; Ed. Globo; 1957.
44. MICROBIOLOGIA DO SOLO; <http://www.consulteme.com.br/1b/biologia/compsoloc.htm>; Acesso em 22/6/2004.
45. MILLER, N.; Trans. Faraday Soc., 46:1086, 1950.
46. MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; Microbiologia e Bioquímica do Solo. Editora UFLA. 2002.
47. NASCIMENTO JUNIOR, R.C.; MANTOVANI, M.C.; TAKANO, C.; MOURÃO, M.B.; CAPOCCHI, J.D.T.; Inchamento de pelotas auto-redutoras na reciclagem de resíduos siderúrgicos. In: Seminário de Reciclagem de Resíduos, Vitória, 1997. Seminário. São Paulo: ABM, 1997. p.67-84. EP/USP 0434.
48. OLIVEIRA, M.B.P.; SCHALCH, V.; Processos de reciclagem de resíduos sólidos industriais. In: Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 13, São Carlos, 1994. Anais. São Carlos: EESC-USP, 1994. p.55. EESC/USP 0439.
49. Paul Wurth do Brasil Ltda. PRIMUS® (Processo para reciclagem de sub-produtos). Disponível em: <http://www.paulwurth.com.br/novidades.htm>. Acesso em: 20/02/2003.
50. PAULA JUNIOR, D.R.; BONI, N.R.; SCHALCH, V.; Avaliação de impacto ambiental de aterro de resíduos sólidos industriais: estudo de caso. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 18, Salvador, 1995. Anais. Rio de Janeiro: ABES, 1995. disquete 7/9. EESC/USP 0443.

51. PIMENTEL JUNIOR, A.C.; SCHALCH, V.; Codisposição de resíduos sólidos industriais classe II e III em aterro sanitário. In: Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental, 1/Simpósio do Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, 3, São Carlos, 1996. Anais. São Carlos: CRHEA, 1996. p.54-6. EESC/USP 0444.
52. ROMER, A.; Accident and Professor Röntgen. *American Journal of Physics*, 27, 275-277 (1959).
53. SEGRÈ, E.; *From X-Rays to Quarks*. New York: W.H. Freeman and Company (1980).
54. SERSALE, R.; AMICARELLI, V.; FRIGIONE, G.; UBBRIACO, P.; "A Study on the Utilization of an Italian Steel Slag". CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 8. Rio de Janeiro. 1986. Communications Theme 1 v. II. p. 194 – 198.
55. SHACKELFORD, J.F.; *Introduction to Materials Science for Engineers - 4th Ed.*, Prentice-Hall, 1996.
56. SILVA, J.S.; Estudo do reaproveitamento dos resíduos sólidos industriais na região metropolitana de João Pessoa (Bayeux, Cabedelo, João Pessoa e Santa Rita) – PB. Universidade Federal do Paraíba. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Dissertação de Mestrado. UFPB. 2004.
57. SILVA, H.V.O.; Programa de Gestão de Resíduos Industriais: Do Planejamento à Auditoria Ambiental. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000. Disponível em: <http://www2.ciesp.org.br/bolsa/index2.htm>. Acesso em: 01/02/2003.
58. Site: <http://www.physics.sfsu.edu/~dyamada/ph490/moss/aamoss.html>
59. SKOOG, D.A., LEARY, J.J.; *Principles of Instrumental Analysis*. 4th Ed. Sanders College Publishing, 1986.
60. TAKANO, C.; MOURÃO, M.B.; Self reducing pellets of wastes from iron ore sinter plant. In: International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes, 2, Scottsdale, 1996. Proceedings. Warrendale: Tms, 1996. p.791-9. EP/USP 0455.
61. TENÓRIO, J.A.S.; ESPINOSA, D.C.R.; PINI, R.A. Caracterização e Recuperação de Resíduos Sólidos contendo Metais. USP. 2004.
62. TIPLER, P.A.; *Física Moderna*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois (1981).
63. URENHA, L.C.; CHAVES, A.P.; Estado da arte da lixiviação bacteriana de metais: bactérias e parâmetros do processo. In: Seminário sobre Reciclagem de Rejeitos da Indústria Mínero-Metalúrgica, Ouro Preto, 1992. Reciclagem de Rejeitos da Indústria Mínero-Metalúrgica. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992. p.271-90. EP/USP 0456.
64. VANDENBERGHE, R.E.; *Mössbauer Spectroscopy and Applications Geology*; 2nd Ed.; 1991.
65. VAZ, T.; "Determinação de Minerais". Escola Nacional de Minas e Metalurgia. 1953.
66. VELLOSO, A.C.X.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; SOUZA, E.R.; BERBARA, R.L.L.; MAZUR, N.; Avaliação e Controle da Poluição do Solo, Sedimentos e Água pela aplicação de Fertilizantes, Corretivos e Resíduos Urbanos e Industriais. Departamento de Solos. Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 1994. disponível em: www.ufrj.br. Acesso em: 15/12/2002.

67. VERAS, M.R.V.; SCHALCH, V.; Utilização da técnica de aterros para resíduos sólidos industriais. In: Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 13, São Carlos, 1994. Anais. São Carlos: EESC-USP, 1994. p.56. EESC/USP 0457.
68. VIGOUREUX, P.; "Ultra-Sonics". Royal Naval Scientific Service. Ed. Chapman and Hall, 1942.
69. VINOGRADSKY, S.N.; Nitrification, Chemosynthesis and the Cycle of Life, 1875-1905; ACKERT, L. – Johns Hopkins University; Symposium: Aspects of Soil Science History; Soil Science Society of America; Annual Meeting; Charlotte Convention Center, Room 203A; October 22, 2001.
70. VIRTANEN, A.J.; ELLFOLK, N.; J. Am. Chem. Soc., 72:1046, 1950.
71. WAKSMAN, S. A.; My Life with the Microbes. New York. Simon & Schuster, 1954.
72. WATSON, E.C.; The Discovery of X-Rays. *American Journal of Physics*. 13, 281-291 (1945).