



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA
DE ANODIZAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA FABRICAÇÃO
DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MÉRCIA FRANCA DE CARVALHO

RECIFE, AGOSTO DE 2010

C331e **Carvalho, Mércia Franca de**

Estudo de reaproveitamento dos resíduos da indústria de **anodização do alumínio** para fabricação de isoladores elétricos de alta tensão **Mércia Franca de Carvalho**. – Recife: O Autor, 2010.

xiii, 75 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. **CTG**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. Resíduos Industriais. 3. Indústria de Anodização. 4. Reaproveitamento. 5. Alumina. 6. Isolador Elétrico. I. Título.

UFPE

621 CDD (22.ed.)

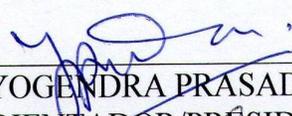
BCTIG/2010-100

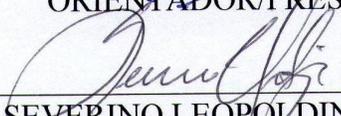
“ESTUDO DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE ANODIZAÇÃO DO ALUMÍNIO PARA FABRICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO”.

MÉRCIA FRANCA DE CARVALHO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE


Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA
ORIENTADOR/PRESIDENTE


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)


Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)


Prof. Dr. YEDA MEDEIROS BASTOS DE ALMEIDA (UFPE)

“Se queremos progredir, não devemos repetir a história, mas fazer uma história nova”.

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Deus criou o homem e concedeu-lhe a força do pensamento como veículo invisível que o conduz a locais aos quais deseja alcançar. Foi esta Energia que me guiou através dos meus passos, ajudando-me a conquistar todos os meus objetivos.

Aos meus pais pelos ensinamentos da formação de caráter e especial a minha querida mãe, Rivaldete Monteiro da Franca, que me mostrou através de suas ações o que é ser persistente e ter coragem para enfrentar os desafios. Aos meus irmãos pelo apoio e em especial as minhas irmãs Roseane Franca e Flávia Franca pelo apoio que me fortaleceu durante esta jornada. Agradecimentos também estendidos aos meus sobrinhos, Fabiana Carolini e Victor Hugo, e minha querida avó companheira, Daura de Oliveira Franca, “mamãe Daura”, *in memoriam*.

Ao meu amado filho, Tiago Franca de Carvalho, por seu carinho e por entender minha ausência na construção desta e por participar de minhas conquistas, sempre oferecendo o seu apoio com carinho, fazendo-me dividir com ele minhas vitórias profissionais e pessoais.

Ao professor e orientador, Dr. Yogendra Prasad Yadava, meus agradecimentos pela ajuda fundamental neste trabalho por sua paciência e seus sábios ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

A Eliane, Secretária da Pós-Graduação, e aos meus colegas de curso, Orlando, Diniz, Carlos, Pietro, Luiz, Timóteo, Lenita, Janaína e Ivaldo. E aos grandes amigos professores do IFPE da Coordenação de Desenho, João Carlos, Carlos Alberto, Jameson, Antônio Nóbrega, Edes, Henrique Moreira, Inaldo e Francisco, pela amizade e incentivo.

Aos meus amigos irmãos como Luciana Monteiro pelo seu apoio e estímulo para sempre seguir adiante. Farah Diba da Silva, que com sua orientação e estímulo me fez acreditar na realização deste trabalho. Everaldo Silva pelo companheirismo e respeito de verdadeiro irmão.

Agradecimentos ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos – LABEND - do Departamento de Engenharia Mecânica/CTG na pessoa do Prof. Dr. Armando Shinohara, pelo fornecimento das análises de difração de raios x e ensaios de dureza vickers nos corpos de prova cerâmicos.

Laboratórios de Solos e Instrumentação do Departamento de Engenharia Civil: Sr. Severino Costa da Silva, Gutenberg, Francisco da Silva, Antonio Brito. Ao Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM do Departamento de Engenharia de Minas: Marcelo Gomes.

A FACEPE, pelo apoio financeiro, durante a realização do Mestrado.

RESUMO

A anodização de alumínio e processos de revestimento de superfície é técnica comumente usada para produzir uma película decorativa e protetiva de alta qualidade. Estes processos demandam um grande consumo de água, e como consequência, tem-se a geração de expressivo volume de lodo industrial contendo quantidade significativa de hidróxido de alumínio coloidal, juntamente com o sódio, cálcio, sulfato de alumínio e água (entre 85-90%), resultando em uma problemática na eliminação destes resíduos industriais e a devida proteção ao meio ambiente. O alto teor de hidróxido de alumínio em resíduos industriais da anodização constitui um amplo atrativo para fabricação de produtos industriais cerâmicos. No presente trabalho, foram coletados os resíduos numa indústria de anodização de alumínio no nordeste do Brasil. Estes foram secos a temperatura de 200°C por um período de 24 horas para eliminação da água existente, que neste caso foi detectado uma umidade de 88% por peso com redução significativa do volume da massa. Na etapa seguinte, os resíduos secos foram calcinados a temperatura de 1000°C por um período de 24 horas para dissociação de substâncias químicas, ou seja, eliminação de impurezas; e na etapa final, estes foram calcinados a temperatura de 1400°C por um período de 48 horas com a finalidade de obtenção da maior porcentagem de alumina no material. Em todas as etapas de temperatura, os resíduos foram submetidos à apreciação estrutural e química através da análise de difratometria de raios x e fluorescência de raios x, em que nos quais se evidenciava um grande potencial de alumina. Após avaliação do resultado destes ensaios, verificou-se um crescimento gradativo da porcentagem de alumina, principalmente na de 1400°C que obtivemos aproximadamente 93% de alumina. Com a obtenção de uma massa cerâmica de alto teor de alumina, foram conformados corpos de prova de forma cilíndrica com 30 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Os mesmo foram submetidos aos ensaios cerâmicos, mecânicos e de medida elétrica. Após a obtenção de 93% de alumina no resíduo reciclado, o resultado da medida elétrica apresentou uma resistência elétrica volumétrica de aproximadamente $10^{14}\Omega\text{m}$, o qual é suficiente para a fabricação de isoladores elétricos. Com base nas análises realizadas foi possível constatar que o resíduo quando tratado resulta em uma matéria prima para a produção de isoladores elétricos de alta tensão.

Palavras-chave: resíduos industriais, indústria de anodização, reaproveitamento, alumina, isolador elétrico.

ABSTRACT

Aluminum anodizing and surface coating processes are commonly used techniques to produce a decorative and protective film of high quality. These processes require a large consumption of water and, consequently, generate a large amount of industrial sludge containing significant amount of colloidal aluminum hydroxide along with sodium, calcium, aluminum sulfate and water (between 85-90 %), resulting in the problematic elimination of industrial waste and proper environmental protection. The high content of aluminum hydroxide industrial anodizing waste has a large attraction for the manufacture of industrial ceramics. In this study, industrial wastes of an aluminum anodizing industry situated in northeastern region of Brazil were collected. These wastes were dried at 200°C for a period of 24 hours for removal of existing humidity, which in this case was detected to be 88% by weight of water with a significant reduction in the volume of the dough. In the next step, the dry residues were annealed at a temperature of 1000°C for a period of 24 hours for dissociation of chemicals and elimination of impurities. In the final stage, they were annealed at a temperature of 1400°C for 48 hours in order to obtain the highest percentage of alumina in the material. At all stages of heat treatment, residues were submitted to chemical and structural analysis by x-ray diffraction and x-ray fluorescence, which showed a great potential of alumina. After evaluating the results of these tests, we noted that there was a gradual increase in the percentage of alumina, especially at 1400°C approximately 93% of alumina. From the recycled alumina, test specimens of cylindrical shape with 30mm diameter and 5 mm thick were fabricated and submitted to the ceramic, mechanical and electrical measurements. Electrical measurements showed that these samples have a volumetric resistance of $\sim 10^{14}\Omega\text{m}$. Based on the analysis performed, we determined that the residue when treated results in a raw material for the production of high voltage electrical insulators.

Keywords: industrial waste, aluminum anodizing industry, reutilization, alumina, electrical insulator.

SUMÁRIO

REFLEXÃO	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xiii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Generalidades.....	01
1.2 Justificativa.....	04
1.3 Objetivos.....	06
1.3.1 Objetivo Geral.....	06
1.3.2 Objetivos Específicos.....	06
1.4 Estruturas da Dissertação.....	06
CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO TEÓRICO	08
2.1 Meio Ambiente e Resíduos Industriais.....	08
2.2 Reciclagem e Reaproveitamento.....	11
2.3 Indústria de Anodização do Alumínio.....	13
2.3.1 Anodização do Alumínio.....	14
2.4 Geração de Resíduos.....	15
2.5 A Alumina Industrial.....	16
2.6 Cerâmica Alumina.....	18
2.7 Processamento de Materiais Cerâmicos.....	20
2.7.1 Sinterização.....	23

2.7.2 Crescimento de Grão.....	24
2.7.3 Sinterização no Estado Sólido.....	25
2.7.4 Densificação.....	26
2.8 Isoladores Elétricos.....	27
CAPÍTULO 3 - TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ANODIZAÇÃO E METODOLOGIA.....	29
3.1 Processo de Anodização.....	30
3.1.1 Montagem das Gancheiras.....	30
3.1.2 Desengraxe (tanque N° 1).....	31
3.1.3 Lavagens (tanque N° 2).....	31
3.1.4 Lavagem dos Perfis (tanque N° 3).....	32
3.1.5 Fosqueamento (tanque N° 4).....	32
3.1.6 Lavagem Alcalina (tanque N° 5).....	32
3.1.7 Lavagem do Chassi (tanque N° 6).....	32
3.1.8 Neutralização (tanque N° 7).....	33
3.1.9 Lavagem dos Perfis (tanque N° 8).....	33
3.1.10 Anodização N° 1 (tanque N° 9).....	33
3.1.11 Lavagem Ácida (tanque N° 10).....	34
3.1.12 Anodização N° 2 (tanque N° 11).....	34
3.1.13 Anodização N° 3 (tanque N° 12).....	34
3.1.14 Lavagem Ácida (tanque N° 13).....	34
3.1.15 Lavagem Água Desmineralizada (tanque n° 14).....	35
3.1.16 Coloração (tanque N°15).....	35
3.1.17 Selagem 1 (tanque N° 16).....	35
3.1.18 Selagem 2 (tanque N° 17).....	36
3.1.19 Lavagem da Selagem (tanque N° 18).....	36
3.1.20 Lavagem de Água Quente (tanque N° 19).....	36
3.1.21 Secagem dos Perfis (tanque N° 20).....	36

3.2 Estação de Tratamento de Efluentes do Processo de Anodização (ETE).....	36
3.2.1 Equalização.....	37
3.2.2 Correção 1 e 2	37
3.2.3 Floculação.....	38
3.2.4 Decantação.....	38
3.2.5 Tanque de Saída.....	39
3.2.6 Condicionador de Lama.....	39
3.2.7 Prensagem da Lama.....	39
3.3 Caracterização do Resíduo.....	40
3.3.1 Coleta do Material na Indústria.....	40
3.3.2 Tratamento Térmico.....	41
3.3.3 Secagem.....	41
3.3.4 Calcinação.....	41
3.3.5 Cominuição.....	42
3.4 Confeção dos Corpos de Prova.....	42
3.5 Análises dos Índices Físicos e Químicos.....	44
3.5.1 Distribuição de Tamanho de Partículas.....	44
3.5.2 Densidade.....	46
3.5.3 Fluorescência de Raios X.....	46
3.5.4 Difração de Raios X.....	47
3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	47
3.6 Ensaio Cerâmicos.....	49
3.6.1 Absorção de Água (AA).....	49
3.6.2 Porosidade Aparente (PA).....	50
3.6.3 Dureza Vickers.....	50
3.6.4 Resistência Elétrica.....	51
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53

4.1	Introdução.....	53
4.2	Tratamento Térmico.....	53
4.2.1	Secagem.....	53
4.2.2	Calcinação.....	54
4.3	Distribuição de Tamanho de Partículas.....	56
4.4	Análises Químicas.....	57
4.4.1	Difração de Raios X.....	57
4.4.2	Análise de Fluorescência de Raios X.....	59
4.5	Análises Cerâmicas.....	60
4.5.1	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
4.5.2	Análises de EDS.....	62
4.5.3	Índices Físicos da Massa Cerâmica MF03.....	65
4.5.3.1	Absorção de Água (AA) e Porosidade Aparente (PA).....	65
4.5.4	Resistência Mecânica e Medida Elétrica.....	65
4.5.4.1	Análise de Microdureza.....	65
4.5.4.2	Resistência Elétrica.....	66
	CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	67
	CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	69
	CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxo da cadeia de produção do alumínio primário. Fonte: ABAL (2009).....	09
Figura 2.2 - Esquemática do processo de anodização. Fonte: Tecnoquim (2010).	15
Figura 2.3 - (A) Minério de bauxita; B) Alumina. Fonte: Lab. Trat. Mineral – UFPE (2009).....	16
Figura 2.4 - Prensagem uniaxial de pós cerâmicos. Fonte: Kingery (1960).....	22
Figura 2.5 - Efeito da pressão de conformação na densificação e retração volumétrica do BeO. Fonte: Kingery (1960).....	22
Figura 2.6 - Distribuição de pressão na compactação de pó em matriz cilíndrica a partir de uma extremidade. As linhas mostradas são de pressão constante (Kingery, 1960).....	23
Figura 2.7 - Desenho esquemático de um sólido policristalino. Fonte: Kingery (1960).....	24
Figura 2.8 - Sinterização em estado sólido (a) Partículas antes da sinterização com duas superfícies adjacentes (b) Após a sinterização os grãos são delimitados por um contorno. Fonte: Barros (2003).....	25
Figura 2.9 - Vias alternativas de transporte de material nos estágios iniciais da sinterização.....	26
Figura 3.1 - Fluxograma das principais etapas do processo de anodização.....	29
Figura 3.2 - Perfis metálicos na gancheira. Fonte Departamento de Materiais de Lisboa (2004).....	30
Figura 3.3 - Detalhe dos tanques de anodização. Fonte Anodilux (2005).....	31
Figura 3.4 - Estágio de crescimento da camada anódica. Fonte: ABAL (2005).....	34
Figura 3.5 - Representação esquemática da coloração do alumínio mediante	35

deposição de partículas metálicas nos poros. Fonte: ABAL (2005).....	
Figura 3.6 - Perfis metálicos anodizado. Fonte: Alcoa (2008).....	36
Figura 3.7 - Fluxograma da estação de tratamento de efluente (ETE).....	37
Figura 3.8 - Sistema de paleta giratória. Fonte: Alcoa (2008).....	38
Figura 3.9 - (A) Detalhe do tanque de decantação cheio de lodo; B) Detalhe do interior do tanque de decantação seco. Fonte: Alcoa (2008).....	38
Figura 3.10 - (A) Filtro prensa; (B) Detalhe das torneiras de saída de água do lodo; (C) Visão lateral de placas de lodo prensado no filtro; (D) Válvula de saída do lodo para o condicionador de lama; (E) Lodo prensado em filtro prensa. Fonte: Alcoa (2008).....	39
Figura 3.11 - Fluxograma do beneficiamento do lodo e das análises tecnológicas da massa cerâmica MF03.....	40
Figura 3.12 - A) Visão completa da estufa usada; B) Detalhe das bandejas cheias do lodo para secagem.....	41
Figura 3.13 - Moinho de Bolas Modelo MA-500.....	42
Figura 3.14 - Amostras de corpos de prova compostos de resíduo mais aditivo ADCER.....	43
Figura 3.15 - (A) Prensa MARCON - MPH-15 usada na confecção dos corpos de prova; (B) Corpos de prova sinterizados.....	44
Figura 3.16 - (A) Homogeneização da amostra para o ensaio granulométrico; (B) Ensaio granulométrico no equipamento de DTP.....	45
Figura 3.17 - Visão parcial do difratômetro utilizado.....	47
Figura 3.18 - Metalização.....	49
Figura 3.19 - Medida das diagonais de indentação em ensaio de dureza Vickers...	51
Figura 3.20 - Arranjo experimental para o método duas pontas (ou de dois terminais). Fonte: Giroto e Santos (2002).....	52

Figura 4.1 - (A) Lodo antes da secagem em estufa; (B) Lodo seco em estufa.....	53
Figura 4.2 - Gráfico da distribuição de secagem dos resíduos em temperatura de 200°C.....	54
Figura 4.3 - Tonalidade das amostras após os tratamentos térmicos.....	55
Figura 4.4 - Resíduo calcinado entre as temperaturas de 200°C e 1000°C.....	55
Figura 4.5 - Resíduos calcinados entre as temperaturas de 1000°C e 1400°C.....	56
Figura 4.6 - Distribuição do tamanho de partículas da amostra MF03.....	57
Figura 4.7 - DRX de resíduo tratado termicamente na temperatura de 200°C.....	58
Figura 4.8 - DRX de resíduo calcinado na temperatura de 1000°C.....	58
Figura 4.9 - DRX de resíduo calcinado na temperatura de 1400°C.....	58
Figura 4.10 - A) Foto micrografia da fratura do corpo de prova da massa cerâmica MF03; B) Foto micrografia em detalhe maior da fratura mostrando o ligamento das partículas pela sinterização.....	61
Figura 4.11 - A) Foto micrografia da superfície do corpo de prova da massa cerâmica MF03; B) Foto micrografia em detalhe maior da superfície mostrando o contorno de grãos.....	61
Figura 4.12 - A) Corpo de prova cerâmico da amostra MF03; B) Pontos de análise do EDS da fratura da massa cerâmica MF03.....	62
Figura 4.13 - Picos cristalográficos do ponto 1 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.....	63
Figura 4.14 - Picos cristalográficos do ponto 2 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.....	64
Figura 4.15 - Picos cristalográficos do ponto 3 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.....	64
Figura 4.16 – Curva de Medida de Duas Pontas da massa cerâmica.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Alta alumina, cerâmica de engenharia (classes A1 - A4, pelo menos, 99% Al_2O_3) e suas características. Fonte: Morrell (1987).....	20
Tabela 2.2 - Graus de pureza da alumina na engenharia A6 - A9 ($80\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 99\%$ como exigência) e suas características. Fonte: Morrell (1987).....	20
Tabela 3.1 - Especificações da espessura da camada anódica segundo a NBR12609 (2003).....	34
Tabela 4.1 - Análise semi quantitativa do lodo.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de Água
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CELESC	Centrais Elétricas Santa Catarina
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
C _u	Curva de Uniformidade Média
DEC	Duração da Interrupção Equivalente
DRX	Difratometria de Raios-X
ECO-92 (CNUMAD)	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
EDS	<i>Electronic Data Systems</i>
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
HV	<i>Vickers Hardness</i>
IEL	Instituto Euvaldo Lodi
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABEND	Laboratório de Ensaios Não destrutivos
Lab. Trat. Mineral	Laboratório de Tratamento Mineral
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MRN/ S.A	Mineração Rio do Norte Sociedade Anônima
NBR	Normas Brasileiras
PA	Porosidade Aparente
pH	Potencial Hidrogeniônico
psi	<i>pound force per square inch</i>
rpm	Rotação por Minuto
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A questão ambiental é uma preocupação que tem mobilizado a sociedade em busca de soluções alternativas como o reaproveitamento e reciclagem do crescente volume de resíduos que tem sido gerado principalmente pela demanda industrial de produtos de origem metálicas.

Com o advento da onda industrial, surgida a partir do século XVIII, o crescimento econômico em curto prazo vem a ser o objetivo principal mediante a utilização de novos processos produtivos e a exploração intensiva de energia e matérias-primas, cujas fontes eram consideradas ilimitadas. Este modelo gerou expressiva riqueza econômica, mas trouxe consigo graves problemas sociais e ambientais, entre eles os resíduos industriais de acordo com Toffler (1993).

Os resíduos fazem parte dos ciclos da natureza e da economia, mas o progresso econômico fez com que o desenvolvimento se acelerasse e como conseqüência o aumento da quantidade de resíduos, alguns difíceis de serem reciclados naturalmente. O descarte dos resíduos no ar, na água ou no solo, geralmente produz efeitos prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem. Esta problemática torna-se mais visível quando se trata de resíduos sólidos, pelo fato de seu grau de dispersão ser bem menor que dos líquidos ou gases, Mombach (2007).

O homem é um constante gerador de resíduos de todas as espécies, seja em casa, no escritório, na indústria, no comércio ou na oficina em que trabalha de acordo com Veiga (2004). Atualmente inúmeros resíduos são gerados e descartados erroneamente pelo homem. A gestão adequada destes resíduos reflete um equilíbrio entre a conservação de recursos naturais renováveis e não renováveis e o consumo.

Para garantir às gerações futuras um desenvolvimento sustentável é imprescindível utilizar racional e adequadamente a água, o solo, as plantas e os animais. Essa utilização deve estar relacionada com a necessidade de manter e renovar as fontes de recursos naturais, bem como limitar o lançamento de resíduos, de forma a não ultrapassar a capacidade de autodepuração do ambiente, causando poluição, conforme Milanez (2003).

Todo processo industrial está caracterizado pelo uso de insumos (matérias-primas, água, energia, etc.) que, submetidos a uma transformação, dão lugar a produtos, subprodutos e resíduos. O lixo gerado pelas atividades industriais é tecnicamente conhecido como resíduo e os geradores são obrigados a cuidar do gerenciamento, transporte, tratamento e destinação

final de seus resíduos, e essa responsabilidade é para sempre. A indústria é responsável por grande quantidade de resíduo: sobras de carvão mineral, refugos da indústria metalúrgica, resíduo químico e gás e fumaça lançados pelas chaminés das fábricas de acordo com Pombo e Magrini (2008).

A água é um fator essencial em todo o processo de anodização do alumínio. A demanda de água constitui um dos maiores desafios a serem enfrentados pela humanidade segundo Silva *et. al.* (2004), uma vez que a degradação do meio ambiente escasseia e contamina as reservas superficiais e subterrâneas de recursos hídricos. Dessa forma, o conceito de água como recurso inesgotável e gratuito passa por uma reflexão criteriosa.

A anodização é uma forma de oxidação manipulada do alumínio objetivando uma grande proteção na superfície dos perfis, como também, em alguns casos, coloração para efeito estético do produto. Esse tratamento requer a utilização de muita água e ácido sulfúrico, assim, é através do processo eletroquímico que se consegue o preenchimento dos poros do perfil, o que resulta em uma película monolítica e uniforme.

A reciclagem de resíduos é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesas em fonte de faturamento ou de redução das despesas de deposição. A incorporação de resíduos nos processos produtivos reduz custos e abre novas oportunidades de negócios, além de reduzir o volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados, Kniess (2005).

A preocupação da indústria mineral com a preservação do meio ambiente deriva do fato de que as atividades de lavra e processamento mineral são compostas por diversas etapas, às quais estão associadas algumas possibilidades de contaminação. A segregação dos resíduos na origem, ou seja, na fonte geradora, constitui aspecto extremamente importante, junto com o desenvolvimento dos procedimentos corretos no processo de classificação, elevando a potencialidade de reaproveitamento e reciclagem de um determinado resíduo, *apud* Guedes (2006, p. 27).

Desde março de 2005, quando o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) promulgou a resolução 357, que estabelece padrões de lançamento de efluentes em rios, as empresas começaram a procurar soluções para se adequar às novas diretrizes ambientais considerando afirmação de Ereno (2009). O Brasil começa a despertar, a partir da ECO-92, para a necessidade de conservação do meio ambiente, implementando instrumentos legais para resolvê-los e incentivando atividades que resultem em ganhos ambientais.

A atividade de reutilização de resíduos merece destaque, podendo ser considerada a opção mais interessante tanto sob o ponto de vista econômico como ambiental para Pires e

Mattiazzo (2005). É interessante destacar a diferença entre descarte e disposição de resíduos, uma vez que ainda existe muita confusão entre estes dois conceitos que, muitas vezes, são utilizados erroneamente. Descarte é definido como ato ou efeito de se livrar de alguma coisa que não tem mais serventia ou não se deseja mais ou, ainda, descarte é qualquer coisa que se encontre à parte, por ter sido rejeitada ou posta de lado.

Por outro lado, disposição é definida como colocação metódica, arranjo, posição ocupada por vários elementos, forma de emprego e uso. Portanto o descarte de resíduos não é desejável, pois este é feito de maneira aleatória, cujo maior interesse é se livrar do resíduo. Já no caso da disposição, a ação é realizada de maneira ordenada e o objetivo é utilizar o resíduo e não apenas eliminá-lo conforme Pires e Mattiazzo (2005).

O desenvolvimento industrial seguido do crescimento populacional nas últimas décadas promoveu riscos imensuráveis ao meio ambiente. O fato de um resíduo ser considerado perigoso não exclui a possibilidade de reciclá-lo. Dependendo da propriedade que conferiu ao resíduo esta classificação, pode-se avaliar a possibilidade de realizar pré-tratamento do resíduo, adequando-o para o uso desejado de acordo com Pires e Mattiazzo (2005).

As indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem, em maior ou menor grau, certa quantidade de resíduos que nem sempre são reaproveitados ou têm um destino ecologicamente correto. Dar um destino correto a estes subprodutos constitui-se em um grande desafio. Em alguns casos, estes produtos secundários podem ser reutilizados diretamente ou podem ser aproveitados como matéria-prima básica em outros processos industriais, de acordo com o preconizado pela ISO 14040 (1997).

O aproveitamento dos resíduos gerados pode trazer benefícios interessantes, tanto do ponto de vista ambiental como também na redução da criação e utilização de aterros; nos gastos com acondicionamento e transporte; na redução da utilização dos recursos naturais e na diminuição dos riscos ambientais proporcionados por esses resíduos de acordo com SEBRAE (2006, p.11).

A utilização dos resíduos do processo de anodização para reciclagem vem desenvolvendo, a cada dia, novas alternativas de produtos cerâmicos, através de pesquisas e conhecimentos científicos. Com a evolução das pesquisas sobre esse material, tem-se conquistado, em sua composição, alumina de alto teor de pureza, sendo um elemento de larga aplicação na indústria cerâmica por apresentar propriedades elevadas em resistência elétrica, mecânica e de refratariedade.

1.2 Justificativa

Esta dissertação aborda o lodo resultante do tratamento das águas de lavagem dos tanques do processo de anodização do alumínio, e que mesmo após ter passado por uma prensa, retém grande quantidade de água, em torno de 88% da amostra estudada, resultado este confirmado através do tratamento térmico de secagem. Tanto o lodo quanto o efluente resultantes do processo de prensagem são ricos em metais, este último é lançado no meio ambiente sem nenhum tratamento, pois o mesmo requer altos custos financeiros para a minimização do impacto ambiental.

O tradicional uso de filtro prensa no início da etapa do tratamento desse rejeito em forma de lodo é o beneficiamento físico gerador de maior volume de rejeito sólido, objeto de estudo da pesquisa e um antigo passivo ambiental depositado em aterros.

Indústrias nesse segmento tendem a ser grandes colaboradoras de poluição ao meio ambiente, pelo fato do descarte das águas de anodização que muitas vezes, apenas pelo tratamento de equalização do pH, mostram de maneira bastante explícita a falta de um tratamento específico contaminando o meio ambiente. Efluentes contendo metais ao serem lançados em áreas de mangues e rios contaminam seres aquáticos como ostras, consideradas seres “filtrantes”, que venham a ser consumidas pelo ser humano causando assim, grandes prejuízos a saúde humana.

A indústria do setor, no Brasil, na sua maioria, não tem sistemas de quantificação do resíduo produzido, mas ela estima que é gerada uma quantidade proporcional ao volume de alumínio anodizado. Assim, para cada tonelada de alumínio anodizado uma (01) tonelada de lama é gerada considerando afirmação de Ribeiro *et. al.* (2002). De acordo com os dados da Associação Brasileira de Alumínio (2005), em 2004, a produção de alumínio primário foi de 1.318 toneladas. A lama da anodização do alumínio normalmente não recebe nenhum tratamento, mas a maioria das empresas deposita os resíduos em contentores porosos em locais externos para diminuir a umidade que pode alcançar valores da ordem de 85% em peso reduzindo drasticamente o volume do resíduo gerado.

Diante deste cenário, justifica-se esta dissertação por suas múltiplas razões ambientais e econômicas, pois não se pode deixar de destacar que o benefício inquestionável da reciclagem de resíduos é a minimização do problema ambiental que representa o descarte inadequado destes. Além disso, a longevidade de aterros urbanos e/ou industriais é bastante limitada, principalmente devido à grande quantidade de resíduos gerada. Com isto a

comunidade acadêmica tem sido uma grande colaboradora para a busca de alternativas e soluções para a minimização deste impacto ambiental.

Muitas vezes, uma empresa quer tratar os seus resíduos e há uma consciência do gerador neste sentido, mas todo tratamento de resíduos, ou grande parte dos tratamentos de resíduos, representa custo. Mesmo a reciclagem gera custo e isso significa que, se uma determinada empresa fizer o tratamento e o seu vizinho ou competidor não o fizer, isto colocará a primeira empresa numa posição de menos competitividade no mercado, segundo Cavalcanti (1998).

Seguindo o mesmo raciocínio, fica claro que as indústrias precisam utilizar parte de seus recursos para financiar a disposição dos resíduos, principalmente para atender às novas exigências impostas pela legislação ambiental. Vale então afirmar que o reuso dos resíduos é interessante tanto sob o ponto de vista ambiental, como sob o ponto de vista econômico, quando há o compromisso de todas as empresas neste sentido.

Neste prisma entende-se que o reaproveitamento do lodo para produção de isoladores elétricos de alta tensão é pertinente em seu valor ambiental, econômico e, principalmente, enquanto produto elétrico. Lavieri (2010) destaca que os isoladores elétricos são componentes cujos processos de engenharia, produção, testes e aplicação em campo são muito mais complexos do que se pode julgar em um primeiro olhar. Presentes em todas as subestações, usinas e equipamentos elétricos de relevância no sistema, os isoladores fazem mais do que revela seu nome. Isso em qualquer nível de tensão, da baixa até os 800.000 Volts no caso do Brasil ou 1.000.000 Volts em alguns sistemas asiáticos.

Os isoladores atuam como suportes mecânicos e ao mesmo tempo atuam na isolação das principais estruturas e equipamentos elétricos de qualquer instalação, muitas vezes sujeitos a cargas mecânicas contínuas de mais de meia tonelada de peso. Em paralelo, devem ser capazes de suportar continuamente os campos elétricos aos quais estão expostos e suas perturbações pré-definidas. Da mesma forma, devem suportar distúrbios meteorológicos (chuvas, vendavais, granizo) dentro de seus limites de projeto, ataques por contaminantes (sal, maresia, poluição), ataques de fungos nas regiões de alta umidade como a floresta amazônica, e ainda estão expostos a vandalismo, segundo Lavieri (2010).

Lavieri (2010) afirma existir uma tendência natural que muitas vezes leva os técnicos do setor elétrico a não priorizarem a importância que os isoladores elétricos possuem no desempenho dos sistemas de energia. Afinal de contas, especialmente quando se fala de isoladores de porcelana usados em subestações de alta tensão (como suportes de barramentos ou parte integrante de todos os equipamentos elétricos ali usados, como disjuntores, chaves

seccionadoras, transformadores etc.), ou seja, componentes de elevadíssima robustez elétrica e mecânica, estáticos e que parecem não ter a mesma complexidade estrutural de outros componentes da instalação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo é reaproveitar o lodo do processo de anodização do alumínio, transformando-o em uma nova matéria-prima para fabricação de isoladores elétricos de alta tensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Fomentar o aproveitamento do lodo das águas de lavagem dos tanques de anodização dos perfis de alumínio;
- Tratar termicamente esse lodo, a fim de se obter o resíduo seco a ser analisado como matéria-prima para a indústria cerâmica;
- Qualificar e quantificar o lodo produzido pela indústria de anodização de perfis metálicos;
- Caracterizar química e mineralogicamente o lodo como matéria prima para a indústria cerâmica;
- Analisar a granulometria da matéria-prima desenvolvida, para a verificação das resistências mecânicas no corpo de prova a desenvolver;
- Confeccionar corpos de provas através de conformação na prensa hidráulica;
- Analisar a microestrutura de corpo de prova sinterizadas por microscopia eletrônica de varredura e identificar os elementos através do EDS;
- Especificar a microdureza dos corpos de prova produzidos pela matéria-prima resultante do lodo;
- Analisar a resistividade elétrica do corpo de prova através da medida de duas pontas;
- Minimizar o volume de rejeito industrial no meio ambiente com o uso desse resíduo como matéria prima para a indústria cerâmica.

1.4 Estruturas da Dissertação

A estrutura desta dissertação está dividida da seguinte forma:

No capítulo 1 é discutida a questão ambiental pelo acúmulo de rejeito industrial lançado no meio ambiente. Indústrias no segmento de anodização do alumínio tendem a ter uma expressiva colaboração na poluição ao meio ambiente, pelo descarte das águas de anodização sem um tratamento específico, na ausência da preocupação do destino ecologicamente correto do rejeito tanto sólido quanto líquido. A alternativa apresentada neste trabalho que justifica a viabilização do rejeito (lodo) como matéria prima para a indústria cerâmica na fabricação de isoladores elétricos de alta tensão, é principalmente ao fato do mesmo ser rico em alumina.

O capítulo 2 é destinado ao enquadramento teórico, onde são apresentados os pensamentos dos autores sobre resíduos e meio ambiente, reciclagem, anodização do alumínio e isoladores elétricos. Enfatiza-se o fato de as indústrias se instalarem nas margens de áreas fluviais (mangues, rios, etc.) facilitando assim, o descarte de seus efluentes e conseqüentemente contaminando a vida aquática. A indústria de cerâmica avançada necessita de alumina oriunda principalmente da exploração da bauxita, mas a aplicação da matéria-prima transformada a partir do rejeito de anodização minimiza a exploração do minério de bauxita e reduz significativamente impactos ambientais. Conclui-se que a reciclagem é o termo geralmente utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto.

No capítulo 3 são tratados os materiais e os métodos adotados para a caracterização do lodo como resultado das águas de lavagem dos tanques de anodização de perfis metálicos, através dos tratamentos térmicos com temperaturas de secagem desses resíduos a 200°C e calcinação de 1000°C e 1400°C obteve-se material cerâmico denominado de alumina (Al_2O_3). O resíduo após o processo de calcinação foi submetido à fluorescência de raios X, difração de raios X e análise granulométrica. Como resultado prático destes procedimentos foi projetado como novo produto um isolador elétrico de alta tensão, sob os enfoques ambientais e tecnológicos.

No capítulo 4 é feita a exposição dos resultados e discussões das análises dos resíduos e ensaios tecnológicos nos corpos de prova moldados para conhecimento das propriedades mecânicas e elétricas. A identificação dos compostos químicos do resíduo como rejeito industrial é importante, devido a possibilidade de seu reconhecimento como matéria prima para a fabricação de isolador de alta tensão.

Concluindo, no capítulo 5 traz as conclusões referentes aos resultados desenvolvidos na massa cerâmica MF03. Logo após, tem-se as referências bibliográficas dos autores consultados que embasaram teoricamente a pesquisa.

CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Meio Ambiente e Resíduos Industriais

A atividade que visa à descoberta de minérios denomina-se prospecção mineral e, de acordo com Alves e Barbosa (2009), geralmente é realizada em três etapas sucessivas. A primeira fase envolve o reconhecimento geológico para seleção de alvos; na segunda fase são feitos estudos detalhados dos alvos; e por fim, na última fase, o alvo é avaliado em termos econômicos.

A avaliação da potencialidade do depósito mineral depende de vários fatores, mas principalmente de volume significativo e de teor adequado do minério para garantir seu suprimento a longo prazo. Afirmam Alves e Barbosa (2009) que o minério é definido em bases econômicas e representa agregado de minerais de ocorrência natural, a partir do qual uma ou mais substâncias úteis podem ser extraídas com expectativa de lucro.

Outros fatores devem ser levados em consideração para viabilidade do depósito mineral, por exemplo, localização do corpo mineralizado, disponibilidade de energia elétrica e água, infra-estrutura da região, mão-de-obra, custos de extração, preço do minério, meios de transporte, oferta e demanda do mercado, taxaço governamental, questões políticas e sociais e impacto ambiental.

É necessário, na maioria dos casos, que o minério seja submetido a processos industriais que permita sua utilização. A tecnologia empregada no beneficiamento de minérios depende das propriedades do material, como composição mineralógica do agregado, dimensões e forma das partículas minerais, subprodutos associados e impurezas indesejáveis.

Deste modo, Alves e Barbosa (2009) conceituam que o beneficiamento de minérios consiste na obtenção do concentrado e do rejeito, através de operações que envolvem cominuição (moagem), classificação por tamanho, separação, desaguamento e secagem. O concentrado é um produto com elevado teor da substância de interesse e com especificação apropriada.

A Associação Brasileira de Alumínio (2009) destaca que a obtenção do alumínio é feita a partir da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três principais grupos climáticos: o Mediterrâneo, o Tropical e o Subtropical. A produção mundial de bauxita em 2004 foi de 157,4 milhões de toneladas, sendo os principais países produtores Austrália, Brasil, Guiné e Jamaica. Ocupando a 2ª posição no ranking mundial, em 2004, o Brasil

produziu 21 milhões de toneladas de bauxita. Possui também a terceira maior reserva mundial de bauxita, cujo potencial é da ordem de 2,5 bilhões de toneladas, concentrada principalmente na região Norte do país (estado do Pará), a qual tem como principal concessionária a empresa Mineração Rio do Norte S.A. - MRN.

A ABAL (2009) considera ainda que a bauxita deva apresentar no mínimo 30% de alumina aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. O processo de obtenção de alumínio primário divide-se em três etapas: Mineração, Refinaria e Redução, conforme a figura 2.1.

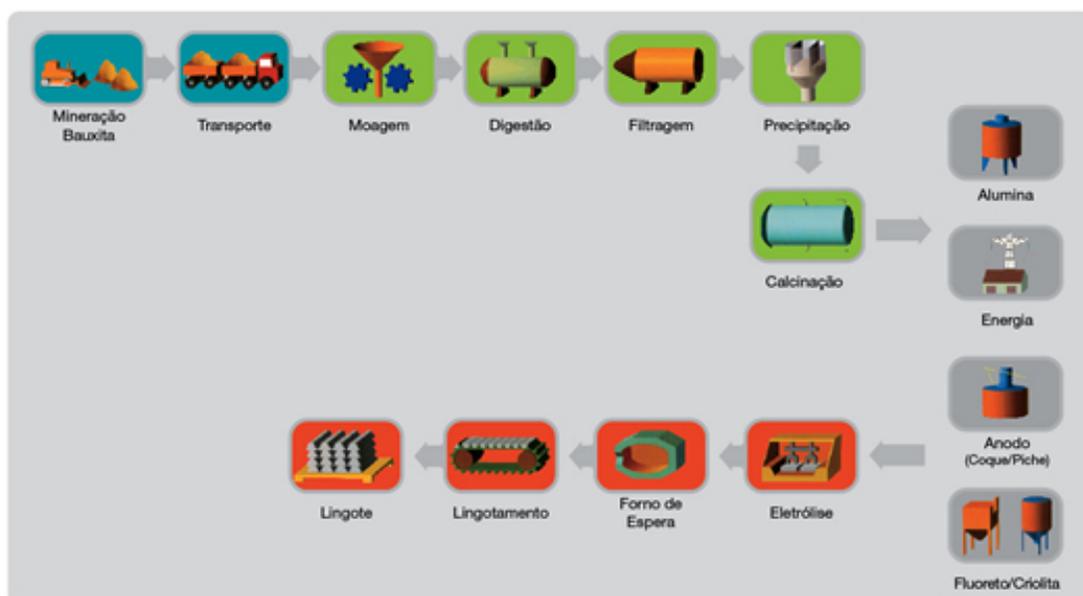


Figura 2.1 – Fluxo da cadeia de produção do alumínio primário. Fonte: ABAL (2009).

Na implantação e operação de indústrias, Pombo e Magrini (2008) destacam que é importante considerar que a utilização das potencialidades advindas dos recursos ambientais é um benefício inquestionável e único, mas precisa ser acompanhada do uso racional sendo por isso fundamental a redução e o controle do lançamento de efluentes industriais no meio ambiente, como uma das formas de cooperação e participação no desenvolvimento sustentável. Cabe ao setor industrial a responsabilidade de minimizar ou evitar que o processo produtivo acarrete em impactos ambientais.

Preconiza a Norma ISO 14001 que impacto ambiental é qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização. Juridicamente, o conceito de impacto ambiental refere-se exclusivamente aos efeitos da ação humana sobre o meio ambiente. Portanto, fenômenos

naturais como tempestades, enchentes, incêndios florestais por causa natural, terremotos e outros, apesar de provocarem as alterações ressaltadas não caracterizam um impacto ambiental (ABNT, 2004).

Um exemplo desse evento gerado pelas atividades industriais, através das emissões gasosas, é a chuva ácida, o que significa a queima do carvão e de combustíveis fósseis e os poluentes industriais que lançam dióxido de enxofre (SO₂) e de nitrogênio (NO₂) na atmosfera. Esses gases combinam com o hidrogênio presente na atmosfera sob a forma de vapor de água. O resultado são as águas de chuva, assim como a geada, neve e neblina, que ficam carregadas de ácido sulfúrico e/ou ácido nítrico, ambos extremamente tóxicos. Ao caírem nas superfícies, alteram a composição química do solo e das águas, atingem as cadeias alimentares, destroem florestas e lavouras, atacam estruturas metálicas, monumentos e edificações.

Indústrias de anodização tendem a se instalarem às margens de áreas fluviais, facilitando assim o descarte dos efluentes no meio ambiente (mangues, rios), este tipo de poluição acarreta na contaminação das águas e do solo com metais. Fatos de contaminação com metais foram comprovados junto à cidade de Pombal (Portugal), que se encontram instaladas duas indústrias de anodização às margens do Rio Arunca, conforme Pinto (2000).

O lançamento indevido de efluentes industriais de diferentes fontes ocasiona, de acordo com Pombo e Magrini (2008), modificações nas características do solo e da água, podendo poluir ou contaminar o meio ambiente. A poluição ocorre quando esses efluentes modificam o aspecto estético, a composição ou a forma do meio físico, enquanto o meio é considerado contaminado quando existir a mínima ameaça à saúde de homens, plantas e animais.

O resíduo industrial originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: o metalúrgico, o químico, o petroquímico, o de papelaria, da indústria alimentícia etc., é bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas segundo Vieira (2009).

A indústria elimina resíduo por vários processos. Certos resíduos perigosos são jogados no meio ambiente, precisamente por serem tão danosos na expectativa de que o ambiente absorva as substâncias tóxicas. Porém, Pombo e Magrini (2008) analisam que essa não é uma solução segura para o problema, já que muitos metais e produtos químicos não são naturais, nem biodegradáveis. Em consequência, quanto mais se enterram os resíduos, mais os ciclos naturais são ameaçados, e o ambiente se torna poluído. Atualmente, há mais de 7

milhões de produtos químicos conhecidos, e a cada ano outros milhares são descobertos. Isso dificulta, cada vez mais, o tratamento efetivo do resíduo.

A destinação, tratamento e disposição final de resíduos devem seguir a NBR 10.004 (ABNT, 2004) que classifica os resíduos conforme as reações que produzem quando são colocados no solo: perigosos (Classe 1- contaminante e tóxica); não-inertes (Classe 2 - possivelmente contaminantes); inertes (Classe 3 – não contaminantes).

No entendimento de Pombo e Magrini (2008) os resíduos das Classes I e II devem ser tratados e destinados em instalações apropriadas para tal fim. Por exemplo, os aterros industriais precisam de mantas impermeáveis e diversas camadas de proteção para evitar a contaminação do solo e das águas.

O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões fatais ao ambiente. Nele estão incluídos produtos químicos (cianureto, pesticidas, solventes), metais (mercúrio, cádmio, chumbo) e solventes químicos que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados. Os resíduos sólidos são amontoados e enterrados; os líquidos são despejados em rios e mares; os gases são lançados no ar. Assim, a saúde do ambiente, e conseqüentemente dos seres que nele vivem, torna-se ameaçada, podendo levar a grandes tragédias conforme Cavalcanti (1998).

Coelho (2002) afirma que a destinação final de todos os resíduos sólidos, ecologicamente aceitos, é em aterro sanitário. No Brasil, a produção diária, em 2002, de resíduos sólidos era de, aproximadamente, 125 mil toneladas, e apenas 20% destes tinham o seu destino final em aterro sanitário. O processo de tratamento de efluentes industriais gera um resíduo sólido (lodo), que geralmente é disposto num aterro industrial, o que pode acarretar ao longo do tempo, danos ao meio ambiente. A tecnologia de conversão à baixa temperatura tem sido estudada em escala laboratorial como alternativa tecnológica para o reaproveitamento do lodo residual gerado, obtendo a partir dele carvão, óleo e gás, todos combustíveis.

2.2 Reciclagem e Reaproveitamento

O reaproveitamento de materiais, ou de rejeitos industriais, através do beneficiamento, transformando em matéria prima para um novo produto oportuniza a viabilidade econômica para a indústria, que antes necessitava empregar recursos financeiros da indústria para o descarte ambientalmente correto. De acordo com Antunes (2001), materiais não biodegradáveis demoram a realizar sua decomposição, como exemplo os derivados da borracha, derivados de metal, papel, plástico e vidro. A reciclagem é importante,

pois é uma forma de reduzir o número e o acúmulo de resíduo no meio ambiente. Além disso, a reciclagem ajuda economicamente, porque preserva os recursos naturais, além de gerar empregos, segundo Antunes (2001).

Na Europa, conforme Cavalcante (1998), a situação dos resíduos é caracterizada por uma forte preocupação em relação à recuperação e ao reaproveitamento energético. A dificuldade de geração de energia, devida aos escassos recursos disponíveis e aliada a um alto consumo energético, favorece a estratégia de reciclagem dos materiais e seu aproveitamento térmico. O autor acima menciona que na indústria do alumínio, por exemplo, 99% dos resíduos da produção são reutilizados, enquanto a indústria de plástico chega a 88% de reaproveitamento de suas sobras. Do total de resíduos municipais europeus, perto de 24% são destinados à incineração, sendo 16% com reaproveitamento energético.

Segundo Antunes (2001) dentre os possíveis tratamentos de um resíduo, a reciclagem é um dos principais fatores considerados, podendo segundo a natureza do mesmo, fazer parte de um ciclo aberto de reciclagem onde o material rejeitado é processado que ao final possuirá características diferentes do produto original (surge um produto novo), os três principais tipos de reciclagem são: a química, a energética e a mecânica.

Os dados econômicos declarados pela ABAL (2009) apontam que em 2007, o Brasil reciclou 324 mil toneladas de alumínio, ficando acima da média mundial, que é de 29,3%. Na reciclagem de latas de alumínio para bebidas, o País reciclou 160,6 mil toneladas de sucata, o que corresponde a 11,9 bilhões de unidades, ou 32,6 milhões por dia ou 1,4 milhão por hora. Pelo sétimo ano consecutivo, o país lidera a reciclagem de latas de alumínio para bebidas, entre os países em que a atividade não é obrigatória por lei – como no Japão, que em 2007 reciclou 92,7% de latas; Argentina (90,5%) e Estados Unidos (53,8%) – e entre países europeus, cuja legislação sobre reciclagem de materiais é bastante rígida apresentaram um índice médio de 57,7%.

Sousa (2003) analisa em seus estudos que até meados do século XX a indústria mundial dispunha de matéria-prima em abundância. Nas últimas décadas, porém, o setor industrial deparou-se com leis ambientais e incumbências sociais mais conscientes e isto aliado à crescente escassez de matérias-primas propiciaram a percepção de que grande parte dos resíduos é susceptível a um novo uso, seja como matéria-prima ou como fonte energética. No Brasil, o planejamento e a fiscalização do uso racional dos recursos naturais tornaram-se

obrigação a partir de 31 de agosto de 1981, com a implantação da lei nº 6.938¹. A ideia era fomentar pesquisas que contribuíssem para gestão do meio-ambiente e assim manter um equilíbrio ecológico propício à vida.

Para Sousa (2003) a aplicação de resíduos industriais em aglomerantes hidráulicos (cimento, asfalto, etc.) e em peças cerâmicas é um exemplo de valorização do resíduo e de preocupação com o meio ambiente. Entretanto, aproveitamentos como estes ainda não atingiram níveis expressivos, mesmo sendo claramente viáveis técnica e economicamente. Apenas 14,2% da 1, 875 milhões de toneladas de vidro produzidas no Brasil acabam sendo reaproveitadas por meio de reciclagem, apesar da grande economia de combustível e de tempo oferecida por esse processo. Tais exemplos devem-se ao fato de que além de conhecimentos técnicos, o reaproveitamento requer interesse direto tanto do governo quanto das indústrias, manifestando-se com investimentos em implantação, pré-tratamento (separação, moagem, fluidificação), pesquisas, entre outros. Em linhas gerais, as vantagens do aproveitamento de resíduos são: disponibilidade de recursos, desenvolvimento de materiais alternativos, resgate do investimento contido no próprio resíduo e a melhora da imagem da empresa perante seu público alvo ou a sociedade.

2.3 Indústria de Anodização do Alumínio

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Mesmo utilizado milênios antes de Cristo, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Esses dados já mostram a importância do alumínio para a nossa sociedade. Antes de ser descoberto como metal isolado, o alumínio acompanhou a evolução das civilizações. Sua cronologia mostra que, mesmo nas civilizações mais antigas, o metal dava um tom de modernidade e sofisticação aos mais diferentes artefatos de acordo com a ABAL (2005).

Hoje, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores mundiais de alumínio. Entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio, conforme ABAL (2005). Possui grande importância econômica para o Brasil, que detém a terceira maior reserva do mundo, com 3,9 bilhões de toneladas. O Estado do Pará conta com uma das mais extensas reservas

¹ Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, segundo BRASIL (1981)

mundiais, nas regiões próximas aos municípios de Oriximiná e Paragominas, cujo potencial é da ordem de 1,5 bilhões de toneladas deste minério de acordo com Reis (2006).

A indústria brasileira do alumínio vem crescendo com a utilização sustentável do grande potencial mineral do Brasil. Enquanto produzem um dos metais mais utilizados na vida moderna, as empresas do setor atuam de forma responsável nos aspectos econômico, social e ambiental, minimizando impactos negativos e multiplicando os benefícios gerados pela atividade. Reis (2006) ainda afirma que o volume de alumínio produzido no mundo está estimado em aproximadamente 30.000.000 de toneladas por ano. No Brasil há grande disponibilidade do metal, sendo produzidas anualmente cerca de 1.300.000 toneladas. O consumo anual do país situa-se em torno de 800.000 toneladas.

O alumínio é considerado um material de alta resistência à corrosão. Sua superfície é facilmente recoberta por uma fina camada de óxido (alumina amorfa), a qual confere uma proteção natural contra os agentes corrosivos do ar. A camada de óxido de alumínio formada naturalmente tem espessura e dureza variável, sendo necessária para maioria das aplicações a formação de camadas mais espessas e protetoras, mediante processos químicos ou eletrolíticos, como por exemplo, a anodização, conforme Reis (2006).

Em relação às indústrias de anodização, os registros da ABAL (2009) apontam quatro empresas no ramo, duas localizadas no estado de São Paulo (Italtecno do Brasil e Companhia Brasileira de Alumínio), uma no estado de Goiás (Aluminium Goiás) e uma no estado de Pernambuco (Alcoa Alumínio Company).

2.3.1 Anodização do Alumínio

A anodização é um processo de oxidação forçada, com parâmetros eletroquímicos controlados, aplicados ao alumínio e suas ligas, com a finalidade de protegê-lo contra a ação de agentes oxidantes externos e eliminar irregularidades superficiais originadas por operações anteriores (conformação), proporcionando à superfície alta resistência à abrasão, corrosão e intempéries, além de conferir aspecto decorativo, facilitando a manutenção dos padrões idealizados nos projetos, concordando com Silva (1981); Metals Handbook (1987).

De acordo com Barbosa (2005) este método é utilizado para produzir uma película decorativa e protetiva de alta qualidade nas ligas de alumínio, servindo a uma gama de aplicações, algumas das quais bastante específicas, tais como camada protetora para refletores e capacitores eletrolíticos, anodização brilhante para frisos, anodização em cores para ornamentos e utensílios domésticos, anodização técnica (dura) para peças que estão sujeitas

ao desgaste por abrasão, e também anodização para fins arquitetônicos (janelas, portas, fachadas, etc.) na construção civil, figura 2.2.

Como visto, o processo deve ser mantido sob controle, pois segundo Barbosa (2005), se for feito de modo inadequado ocorrem defeitos no acabamento da superfície prejudiciais à sua aparência, resultando em uma má performance da camada anódica final. Para obtenção desse efeito decorativo e qualitativo devem-se tomar alguns cuidados quanto ao acabamento de superfície das peças, a estrutura metalúrgica das ligas utilizadas, ao pré-tratamento, a anodização, propriamente dita, e a selagem da camada anódica. Essa camada, por ser uma oxidação eletrolítica do próprio material, irá salientar os defeitos existentes ou mesmo revelar irregularidades que não são visíveis no metal bruto.

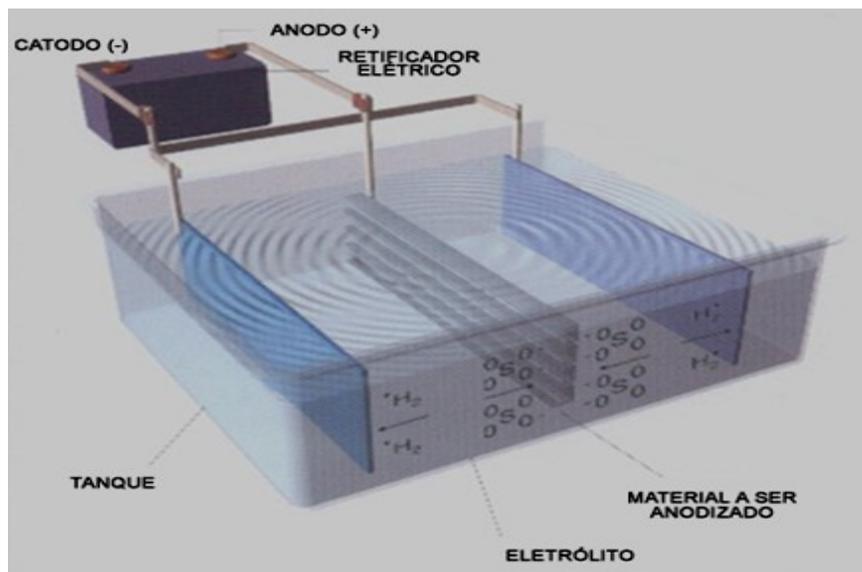


Figura 2.2 - Esquemática do processo de anodização. Fonte: Tecnoquim (2010).

Alguns processos de pré-tratamento disponíveis podem esconder ou eliminar a maioria das irregularidades superficiais, mas as condições metalúrgicas da liga não podem ser controladas pela anodização e dependem do processo utilizado na fundição do metal e do controle de processos de extrusão e de laminação durante a sua fabricação conforme ABAL (2005).

2.4 Geração de Resíduos

Os estudos de Sartor (2006) apontam que um dos resíduos pouco estudados é o lodo que resulta do processo de anodização do alumínio. O processo de reaproveitamento do lodo,

após o processo de calcinação, mostra um elevado percentual de alumina, matéria-prima utilizada em vários seguimentos da indústria cerâmica. Este lodo é constituído principalmente por hidróxido de alumínio (chegando a 72%), tendo sódio ou cálcio gerado das soluções de neutralização e como constituinte minoritário sulfato de alumínio usado como agente floculante e água.

Pesquisas reveladas por Ribeiro *et al* (2002) e Gomes *et al* (2002) são citadas por Sartor (2006) sobre a eficiência do uso desse resíduo como matéria-prima para a industrialização de produtos cerâmicos e entre as propriedades tecnológicas de grande interesse apresentam-se a elevada resistência elétrica, mecânica e refratariedade, obtidas através do controle da formulação inicial ou da sinterização.

2.5 A Alumina Industrial

Como já visto anteriormente o óxido de alumínio (Al_2O_3) é um composto químico de alumínio e oxigênio, também conhecido como alumina, figura 2.3. O óxido de alumínio é o principal componente da bauxita, principal minério de alumínio. Industrialmente, a bauxita é purificada em óxido de alumínio através do processo Bayer, e o óxido é depois convertido em alumínio metálico pelo processo Hall-Héroult. A bauxita é constituída por Al_2O_3 , Fe_2O_3 , e SiO_2 . O Fe_2O_3 não é solúvel e é retirado após filtragem.

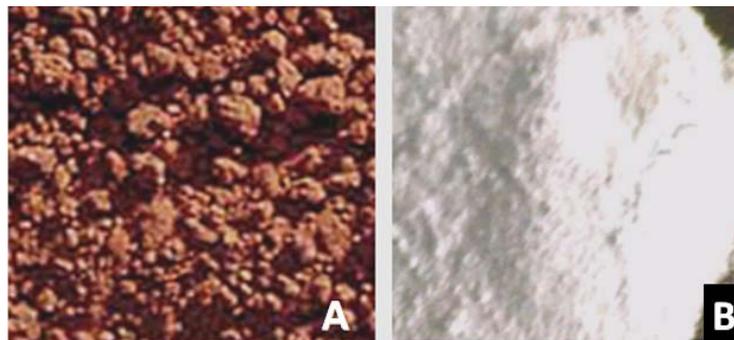


Figura 2.3 - A) Minério de bauxita; B) Alumina. Fonte: Lab. Trat. Mineral – UFPE (2009).

De acordo com Reis (2006), o Al_2O_3 obtido é a alumina que é produzida a partir do hidróxido de alumínio por hidroxilação, resultando em um material altamente poroso; tendo uma alta taxa de superfície por peso, figura 2.2. Este material pode ter uma área de superfície significativamente acima de 200 metros quadrados/grama, o que significa ter uma quantidade grande de poros muito pequenos, quase como túneis, que o atravessam.

O processo Bayer abrange etapas de moagem, digestão, clarificação/filtração, troca térmica, precipitação/evaporação e calcinação.

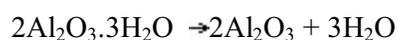
A moagem é a etapa de todo o processo Bayer, descrito pela indústria ALCOA Alumínios S.A. Nessa fase o objetivo é preparar o minério para iniciar suas transformações, até ser obtido na forma de hidróxido ou alumina. Inicialmente, o minério é destinado a um processo de homogeneização, chamado blendagem, ou seja, tornar a matéria-prima proveniente de várias jazidas diferentes, a mais adequada e homogênea possível ao processo de digestão. Com essa medida pretende-se assegurar que o minério que entrará no processo Bayer apresente, em média, 45% de alumina disponível e aproximadamente 4% de sílica reativa (caulinita), ALCOA (2009).

Calcinação é a etapa da obtenção de alumina. Converte o hidrato em uma mistura cristalina de formas alotrópicas de Al_2O_3 , ou uma fase específica. A alumina obtida deve atender as especificações de tamanho de partícula, granulometria, área superficial, perda ao fogo (LOI) e conteúdo de α -alumina desejada para o tipo que está sendo produzida. Além disso, a quantidade de sódio na alumina de grau metalúrgico deve ser baixa e a energia empregada na calcinação próxima à requerida para decomposição do hidrato.

Inicialmente, o hidrato recém-chegado da precipitação é lavado e filtrado nos filtros Dorrcos, seguindo para secagem, calcinação e posterior resfriamento.

Nos filtros Dorrcos, o conteúdo de sódio solúvel atinge valores próximos a 0,04%, restando um hidrato com umidade de aproximadamente 10%. A torta úmida é então levada a um secador que opera em leito fluidizado ($\sim 300^\circ\text{C}$) para remoção da água adsorvida. Dessa mesma forma, o hidrato é transportado por todo o sistema de calcinação para ser então, descarregado no forno e direcionado ao vaso de retenção (HV). Esse vaso opera com uma quantidade de alumina estocada, que se renova à medida que mais quantidade entra e outra quantidade sai.

As condições do forno e do vaso de retenção (HV) (nível e temperaturas de operação) ditam as características finais da alumina em produção, entretanto, pode-se afirmar que maiores temperaturas e níveis no HV apontam para produção de aluminas especiais, e o oposto remete à produção de alumina grau metalúrgico. As temperaturas podem variar de 950°C a 1250°C . Processos de calcinação são tipicamente reações que necessariamente englobam a decomposição de uma fase sólida em outra fase sólida e o desprendimento de gás/vapor. Dessa forma, a reação de calcinação em questão é a que está abaixo:



O produto calcinado e ainda parte do material não-calcinado percorre uma série de dutos e ciclones, onde há uma constante seleção granulométrica e as partículas consideradas finas são redirecionadas a outros ciclones para reclassificação. O material, depois de encerrada a etapa de calcinação, é enviado a um resfriador, para posteriormente ser ensacado / embarcado para distribuição, conforme ALCOA (2009).

De acordo com Reis (2006) para produção de alumina para cerâmica há necessidade de se introduzir algumas modificações no processo Bayer e no tratamento térmico, (temperaturas que variam de 1250 °C a 1500°C), visando principalmente reduzir o teor de Na₂O e controlar o tamanho e forma dos cristais que tem influência sobre as propriedades finais do produto cerâmico. Dessa forma são obtidos inúmeros tipos de óxidos de alumínio, cada um com determinadas características e campo de aplicações.

2.6 Cerâmica Alumina

A alumina tem ampla aplicação na fabricação de refratários, fibras cerâmicas e de inúmeros produtos classificados como cerâmica técnica, tais como: isoladores elétricos de porcelanas, placas para revestimento de moinhos e silos, elementos moedores (esferas e cilindros), guia-fios para a indústria têxtil, camisas e pistões de bombas, bicos de pulverização agrícola, tubos de proteção de termopar, selos mecânicos, parte cerâmica da vela de ignição, substratos para microeletrônica e outras. Reis (2006) afirma que no caso de aplicações que exigem aluminas isenta de impurezas, granulometria extremamente fina, tamanho e forma de grãos rigorosamente controlados, utilizam-se outras aluminas, obtidas por processos químicos não convencionais. Exemplos de aplicações: tubos de alumina translúcida para lâmpada de vapor de sódio, peças para implantes etc.

Estabilidade química e térmica, resistência relativamente boa, térmica e elétrica são características de isolamento combinado com a disponibilidade em abundância de Al₂O₃ óxido de alumínio, ou alumina, atraente para aplicações de engenharia. Em alto grau de sua utilização tradicional está em fins refratário clássico. No entanto, a pureza da alumina é o que irá qualificá-la para seu emprego na engenharia com pelo menos 80% (na maior parte pelo menos 90%), Al₂O₃ e com limite de porosidade. Na prática, a impermeabilidade em condições de temperatura ambiente exige que a total porosidade seja menor do que cerca de 6%, conforme Ryshkewitch (1960); Richerson (1982).

Alumina tem uma estrutura cristalina interna onde os íons de oxigênio são estruturados em forma de um cristal fechado hexagonal (CPH) de acordo com o alumínio (e outros metais) os íons em dois terços dos sítios octaédricos. Alumina deve ser o mais abundante na análise

de estequiometria, mas mesmo pequenos níveis de impurezas podem influenciar na alta temperatura. Alumina tem uma temperatura de fusão cerca de 2040°C, mas as impurezas e elementos de liga que formam fases secundárias podem derreter em temperaturas consideravelmente mais baixas, conforme, Auerkari (1996).

Na engenharia, o grau de pureza da alumina policristalino é feito geralmente por sinterização em altas temperaturas (> 1300°C). O processo de fabricação pode gerar defeitos que, através da tenacidade inicial à fratura irá limitar a resistência mecânica do corpo conformado. A resistência mecânica da alumina não é uma propriedade restritamente do material, mas dependente do volume (ou superfície tensionada, se os defeitos de superfície dominam), de acordo com Auerkari (1996).

A alumina é classificada em dois grupos principais, a primeira da qualidade de alta alumina Al₂O₃ com pelo menos 99% (Tabela 2.1) e o segundo com grau de pureza da alumina entre 80% e 99% Al₂O₃ (Tabela 2.2). Estes grupos principais podem ser subdivididos em subclasses de acordo com o tipo, grau de pureza e de serviço pretendido, conforme Morrell (1987).

A diferença entre as classes é principalmente na quantidade de impurezas e alguns deliberada dos agentes de liga, tais como a sinterização. Liga com outros óxidos não são necessariamente prejudiciais as propriedades mecânicas, mas em média as melhores resistências mecânicas e outras propriedades são vistas em séries de alta pureza de alumina. O primeiro grupo da Tabela 2.1 é geralmente caracterizado pela alta densidade (> 3,75 g/cm³), a altas temperaturas de sinterização na indústria transformadora (1500 - 1900°C) e é relativamente boa para o desempenho mecânico. As aluminas de grau inferior da Tabela 2.2 são mais baratas para produzir e, portanto, atraentes para os fins onde as propriedades são suficientemente aceitáveis, de acordo com Morrell (1987).

Tabela 2.1. Alta alumina, cerâmica de engenharia (classes A1 - A4, pelo menos, 99% Al₂O₃) e suas características. Fonte: Morrell (1987)

Grade	Al ₂ O ₃ min (%)	Tipo	Porosidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Aplicações
A1	99.6	Elétrica e engenharia	0,2 - 3	3.35-3.95	Estrutural
A2	99.8	Translúcido	<1	3.97-3.99	Lâmpadas
A3	99.5	Prensagem a quente	<1	3.90-3.99	Ferramentas de máquinas
A4	99.6	Sinterizado Recristalizado	3 – 6	3.75-3.85	Refratário
A5	99.0	Baixa perda dielétrica	1 – 5	3.76-3.94	Microondas

Tabela 2.2. Graus de pureza da alumina na engenharia A6 - A9 (80% ≤ Al₂O₃ ≤ 99% como exigência) e suas características. Fonte: Morrell (1987).

Grade	Al ₂ O ₃ (%)	Tipo	Porosidade (%)	Densidade (g/mm ³)	Aplicações
A6	96.5-99.0	Elétrica & engenharia	1 – 5	3.71 – 3.92	Mecânica e elétrica
A7	94.5-96.5	Elétrica & engenharia	2 - 5	3.60 – 3.90	Isoladores, partes desgastadas
A8	86.0-94.5	Elétrica & engenharia	2 - 5	3.40 – 3.90	Isoladores, partes desgastadas, refratários
A9	80.0- 86.0	Elétrica & engenharia	3- 6	3.30 - 3.60	Isoladores, partes desgastadas, refratários

2.7 Processamento de Materiais Cerâmicos

No estudo de materiais, independentemente de sua natureza (metais, polímeros ou cerâmicos), é indiscutível a dependência da qualidade do produto final em relação à qualidade das matérias primas e do processamento. Procura-se por isso a adequação de metodologia e controle de processo. No caso de materiais cerâmicos, o processamento e os tratamentos subsequentes terão forte influência na formação da microestrutura, que por sua vez é

constituída das fases presentes e dos defeitos cristalinos existentes na mesma e é determinante de muitas características do material, conforme Padilha (1998).

Conclui-se assim, o processamento de materiais cerâmicos, de um modo geral, envolve um pré-tratamento das matérias-primas que, no caso de cerâmicas avançadas, torna-se muitas vezes dispensável quando os precursores encontram-se na forma de pós finamente particulados e com grau de pureza desejável. A etapa seguinte consiste na mistura e homogeneização das matérias-primas e preparação da suspensão nas condições adequadas ao processo seguinte, o de conformação.

O processo de conformação pode ser realizado de inúmeras maneiras distintas. A escolha depende de fatores como custo, processabilidade da massa, forma do produto final e tempo de processamento. As etapas finais consistem de tratamento térmico e acabamento. O tratamento térmico pode ocorrer em mais de uma etapa e o acabamento pode incluir limpeza, polimento, pintura, etc.

A prensagem uniaxial é um método simples, de baixo custo e alta produtividade, porém restrito a peças de geometria simples. É largamente empregada na fabricação de cerâmicas eletrônicas e magnéticas especiais, tijolos refratários, ladrilhos, cerâmicas técnicas de um modo geral, bem como uma variedade de produtos de geometria simples de acordo com o Callister (1999); Kingery (1960). O processo é análogo à metalurgia do pó e consiste na compactação de um pó cerâmico seco ou levemente umedecido em uma matriz metálica sob uma pressão suficiente para que se obtenha uma peça resistente e densa. O grau de compactação é melhorado e a porção de vazio é reduzida quando do uso de partículas finas misturadas na proporção adequada com partículas menos finas.

A pressão é aplicada por um punção que é introduzido pela parte superior da cavidade da matriz que contém o pó. A parte inferior do molde é encerrada por um punção inferior, que após a prensagem se desloca, permitindo a retirada da peça. A figura 2.3 mostra com clareza o processo. O efeito da pressão de moldagem na compactação do pó está exemplificado na figura 2.4 para o BeO. A figura mostra que há um limite (10.000 psi) a partir do qual um acréscimo na pressão exercerá pouco ou nenhum efeito sobre a compactação do pó, Kingery (1960).

Conforme Kingery (1960) além de aumentar a resistência mecânica do corpo verde, um aumento na compactação reduzirá a retração de queima (redução de volume) para se atingir uma mesma densificação. Assim, o controle do processo de queima se torna mais simples e evita problemas de deformação e outros defeitos.

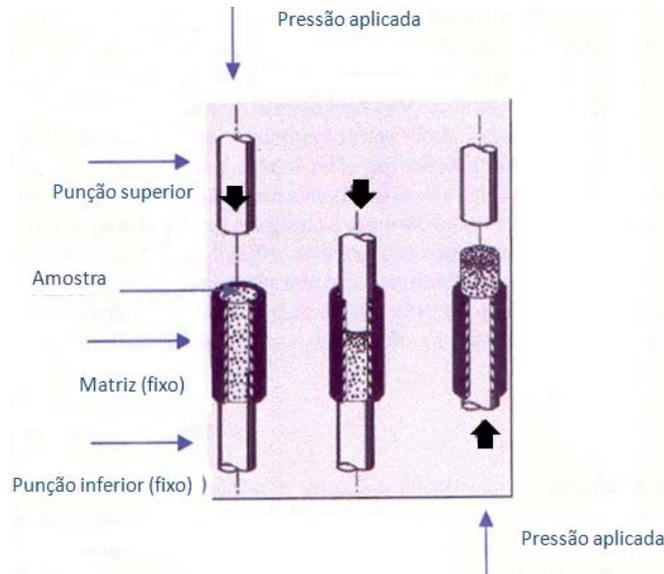


Figura 2.4 - Prensagem uniaxial de pós cerâmicos. Fonte: Kingery (1960).

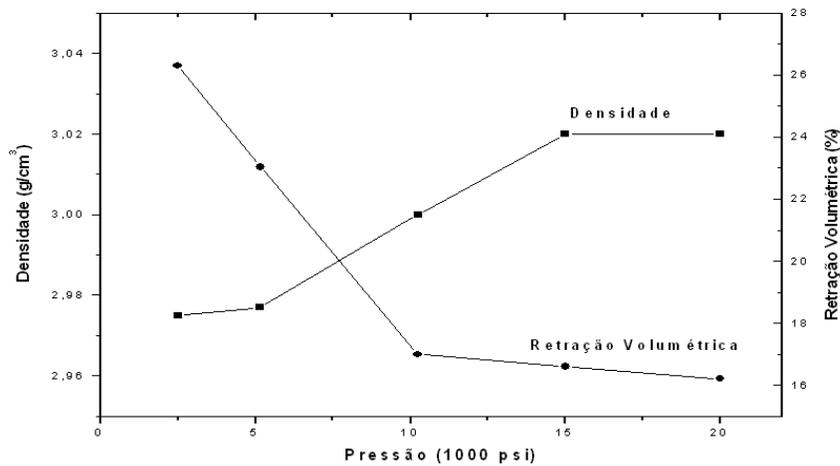


Figura 2.5 - Efeito da pressão de conformação na densificação e retração volumétrica do BeO. Fonte: Kingery (1960).

Uma das limitações da conformação a seco está na relação comprimento x diâmetro dos corpos a serem conformados com pressão uniforme. As variações na pressão advêm do preenchimento irregular de uma matriz complexa ou do atrito com as paredes de uma matriz profunda. A figura 2.4 ilustra como a variação na pressão aumenta com o aumento na relação comprimento x diâmetro e como ocorrem diferenças substanciais na pressão quando essa relação é muito maior que 1 (μm).

No caso da conformação de cerâmicas, não há deformação plástica das partículas como ocorre com metais durante a compactação, conforme Kingery (1960). O uso de lubrificantes e ligantes auxilia na redução do atrito do material com as paredes do molde, reduzindo riscos de

falhas e fraturas nas peças, que podem ocorrer tanto na compactação propriamente dita e, principalmente, na remoção da peça da matriz.

Devido à diversidade de aplicações das cerâmicas, a metodologia de preparação é um capítulo à parte no estudo desta família de materiais. Para determinadas aplicações, a densificação por sinterização em altas temperaturas é importante para reduzir a área superficial e a energia superficial livre, resultando no aumento da resistência mecânica. Por outro lado, os materiais catalíticos precisam manter uma área superficial suficientemente grande para maximizar sua participação e atividade nas reações químicas.

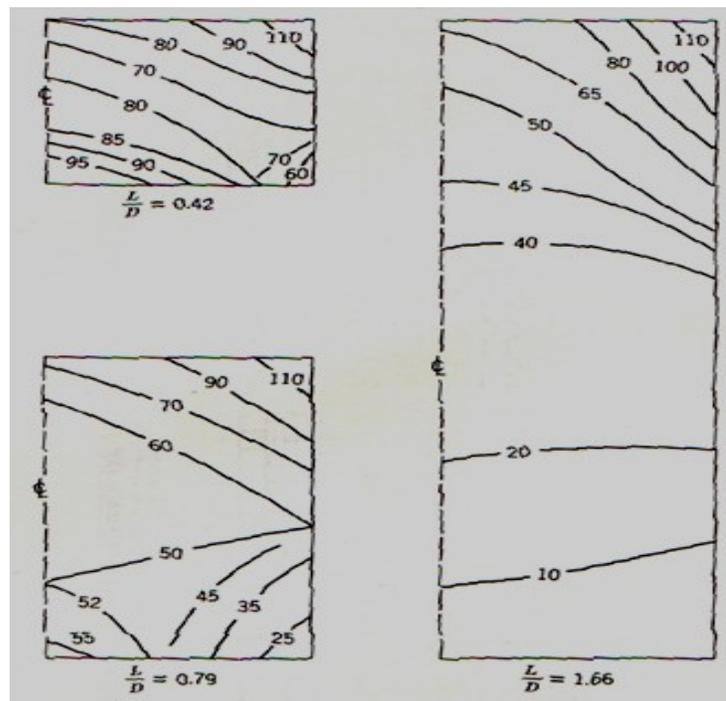


Figura 2.6 - Distribuição de pressão na compactação de pó em matriz cilíndrica a partir de uma extremidade. As linhas mostradas são de pressão constante. Fonte: Kingery (1960).

2.7.1 Sinterização

É nesta etapa, que a massa de partículas já conformada ganha resistência mecânica e adquire quase todas suas propriedades finais. A sinterização, de uma forma simplista, é o processo pelo qual as pequenas partículas de um material se ligam entre si por meio de difusão no estado sólido, conforme Smith (1998).

No zero absoluto de temperatura, os átomos encontram-se no seu mais baixo nível de energia. A elevação da temperatura provoca um aumento em suas vibrações, dando início ao processo de difusão, mecanismo pelo qual ocorre transporte atômico através da matéria. A

difusão é a migração paulatina dos átomos de um ponto a outro da rede quando duas condições são satisfeitas: a existência de um sítio adjacente vazio e energia suficiente do átomo para quebrar as ligações com átomos vizinhos, causando, desta maneira, distorção na rede durante o deslocamento ainda de acordo com Callister (1999).

2.7.2 Crescimento de Grão

O aumento da mobilidade atômica durante o processo de queima (promovido pelo aumento da temperatura) permite que as forças de tensão superficial consolidem o “corpo” do objeto e reduzam a porosidade. Se a retração ocorre de maneira irregular, podem surgir tensões, deformações e trincas, o que torna necessário o controle de uniformidade da temperatura: um rápido encolhimento ou contração da superfície pode gerar tensões suficientemente grandes para provocar falhas. Durante o processo de queima, de acordo com Kingery (1960) podem ocorrer mudanças inicialmente em decorrência da decomposição ou transformações de fase em alguma das fases presentes. Com a continuidade do aquecimento, três fenômenos principais podem ocorrer: aumento do tamanho dos grãos, mudança no formato dos poros e mudança no tamanho dos mesmos, geralmente com redução da porosidade.

Contornos de grãos iguais em energia encontram-se em junções de três grãos com um ângulo de 120° (contornos de grãos sem curvatura ocorrerão para grãos com seis lados). Assim, conforme Chiang (1997) grãos com menos de seis lados, que possuem contornos côncavos em relação a seu centro de curvatura, tendem a encolher e desaparecer, enquanto grãos com mais de seis lados possuem contornos convexos que migram na direção oposta e tendem a crescer mais, figura 2.6.

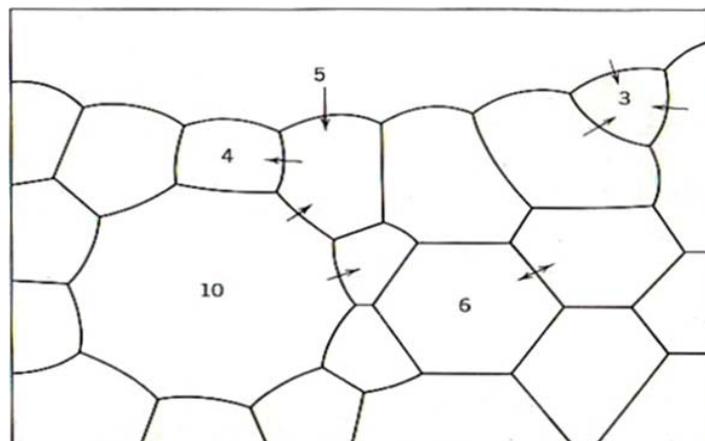


Figura 2.7 - Desenho esquemático de um sólido policristalino. Fonte: Kingery (1960).

De acordo com Kingery (1960) a curvatura dos contornos muda com o número de lados do grão. O raio de curvatura é menor, quanto mais o número de lados difere de seis. As setas indicam a direção de migração dos contornos.

2.7.3 Sinterização no Estado Sólido

O estudo da sinterização consiste na relação entre o aspecto estrutural da peça sinterizada (porosidade residual, fases presentes, tamanho médio de grão e distribuição de tamanho de grão, homogeneidade estrutural, etc.) e as características dos pós utilizados, levando-se em conta as condições de sinterização (temperatura, tempo, atmosfera). A faixa de temperatura na qual ocorre a sinterização é de 0,5 a 0,8 vezes a temperatura de fusão do material, conforme Ohring (1992).

Na sinterização no estado sólido ocorre o transporte de materiais sem a existência de qualquer fase líquida. A figura 2.7 resume o princípio da sinterização em fase sólida, onde inicialmente há duas partículas, entre as quais existem suas superfícies (contornos de alta energia). Posteriormente, as partículas se unem em um contorno de menos energia.

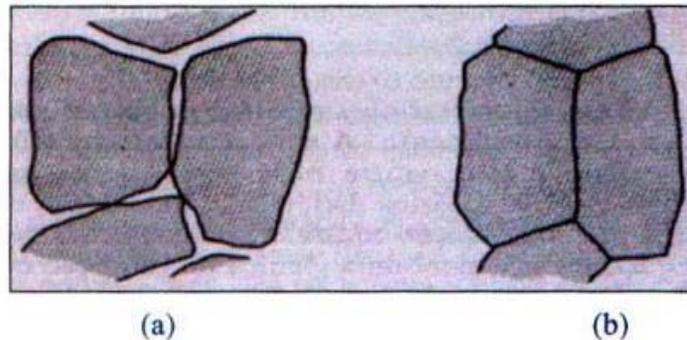


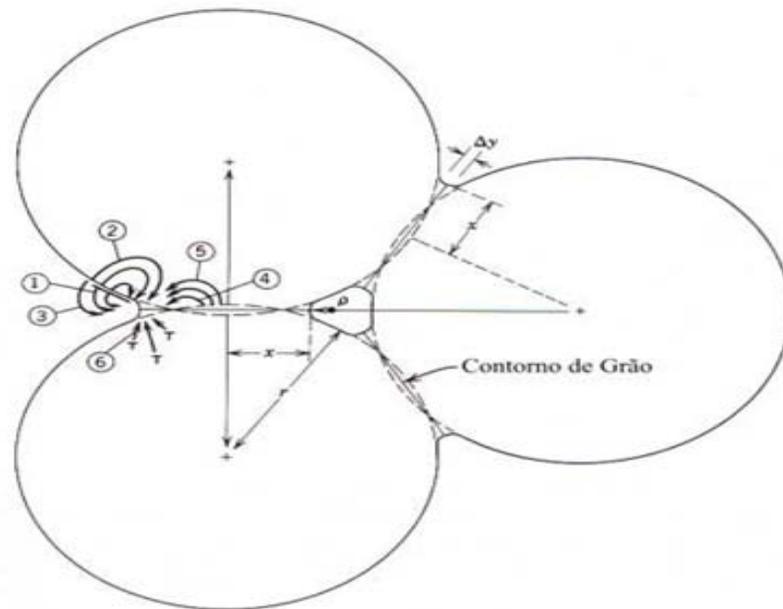
Figura 2.8 - Sinterização em estado sólido (a) Partículas antes da sinterização com duas superfícies adjacentes (b) Após a sinterização os grãos são delimitados por um contorno.

Fonte: Barros (2003).

Esse transporte é realizado por diversos mecanismos (evaporação e condensação, fluxo viscoso, difusão superficial, difusão na rede ou em contornos de grãos, deformação plástica, entre outros, Kingery (1960). Nestes mecanismos ocorre transferência de material para a região de contato entre partículas vizinhas, conforme mostra a figura 2.8, onde se adotou o modelo simplificado de grãos esféricos.

Alguns destes processos conduzem à densificação através da aproximação dos centros das partículas, enquanto outros conduzem ao coalescimento. Neste último há um aumento do pescoço entre grãos, o qual leva a uma redução da área superficial específica, sem

encolhimento. Geralmente a densificação é desejada, de modo que se procura promover os mecanismos que conduzem a ela, em detrimento dos demais de acordo com Chiang (1997).



Mecanismo	Meio de Transporte	Fonte de Material	Absorvedouro de Material
1	Difusão de superfície	Superfície	Pescoço
2	Difusão de rede	Superfície	Pescoço
3	Transporte de vapor	Superfície	Pescoço
4	Difusão de contorno	Contorno de grão	Pescoço
5	Difusão de rede	Contorno de grão	Pescoço
6	Difusão de rede	Discordâncias	Pescoço

Figura 2.9 - Vias alternativas de transporte de material nos estágios iniciais da sinterização.

2.7.4 Densificação

De acordo com a figura 2.8, dois processos de transporte de material são possíveis: evaporação e difusão superficial. Ambos são mecanismos de coalescimento que movem material da superfície da partícula para o pescoço, conduzindo à redução de energia superficial. Nenhum dos dois processos causa densificação, uma vez que não há remoção de massa do plano entre as partículas.

Os mecanismos de densificação (na ausência de escoamento viscoso e de deformação plástica) são aqueles nos quais o plano de contorno de grãos serve como fonte para o transporte difusional e o pescoço como um absorvedouro ou repositório para átomos. O transporte pode ocorrer ao longo do contorno de grão ou através da rede. Em ambos os casos, a força motriz é o gradiente de tensão entre a superfície do pescoço e o plano de contorno de grão conforme os autores Chiang (1997); Reed (1982). O mecanismo de difusão é o único de

sinterização em estado sólido que é prioritariamente responsável pela densificação em sistemas sinterizados sem a presença de fase líquida, conforme Kingery (1960).

Os processos de evaporação–condensação, difusão superficial, difusão em contorno de grãos e difusão em rede são vias concorrentes de transporte. Na queima, o mecanismo que conduzir a uma maior taxa de crescimento de pescoço será o mecanismo dominante e causará coalescimento ou densificação.

2.8 Isoladores Elétricos

Os isoladores para fins elétricos têm a nobre finalidade de isolar eletricamente um corpo condutor de outro corpo qualquer. Existem isoladores de diversos tipos e com as mais variadas aplicações. Entretanto, todos têm uma responsabilidade especial: a confiabilidade dos sistemas elétricos. Os isoladores estão totalmente associados aos níveis de segurança dos sistemas, podendo influenciar diretamente nos índices DEC (Duração da Interrupção Equivalente, em horas) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção) das empresas de energia.

A porcelana é uma das derivações da cerâmica, caracterizada principalmente pela ausência de porosidade. Existe uma variedade enorme de tipos de porcelana para diversos tipos de aplicação, e uma delas é a porcelana para fins elétricos. Considerada como um dielétrico sólido, a porcelana destaca-se principalmente pela sua alta capacidade de isolamento elétrica e resistência mecânica. Os produtos de porcelana podem ser obtidos por três processos, apresentando diferenças nas composições e na umidade, as quais são ajustadas de acordo com seu processo e fim.

Em abril de 2005, as instituições públicas (UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina; IEL / SC – Instituto Euvaldo Lodi de Santa Catarina; CELESC – Centrais Elétricas Santa Catarina S/A) e privadas (Porcelanas Industriais GERMER S/A; e Colorminas Colorificio e Mineração) do estado de Santa Catarina deram início a um projeto sobre isoladores elétricos de alta tensão.

De acordo com o Instituto Euvaldo Lodi de Santa Catarina o projeto abrange a cadeia produtiva de isoladores elétricos, por meio de parcerias com fornecedor de matérias-primas (empresa COLORMINAS), fabricante de isoladores (empresa Porcelanas GERMER), consumidor (CELESC), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como provedor de soluções e o Instituto Euvaldo Lodi (IEL/FIESC) atuando como proponente.

Em seu escopo, tecnicamente o projeto divide-se em dois subprojetos: (i) o primeiro relacionado ao desenvolvimento de novas massas cerâmicas para fabricação de isoladores

elétricos de alta tensão, incluindo a identificação de potenciais novas matérias-primas e/ou fornecedores, visando à redução dos custos de fabricação e a obtenção de isoladores de alta tensão de maior desempenho e; (ii) o segundo relacionado à pesquisa e desenvolvimento de superfícies protetoras (hidrofóbicas e auto limpantes) sobre a base de isoladores elétricos de alta tensão, com design otimizado, de modo a minimizar problemas de deposição e aderência de poluentes sobre a superfície (principalmente em ambientes litorâneos) e, conseqüentemente, a ocorrência do rompimento da rigidez dielétrica (flash over).

O rompimento da rigidez dielétrica é um problema que vem se agravando com o aumento vertiginoso da poluição e a crescente concentração litorânea das indústrias, pois a poluição e os sais com o passar do tempo vão se depositando sobre a superfície do isolador até alcançar uma concentração tal que, em um momento de chuva ou neblina, podem formar a película continua condutora e causar o rompimento da rigidez dielétrica.

Com o passar do tempo algumas soluções vêm sendo adotadas para minimizar o problema de flash over e conseqüente parada da rede, que incluem a inspeção e lavagem periódica do isolador para retirada dos depósitos. Alguns estudos têm sido realizados no intuito de avaliar a influência das diferentes geometrias disponíveis, tamanho, forma, comprimento e afastamento dos discos.

CAPÍTULO 3 - TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS DA ANODIZAÇÃO E METODOLOGIA

O desenvolvimento metodológico deste estudo contou com a colaboração do Laboratório de Solos do Departamento de Eng. Civil, Laboratório de Cerâmicas Especiais do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE-UFPE), Laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos, do Departamento de Geologia, Laboratório de análises não destrutivo LABEND do Departamento de Engenharia Mecânica, e do Laboratório de Tecnologia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas, todos da Universidade Federal de Pernambuco.

Neste capítulo, mostram-se as principais etapas de obtenção do resíduo rico em alumina para desenvolvimento de cerâmica avançada. Nas seções subsequentes deste capítulo 3, onde são apresentados os processos de anodização, como etapa inicial geradora de rejeito industrial, etapa do tratamento de efluente (ETE) e os procedimentos experimentais envolvidos na caracterização do lodo resultante do processo de anodização do alumínio, bem como a aplicação de ensaios cerâmicos no corpo de prova desenvolvido.

Comumente a alumina é obtida através do beneficiamento de bauxita usando o processo Bayer, mas a pesquisa enfatiza a obtenção de matéria prima rica em alumina oriunda do processo de anodização de perfis de alumínio conforme figura 3.1.

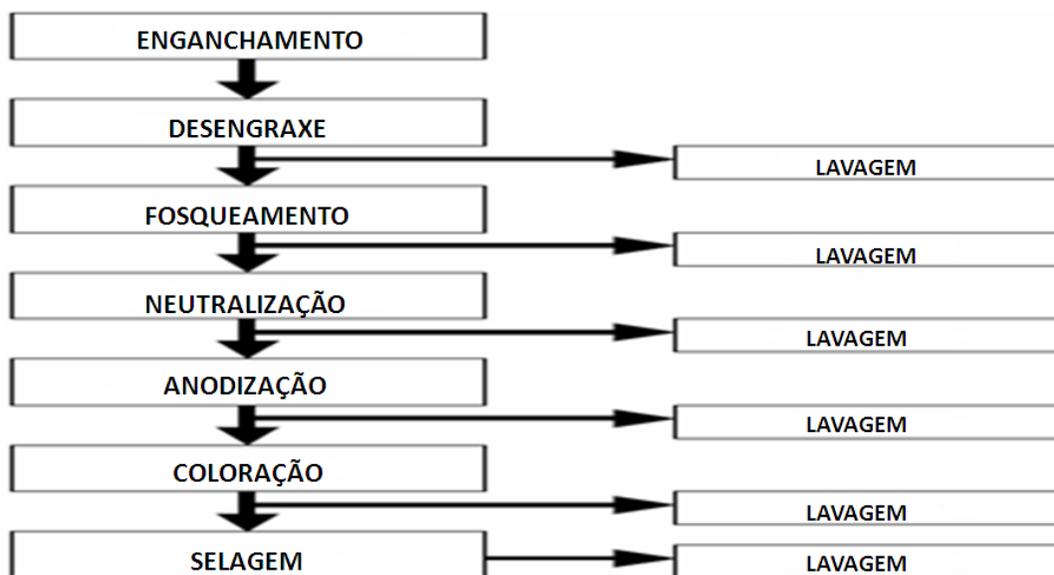


Figura 3.1 - Fluxograma das principais etapas do processo de anodização.

3.1 Processo de Anodização

O processo de anodização é composto por uma série de estágios básicos, comuns a todos os tipos de anodização, sendo que cada processo adquire uma característica própria que identifica o tipo de acabamento, conforme a ABAL (2009).

3.1.1 Montagem das Gancheiras

“Gancheira” ou “suporte” é o dispositivo no qual são afixadas as peças a serem anodizadas de acordo com a ABAL (2009). As gancheiras são compostas de chassis, pernada e alicata ou arames. A montagem consiste em colocar os perfis de alumínio nas gancheiras, regulando-as de acordo com o tamanho dos perfis e de tal modo que permita um contato firme para sustentar os deslocamentos e para a passagem da corrente elétrica em toda operação da anodização, conforme ilustra a figura 3.2.

Devido à alta resistividade elétrica da camada anódica, após cada ciclo de anodização, as gancheiras devem ser decapadas (dissolução da camada de óxido), a fim de se garantir um bom contato elétrico das peças que nelas serão montadas. A falta de decapagem acarreta: maior consumo de energia elétrica; falta de contato entre peça/gancheira e variação da camada anódica. A área de contato da gancheira com os perfis a serem anodizados não poderão ser áreas expostas, pois nessa região de contato terá uma pequena mancha devido a não formação da camada de anodização.



Figura 3.2 - Perfis metálicos na gancheira. Fonte: Departamento de Materiais de Lisboa (2004).

3.1.2 Desengraxe (tanque N° 1)

Após o procedimento da montagem e identificação na gancheira (através da ponte rolante), inicia-se o ciclo da anodização com o processo de desengraxe ou desengorduramento, figura 3.3. Nesse procedimento os perfis são levados para o tanque de desengraxe que consiste em executar a limpeza dos mesmos, com a remoção de poeiras, graxas, óleos e outros resíduos que foram oriundos do processo de extrudados.

O banho de desengraxe consiste em mergulhar as peças em uma solução ácida (geralmente ácido sulfúrico).

- Composição do banho: ácido sulfúrico; água desmineralizada e temperatura ambiente
- O controle do banho envolve os fatores como o nível do tanque, controle do ph da solução e quantidade de alumínio dissolvido no tanque.



Figura 3.3 - Detalhe dos tanques de anodização. Fonte: Anodilux (2005).

3.1.3 Lavagens (tanque N° 2)

Exige dimensionamento correto das vazões de água, estabelecendo um perfeito balanceamento entre a lavagem e o consumo de água, utilizando-se técnicas como sistema de spray, cascata e agitação para esse fim conforme ABAL (2009). Pelo fato da lavagem em água ocorrer no intervalo do ciclo da anodização, é considerada como uma operação intermediária que tem a finalidade de retirar os resíduos na superfície do metal proveniente da etapa de desengraxe e das etapas subseqüentes, garantindo a não contaminação das etapas entre si.

Lavagem Alcalina

Nessa operação, os tanques têm em sua capacidade água alcalina proveniente do banho de fosqueamento. A lavagem tem por função neutralizar o pH do perfil proveniente do tanque do desengraxante ácido para que o mesmo não carregue ácido para o tanque de fosqueamento.

3.1.4 Lavagem dos Perfis (tanque N° 3)

Devido à operação do desengraxe, os perfis saem carregados de ácido para o tanque de lavagem alcalina objetivando a neutralização dos perfis. Nessa etapa, geram-se partículas na superfície do metal provenientes do processo de neutralização, que são retiradas com spray de água.

3.1.5 Fosqueamento (tanque N° 4)

“O fosqueamento pode ser considerado como uma limpeza da peça em processo” de acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2005).

Essa etapa tem a finalidade de retirar a camada protetora natural do alumínio e pequenas falhas do processo de extrudados, para conseguinte ser incorporada a nova camada anódica (processo de anodização). Todo fosqueamento deve ser feito em tanques de aço ou de concreto com revestimento de aço conforme a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2005).

- A composição do banho é de soda cáustica e aditivo.
- O controle do banho envolve os fatores como a temperatura, nível do banho, concentração de alumínio dissolvido e a concentração de soda cáustica.

3.1.6 Lavagem Alcalina (tanque N° 5)

Essa lavagem tem por finalidade a retirada do excesso de soda cáustica dos perfis, proveniente da operação de fosqueamento.

3.1.7 Lavagem do Chassi (tanque N° 6)

Com a mesma função do tanque anterior, também tem a função de limpar as laterais dos chassis que possam vir com resíduos do processo de fosqueamento, o excesso de resíduos no chassi ocasiona um mau contato entre as “pernas” e o mesmo. Neste tanque há o abastecimento de água com controle do nível, que por efeito cascata essa água segue para os tanques N°5 e N° 2.

3.1.8 Neutralização (tanque N° 7)

Esta etapa consiste em neutralizar a ação dos resíduos alcalinos, assim como diluir compostos formados em consequência das reações químicas dos elementos de liga do alumínio, durante a fase de fosqueamento. Esse processo não consome energia, pois a lavagem com água é realizada em temperatura ambiente.

- A composição do banho é de ácido sulfúrico e água desmineralizada.
- O controle do banho envolve fatores como ácido sulfúrico e nível do tanque.

3.1.9 Lavagem dos Perfis (tanque N° 8)

Consiste em retirar o excesso de ácido dos perfis proveniente do tanque de neutralização, para que não haja contaminação dos banhos dos tanques de anodização.

3.1.10 Anodização N°1 (tanque N° 9)

Nesta etapa do processo ocorre a formação da camada anódica, de forma controlada e acelerada, criando uma película homogênea e com elevada dureza e resistência à corrosão e à abrasão. Essa camada anódica é formada na superfície do alumínio, através de uma eletrólise numa solução de ácido sulfúrico por meio de uma corrente contínua.

Na anodização é formada uma camada porosa, constituída de células hexagonais que terá sua espessura dependendo das necessidades do cliente, interferindo para uma camada anódica mais espessas ou finas, podendo ser de 6, 13, 18 e 23 μ m, figura 3.4.

Os controles dos parâmetros do banho de anodização determinam a qualidade da camada anódica, de forma que é possível conseguir camadas duras ou brandas, porosas ou compactas, espessas ou finas dependendo da aplicação do alumínio, conforme indica a Tabela 3.1.

- A composição do banho é de ácido sulfúrico e água desmineralizada
- O controle do banho envolve a concentração do ácido sulfúrico, temperatura entre 18°C a 21°C, voltagem, corrente elétrica, agitação e o nível do banho.

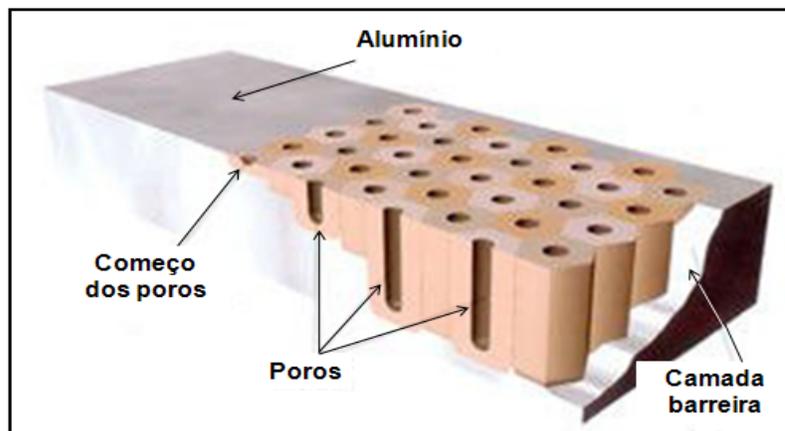


Figura 3.4 - Estágios de crescimento da camada anódica. Fonte: ABAL (2005).

Tabela 3.1 – Especificações da espessura da camada anódica segundo a NBR 12609 (2003).

Classe de espessuras de camadas anódicas para aplicações exteriores / interiores			
Classe	Espessura da camada anódica (micrômetro)	Nível de agressividade	Ambiente típico
A13	11 a 15	Baixa/Média	Urbano/Rural
A18	16 a 20	Alta	Litorâneo
A23	21 a 25	Excessiva	Industrial/Marítimo

3.1.11 Lavagem Ácida (tanque N° 10)

Consiste em remover o excesso de ácido dos perfis que são retirados do tanque de anodização N°1 para que não ocorra respingos de ácido sobre os chassis localizados nos tanques de anodização N°s 2 e 3.

3.1.12 Anodização N° 2 (tanque N° 11)

Segue os mesmos processos do tanque de anodização N°1, sendo os perfis lavados no tanque N°10.

3.1.13 Anodização N°3 (tanque N° 12)

Segue o mesmo processo de anodização N° 1 e 2, sendo os perfis lavados no tanque de lavagem ácida (tanque N°13).

3.1.14 Lavagem Ácida (tanque N° 13)

Consiste em remover o excesso de ácido dos perfis que são retirados do tanque de anodização N°3. Neste tanque há o controle do abastecimento de água.

3.1.15 Lavagem Água Desmineralizada (tanque N° 14)

Esse tanque tem por função mais uma lavagem nos perfis para que não ocorra contaminação de água ácida no tanque de coloração. Este tanque trabalha com um circuito fechado com filtragem da água.

3.1.16 Coloração (tanque N°15)

O banho de coloração é composto de estanho dissolvido proveniente do ataque ácido às barras de estanhos que estão dispostas lateralmente e no centro ao longo do tanque. O estanho quando dissolvido preenche os poros da camada anódica, iniciando-se assim a coloração dos perfis. A quantidade de estanho nos poros irá determinar as tonalidades desejadas na operação, figura 3.5.

- A composição do banho é de ácido sulfúrico, estanho dissolvido e aditivo.
- O controle do banho envolve concentração do ácido sulfúrico, temperatura, voltagem, corrente, agitação, nível do banho e aditivo.

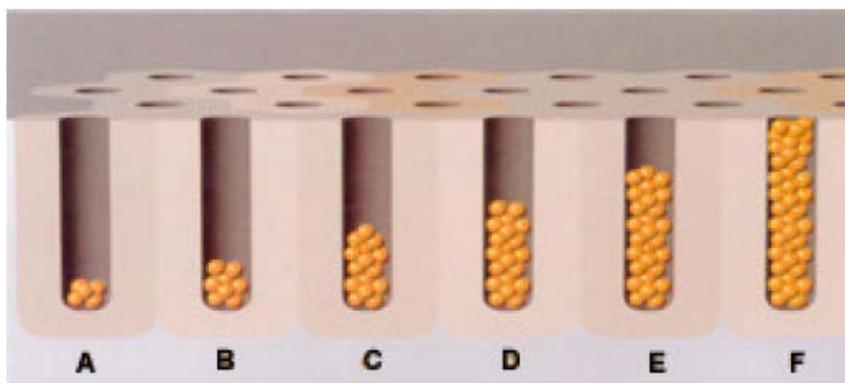


Figura 3.5 - Representação esquemática da coloração do alumínio mediante deposição de partículas metálicas nos poros. Fonte: ABAL (2005).

A = Champanhe Claro, B = Champanhe, C = Bronze Claro, D= Bronze Médio, E = Bronze Escuro, F = Preto

3.1.17 Selagem 1 (tanque N° 16)

Esse banho tem a finalidade de fechar os poros dos perfis após serem anodizados, passando ou não pelo processo de coloração.

- A composição do banho é de água desmineralizada, aditivo e sob condições de temperatura ambiente.
- O controle do banho envolve concentrações de aditivo, nível do tanque e o pH.

3.1.18 Selagem 2 (tanque N° 17)

Esse banho segue os mesmos parâmetros do tanque de selagem 1.

3.1.19 Lavagem da Selagem (tanque N° 18)

Essa lavagem realiza a retirada do excesso de resíduos na superfície dos perfis que foram provenientes da etapa anterior. Neste tanque há o abastecimento de água controlada.

3.1.20 Lavagem de Água Quente (tanque N° 19)

Sua finalidade é provocar um choque térmico no perfil, acelerando o processo de selagem.

- A composição do banho envolve água desmineralizada.
- O controle do banho envolve níveis do banho, controle do pH, controle da temperatura entre 65°C a 70°C.

3.1.21 Secagem dos Perfis (tanque N° 20)

Após o escoamento da água dos perfis por inclinação do chassi, os mesmos são encaminhados para o tanque de secagem de ar quente para a finalização de todo processo de anodização seguindo para a desmontagem e embalagem, tem-se abaixo uma ilustração do perfil metálico anodizado, figura 3.6.



Figura 3.6 - Perfis metálicos anodizado. Fonte: Alcoa (2008).

3.2 Estação de Tratamento de Efluentes do Processo de Anodização (ETE)

As águas das lavagens do processo de anodização são descartadas e encaminhadas através de calha por gravidade para a estação de tratamento de efluentes (ETE). Essa água é composta por ácido sulfúrico, soda cáustica e alumínio dissolvido.

A ETE tem por finalidade a neutralização das águas de lavagens da anodização, para que a mesma esteja em condições de descarte no meio ambiente. O processo é realizado em tanques seguindo a seqüência apresentada na figura 3.7.

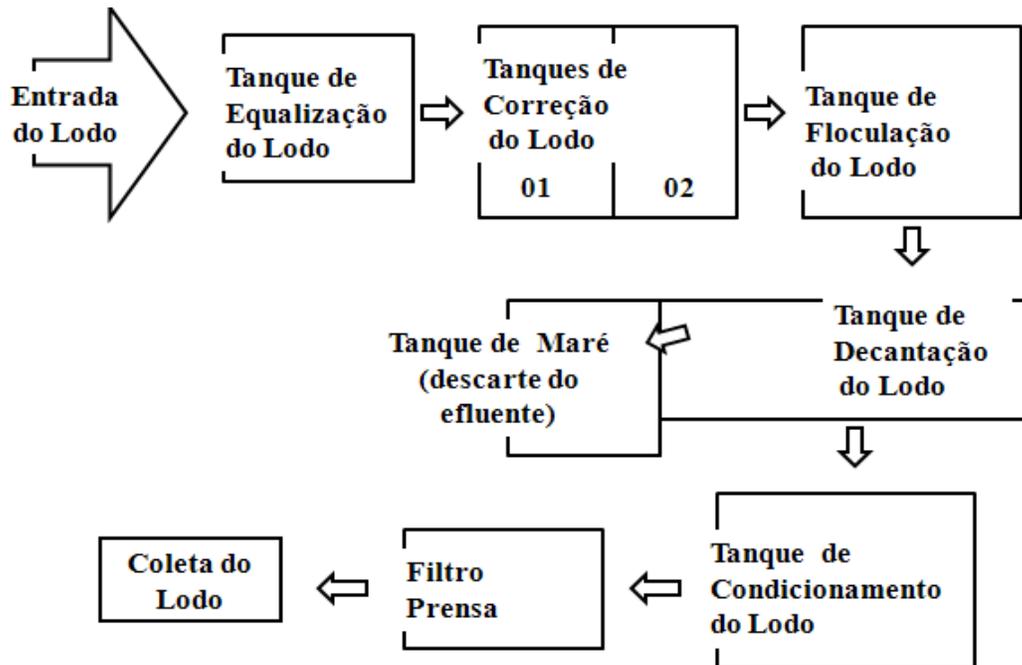


Figura 3.7 – Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluente (ETE).

3.2.1 Equalização

Recebe as águas da anodização e através de ar comprimido essa água é agitada mantendo o pH homogêneo. O efluente passa para a próxima etapa através de bombas de sucção.

3.2.2 Correção 1 e 2

Responsável pela correção do pH, deixando-o neutro e em uma faixa ótima para floculação com pH entre 7 a 8. É feita em dois estágios (tanque de entrada e saída) e o pH controlado por eletrodos e corrigido automaticamente através de bombas dosadoras com solução de ácido sulfúrico ou soda cáustica diluída, dependendo do pH do efluente. A partir desta etapa, trabalha-se por gravidade. Nestes tanques, automaticamente, são feitas as leituras de pH e se necessário são realizadas as devidas correções com ácido e soda cáustica diluídos.

3.2.3 Floculação

Automaticamente, ocorre a adição de polímero no efluente objetivando a formação de flóculos aumentando o tamanho das partículas, e o sistema de paletas (figura 3.8) faz a agitação do líquido para que não ocorra sedimentação dos flóculos.



Figura 3.8 - Sistema de paletas giratórias. Fonte: Alcoa (2008).

3.2.4 Decantação

A dosagem de polímeros e o pH influenciam no tamanho dos flocos, tornando-os mais pesados do que a água, ocorrendo à separação dos mesmos no tanque (figura 3.9) e que por gravidade passa para a etapa seguinte. Através da abertura da válvula de cada prisma do tanque de decantação, sob pressão o lodo é descartado e segue por uma calha, para o TQ de condicionamento.

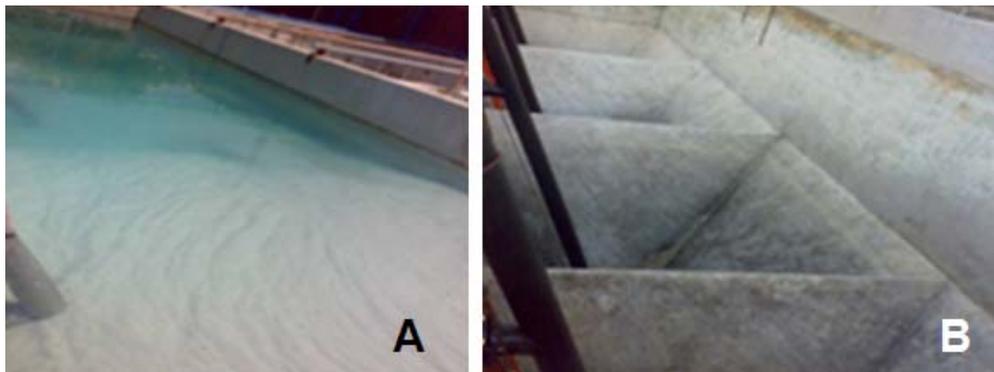


Figura 3.9 - A) Detalhe do tanque de decantação cheio de lodo; B) Detalhe do interior do tanque de decantação seco. Fonte: Alcoa (2008).

3.2.5 Tanque de Saída

É através de gravidade que a água resultante da decantação é descartada para o meio ambiente, sendo que 1/3 dela é reaproveitada para o processo de anodização. Neste tanque há o controle do pH e turbidez da água, que ao apresentar qualquer anormalidade, retorna ao início do processo (tanque de equalização).

3.2.6 Condicionador de Lama

Sobre pressão atmosférica o resíduo decantado no tanque de decantação passa para o tanque condicionador de lama através de válvulas manuais. Através de bomba de sucção o lodo é bombeado para o filtro prensa.

3.2.7 Prensagem da Lama

Este processo consiste na prensagem do lodo através de um filtro prensa que consegue separar o resíduo rico em alumina do excesso de água. (figura 3.10 (A)). O resíduo final fica com aproximadamente entre 80% a 85% de umidade (figura 3.10 (E)).

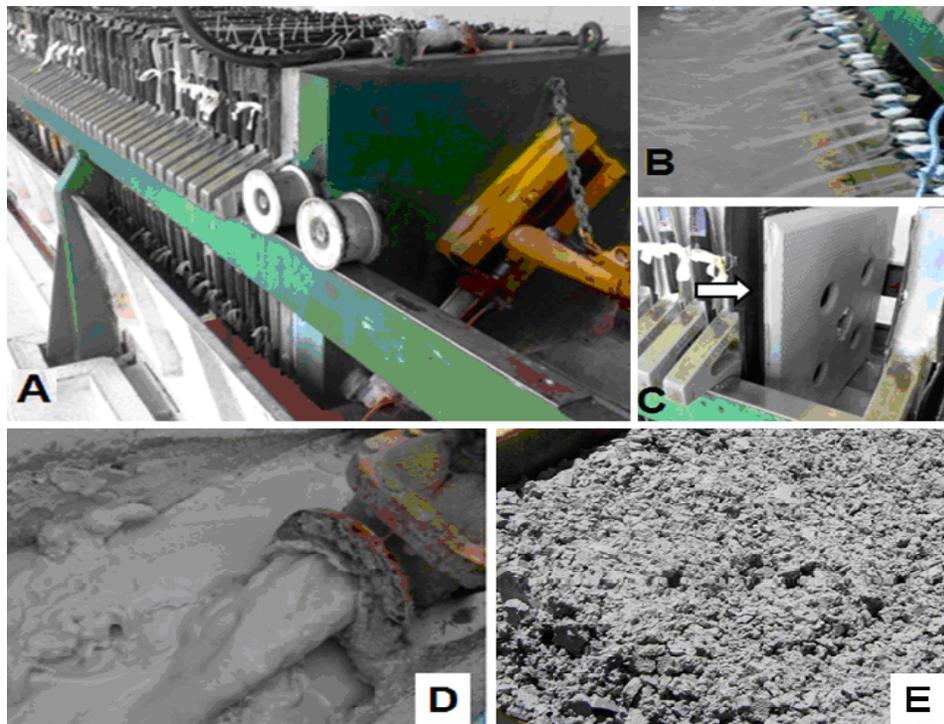


Figura 3.10 - (A) Filtro prensa; (B) Detalhe das torneiras de saída de água do lodo; (C) Visão lateral de placas de lodo prensado no filtro; (D) Válvula de saída do lodo para o condicionador de lama; (E) Lodo prensado em filtro prensa. Fonte: Alcoa (2008).

3.3 Caracterização do Resíduo

3.3.1 Coleta do Material na Indústria

Com a permissão da empresa de anodização foram coletados 110 quilos de lodo de anodização, gerados pela fabricação da anodização de alumínio, prensados mecanicamente e acondicionados em sacos plásticos, figura 3.10 (E). O resíduo (lodo) apresentava uma coloração branca acinzentada, inodora e elevada umidade, apesar de ter sofrido o processo de prensagem. O lodo foi submetido a tratamento térmico antes das análises químicas e mineralógicas.

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido seguindo as etapas descritas no fluxograma da figura 3.11, que apresenta todos os procedimentos adotados na realização dos experimentos e a sequência estabelece o método de produção que foi utilizado para obtenção da amostra selecionada.

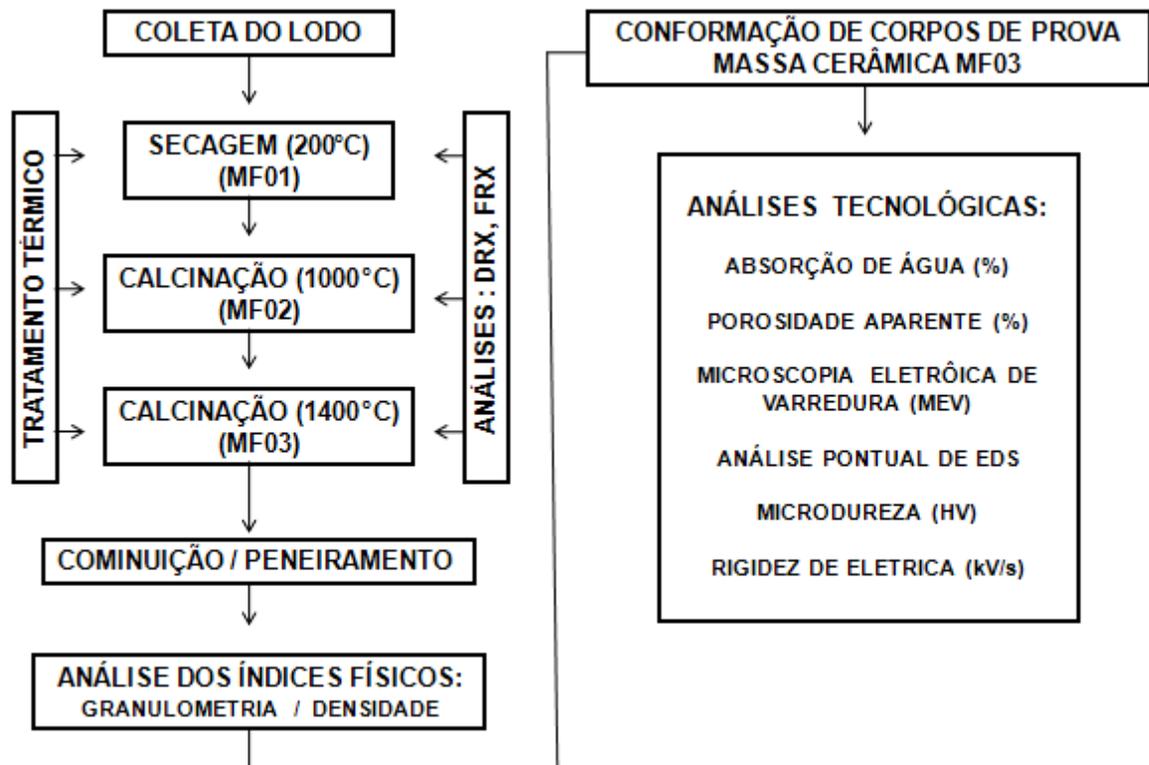


Figura 3.11 - Fluxograma do beneficiamento do lodo e das análises tecnológicas da massa cerâmica MF03.

3.3.2 Tratamento Térmico

O lodo em estado verde (figura 3.12 (E)) foi submetido aos tratamentos térmicos de secagem em estufa e de calcinação. A calcinação ocorreu com o acondicionamento do lodo seco em cadinhos de alta alumina.

3.3.3 Secagem

A secagem do lodo foi possível de ser realizada no Laboratório de Materiais de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco com o uso da estufa Navetherm, modelo ERN, nº de Série – D04-B30-300 e acondicionados em bandejas forradas com papel alumínio na temperatura de 200°C durante o período de 24 horas, figura 3.12. Para a verificação da perda de umidade do lodo em estufa foram analisadas 11 amostras.

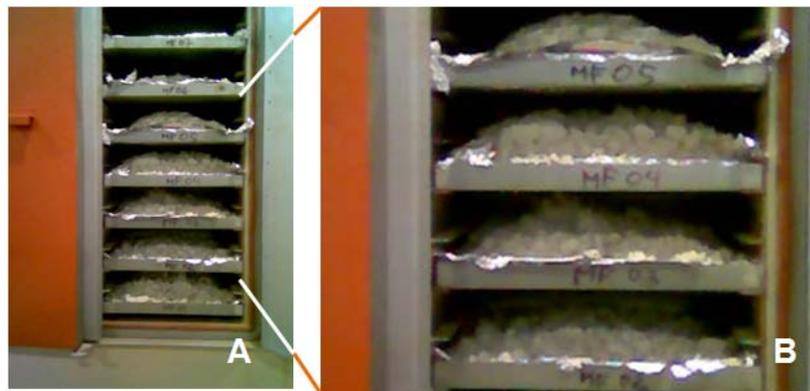


Figura 3.12 – A) Visão completa da estufa usada; B) Detalhe das bandejas cheias do lodo para secagem.

3.3.4 Calcinação

Para o processo de calcinação do lodo após a secagem em estufa e destorroamento o resíduo foi acondicionado em cadinho de alumina 7 amostras, para em seguida ser calcinado em forno laboratorial a temperatura de 1000°C por 24 horas. O resfriamento foi realizado no interior do forno até temperatura ambiente de 27°C. Em seguida 4 amostras do resíduo seco e cominuído foi submetida ao processo anterior agora em temperatura de 1400°C por um período de 48 horas, dessa vez com objetivo de sinterização do resíduo rico em Al_2O_3 . Os lodos foram classificados conforme as etapas de tratamento térmico, como: MF 01 - secagem a 200 °C; MF 02 - calcinação a 1000 °C; MF 03 - calcinação a 1400°C.

Após a calcinação foi possível seguir as etapas de cominuição, análise granulométrica, densidade de partículas, análises químicas semi-quantitativas (fluorescência de raios X) e

qualitativas (difração de raios X, MEV) e as análises tecnológicas de índices físicos como a porosidade aparente e a absorção de água da massa calcinada em temperatura de 1400°C e a resistência mecânica (Dureza Vickers).

3.3.5 Cominuição

O material referente à amostra MF 03 foi moído no Moinho de Bolas MA-500, que tem jarro em cerâmica sinterizada, figura 3.13. A cominuição é realizada através de movimentos circulares rápidos no sentido horizontal de jarros sobre rolos motorizados, sendo que roletes cilíndricos em alumina sinterizada são direcionados em sentido contrário contra as paredes internas dos jarros amassando o material por vinte e quatro horas, gerando uma granulometria fina. Após moagem os resíduos foram beneficiados em peneira #200 mesh (ABNT) visando padronizar os tamanhos máximos das partículas presentes.

O peneiramento foi realizado por via úmida objetivando quantificar o tamanho das partículas, pois no meio aquoso as partículas se distribuem, e sua exposição a aberturas da tela da peneira é maior quando comparado ao peneiramento a seco. Neste ensaio, foi utilizada água bidestilada, limpa e livre de impurezas e foram executadas três leituras a fim de obter a média.



Figura 3.13 - Moinho de Bolas Modelo MA-500.

3.4 Confeção dos Corpos de Prova

Após a submissão do lodo em processos de secagem em estufa. O material a ser prensado foi misturado manualmente com o auxílio de um almofariz com pistilo em ágata. Em primeira etapa, foram produzidos dois grupos de corpos de prova: um composto de 98% de resíduo (calcinado a 1400°C (MF03)) com 2% de aditivo ADCER; e outro com apenas 100% do resíduo (calcinado a 1400°C (MF03)).

Essas amostras foram moldadas uniaxialmente com carga de 12 toneladas durante 5 minutos em molde metálico com 30 mm de diâmetro, para formar pastilhas com cerca de 5 mm de espessura. Utilizou-se etilenoglicol como desmoldante, a fim de evitar a quebra das pastilhas e adesão do pó dentro do molde, ou seja, reduzindo a fricção do mesmo com as paredes do molde.

Após moldagem, a massa cerâmica composta de aditivo ADCER foi encaminhada ao forno para sinterização em uma temperatura de 1400°C por 24 horas, porém depois do resfriamento natural do forno, foi verificado na retirada das pastilhas que não apresentavam um bom aspecto visual e ao contato para polimento estavam quebradiças, impossibilitando a submissão destas às análises tecnológicas nesta pesquisa, conforme figura 3.14.



Figura 3.14 – Amostras de corpos de prova compostos de resíduo mais aditivo ADCER.

Devido à avaliação anterior, em uma segunda etapa foram produzidos novos grupos de corpos de prova, desta vez composto apenas de 100% do resíduo calcinado a 1400°C (MF03). Levando-se em consideração a grande incorporação natural de ar entre as partículas, a prensagem foi executada com atenção aos critérios de conformação versus tempo.

Com a massa MF03 foram moldados corpos de prova por prensagem uniaxial com carga de 12 toneladas por 12 minutos em molde metálico com 30 mm de diâmetro, para formar pastilhas com cerca de 5 mm de espessura, figura 3.15 (A). As amostras conformadas foram sinterizadas a temperatura de 1400°C durante o tempo de 48 horas, figura 3.15 (B). Estes corpos de prova foram submetidos aos ensaios tecnológicos pretendidos em pesquisa.

Na sinterização, a tendência é que toda a superfície interna da peça desapareça e ela se torne completamente densa. Isto de fato só ocorre se a temperatura for alta e o tempo for longo o suficiente para que ocorram as transformações da matéria.

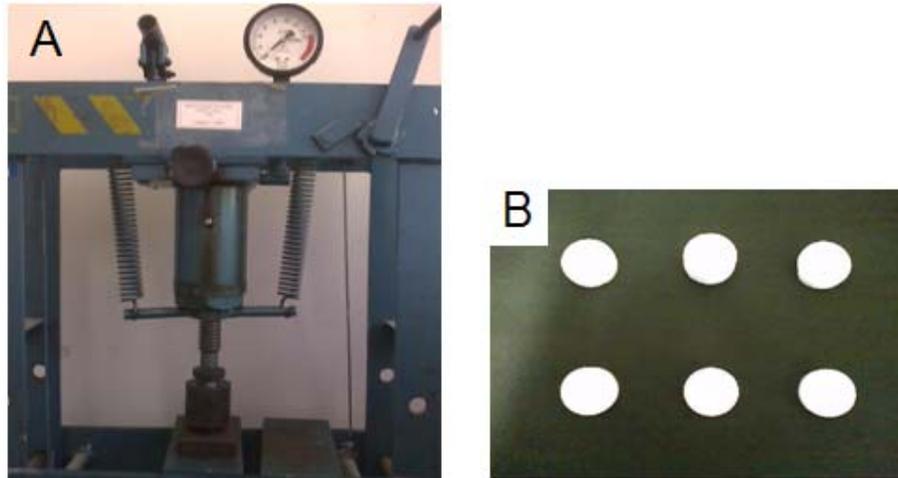


Figura 3.15 - (A) Prensa MARCON - MPH-15 usada na confecção dos corpos de prova; (B) Corpos de prova sinterizados.

3.5 Análises dos Índices Físicos e Químicos

3.5.1 Distribuição de Tamanho de Partículas

A análise de distribuição granulométrica do lodo em estado seco foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral, no Departamento de Engenharia de Minas da UFPE. A curva de tamanho das partículas foi obtida via analisador de partículas a laser Mastersizer 2000 da Malvern Instruments Ltda. As amostras foram dispersas em água bidestilada e mantidas sob agitação (1700 rpm) por 60 minutos no equipamento, figura 3.16 (A).

O granulômetro a laser é um aparelho que é composto por três partes fundamentais: a unidade óptica, a unidade de preparação de amostra e um software computacional.

A Unidade Óptica é usada para coletar os dados obtidos durante o processo de medida do tamanho da amostra. Este compartimento é composto com tampa onde está alojada a célula da amostra, a lente de alinhamento com o canhão laser e o difusor de irradiação que é colocado em frente ao conjunto formado pela célula da amostra e a lente de alinhamento. As leituras das medidas dos tamanhos das partículas são feitas quando as amostras circulam em frente ao dispositivo que regula o feixe de laser de acordo com Manso (1999). Essa circulação é feita por mangueiras que levam a amostra em suspensão até a lente de face dupla quando, então, os grãos são captados pelo feixe de laser e se processa a leitura dos tamanhos das partículas, figura 3.16 (B). Estas partículas dispersam a luz em um ângulo que é inversamente proporcional ao seu tamanho. A intensidade angular da luz espalhada é medida por uma série de detectores fotossensíveis. O número de localização destes

detectores no Mastersizer 2000 foi otimizado para assegurar a resolução máxima em uma ampla variedade de tamanho, conforme Couto *et. al.* (2008).

O método se baseia na premissa de que o ângulo de difração do laser é inversamente proporcional ao tamanho da partícula por ele incidida. Rawle (2004) afirma que a distribuição do tamanho das partículas é calculada com base na intensidade da luz recebida pelo detector.

A faixa de leitura do equipamento utilizado é de $0,03\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$. O mesmo consiste em: uma fonte de raio laser, conjunto de detecção (constituído por 81 fotos sensores em um tubo foto multiplicador) e um amostrador, podendo ser utilizado o pó seco ou uma dispersão da amostra em líquido.

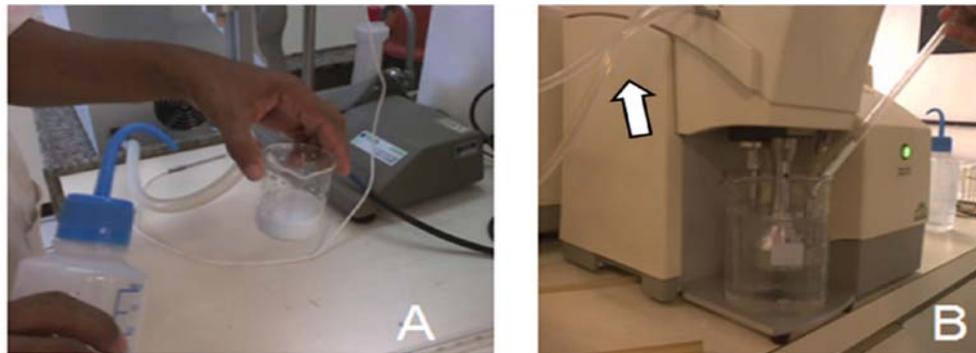


Figura 3.16 - (A) Homogeneização da amostra para o ensaio granulométrico; (B) Ensaio granulométrico no equipamento de DTP.

No cálculo para determinação do tamanho das partículas foi utilizada a aproximação de Fraunhofer, que assume que todos os tamanhos de partícula espalham a luz com a mesma eficiência e que as partículas analisadas são opacas, e, portanto não transmitem a luz incidida, Martin (1993); Rawle (2004).

A distribuição de tamanho granulométrico das partículas e sua morfologia resulta em grande parte na porosidade final do produto. O volume total dos poros intragranulares depende, principalmente, da forma e da distribuição das partículas que compõe o aglomerado. Uma distribuição de tamanho de partículas adequada promove um empacotamento de partículas de elevada densidade relativa, minimizando o volume destes poros no compacto, Alberio (2000).

3.5.2 Densidade

A densidade das amostras foi determinada pelo método de imersão de Arquimedes com água destilada, empregando-se picnômetro de 50 ml, balança analítica de precisão 0,0001 g e temperatura ambiente controlada (22°C) para amostras com 10 mm de diâmetro.

A densidade real de uma amostra é dada pela razão entre a massa total de suas partículas sólidas e o respectivo volume total, excluindo o volume ocupado pelo ar presente nos poros dos agregados de partículas. Sendo: (a) a massa do picnômetro vazio, (b) a massa do picnômetro com a amostra, (c) a massa do picnômetro com a amostra mais água, (d) a massa do picnômetro cheio de água, D a densidade ou massa específica das partículas sólidas, D' a massa específica da água à temperatura ambiente T (0,9978 g/cm³ a 22°C), a densidade das amostras será dada pelas equações (a) e (b) de acordo com Barros (2003):

$$D = \frac{(b-a)}{b-a-c+d} \quad \text{a)}$$

$$D_{\text{corrigida}} = \frac{(b-a)}{b-a-c+d} D' \quad \text{b)}$$

3.5.3 Fluorescência de Raios X

O lodo após todo tratamento térmico de calcinação, foi peneirado apenas para homogeneização e catalogado em amostras nas respectivas temperaturas para serem analisadas por fluorescência de raios X. A análise foi realizada no Laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos, do departamento de Geologia, da UFPE.

A análise consiste em identificar em laboratório o resíduo através da análise de fluorescência de raios X, esta técnica é não destrutiva. As amostras foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, sendo os resultados das análises expressos em peso percentual. Para cada amostra foi feita uma pastilha prensada com 30 toneladas de força. As amostras foram analisadas semi quantitativamente para os elementos pesados e para alguns leves. Todos os elementos da tabela periódica podem ser detectados, com exceção dos elementos leves H, He, Li, Be, B, C, N e O.

3.5.4 Difração de Raios X

Outra fração dessa amostra foi encaminhada ao Laboratório de Ensaio Não Destrutivos (LABEND) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE para a execução do ensaio de raios X, utilizando-se um difratômetro SHIMADZU XRD-6000, como mostra a figura 3.17, com radiação de $\text{CuK}\alpha$ com $\lambda = 1.54060\text{\AA}$, numa varredura $10^\circ < 2\theta < 100^\circ$. O XRD-6000 soluciona problemas analíticos usuais, desde análises qualitativas de rotina, análises quantitativas de fases, e análises cristalográficas mais exigentes. A difração de raios X é atualmente considerada como o método da maior importância para elucidação de estruturas complexas de produtos naturais, além de que fornece um meio conveniente e prático para identificação qualitativa de compostos cristalinos, de acordo com Skoog *et. al.* (2006).



Figura 3.17 - Visão parcial do difratômetro utilizado.

3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Física da UFPE. A microanálise é um dos mais importantes instrumentos para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos. Através da identificação dos raios X emitidos pela amostra, quando da interação com o feixe eletrônico, é possível determinar a composição de regiões com até $1\ \mu\text{m}$ de diâmetro. É uma técnica não destrutiva, podendo determinar quantidades de até 1-2% dos elementos presentes na amostra.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000x). O principal objetivo para aplicação do MEV é gerar a ampliação da imagem para caracterizar a amostra. Nesta aplicação, procuram-se respostas para fissuras, variações no material durante a fabricação, tamanho dos poros, entre outros. Toda a amostra para ser analisada precisa ser preparada de acordo com seu comportamento. Dependendo da preparação dessa amostra os resultados da análise podem variar.

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição.

Diamantino e Nicolau (2009) afirmam que o uso em conjunto do EDX com o MEV é de grande importância na caracterização petrográfica e estudo petrológico nas geociências. Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens (ainda que virtuais, pois o que se vê no monitor do computador é a transcodificação da energia emitida pelas partículas, ao invés da radiação emitida pela luz, ao qual estamos habitualmente acostumados), o EDX permite sua imediata identificação. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados.

O mecanismo do MEV só funciona se o sistema de vácuo estiver preparado, e mesmo sem operação a câmara de vácuo deve estar sempre ativa para evitar a entrada de impurezas. Normalmente na primeira amostra a câmara de vácuo demora cerca de 15 minutos para se estabilizar, mas para substituição da amostra, esse tempo cai para 5 min.

Todavia, dependendo da amostra esse mesmo tempo pode variar, uma vez que o equipamento tem que se estabilizar para começar o processo de ampliação da imagem. Quanto mais poroso o material maior o tempo para estabilização. Algumas amostras precisam de um determinado tempo em outro equipamento para perder umidade antes do MEV, chamado de dissecador.

Toda a amostra não condutora precisa ser preparada em um processo denominado metalização. A metalização consiste em um recobrimento superficial com ouro (figura 3.18). Existe também para condutibilidade da amostra um processo chamado de carbonização que consiste em recobrir superficialmente a amostra com carbono condutivo (grafite em pó).

Alguns problemas que podem ocorrer durante a operação do MEV são: a amostra está carregando, ou seja, queimando; a voltagem do MEV está maior do que a suportada pela amostra; a amostra pode se movimentar. Quanto maior a voltagem melhor a definição, no entanto, algumas amostras não suportam a energia e carregam. Ex: 20kv para arame e 5kv para material orgânico.

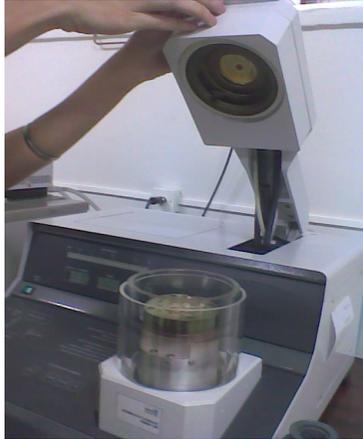


Figura 3.18 - Metalização

O MEV arranca os elétrons da camada superficial e ocorre o reposicionamento das camadas mais profundas. O detector identifica a quantidade de energia do elétron para capturar a imagem. Com o processo da fluorescência de raios X é possível visualizar toda a estrutura ao mesmo tempo.

O EDS é uma análise pontual da amostra na superfície e trabalha sob um banco de dados de energia do átomo. O EDS trabalha sob nitrogênio líquido. É necessário estabilizar o equipamento antes da operação, para isso é preciso abastecer o equipamento com nitrogênio líquido 24h antes da operação. Na análise do pó (pigmento) é possível perceber a forma e o contorno do grão em até 400.000 vezes.

3.6 Ensaio Cerâmicos

3.6.1 Absorção de Água (AA)

O ensaio de absorção de água avalia o nível de absorção de água do material, por meio de sua porosidade. Inicia-se com a pesagem da amostra seca (**P1**), a seguir o corpo de prova é imerso em um recipiente com água, onde se eleva a temperatura da água até seu ponto de ebulição, por 2 horas em fervura. Para a pesagem é retirado o excesso de água do corpo de prova com uma toalha ligeiramente úmida e pesa-se novamente (**P2**), ou seja, o corpo de prova saturado. Aplica-se a equação (c) e encontra-se o valor para AA da amostra.

$$AA = \{(P2 - P1) / P1\} \times 100 \quad (c)$$

3.6.2 Porosidade Aparente (PA)

A determinação da porosidade aparente dos corpos de prova após a calcinação de 1400°C foi determinada a partir de diferentes pesagens: ao ar, do corpo de prova seco (M_s) e saturado (M_u); e M_i , do corpo de prova submerso. O valor da porosidade aparente é obtido por meio da equação (d):

$$PA (\%) = [(M_u - M_s) / (M_u - M_i)] \times 100 \quad (d)$$

3.6.3 Dureza Vickers

As análises de microdureza foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE. Utilizou-se o microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2, com aplicação de uma carga de 2942 N durante 30 segundos, em quatro pontos conforme a orientação dos quadrantes no círculo da superfície da amostra, por meio de um Indentador Vickers.

No teste de dureza Vickers uma pirâmide com base quadrada é prensada com uma carga específica sobre a superfície polida de um material. O valor de dureza Vickers (geralmente abreviado por HV) é calculado pela razão da carga pela área projetada da penetração. Os comprimentos das diagonais são mensurados e seus valores multiplicados para calcular a área, *Apud.* Silva (2008).

O ensaio foi realizado em 5 amostras em temperatura ambiente na amostra com 30 mm de diâmetro que foram compactadas e sinterizadas a 1400°C por 48 horas e depois de lixadas com lixas grana #600 e #1200 e para polir foi usada manta de polimento com pasta de diamante de 1 e ¼ µm, para obtenção de uma superfície lisa, plana e polida, ideal ao ensaio e a respectiva indentação.

A caracterização mecânica das amostras foi realizada por ensaio de dureza Vickers. Esta técnica consiste em forçar contra a superfície do material a ser testado um pequeno indentador, em condições controladas de carga e taxa de aplicação. A indentação resultante é medida e relacionada a um número de dureza, do que resulta que este resultado é mais relativo do que absoluto. Os ensaios de dureza são comumente empregados como técnicas de caracterização mecânica de materiais, pois consistem em procedimentos de baixo custo, simples e que não exige preparação especial do material (somente faces paralelas e superfície

polida para melhor visualização da indentação). A figura 3.19 ilustra o procedimento de medida das diagonais de indentação.

No ensaio de dureza Vickers o indentador é uma pirâmide de base quadrada e com ângulo entre faces de 136° . Através das medidas das diagonais da indentação, determina-se o valor da Dureza Vickers (HV), em N/mm^2 por meio da relação:

$$H_v = \frac{2P \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = \frac{185,44P}{d^2} \quad (e)$$

Onde: P é a carga aplicada (N) e d é a média das diagonais da indentação, em mm.

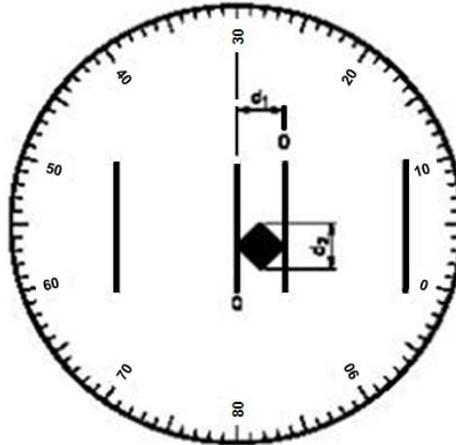


Figura 3.19 - Medida das diagonais de indentação em ensaio de Dureza Vickers.

3.6.4 Resistência Elétrica

Este é um método bastante comum e também de muito fácil utilização. Conhecendo-se com precisão as dimensões do material, pode-se fazer uma medida direta de sua resistividade elétrica medindo-se a diferença de potencial e a corrente elétrica que flui através da amostra sob a ação de um campo elétrico dc aplicado de acordo com Girotto e Santos (2002).

Considerando que a resistência elétrica (R) é uma grandeza física que expressa o “impedimento” sofrido pelos portadores de carga, sujeitos à ação de um campo elétrico, ao atravessarem de um ponto a outro em um determinado “corpo”, sendo dependente das dimensões e do tipo de material do qual este corpo é constituído. Por outro lado, resistividade elétrica é uma grandeza que também está relacionada a um impedimento sofrido pelos portadores de carga, porém, é uma propriedade intrínseca da matéria, sendo independente das

dimensões do corpo estudado. Portanto, resistividade é uma propriedade da matéria, conforme Giroto e Santos (2002).

Este método é válido somente se: 1) a quantidade de portadores de carga no material a ser analisado for alta; 2) sob pequenas variações de temperatura, a densidade desses portadores não seja muito afetada (como no caso de materiais ôhmicos). Se estas condições não forem satisfeitas, ocorrerão flutuações aleatórias da condutividade em função do tempo, o que permitirá obter somente uma média temporal da condutividade elétrica do material analisado, conforme Giroto e Santos (2002). Estes problemas são particularmente importantes quando analisamos isolantes e semicondutores de baixa condutividade.

O método duas pontas, também chamado de método de dois terminais, é o mais simples de todos. Seguindo o esboço da Figura 3.20, devemos usar um multímetro para monitorar a tensão V , outro para monitorar a corrente i e uma fonte dc para gerar o fluxo de corrente (através de uma tensão aplicada). Assim, basta substituir os valores medidos de V , i e A diretamente na equação (f), já que as dimensões da amostra são conhecidas, conforme Giroto e Santos (2002).

$$\rho = VA/il \quad (f)$$

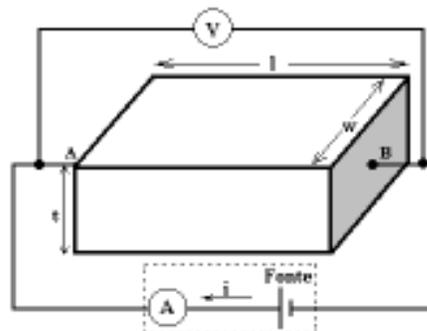


Figura 3.20 - Arranjo experimental para o método duas pontas (ou de dois terminais). Fonte: Giroto e Santos (2002).

No arranjo experimental o circuito elétrico contido no retângulo pontilhado equivale ao tocarmos os pontos A e B do material com os terminais de um multímetro comum, figura 3.20. A leitura, em ohms (V/i), e as dimensões da amostra são usadas no cálculo, utilizando a equação (f). Afirmo Giroto e Santos (2002) que para os materiais de alta resistividade elétrica é necessário usar os equipamentos fonte e amperímetro, separadamente.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Os resultados dos ensaios realizados a partir da metodologia aplicada são discutidos e verificados de acordo com o objetivo do tema em pesquisa.

4.2 Tratamento Térmico

O tratamento térmico de secagem pode ser considerado como a primeira etapa do beneficiamento do lodo para a obtenção de resíduo rico em alumina. As elevadas perdas de umidade são comprovadas após o período de 24 horas de secagem em estufa de saída de ar forçada. Porque o processo de separação da água e do resíduo no filtro prensa não resulta em um resíduo com grande eficiência de secagem. Gradientes de perda da umidade estão relativamente intrínsecos com o emprego de energia requerido ao longo de todo o tratamento térmico.

4.2.1 Secagem

A secagem em estufa em temperatura de 200°C por 24 horas do lodo que tem cor branco acinzentado após sair da estufa adquire a cor marrom claro conforme a figura 4.1 (A e B). As 11 amostragens do lodo na secagem registraram uma redução significativa de massa com perda da umidade de 88%, conforme a figura 4.2. Após a secagem em estufa a amostra apresentou uma coloração de marrom claro, com aspecto de tamanho de grãos bem reduzidos e com a formação de grânulos resistentes a esforços manuais, figura 4.1 (B).

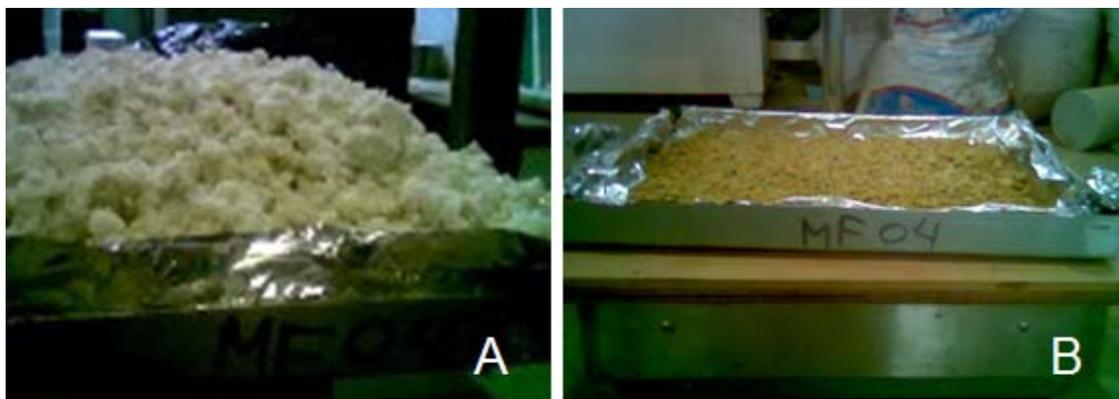


Figura 4.1 - (A) Lodo antes da secagem em estufa; (B) Lodo seco em estufa.

Ocorre uma significativa perda de água durante o processo de secagem figura 4.2. A elevada umidade contida no lodo não vem a impedir o beneficiamento do lodo a ser transformado em matéria prima rica em Al_2O_3 para a produção de cerâmica avançada. Tal significância de perda volumétrica entre o estado verde do lodo e após secagem pode ser verificada na figura 4.2.

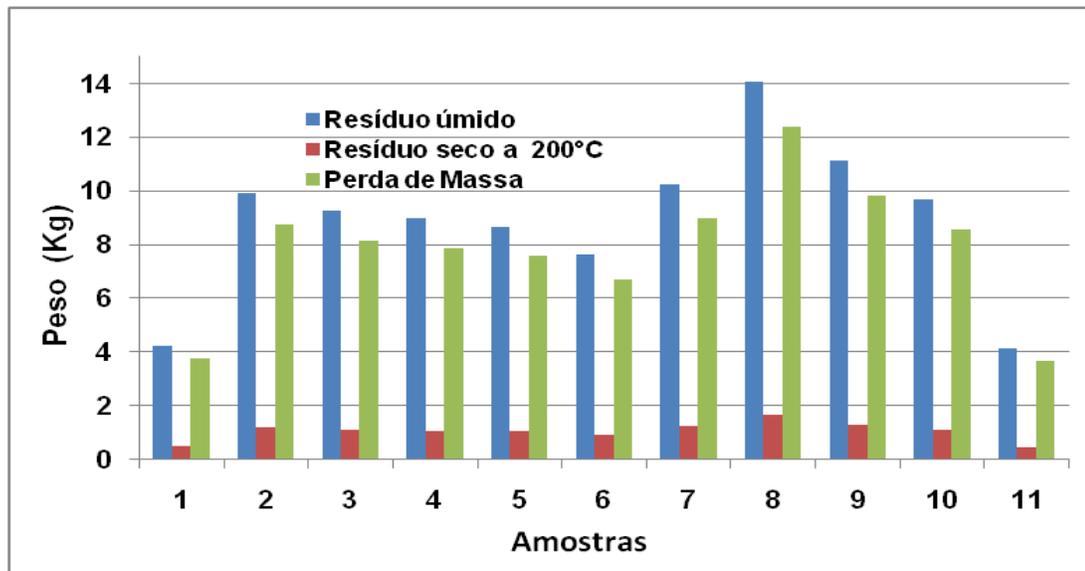


Figura 4.2 - Gráfico da distribuição de secagem dos resíduos em temperatura de 200°C.

4.2.2 Calcinação

Os tratamentos de calcinação foram realizados em 7 amostras no forno em temperaturas de 1000°C e 4 amostragens para calcinação em temperatura de 1400°C em forno tipo mufla por períodos de 24h e 48h, respectivamente. A queima da matéria nesta temperatura teve por objetivo a liberação das impurezas em forma de gás. Queima em temperatura de 1400°C é capaz de desfazer a estrutura cristalina de alguns minerais e provocar a volatilização de compostos químicos. O ensaio de difração de raios X possibilita a verificação da ausência de picos cristalinos devido à volatilização ocorrida em temperaturas elevadas (1400°C). A sinterização favorece a exaustão de gases tóxicos contendo, entre outras substâncias o gás sulfídrico (H_2S).

Após resfriamento do forno e retirada da amostra, verificou-se uma tonalidade azul clara na amostra MF03 de calcinação a 1400°C. Considerando a redução do volume em perdas por calcinações de acordo com as figuras gráficas 4.4 e 4.5 são gradativamente menores conforme o aumento de temperatura. Porque a perda significativa no lodo é

exatamente referente à umidade e as perdas de calcinações são de impurezas e de moléculas de água e de elementos voláteis que constituem os minerais. A queima em temperatura de 1000°C conferiu ao resíduo a cor branca. Está apresentada na figura 4.3, a variação de cores conforme os tratamentos térmicos adotados de secagem em estufa com temperatura de 200°C por 24 horas na amostra MF01, calcinações em temperaturas de 1000°C por tempo de 24 horas para a amostra MF02 e temperatura máxima de 1400°C durante o tempo de 48 horas para a amostra MF03.



Figura 4.3 - Tonalidade das amostras após os tratamentos térmicos.

A primeira calcinação em temperatura de 1000°C registrou um diferencial de valores entre 7,76g e 22,32g em peso de massa perdida, correspondendo a perda de compostos químicos voláteis das espécies cristalográficas (minerais) voláteis e da água estrutural de minerais da massa cerâmica MF03, figura 4.4. A calcinação em temperatura de 1400°C registrou uma variação diferencial de 23,19g e 25,79g como perda de massa. Em temperatura de 1400°C a perda de massa é relativamente pequena quando comparada com a perda de massa a 1000°C, figura 4.5.

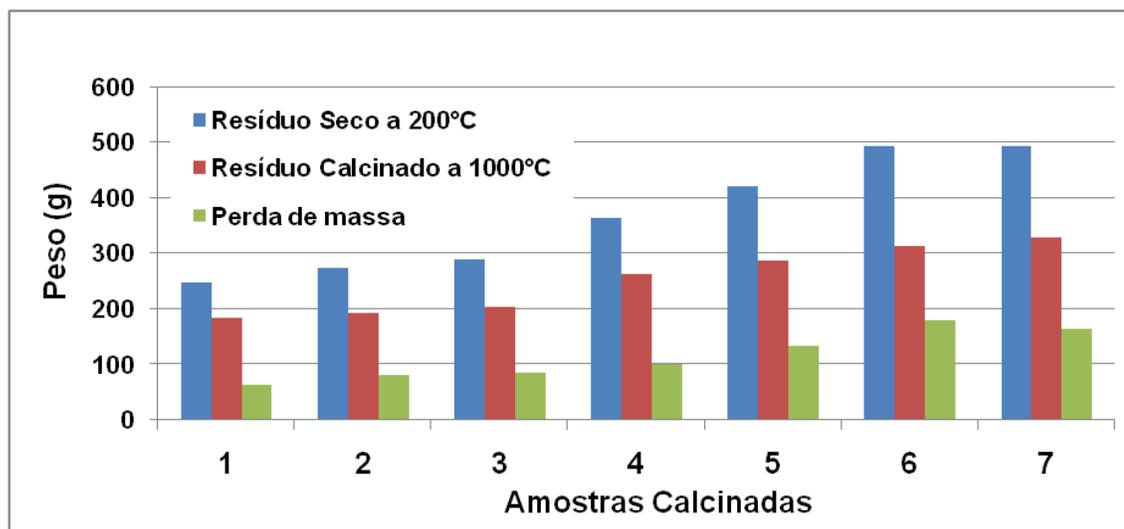


Figura 4.4 - Resíduos calcinados entre as temperaturas de 200°C e 1000°C.

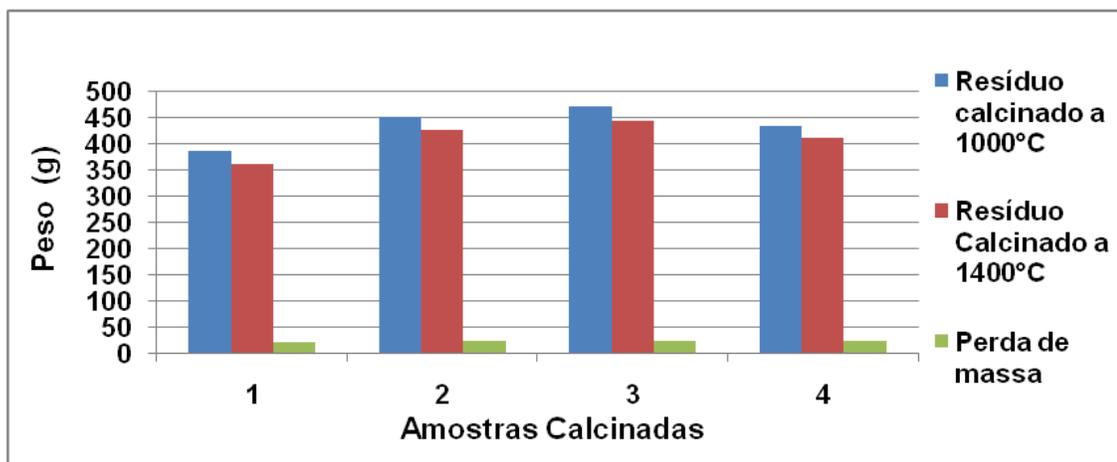


Figura 4.5 - Resíduos calcinados entre as temperaturas de 1000°C e 1400°C.

4.3 Distribuição de Tamanho de Partículas

O ensaio granulométrico foi executado com o pó cominuído em moinho e anteriormente calcinado em temperatura de 1400°C (MF 03). A distribuição do tamanho de partículas é importante para uma análise das propriedades da matéria-prima na geração do novo produto. Através dessa análise podem ser obtidos resultados aceitáveis no desempenho do produto cerâmico final, como resistência mecânica, porosidade e tamanho dos poros em uma determinada massa cerâmica.

A amostra foi preparada na forma de suspensão com 9,76% de obscuração em massa do teor de sólidos e o restante de água bidestilada, sendo submetida à agitação para completa desaglomeração das partículas. Posteriormente, esta suspensão foi submetida ao equipamento de DTP para realização do ensaio. O material referente à amostra MF03 calcinado registrou uma curva granulométrica de uniformidade média com C_U 5,78%, posicionando-se entre os valores de $5 < C_U < 15$, conforme a classificação de Caputo (1973). A curva do tipo gaussiana tem uma concentração maior de partículas com diâmetro entre 2 e 3 μm , figura 4.6.

A amostra após a moagem dos resíduos foi peneirada em abertura de #200 mesh ABNT, correspondendo a 0,074mm, visando padronizar os tamanhos máximos das partículas presentes. Com o peneiramento a úmido com o uso de água bidestilada o ensaio foi executado em triplicata para fim de obtenção da média. Neste ensaio obteve-se como resultado partículas com dimensão de 2,26 μm como o menor diâmetro das partículas.

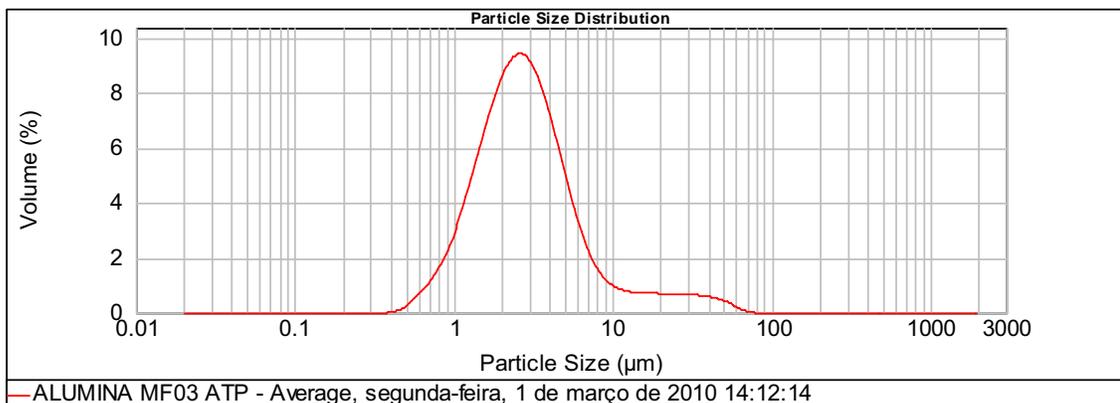


Figura 4.6 - Distribuição do tamanho de partículas da amostra MF03.

A densidade média real dos grãos de uma matéria prima (alumina) de uso industrial registra densidade de $3,49\text{g/cm}^3$. Enquanto que a densidade média real dos grãos do resíduo proveniente do lodo registrou $3,64\text{g/cm}^3$. Quando a densidade de sinterização é mais próxima da densidade padrão da alumina o material tem menos porosidade e defeitos estruturais, obtendo um produto de maior resistência mecânica.

4.4 Análises Químicas

4.4.1 Difração de Raios X

Os espectros de difração de raios X de resíduos de secagem a 200°C e tratamento térmicos a 1000°C e 1400°C são apresentados nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

O espectro de resíduo seco mostra uma estrutura semi cristalina picos não definidos. Portanto, resíduos tratados termicamente a 1000°C começaram a apresentar picos de referência a planos cristalinos de alumina (Al_2O_3) os quais estão identificados na figura 4.8.

No espectros de resíduos tratados a 1400°C apresenta estrutura cristalina de (Al_2O_3) sem impurezas.

Os resultados mostram, claramente, com o tratamento térmico de diferentes temperaturas, o resíduo torna-se Al_2O_3 policristalina monofásica.

Os resultados em espectros de DRX das amostras em geral os picos mais intensos registrados nos três gráficos de difratometria de raios X conservam-se registrados como coríndon. Registram-se a volatilização de composto químico em calcinação de 1000°C (figura 4.8) calcinação, por ser entre as temperaturas de 200°C e 1000°C onde ocorre a volatilização principalmente das impurezas.

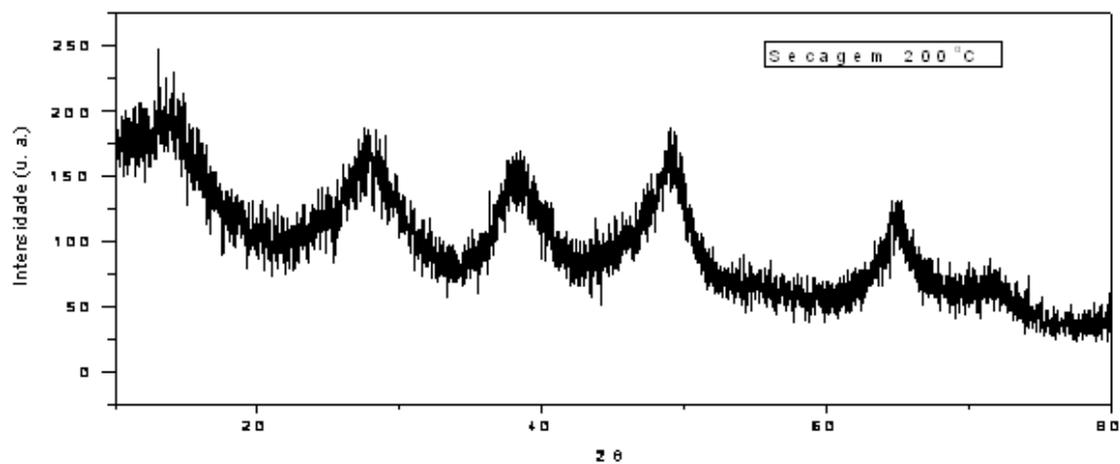


Figura 4.7 - DRX de resíduo tratado termicamente na temperatura de 200°C.

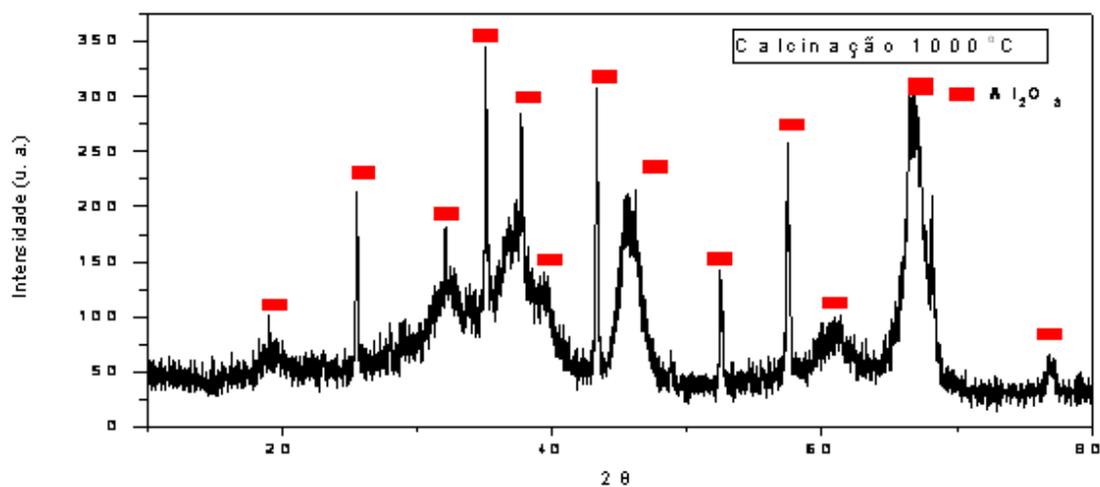


Figura 4.8 - DRX de resíduo calcinado na temperatura de 1000°C.

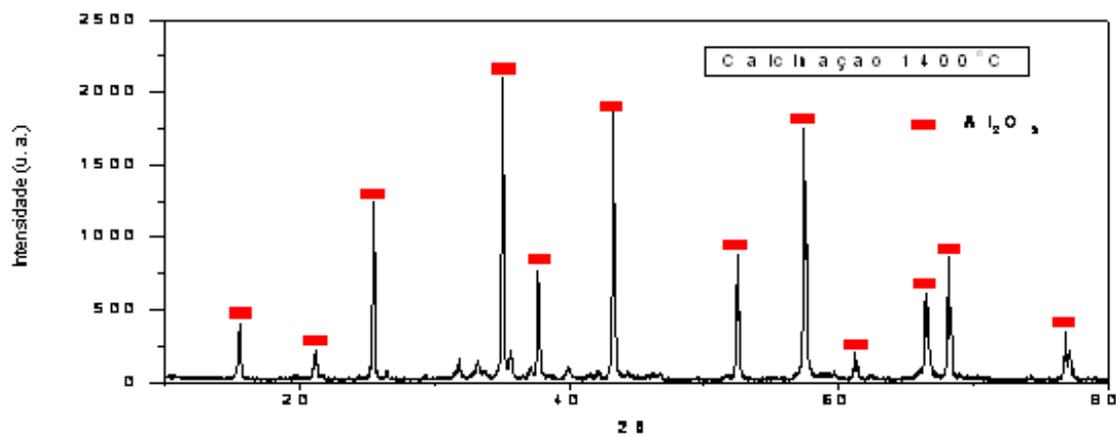


Figura 4.9 - DRX de resíduo calcinado na temperatura de 1400°C.

4.4.2 Análise de Fluorescência de Raios X

A importância da análise de fluorescência de raios X, por se tratar de avaliação semi quantitativa é a leitura em óxidos que possibilita a averiguação de compostos químicos voláteis conforme o aumento de temperatura. Observou-se que em temperatura de 1000°C o SO₃ volatiliza significativamente ao considerar o percentual registrado na temperatura de 200°C, concordando, que a decomposição dos sulfatos ocorre na faixa de temperatura de 800°C – 1200°C conforme Ribeiro *et. al.* (2002). Logo, para se obter uma matéria prima com aplicação em cerâmica alumina, ou cerâmica avançada, o lodo seco foi submetido a diferentes temperaturas de calcinação.

A composição química das amostras secas a 200°C (MF01), e calcinadas em temperatura de 1000°C (MF02) e 1400°C (MF03) registram o Al₂O₃ como composto químico mais abundante nas três amostras analisadas, mas com o aumento de temperatura de calcinação registrou-se uma concentração maior de Al₂O₃. Na amostra MF01 não consegue ser registrado em análise de fluorescência de raios X a presença dos compostos químicos TiO₂ e Cr₂O₃ por o lodo conter uma quantidade muito pequena em ppb e só quando ocorre a volatilização dos outros compostos químicos é que consegue tais aparecem na análise, tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Análise semi quantitativa do lodo.

Compostos Químicos	Produtos dos Tratamentos Térmicos		
	200°C	1000°C	1400°C
	MF 01	MF 02	MF 03
Al ₂ O ₃	80,40	91,60	93,00
SO ₃	13.50	2.12	0.05
SiO ₂	2.73	2.52	2.30
Na ₂ O	1.58	1.98	2.72
MgO	0.32	0.33	0.36
P ₂ O ₅	0.22	0.23	0.22
K ₂ O	0.03	0.03	0.04
CaO	0.15	0.13	0.13
TiO ₂	nd	0.06	0.05
V ₂ O ₅	nd	nd	0.01
Cr ₂ O ₃	nd	nd	0.01
MnO	0.02	0.02	0.02
Fe ₂ O ₃	0.21	0.20	0.23
Co ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01
NiO	0.18	0.17	0.18
CuO	0.01	0.01	0.01
ZnO	0.00	0.00	0.00
Ga ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01
SrO	0.01	0.00	0.00
ZrO ₂	0.09	0.08	0.09
SnO ₂	0.47	0.52	0.59
PERDA AO FOGO	0.13	nd	0.10
Total	100.06	100.02	100.02

A temperatura de 1400°C na amostra MF03 registra a intensificação da presença dos metais, principalmente porque eles não volatilizam e o Al_2O_3 torna-se o composto químico mais abundante. Entre as amostras MF01, MF02 e MF03 é visível o aumento de Al_2O_3 devido ao tratamento térmico de calcinação. O Co_2O_3 permanece inalterado após a calcinação de 1400°C na amostra MF03 podendo está sendo registrado na forma de cobalto.

Alcalinos terrosos como o Mg, Ca, na forma de óxidos permanecem sendo registrados nas amostras MF01, MF02 e na MF03, enquanto que o SrO que registrou-se em pequena quantidade na amostra MF01 e com a calcinação não foi mais registrado nas amostras MF01 e MF02. Os alcalinos na forma de óxido como compostos químicos principalmente o Na_2O quando submetido à calcinação aumenta significativamente sua concentração e o K_2O registra uma elevação na concentração com a calcinação a temperatura de 1400°C na amostra MF03.

O registro de SiO_2 no lodo deve-se ao processo de beneficiamento da alumina a partir do minério de bauxita. O SiO_2 registra uma constante redução no lodo quando submetido as temperaturas de 1000°C (MF02) e de 1400°C (MF03). O silício pode atuar como aglutinante das partículas de alumina fazendo parte do material. Este fato também foi observado por (BIENIEK & MARX 1994). A composição do resíduo seco e calcinado mostra-se rico em metais resistentes a altas temperaturas, principalmente pela abundância composicional de Al_2O_3 .

4.5 Análises Cerâmicas

4.5.1 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise foto micrografia mostra-se eficiente para uma análise micro na massa cerâmica confeccionada e calcinada em temperatura de 1400°C. Como se pode observar, as fotos micrografia mostram a morfologia de superfície com a presença de fraturas, poros, predominância de tamanho de partículas e o contorno dos grãos bem definidos. A análise foto micrografia da fratura é importante por fornecer imagem do ligamento e crescimento de contorno de grão como resultado do efeito do tratamento térmico e da ocorrência de poros, conforme as figuras 4.10 e 4.11.

Na figura 4.10 (A) de imagem aumentada a 15KVx1.000 (10µm) a massa cerâmica após queima de 48 horas em temperatura de 1.400°C se apresenta com poros bem distribuídos e em tamanhos diversos. Ocorre uma predominância de tamanho de partículas em forma de placas, que se apresentam com boa aderência entre elas, o que pode influenciar na propriedade de resistência mecânica quando submetida a esforços físicos. Na figura 4.10 (B)

em detalhe, aumentada, observa-se a formação de contornos de grãos nas partículas e a porosidade da matéria e na mesma, pode ser observado o ligamento entre as partículas ocorrido durante o processo de calcinação de 1400°C e a diversidade em tamanho de poros micrométricos do corpo de prova da massa cerâmica MF03.

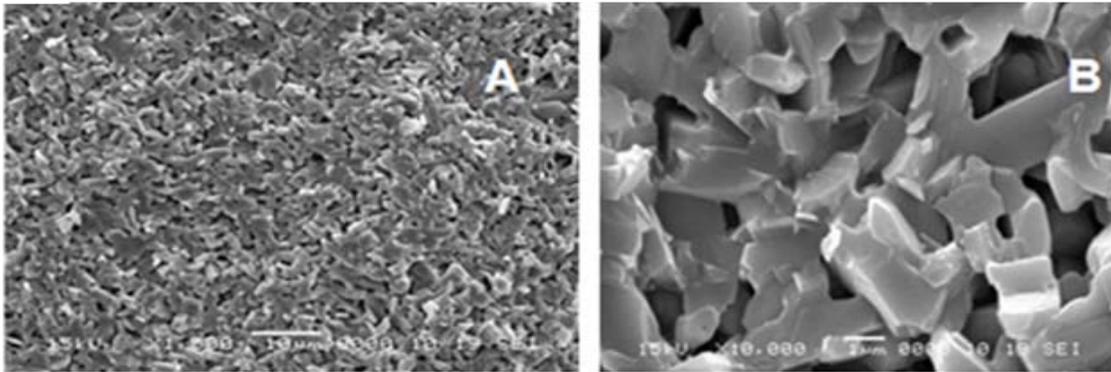


Figura 4.10 - A) Foto micrografia da fratura do corpo de prova da massa cerâmica MF03; B) Foto micrografia em detalhe maior da fratura mostrando o ligamento das partículas pela sinterização.

Na superfície do corpo de prova da massa cerâmica MF03 (figura 4.11 (A)), podem ser observados porosidades, como também, contornos das partículas com arestas arredondadas devido à exposição de alta temperatura de queima. As partículas que compõem a massa cerâmica MF03 mostram uma predominância em forma de placas em diversos tamanhos, indicando uniformidade média do diâmetro de partículas. Anteriormente classificada como sendo de uniformidade média para os grãos, ou seja, existem grãos de vários diâmetros distribuídos nas diferentes frações granulométricas compondo a massa cerâmica MF03.

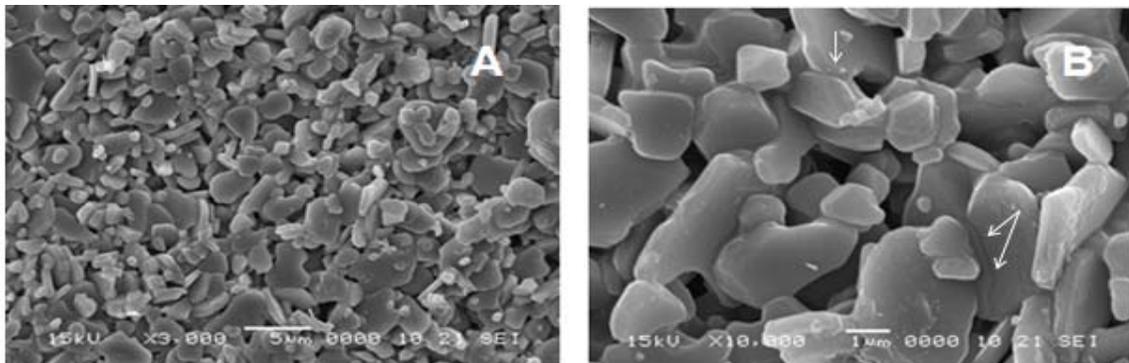


Figura 4.11 - A) Foto micrografia da superfície do corpo de prova da massa cerâmica MF03; B) Foto micrografia em detalhe maior da superfície mostrando o contorno de grãos.

Na figura 4.11 (B) as setas apontam o ligamento de partículas e a formação de contornos de grãos entre elas, ocorrido pelo processo de sinterização em temperatura de 1400°C. Verifica-se com mais nitidez, que as partículas da superfície do corpo de prova da massa cerâmica MF03 registram, portanto, um hábito placoso com contornos angulosos e arredondados em partículas de diversos tamanhos dos cristais sinterizados. Como analisado anteriormente na porosidade aparente (%) do corpo de prova, constata-se o registro de poros tanto na superfície como na fratura, porém não interligados.

4.5.2 Análises de EDS

A justificativa da importância para a análise de EDS é a verificação da homogeneização dos elementos químicos que compõem a massa cerâmica. Buscou-se verificar a distribuição dos elementos químicos no interior do corpo de prova sinterizado em temperatura de 1400°C. Visto que, a resistência de um corpo cerâmico está totalmente intrínseca a questão de elementos químicos que venham a favorecer o crescimento do contorno do grão e a conseqüente diminuição da porosidade durante a queima. O corpo de prova cerâmico da massa MF03 teve a fratura submetida à análise de EDS, figura 4.12 (B).

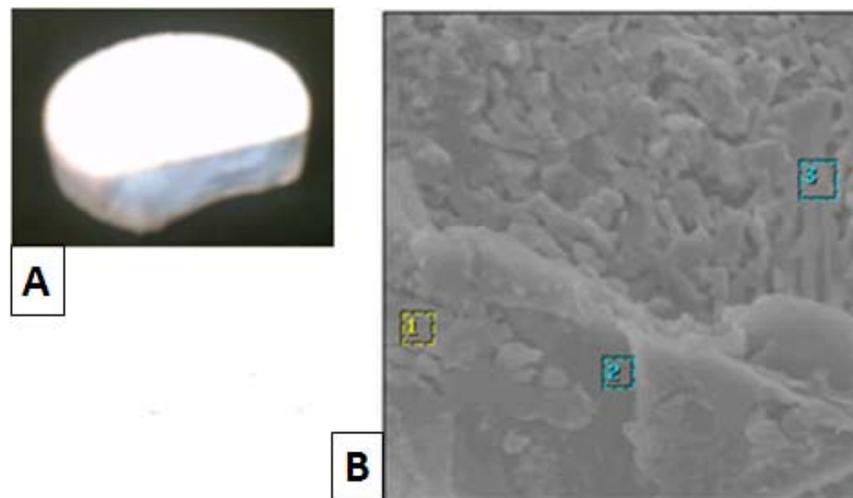


Figura 4.12 - A) Corpo de prova cerâmico da amostra MF03; B) Pontos de análise do EDS da fratura da massa cerâmica MF03.

Nos gráficos de EDS analisados com leituras altas de 0 a 6000 (ponto 1 (figura 4.13)) e leitura de 0 a 8000 (ponto 3 (figura 4.15)) registram picos intensos de Au (ouro) e Al (alumínio). O ouro é oriundo do processo de metalização da amostra para análise e o Al (alumínio) é o elemento mais abundante na composição química do lodo como matéria prima.

No ponto 2 foi realizada uma leitura menor, favorecendo o melhor espalhamento dos picos de O (oxigênio), do elemento metálico alcalino terroso como o Mg (magnésio), do elemento alcalino Na (sódio). O C (carbono) registrado nos três pontos de análise de EDS apresenta-se como impureza, pois na análise de fluorescência de raios X o mesmo não se apresenta como constituinte, considera-se, portanto, que a situação anteriormente citada ocorra devido ao fato de que o MEV opera com amostras não apenas metalizadas, mas também carbonificadas. O elemento Si (silício) consta dentro da composição química da massa cerâmica porque tem relações intrínsecas com o minério de bauxita.

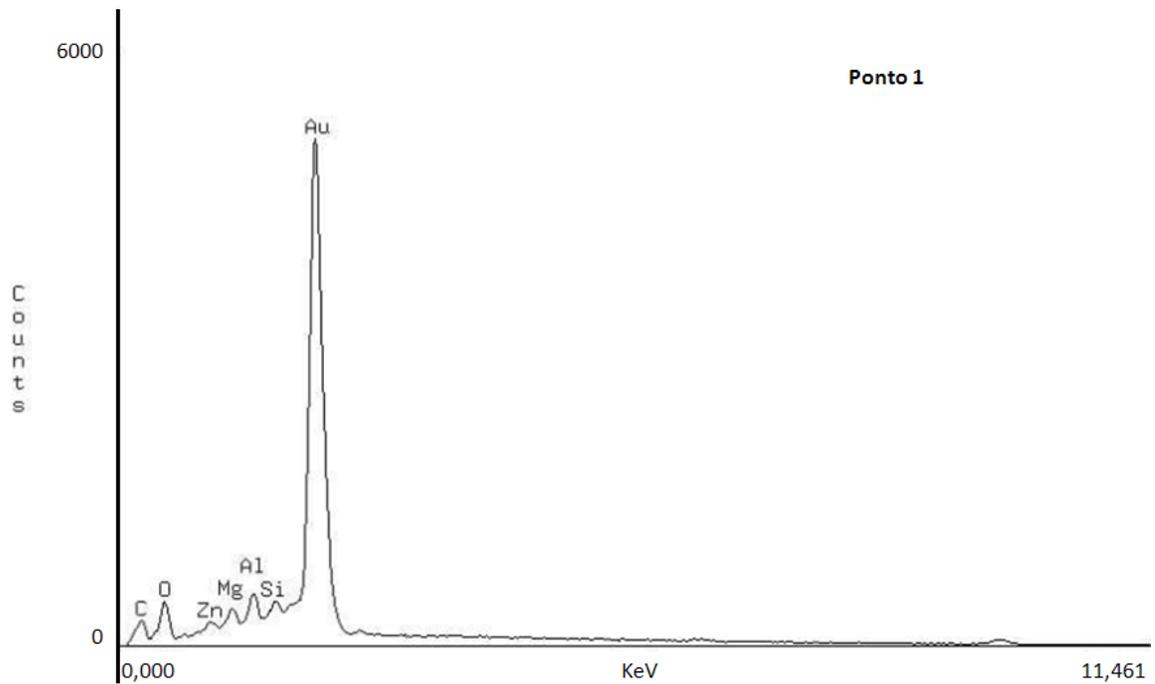


Figura 4.13 - Picos cristalográficos do ponto 1 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.

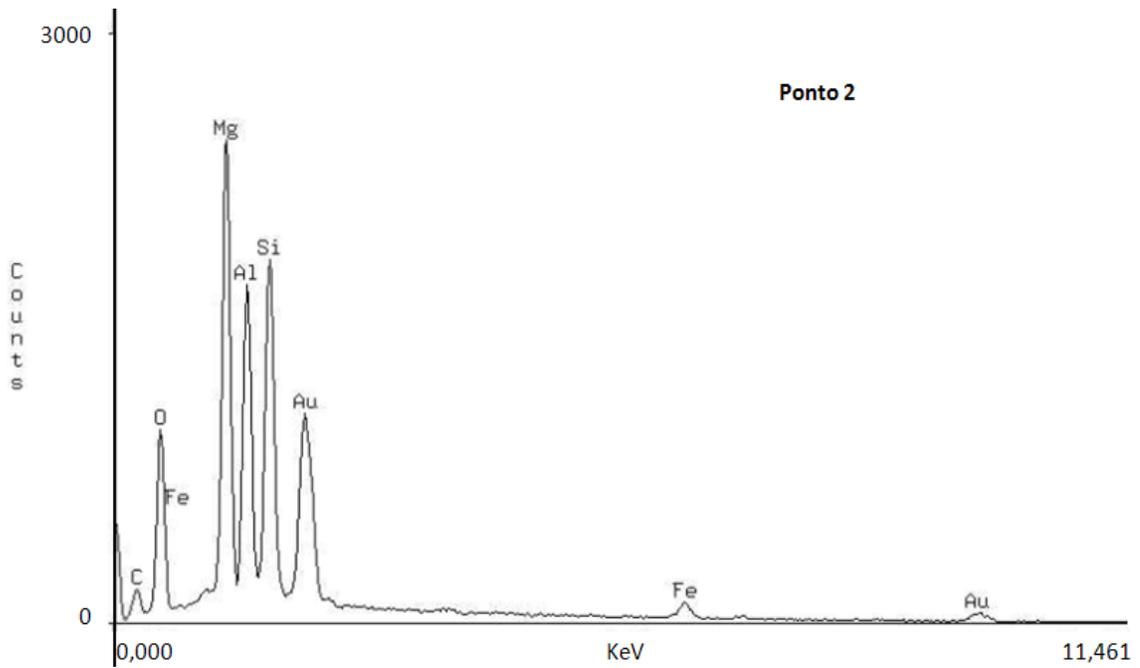


Figura 4.14 - Picos cristalográficos do ponto 2 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.

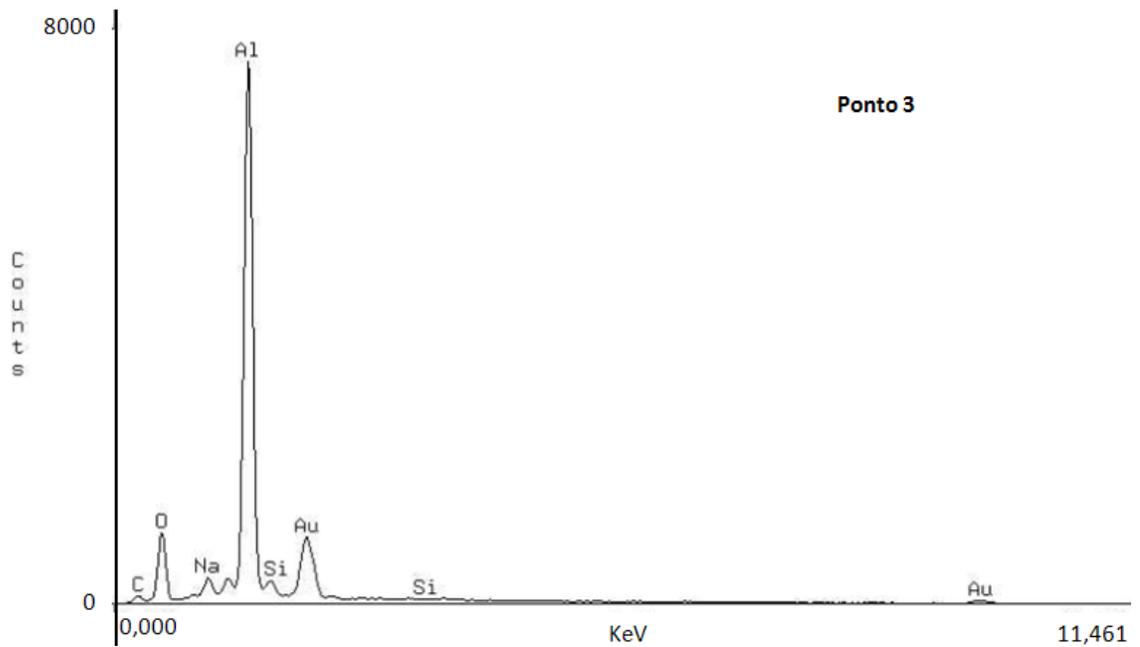


Figura 4.15 - Picos cristalográficos do ponto 3 de análise de EDS do corpo de prova da massa cerâmica MF03.

4.5.3 Índices Físicos da Massa Cerâmica MF03

4.5.3.1 Absorção de Água (AA) e Porosidade Aparente (PA)

Propriedades físicas como a absorção de água e porosidade aparente são importantes na indicação de produto cerâmico por fornecer informações intrínsecas do arranjo dos grãos que compõem a massa, e indicações da resistência mecânica da cerâmica devido à alta ou baixa capacidade de absorção de água dos corpos-de-prova que refletirá em porosidade baixa ou elevada.

A massa cerâmica MF03 desenvolvida registra um índice de porosidade aparente de 17,64% e uma capacidade de absorção de água de 5,93%. A partir desta análise pode-se verificar que a absorção de água da massa cerâmica MF03 é de baixa intensidade quando comparada com o percentual de porosidade aparente. Portanto, os poros registrados na massa cerâmica MF03 não estão interligados entre si, favorecendo a aplicação desta na confecção de isoladores elétricos.

Existem restrições de uso de um determinado produto cerâmico quanto à maior ou menor capacidade de absorção de umidade principalmente para aqueles materiais cerâmicos que estarão expostos à umidade. Tais propriedades avaliadas para a massa cerâmica de isolador elétrico que está exposto a umidade da uma dada região, logo, o percentual de água absorvida e a porosidade desta massa do isolador elétrico exposto é importante, por considerar a capacidade deste corpo cerâmico de absorver água do meio. O alto índice de porosidade, com o passar do tempo provoca o acúmulo de umidade nos poros podendo causar a expansão por umidade.

4.5.4 Resistência Mecânica e Medida Elétrica

4.5.4.1 Análise de Microdureza

Com o objetivo de relacionar as características físicas com as propriedades mecânicas dos corpos de prova na massa calcinada, foi realizada a análise de microdureza. Foram realizadas quatro medições pontuais na pastilha cerâmica seguindo o critério dos quadrantes do círculo. Nesta análise após a aplicação da carga de 2942 N durante 30 segundos em cada ponto foi possível registrar resistências de dureza (HV) com variações diferenciadas entre 283HV, 288HV, 302HV e 308HV. A média (\bar{X}) obtida foi de 295,25 e a incerteza do resultado da medição expressa como o desvio padrão medido em 10,13. A importância deste

ensaio considerado tecnológico relaciona-se com os eventos de impactos, e desgastes físicos aos quais os isoladores elétricos estão expostos durante sua vida útil.

4.5.4.2 Resistência Elétrica

A importância do ensaio de resistência elétrica está na resposta que o corpo de prova registra como resistência ao ser submetido a um campo elétrico que atravessa todo o corpo cerâmico. A resposta obtida é considerada uma propriedade intrínseca da matéria independente das dimensões do corpo estudado, conforme Giroto e Santos (2002).

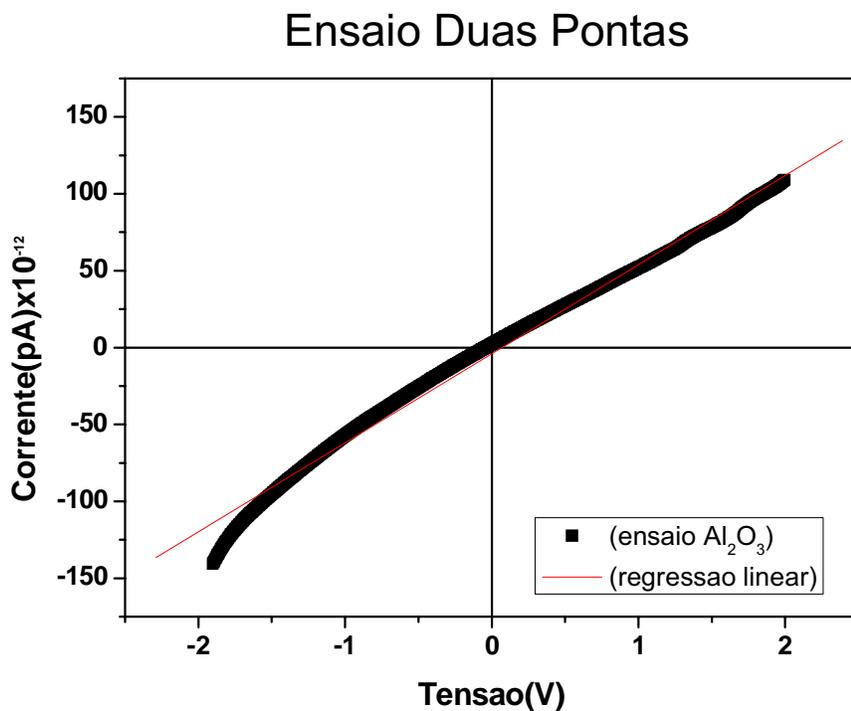


Figura 4.16 – Curva de medida de Duas Pontas da massa cerâmica.

Após a obtenção de 93% de alumina no resíduo reciclado, o resultado da medida elétrica apresentou uma resistência elétrica volumétrica de aproximadamente $10^{14} \Omega m$, o qual é suficiente para a fabricação de isoladores elétricos conforme a classificação de Auerkari (1996). Logo, mostra-se ser possível a produção de isolador elétrico, um material nobre, a partir de um rejeito industrial. A curva de medida elétrica está apresentada na figura 4.16.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Nas análises realizadas para a caracterização das propriedades químicas e físicas do lodo industrial de anodização de perfis metálicos foi verificado que seu reaproveitamento é possível sem o emprego de aditivos.

A granulometria do lodo em estado de resíduo seco apresentou finura das partículas de uniformidade média, configurada em uma curva do tipo gaussiana, proporcionando que os espaços vazios sejam ocupados pelas partículas de diâmetro menor, ocasionando como consequência menor porosidade no corpo cerâmico e resultando assim maior resistência mecânica do produto final cerâmico.

Na fase experimental de determinação da composição de massa cerâmica, analisaram-se duas composições: uma massa composta de resíduo calcinado mais aditivo e outra massa cerâmica com apenas o resíduo calcinado. O emprego do aditivo objetivava a melhoria das propriedades mecânicas do corpo de prova desenvolvido, porém, verificou-se que o gasto econômico com aditivos não trouxe benefícios a massa cerâmica. Apenas a massa cerâmica com o resíduo calcinado, denominada MF03 mostrou-se satisfatória a ser submetida às análises tecnológicas.

O corpo de prova desenvolvido a partir da massa cerâmica denominada MF03 registrou um nível considerado de porosidade, mas devido a uniformidade média das partículas desta massa cerâmica utilizada como matéria prima corroborou com uma capacidade de absorção de água muito baixa. Considerando que os valores de AA (%) e de PA (%), confirmados nos resultados desta pesquisa, apresentaram-se com certa disparidade, pode-se concluir que os poros do corpo cerâmico não estão interligados. Portanto, não podem ser consideradas restrições quanto ao uso e fabricação de isoladores elétricos da massa cerâmica MF03 em áreas de grande incidência de umidade (chuva).

A calcinação em temperatura de 1400°C é benéfica para o eficiente ligamento entre partículas durante o período de 48 horas. A classificação de uniformidade média das partículas garante que se tenha menos espaço entre as partículas e conseqüentemente, resulta em menos poros dentro do corpo cerâmico após a calcinação. A sinterização em temperatura de 1400°C proporciona à concentração de metais a desestruturação e reorganização cristalina de alguns minerais contribuindo para a melhor organização do corpo cerâmico e ganho de resistência mecânica.

Neste trabalho foi possível apresentar um bom potencial para a reciclagem do resíduo analisado, obtendo após as pesquisas realizadas e constatadas a produção de alumina com cerca de 93% de pureza na análise química semi-quantitativa.

A presença de 93% de alumina no resíduo e resistência elétrica com aproximadamente $10^{14}\Omega\text{m}$ registra como resultado suficiente para a fabricação de isoladores elétricos.

Os resultados do experimento indicam que a linha de pesquisa sobre a lama residual de uma indústria de anodização, começa com o tratamento térmico, para a linha de produção de isoladores elétricos provenientes de resíduos industriais.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Estudo de viabilidade de fabricação de isoladores elétricos de alta tensão com resíduos reciclados a temperatura de 1.000°C por uma questão de economia da energia de fabricação.

Avaliação dos ensaios elétricos nos isoladores de alta tensão nas condições reais de isolação de eletricidade.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Guia Técnico de Alumínio. Tratamento de Superfície.** vol. 3. 2. ed. São Paulo, 2005.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **O alumínio: alumínio primário.** Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/producao_alupri.asp> Acesso em 30 out. 2009.

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Agenda. Panorama econômico do alumínio.** Ed. nº 752, 1ª Quinzena de Abril de 2009, p. 3-5.

ALBERO, J. L. A. **A operação de pesagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial. Parte1: o preenchimento das cavidades do molde cerâmico industrial v.5(5),** pg. 23-28(2000).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-10004. **Resíduos sólidos.** 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005. **Lixiviação de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006. **Solubilização de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14001:2004. **Sistemas de gestão ambiental.** Rio de Janeiro, 2004.

ALCOA. **Alumina & produtos químicos: processos de produção.** Disponível em: <http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_alumina_processo.asp> Acesso em 15 dez. 2009.

ALVES, J.; BARBOSA, M. **Recursos minerais do estado do Rio de Janeiro.** Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br/item.asp?>> Acesso em 10 nov. 2009

ANTUNES, D. L. **Estudo de viabilidade econômica de uma empresa de reciclagem de plásticos de origem industrial.** [Dissertação] Mestrado em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis – SC, 2001, 89 p.

AUERKARI, P. **Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics,** VTT Manufacturing Technology, Technical Research Center of Finland, Espoo, 1996.

- BARBOSA, L. K. **Estudo sobre tratamento anticorrosivo ao alumínio.** [Monografia] Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2005, 28p.
- BARROS, J. V. **Produção e estudo da microestrutura e propriedade mecânica da cerâmica Ba_2HoZrO_5 , à base de zircônia para fabricação de cadinhos de alta temperatura.** (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. 71p.
- BIENIEK, K. W; MARX, R. *Die mechanische belastbarkeit neuer vollkera-mischer kronen-und brückenmaterialien.* *Schweiz Monatsch Zahnmed.* 1994; 104(3): 284-9.
- CALLISTER JR., W. D. *Materials Science and Engineering: an Introduction.* 5ª edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999. 871 p.
- CAPUTO, H.C. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**, 3ªed. , Revista e Ampliada, MEC vol. 1, p 243, Rio de Janeiro, 1973.
- CAVALCANTI, J. E. **A década de 90 é dos resíduos sólidos.** Revista Saneamento Ambiental – nº 54, p. 16-24, nov./dez. 1998.
- CHIANG, Y., III BIRNIE, D., KINGERY, W. D. *Physical Ceramics – Principles for Ceramic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997. 522 p.
- COELHO, H. **Resíduos sólidos: um grave problema para saúde pública.** Jornal da ANBio, Ano 2, nº 7, julho de 2002, Rio de Janeiro, p. 12.
- COUTO, H. J. B.; FRANÇA, S. C. A.; SAMPAIO, J. A. **Recuperação de finos na indústria mineral utilizando os processos de flotação em coluna e por ar dissolvido.** In: **Anais da I Jornada PCI – 2008.** Zuleica Carmen Castilhos (coord.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 451p. (Série Programa de Capacitação Institucional, 01).
- DEPARTAMENTO DE MATERIAIS. **Comportamento do alumínio anodizado à corrosão atmosférica: Influência do tipo de colmatagem.** Núcleo de Materiais Metálicos Proc. 204/11/14731. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério das obras públicas, transportes e habitação. Lisboa, Junho de 2004, 63p.
- DIAMANTINO, A.G; NICOLAU, R, A. **RAIOS X, EDX E MEV como método de avaliação do processo de reparação do tecido ósseo: revisão de literatura.** In: Anais XIII INIC - Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 15 a 16 outubro 2009, São Paulo, SP.

- ERENO, D. **Patentes geram produtos para tratamento de efluentes industriais.** Química sem Resíduo Tóxico. Pesquisa FAPESP 155. Janeiro, 2009, p. 84-85.
- FERREIRA, J. M. F.; OLHERO, S. M. *Al-rich sludge treatments towards recycling.* *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, 2002, p. 2243-49.
- FERREIRA, J.M.; OLHERO, S. M. *Journal of the European Ceramic Society*. 22, p. 2243-49, 2002.
- GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. **Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetuá-las corretamente.** Química Nova, Vol. 25, N^o. 4, 639-647, 2002.
- GOMES, V.; PICCOLI, R.; OLIVEIRA, A. P. **Resíduo de anodização do alumínio como matéria prima para a indústria cerâmica.** Revista Cerâmica Informação, n^o 23, julho/agosto, 2002, p. 48-50.
- GUEDES, W. A. **Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde: aspectos legais, técnicos e de conformidade de produtos relacionados com os mesmos.** Dissertação de Mestrado em Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2006, p.27.
- IEL. Instituto Euvaldo Lodi. **Projeto.** 04 de abril de 2005. Disponível em: <http://portaldeprojetos.ielsc.org.br/IEL_comunicacao/projetos.htm.> Acesso em 15 dez. 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040. *Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework.* Jun. 1997.
- KINGERY, W. D. *Introduction to Ceramics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.781p.
- KNISS, C. T. **Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinza pesadas de carvão mineral.** [Tese] Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005, 279 p.
- LAVIERI, A. **Isoladores Elétricos - componentes básicos para um sistema elétrico.** Revista Canal Energia. Gesel / Eletrobras, São Paulo, 2010, p.2.
- MANSO, E. A. **Análise granulométrica pelos solos de Brasília pelo granulômetro a laser.** [Dissertação] Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 1999, 128p.
- METALS HANDBOOK. *Corrosion.* 9 ed. ASM International, v. 13, 1987.

- MOMBACH, V. L. **Incorporação do vidro de lâmpadas fluorescentes na produção de fritas cerâmicas.** [Dissertação] Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007, 105 p.
- MORRELL, R. 1987. *Handbook of Properties of Technical & Engineering Ceramics*. Part 2. *Data Reviews, Section I. High-alumina ceramics*. London: Her Majesty's Stationery Office. 255 p.
- OHRING, M. *Engineering Materials Science*. Academic Press, Londres, 1992. 827 p.
- PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: Microestrutura e Propriedades**, Hemus, São Paulo, 1998.
- PINTO, J. M. **Contaminação em metais da zona a norte de Pombal.** [Dissertação] Mestrado em Geociências, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- PIRES, A.; MATTIAZZO, M. E. **Efluentes da indústria processadora de batata x preservação do meio ambiente.** 20/07/2005. Disponível em: <http://www.abbabatabrasileira.com.br/minas2005/07/20_Efluentes_meio_ambiente.pdf>
- _____. **Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura.** Circular Técnica 19. Jaguariúna: Embrapa, 2008, 9 p. ISSN 1516-4683.
- POMBO, F.; MAGRINI, A. **Panorama de aplicação da norma ISO 14001 no Brasil.** Rev. Gest. Prod., São Carlos, v. 15, n. 1, p. 1-10, jan/abr, 2008.
- REIS, M. N. **Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação técnica das esquadrias de alumínio.** [Dissertação] Mestrado. Universidade de São Paulo Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Departamento de Tecnologia, São Paulo, Março de 2006, 199 p.
- RIBEIRO, M. J.; TULYAGANOV, D. U.; *et al.* **Recycling of Al-rich industrial sludge In: refractory ceramic pressed bodies.** *Ceramics International*, v.28, 2002, p. 319–326.
- RIBEIRO, M. J.; GANOV, D. U.; FERREIRA, J. M.; LABRINCHA, J. A. *Ceramics International* 28, p. 319-326, 2002.
- RICHERSON, D. W. *Modern Ceramic Engineering*. New York: Marcel Dekker. 1982, 399 p.
- REED – HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física.** 2ª ed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982. 776 p.

RVSHKEWITCH, E. *Oxide Ceramics. Physical Chemistry and Technology*. New York: Academic Press. 1960, 472 p.

SANTOS, S. C. H.; CELLI, C. E. **Destinação final de resíduos industriais pela técnica de co-processamento**. Disponível em: <www.institutovotorantim.org.br>. Acesso em: 23 mar. 2010.

SARTOR, M. N. **Utilização do resíduo de anodização do alumínio como matéria-prima para o desenvolvimento de produtos cerâmicos**. [Dissertação] Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006, 77 p.

SEBRAE. **Manual de Gerenciamento de Resíduos: Guia de procedimento passo a passo**. Sistema FIRJAN. Rio de Janeiro: GMA, 2ª Edição, 2006, p.11.

SILVA, L. C. **Recuperação dos isoladores de vidro das linhas de transmissão condenados por corrosão e avaliação da aplicação de nanotecnologia na redução de acúmulo de poluentes**. (Dissertação) Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008, p.73.

SILVA, P. F. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas**, Belo Horizonte: Imprensa Universitária UFMG, 1981.

SILVA, P. F.; FRANÇA, S. C. A; ANDRADE, M. C. **Processo de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente da indústria mineral**. In: Anais IV JIC – Jornada Iniciação Científica UFRRJ. Rio de Janeiro, CETEM, 2004.

SKOOG, Douglas A; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. **Princípios de Análise Instrumental** Editora Bookman Companhia, Artmed, 2006, p 265.

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**, 3ª ed., *McGraw-Hill, Inc.*, Alfragide, 1998, 892 p.

SOUSA, F. J. P. **Estudo e desenvolvimento de alternativas para o aproveitamento de resíduo das indústrias de revestimentos cerâmicos**. [Dissertação] Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003, 93p.

TEIXEIRA, N. S.; LIMA, M. H. R. **A indústria do alumínio primário no Brasil: perspectivas de relações comerciais com a China**. Artigo de iniciação científica – UFRJ, 2003, p.11.

TOFFLER, A. **A terceira onda**. 19 ed. Rio de Janeiro: Record, 1993, p.25-30.

VEIGA, V. **Análise de indicadores relacionados à reciclagem de resíduos sólidos urbanos no município de Florianópolis**. [Dissertação] Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004, 140 p.

VIEIRA, A. M. **Tecnologia brasileira captura moléculas de CO₂ e gera produtos**. disponível em: <<http://www.portaldomeioambiente.org.br/artigos/divulgacao-cientifica/html>> Acesso em: 20 dez. 2009.

YOSHIMURA, M.; BOWEN, H. K. 1981. **Electrical breakdown of alumina at high temperatures**. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, No. 7, 1981, pp. 404 - 410.

SITES PESQUISADOS (Imagens)

<http://www.tecitec.com.br/p_etb.html> Acessado em 10/07/2010.

<<http://www.abal.org.br>> Acessado em março 2005.

<http://www.geradordeprecos.info/imagenes2/cortizo_20> Acessado em 10/07/2010.

<<http://www.tecnoquim.com.br/servicos/processo.php>> Acessado em 10/07/2010.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.