

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**FELIPE DE LUCA SARTOR**

**REAPROVEITAMENTO E DESTINAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO DE  
BENEFICIAMENTO DE SAIBRO DA MINERAÇÃO NOSSA SENHORA DO  
CARMO**

**CRICIÚMA**

**2015**

**FELIPE DE LUCA SARTOR**

**REAPROVEITAMENTO E DESTINAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO DE  
BENEFICIAMENTO DE SAIBRO DA MINERAÇÃO NOSSA SENHORA DO  
CARMO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental no curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. Dr. Elídio Angioletto

**CRICIÚMA**

**2015**

**FELIPE DE LUCA SARTOR**

**REAPROVEITAMENTO E DESTINAÇÃO DO REJEITO DO PROCESSO DE  
BENEFICIAMENTO DE SAIBRO DA MINERAÇÃO NOSSA SENHORA DO  
CARMO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental, no Curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Tratamento e Valoração de Resíduos.

Criciúma, 30 de novembro de 2015.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Doutor Elídio Angioletto - (UNESC) - Orientador

Engenheiro Evaldo Ávila Da Silva - Mineração Nossa Senhora do Carmo

Prof. Doutor Michael Petterson - (UNESC)

**Dedico este trabalho aos meus pais, família e amigos que foram imprescindíveis para que eu chegasse até aqui, me apoiando, orientando e motivando a cada momento de minha vida.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais e família que me deram todo o apoio e incentivos em toda a minha vida;

A todos os funcionários e diretores da Mineração Nossa Senhora do Carmo pelo apoio no decorrer da pesquisa, em especial ao meu supervisor, o Engenheiro de Minas Evaldo Ávila da Silva, o qual me instruiu e auxiliou no decorrer deste trabalho;

A todos os laboratoristas, os responsáveis dos laboratórios e co-orientadores do IDT e IPAT pela disponibilidade e auxílio durante as análises realizadas. Agradecimento em especial ao GMC, laboratório presente no IDT da UNESC;

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental, bem como colegas e amigos de graduação pela troca de experiências e aprendizados ao longo do curso e nesta etapa final com o TCC;

Ao Prof. Dr. Elídio Angioletto pelo tempo dispendido e pela ótima orientação e convívio no decorrer deste semestre;

E a banca examinadora pela disponibilidade e contribuições dadas para o aperfeiçoamento do presente trabalho.

**“It matter not how strait the gate, how  
charged with punishments the scroll, I am the  
master of my fate, I am the captain of my  
soul.”**

**William Ernest Henley**

## RESUMO

A Mineração Nossa Senhora Do Carmo atualmente comercializa uma grande quantidade de feldspato, devido a demanda no setor cerâmico, principalmente na região sul do Estado de Santa Catarina. A função do feldspato é de atuar como fundente no processo de fabricação das cerâmicas vermelha e branca. Em razão desta alta produção de feldspato a mineradora enfrenta alguns problemas ambientais, como por exemplo a geração do resíduo do processo de beneficiamento do feldspato. Este estudo, tem por objetivo analisar a viabilidade técnica da incorporação do resíduo na massa cerâmica, seja para produção de tijolos e/ou de telhas em escala laboratorial. Para isto, foram realizados ensaios de caracterização físico-químicos do resíduo e da argila. Posteriormente, aplicou-se formulações em diferentes percentuais de resíduo (0, 5, 15 e 25%) à massa cerâmica com uma argila padrão da região de Morro da Fumaça. Feito isto, os corpos de provas foram extrudados e logo após, submetidos à queima em três distintas temperaturas, seja elas a 850, 950 e a 1050 °C. As propriedades tecnológicas avaliadas neste estudo foram: retração linear de queima, absorção de água e resistência mecânica a flexão. Ao final, como aprofundamento do estudo, analisou-se estatisticamente as propriedades tecnológicas, por meio da análise da variância. Os resultados de classificação do resíduo indicaram como sendo Não Perigoso classe II A – Não Inerte. Paralelo a isto, os resultados das propriedades técnicas permitiram verificar a viabilidade técnica na adição de 15 e 25% do resíduo na massa cerâmica. Nesta faixa, verificou-se que todos os parâmetros mecânicos das peças melhoraram comparado com as peças em branco (0% de resíduo), exceto para os valores de retração linear de queima. A análise da variância mostrou que os fatores para o ensaio de absorção de água são significativos e por isso, reprodutíveis na população. Os ensaios de retração linear de queima e resistência a flexão apresentaram não significâncias e recomenda-se um maior número de amostras/evidências afim de melhorar os resultados estatísticos. Como continuidade deste estudo, sugere-se o desenvolvimento do mesmo em escala industrial, uma vez que se pode obter diferenças no rendimento das composições em escala maior. Ainda, aconselha-se um estudo de viabilidade econômica do tratamento e destinação deste resíduo com o intuito de aperfeiçoar este trabalho.

**Palavras-chave:** Resíduo. Cerâmica Vermelha, Propriedades técnicas, Análise da Variância.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de beneficiamento de saibro na Mineração Nossa Senhora do Carmo. ....	12
Figura 2 – Representação esquemática grelha fixa. ....	22
Figura 3 – Esquema de uma peneira vibratória.....	23
Figura 4 – Imagem esquemática do filtro prensa horizontal.....	28
Figura 5 – Ilustração de filtro de tambor a vácuo localizado na empresa.....	30
Figura 6 – Fluxograma do processo da cerâmica vermelha.....	33
Figura 7 – Calha que conduz o efluente até as bacias de decantação. ....	37
Figura 8 – Ilustra o ensaio de resistência a flexão. ....	41
Figura 9 – Imagem da Extrusora utilizada no GMC.....	45
Figura 10 – Imagem do forno elétrico utilizado neste projeto.....	47
Figura 11 – Ensaio de DRX realizados com o resíduo. ....	52
Figura 12 – Ensaio de DRX realizados com o resíduo. ....	53
Figura 13 – DTP do resíduo objeto de estudo.....	54
Figura 14 – Fases cristalinas identificadas para as argilas A e B.....	57
Figura 15 - Curva dilatométrica das peças para cada composição. ....	59
Figura 16 – Resíduo calcinado a 900 °C.....	60
Figura 17 – Resíduo calcinado a 1.200 °C.....	61
Figura 18 – Valores obtidos para retração linear de queima. ....	61
Figura 19 – Gráfico ANOVA para retração linear de queima. ....	63
Figura 20 – Valores obtidos para absorção de água.....	64
Figura 21 – Gráfico ANOVA para absorção de água. ....	65
Figura 22 – Resultados para resistência a flexão das peças. ....	66
Figura 23 – Gráfico ANOVA para resistência mecânica a flexão. ....	67
Figura 24 – Cor de queima resultante dos corpos de prova.....	68
Figura 25 – Cor de queima resultante dos corpos de prova.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantificação de sólidos, vazão e vazão mássica da calha.....	48
Tabela 2 – Análise química do resíduo objeto de estudo.....	49
Tabela 3 – Valores obtidos para o ensaio de DTP.....	54
Tabela 4 - Análise química da argila objeto de estudo.....	55
Tabela 5 – Valores com melhores desempenhos plásticos. ....	58
Tabela 6 – p-valores para o ensaio de retração linear de queima.....	62
Tabela 7 – p-valores para o ensaio de absorção de água. ....	65
Tabela 8 – p-valores para o ensaio de absorção de água. ....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
C	Concentração (g/L)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de raio X
DTP	Distribuição de Tamanho de Partícula
FRX	Fluorescência de raio X
GMC	Grupo de Materiais Cerâmicos
IDT	Instituto de Engenharia e Tecnologia
IPARQUE	Parque Científico e Tecnológico
IPAT	Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
L <sub>s</sub>	Comprimento corpo de prova Seco
L <sub>q</sub>	Comprimento corpo de prova Queimado
MRF	Resistência Mecânica a Flexão
M <sub>s</sub>	Massa do corpo de prova após Queima
M <sub>sat</sub>	Massa do corpo de prova Saturado em Água
NBR	Norma Brasileira
PF	Perda ao Fogo
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RL <sub>q</sub>	Retração Linear de Queima
SENAISC	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Santa Catarina
UNESC	Universidade do extremo sul catarinense

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS EXPECÍFICOS .....	9
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
2.1 HISTÓRICO DA EMPRESA.....	10
2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE SAIBRO.....	11
<b>2.2.1 Processo de Beneficiamento para Cerâmica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2 Processo de Beneficiamento para Colorifício .....</b>	<b>14</b>
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SEGUNDO NBR 10.004/2004.....	14
2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
<b>2.4.1 Resíduos Sólidos na Mineração .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2 Reuso e Reaproveitamento de Rejeitos .....</b>	<b>18</b>
2.5 MÉTODOS DE REAPROVEITAMENTO DO REJEITO.....	19
<b>2.5.1 Peneiramento.....</b>	<b>20</b>
2.5.1.1 Grelhas Fixas .....	21
2.5.1.2 Peneiras Fixas.....	22
2.5.1.3 Grelhas Vibratórias.....	22
2.5.1.4 Peneiras Vibratórias .....	22
<b>2.5.2 Filtração .....</b>	<b>23</b>
2.5.2.1 Filtro Prensa .....	25
2.5.2.1.1 <i>Filtro Prensa Horizontal.....</i>	26
2.5.2.2.1 <i>Filtros a Vácuo de Disco Rotatório .....</i>	29
2.5.2.2.2 <i>Filtro de Tambor a Vácuo .....</i>	30
2.6 PRINCIPAIS DESTINAÇÕES DO REJEITO.....	31
2.7 CERÂMICA VERMELHA.....	33
<b>2.7.1 Processo .....</b>	<b>33</b>
2.7.1.1 Preparação da Matéria-Prima .....	34
2.7.1.2 Conformação.....	34
2.7.1.3 Secagem .....	34
2.7.1.4 Queima.....	35
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1 QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS E VAZÃO DA CALHA.....	36

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO E DOS CORPOS DE PROVA.....	38
<b>3.2.1 Fluorescência de Raio-X (FRX) .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2 Difração de Raios-X (DRX).....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.3 Tamanho de Partícula .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4 Calcinação .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.5 Dilatometria.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.6 Caracterização Mecânica após Produto Acabado.....</b>	<b>40</b>
3.2.6.1 Módulo de Resistência à Flexão .....	40
3.2.6.2 Retração Linear de Secagem e Queima .....	41
3.2.6.3 Absorção de Água (AA).....	42
3.2.6.4 Cor de Queima .....	42
3.2.6.5 Análise da Variância.....	43
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA .....	43
3.4 SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO INDICADO .....	44
3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	44
<b>3.5.1 Preparação matéria-prima .....</b>	<b>44</b>
<b>3.5.2 Conformação .....</b>	<b>44</b>
<b>3.5.3 Secagem.....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.4 Processo de Queima .....</b>	<b>46</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS E VAZÃO DO EFLUENTE.....	48
4.2 ANÁLISES QUÍMICAS RESÍDUO.....	49
<b>4.2.1 FRX .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2 DRX.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3 Classificação do Resíduo ABNT 10.004/04 .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.4 Distribuição de Tamanho de Partícula (DTP).....</b>	<b>54</b>
4.3 ANÁLISES QUÍMICAS ARGILA .....	55
<b>4.3.1 FRX .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.2 DRX.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.3 Plasticidade .....</b>	<b>57</b>
4.4 ANÁLISES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA.....	57
<b>4.4.1 Umidade a Extrusão .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.2 Dilatometria.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.3 Retração Linear de Queima .....</b>	<b>61</b>

4.4.3.1 Análise Estatística (ANOVA) .....	62
<b>4.4.4 Absorção da Água.....</b>	<b>63</b>
4.4.4.1 Análise Estatística (ANOVA) .....	64
<b>4.4.5 Resistência Mecânica à flexão de três pontos (MRF) .....</b>	<b>65</b>
4.4.5.1 Análise Estatística (ANOVA) .....	67
<b>4.4.6 Cor de Queima.....</b>	<b>68</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO (FRX E DRX).....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O principal minério beneficiado do saibro presente na Mineração Nossa Senhora do Carmo é o feldspato. O feldspato é um termo que engloba principalmente dois grupos de minerais, são eles os álcalis-feldspato e os plagioclásios (COELHO, 2001).

O mineral em questão engloba uma série de silicatos de alumínio, contendo traços constituintes de potássio, sódio, cálcio e, não raramente, bário. As características encontradas no feldspato na jazida objeto de estudo é o potássico. Sua principal função no corpo cerâmico é promover a fusão a uma temperatura mais baixa. No vidro, é a fonte principal de alumínio, além da função de fundente (COELHO, 2001).

Referente aos dados de Júnior (2014), consultor do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, a produção mundial de feldspato atingiu em 2013 aproximadamente 22,96 milhões de toneladas, sendo os maiores produtores a Turquia, seguida da Itália e China, 30,5%, 20,5% e 9,1% respectivamente. Neste mesmo ano a produção brasileira correspondeu 1,2% do total mundial.

No Brasil a reserva medida é da ordem de 316 milhões de toneladas, distribuída entre os estados do Paraná (28,3%), Minas Gerais (13,3%), Paraíba (10,4%), Rio Grande do Norte (10,2%), Rio de Janeiro (10,2%), Bahia (8,9%), São Paulo (8,2%), Santa Catarina (6,2%) e Tocantins (4,3%) (JÚNIOR, 2014).

Ainda segundo Júnior (2014), a produção bruta do mineral em 2013 foi de aproximadamente 320.048 t, representando uma queda de 2,4% em relação ao ano anterior. O Estado de Santa Catarina obteve uma contribuição de 15,7% na produção nacional.

A lavra de feldspato em questão é explorada de forma mecânica, ou seja, com o auxílio de uma escavadeira hidráulica, que é responsável pelo decapeamento do minério em bancadas com uma relação de 7/7 metros.

Com o minério lavrado, o mesmo é transportado até a unidade de beneficiamento. A lavagem e peneiramento constituem a primeira fase do processo, onde se retiram materiais como argila/areia e outros materiais mais grosseiros. Os materiais acima de 1 mm seguem para a moagem, já os menores de 1 mm são destinados as bacias de decantação. Na moagem, em moinhos de bola, o minério sofre a cominuição e logo após passa por um sistema de ciclones para deslamar o

material, sendo os finos encaminhados para as bacias de decantação e os grossos para o imã magnético para a redução do teor de ferro. Na sequência, depois da desferrização, o material é encaminhado às células de flotação.

O beneficiamento de feldspato geralmente envolve flotação e separação magnética para remover os minerais acessórios tais como mica, granada, ilmenita e quartzo (LUZ; COELHO, 2005).

Tão logo o minério atinja a granulometria de liberação, iniciam-se as operações de flotação que possuem o intuito de separar os óxidos do minério a ser comercializado (feldspato e quartzo). Nesse processo, tem-se a geração de subprodutos, como a mica, que também pode ser comercializado.

Atualmente, em termos mundiais, o crescimento do consumo de feldspato está sendo comandado pelos segmentos de revestimentos cerâmicos e de colorifícios, tendo em vista que a indústria de vidro vem apresentando um baixo crescimento (COELHO, 2001).

O resíduo em estudo neste presente trabalho é retirado no processo de lavagem e peneiramento, sendo encaminhado para as bacias de decantação. A crescente demanda do feldspato para a indústria faz com que se aumente a produção e conseqüentemente observa-se um aumento na geração deste resíduo.

Baseado em todos estes fatos, o presente trabalho, portanto, se propõe a buscar uma forma de reaproveitamento e destinação do resíduo do processo de beneficiamento de saibro de forma tecnicamente viável à Mineração Nossa Senhora do Carmo.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Reaproveitar e destinar o rejeito do processo de beneficiamento de saibro da Mineração Nossa Senhora do Carmo de forma tecnicamente correta e viável.

## 1.2 OBJETIVOS EXPECÍFICOS

Os objetivos específicos são descritos abaixo:

- Quantificar o rejeito produzido por mês (sólidos e líquido) e a vazão na calha que conduz o mesmo as lagoas de decantação;
- Identificar e indicar o método de reaproveitamento do rejeito;
- Apontar possíveis destinos para o rejeito;
- Execução dos corpos de prova e de testes de qualidade com os mesmos (testes mecânicos);
- Analisar a viabilidade técnica do rejeito para emprego na cerâmica vermelha;

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste referencial serão abordados diferentes temas pertinentes ao assunto e temática de pesquisa do trabalho, iniciando com uma rápida abordagem sobre o histórico e o processo de beneficiamento de saibro para obtenção do feldspato, dando ênfase também a problemática do rejeito a ser tratado, objeto deste estudo. Em sequência, serão explanados aspectos relacionados à questão de resíduos na mineração e sua classificação em relação à NBR, bem como métodos de tratamento para um possível reaproveitamento deste rejeito, englobando assuntos como, suas características físico-químicas, tecnologias a serem empregadas, como o peneiramento e filtração (processos de separação sólido-líquido) e por fim os principais destinos para este material.

### 2.1 HISTÓRICO DA EMPRESA

A descoberta da jazida de fluorita, e posteriormente de saibro foi atribuída à exploração de Alberto de Bona Sartor nas matas da região de Urussanga, no sudeste do Estado de Santa Catarina, em função de vestígios associados a este mineral na época. O descobrimento aconteceu no início de 1962, na localidade de 2ª Linha Torrens, no Município de Urussanga hoje Morro da Fumaça. Em 31 de Agosto do mesmo ano, registrou-se a empresa, que começou a extrair as primeiras pedras de fluorita de modo garimpeiro, vendidas para intermediários para sustentar o negócio.

Já no final da década de 60, a mineradora contava com um poço de extração por ser tratar de mineração subterrânea. Com a implantação da Usina de Beneficiamento por Flotação a mineradora em questão chegou a atender 50% do mercado brasileiro de fluorita em 1970 e em meados de 1974 efetuou algumas exportações para os Estados Unidos e Japão.

Porém, com o término da jazida de fluorita em sua reserva, a Mineração Nossa Senhora do Carmo passou, no ano de 2000, a explorar o saibro na mesma localidade com intuito de obter feldspato.

Atualmente a mineradora ainda explora e beneficia o saibro, além de possuir a maior reserva (à céu aberto) de fluorita do Brasil em operação, no município de Cerro Azul, Estado do Paraná. Hoje em dia a produção de feldspato é de

aproximadamente 4.000 ton/mês e seus clientes são os mais diversos, atendendo principalmente o setor cerâmico e de coloríficos.

## 2.2 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE SAIBRO

A Figura 1 demonstra o processo de beneficiamento do saibro para a obtenção do feldspato cerâmico e de colorífico.



O processo de beneficiamento de saibro para a obtenção do feldspato começa na exploração do saibro. A lavra em questão é do tipo céu aberto, com bancadas de 7m de altura. O minério é explotado pelo método de escavação, onde são utilizadas máquinas do tipo escavadeira, sendo o transporte do material até o pátio de beneficiamento feito por caminhões.

Ao chegar ao beneficiamento, os operadores dos caminhões fazem duas pilhas “pulmão”. Estas pilhas representam duas partes de saibro de lugares diferentes da lavra, um com teor mais rico em feldspato e outro com teor mais pobre. Isto serve para aproveitar melhor a jazida.

A lavagem e peneiramento constituem a primeira fase do processo de beneficiamento, onde se retiram materiais como argila/areia e outros materiais mais grosseiros. Os materiais entre 1 a 13 mm seguem para a moagem, já os menores de 1 mm são destinados as bacias de decantação (constitui o rejeito objeto de estudo).

Na moagem, em moinhos de bola, o minério sofre a cominuição para atingir uma granulometria de liberação (48 mesh). São realizados dois processos de moagem, um para os produtos cerâmicos (entre 1 e 8 mm) e o segundo com destino para indústria colorifício (entre 8 e 13 mm). Depois da moagem, a polpa de ambos os sistemas passam por um classificador, onde o mesmo tem como objetivo a classificação do material (48 mesh) para as fases posteriores do beneficiamento. O sistema do moinho/ classificador opera em ciclo fechado, portanto caso a polpa não atinja a granulometria ideal, a mesma volta para o moinho para sofrer novamente a cominuição.

A partir do classificador, o processo de beneficiamento se divide em dois. Um para a obtenção do feldspato para as cerâmicas e o outro para produção do material para indústria de colorifício.

### **2.2.1 Processo de Beneficiamento para Cerâmica**

Após passar pelo classificador, a polpa é encaminhada para o ciclone, que por sua vez serve para deslamar o material, sendo os ultrafinos encaminhados para as bacias de decantação e os finos (48 mesh) para o separador eletromagnético (imã magnético) para a remoção do teor de ferro do minério. No separador magnético também há a geração de rejeito, no qual é encaminhado para as bacias de decantação.

Finalmente, depois da remoção do ferro, o minério entra em um ciclone desaguador para a retirada da água, deixando o produto final mais denso. A última etapa incide na secagem natural, feita na área de estoque. Uma vez que o produto atinge a umidade necessária, o mesmo é embalado e expedido para os clientes.

### **2.2.2 Processo de Beneficiamento para Colorifício**

Nesta parte do beneficiamento, após o classificador a polpa é drenada para um sistema de dois ciclones em serie que são utilizados para a deslamagem da polpa. Os ultrafinos são destinados para as bacias de decantação, já os finos (48 mesh) para o separador magnético. Uma vez no imã, o ferro é retirado do minério e o mesmo se encontra pronto para a próxima etapa, a flotação de óxidos.

O sistema de flotação de óxidos tem o objetivo de remover os óxidos presente no minério. Os óxidos são removidos com o auxílio de ácidos graxos, como o “tall oil” e o álcool “Mibcol”. Ambos são muito utilizados em sistemas de flotação. O primeiro tem a capacidade de adesão e agregação do minério as bolhas no processo, já o segundo da consistência na agregação das partículas.

Depois, o minério já flotado, passa por um filtro de tambor a vácuo, o qual se encarrega de retirar a água e adensar o produto. Porém, a filtragem não consegue retirar toda a água necessária. Então, o feldspato é levado até um forno secador, onde a umidade é retirada totalmente.

Por fim, o feldspato é conduzido até um silo para armazenamento e, dependendo da demanda, para um moinho a seco, que cominui o produto para 200 mesh. Após, o produto segue para um segundo silo e é então expedido para os clientes.

## **2.3 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SEGUNDO NBR 10.004/2004**

Com a crescente preocupação da sociedade perante as questões ambientais, a ABNT criou uma Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos com o intuito de revisar a NBR 10.004/2004. Esta comissão tinha o objetivo de aperfeiçoar e classificar de maneira correta os resíduos sólidos.

Segundo a Norma, para uma correta classificação dos resíduos deve-se primeiro analisar e identificar o processo de origem do material, suas características

e os compostos (substâncias) nele presente. Feito isto, é realizada a comparação destes compostos com os resíduos e substâncias nos quais os impactos a saúde e ao meio ambiente já são conhecidos.

A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados (ABNT NBR, 2004).

Desta forma a norma ABNT NBR 10.004 classifica os resíduos sólidos em:

- Resíduos Classe I – Perigosos;
- Resíduos Classe II – Não Perigosos;
  - A. Resíduos Classe II A – Não Inertes;
  - B. Resíduos Classe II B – Inertes;

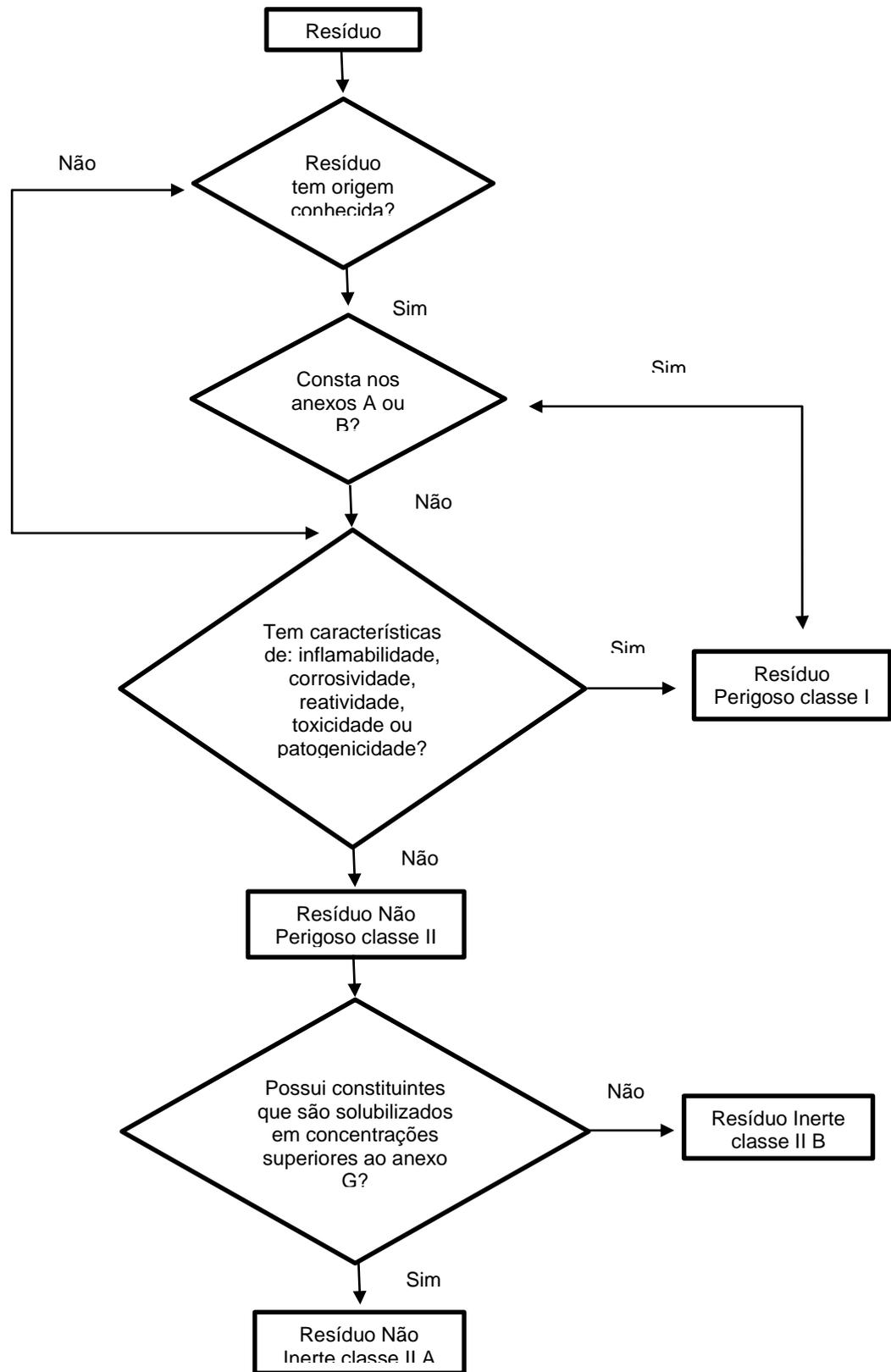
Os Resíduos Classe I – Perigosos são aqueles que constituem periculosidade, conforme a presente norma. Os mesmos apresentam propriedades como, corrosividade, toxicidade, patogenicidade e inflamabilidade.

Os Resíduos Classe II A – Não Inertes constituem os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – perigosos ou de resíduo classe II B – inertes, conforme a norma em questão. Estes podem ocasionalmente possuir as seguintes características: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Ademais, podem ser provenientes de serviços de limpeza de áreas que não estejam contaminados por resíduos de processo industrial.

Já os Resíduos Classe II B – Inertes são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa e submetida a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, conforme definições norma ABNT NBR 10.004, executando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplo destes materiais, podem-se citar rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

Paralelamente a isto, para facilitar o usuário na classificação dos resíduos sólidos, o Fluxograma 01 foi elaborado, como podemos ver abaixo.

Fluxograma 1 – Classificação dos resíduos sólidos segundo NBR 10.004/04.



Fonte: Adaptado de ABNT/NBR, 2004.

## 2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2011) são quaisquer materiais e/ou substâncias e bens resultante de atividades antrópicas descartados que se encontram ou podem eventualmente se encontrar nos estados sólido ou semissólidos, gasoso (quando contidos em recipientes) e na forma líquida, cuja suas propriedades tornem-na inviável o seu despejo em sistemas de esgotos e corpos d'água.

Paralelamente a isto, o plano descreve ainda que rejeito é todo aquele resíduo sólido que, depois de esgotadas todas as alternativas de reaproveitamento e de recuperação com as tecnologias disponíveis e que sejam economicamente viáveis para as entidades, não apresentem outro destino que não a disposição ambientalmente adequada.

Como destacado por Lima (2001) os resíduos sólidos são um dos grandes responsáveis pelos problemas sanitários, econômicos e estéticos em que a sociedade brasileira vem sofrendo nestas últimas décadas.

No que tange a conceituação de resíduos sólidos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT 2004, p.1).

Pellenz (2001) descreve que no setor de mineração, enquadram-se como resíduos sólidos os seguintes itens: estéril, rejeitos, resíduos provenientes de oficinas, almoxarifados e refeitório, bem como aqueles provenientes de operações de tratamento de efluentes ou esgotos, sendo os dois primeiros os mais importantes do segmento.

### 2.4.1 Resíduos Sólidos na Mineração

Os resíduos de mineração são específicos de algumas regiões brasileiras que, pelas suas condições geográficas têm estas atividades mais desenvolvidas. Os

dois tipos gerados em maior quantidade são os estéreis e os rejeitos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas (DA SILVA et. al, 2011).

Os rejeitos são os resíduos provenientes do beneficiamento dos minerais. Esses se juntam aos resíduos de outras atividades que auxiliam na exploração, bem como no beneficiamento, como por exemplo: materiais utilizados em desmonte de rochas, manutenção de equipamentos pesados e veículos, atividades administrativas e outras relacionadas.

Os minérios que mais contribuíram para a geração de rejeitos no período foram o ferro (35,08%), o ouro (13,82%), o titânio (12,55%) e o fosfato (11,33%). Em conjunto, estas substâncias contribuíram com pouco mais de 70% da massa de rejeitos no decênio (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

De acordo com o PNRS (BRASIL, 2011) a atividade de mineração é responsável por 4,2% do PIB e por 20% das exportações nacionais. Ademais, segundo o PNRS, estima-se que o setor de mineração brasileiro produziu um volume de resíduos em torno de 2.179 milhões de toneladas no período de 1996 a 2005. Estima-se que na Mineração Nossa Senhora do Carmo, cerca de 3.000 toneladas são geradas de rejeito (lama de feldspato) por mês.

Portanto, é inegável que a mineração desenvolve uma grande importância no cenário econômico brasileiro, porém, percebe-se que este setor apresenta um grande passivo ambiental, principalmente na geração de resíduos (rejeitos e estéreis).

Com isto, se faz necessário que as mineradoras invistam em ações e medidas em seus processos para que encontrem finalidades para a reutilização desses resíduos, diminuindo assim sua geração e acúmulo e ainda potenciais danos ambientais e até torna-los uma fonte de lucro.

#### **2.4.2 Reuso e Reaproveitamento de Rejeitos**

Hoje em dia, devido as crescentes preocupações ambientais realizadas pela sociedade e com as leis ambientais cada vez mais rigorosas, é quase que inevitável a adaptação de empresas à adoção de programas, medidas e ações que permeiam as questões de sustentabilidade, principalmente no setor minerário, onde

os impactos são os mais diversos e visíveis e onde a pressão populacional é cada vez mais presente.

Neste contexto surge à necessidade de maximização e otimização do uso da matéria-prima e insumos, bem como de minimização e correção dos impactos de uma atividade mineira em todo seu ciclo de vida (FILHO, 2009).

Os rejeitos, quando em grandes quantidades e quando na forma úmida, comumente são dispostos em bacias, onde se promove sua decantação, com ou sem o auxílio de floculantes.

A Mineração Nossa Senhora do Carmo, direciona os rejeitos do processo de beneficiamento para cinco bacias em série de decantação. Além de ocuparem grandes áreas e sofrerem restrições devido às características geotécnicas, estas bacias devem ser dragadas mensalmente para a retirada deste rejeito, o que torna o processo muito dispendioso para a mineradora em questão.

O reuso e/ou o reaproveitamento de rejeitos na mineração, tornou-se uma solução para mineradoras diminuir seus passivos ambientais e melhorarem sua imagem perante investidores e sociedade, ao passo que novas tecnologias foram sendo desenvolvidas tornando essas atividades economicamente viável.

Monteiro (2001) explana que a reciclagem/recuperação transforma os resíduos em matéria prima, gerando economias no processo industrial, porém é exigido grandes investimentos, com um retorno imprevisível, já que é limitado o repasse dessas aplicações no preço do produto, mas esse risco diminui na medida em que o desenvolvimento tecnológico vai abrindo caminhos mais seguros e econômicos para o aproveitamento desses materiais.

Alternativamente, o reuso do rejeito de processos de beneficiamento podem se tornar fontes de renda e influenciar no corte de gastos das empresas.

Com base nestas premissas, este presente estudo tem como uma de suas principais finalidades viabilizar e destinar o rejeito do processo de saibro.

## 2.5 MÉTODOS DE REAPROVEITAMENTO DO REJEITO

Levando em consideração as características do rejeito, dois sistemas de tratamento são indicados para proporcionar as condições necessárias de forma que possa ser reaproveitado, sendo eles: o peneiramento e a filtração.

Ambos são largamente utilizados pelo setor industrial. Nesta seção serão descritos os processos unitários de peneiramento (auxiliar na retenção de matéria grosseira) e filtração. O segundo tem como destaque o método de filtração de tambor a vácuo, pois a mineradora possui esse equipamento instalado e atualmente com baixa utilização.

### **2.5.1 Peneiramento**

Peneiramento é um método de separamento de partículas de acordo com o tamanho das mesmas. No peneiramento industrial, os sólidos são submetidos contra uma tela. As partículas finas passam pelas aberturas presentes na tela. As partículas maiores são retidas (WARREN et. al, 2005).

Como destacado por Perry e Green (2008) o peneiramento é um dos métodos de separação sólido-sólido mais utilizado em processos industriais e minerários devido a sua praticidade, simplicidade de operação e por ser um equipamento geralmente de baixo custo.

As peneiras são projetadas e desenvolvidas em diversos tamanhos e variam de acordo com o mesh (granulometria) necessário para as empresas. Mesh é representado pelo número de fios por unidade linear (PERRY; GREEN, 2008).

Seguindo a mesma linha de raciocínio os autores Correira e Carisso (2004) apresentam que o peneiramento tem como finalidade a separação de um material em frações com granulometria distintas. Porém, em muitos processos os sólidos obtidos após o peneiramento, dificilmente possuem um único tamanho, geralmente estão distribuídos em torno de uma granulometria média.

A necessidade de separar sólido-sólido pode estar incluída em dois objetivos: dividir o sólido em tamanhos homogêneos e obter granulometria de mesmo tamanho.

Partículas mais grosseiras caem facilmente através de grandes aberturas numa superfície estacionária, mas para partículas finas a superfície da tela deve ser agitada, como, por exemplo, girando ou vibrando a mesma mecanicamente ou eletronicamente (WARREN et. al, 2005).

As peneiras podem ocasionalmente trabalharem com material úmido/molhado, porém é mais comumente usado a seco.

Perry e Green (2008) citam três principais dificuldades em relação ao peneiramento: peneiras com mesh metálicos podem ocasionar aberturas com o tempo; o mesh pode ser facilmente danificado; e as partículas devem ser o mais homogêneas possíveis, evitando assim que outras partículas bloqueiem as aberturas.

Deste modo, Foust (1982) explica que para evitar problemas de mau funcionamento e/ou entupimento das peneiras, é indicado fazer revisões periódicas nos equipamentos. A agitação e/ou inclinação também são uma alternativa, pois melhoram o desempenho e também ajudam a prevenir o entupimento das peneiras.

As peneiras industriais são feitas de telas metálicas, revestidas de seda ou plástico (PVC, polietileno, polipropileno, orlon, dacron ou teflon), barras metálicas e entre outros materiais.

Ademais, segundo Foust (1982) as peneiras podem ser classificadas em: estacionárias (grelhas e telas), onde a única força atuante é à força da gravidade e possuem superfície inclinada; mecânicas (grelha rotatória) e vibratórias (grelhas e peneira vibratórias), cuja força motriz é proveniente da força mecânica e/ou eletromagnéticas.

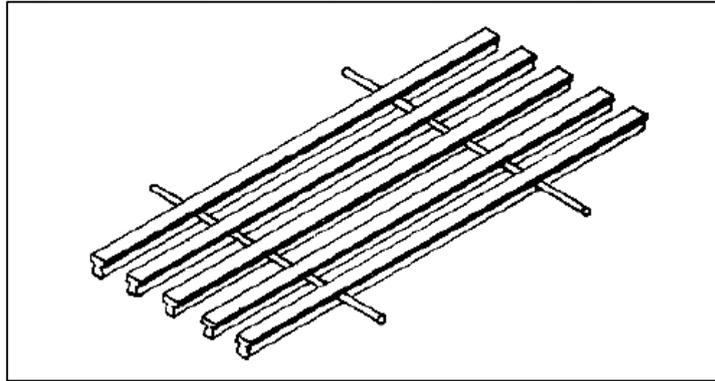
Deste modo, segue abaixo breves explicações sobre os principais tipos de peneiramento utilizados na mineração.

#### 2.5.1.1 Grelhas Fixas

Estas possuem um conjunto de barras paralelas entre si e espaçadas de acordo com que a necessidade do processo requer. Elas são inclinadas na direção do fluxo de alimentação e numa ordem de 35 a 45 graus. São empregadas basicamente em circuitos de britagem para separação de blocos de 7,5 a 0,2 cm, em geral, sendo utilizados invariavelmente a seco (CORREIRA; CARISSO, 2004).

A Figura 2 abaixo demonstra a representação esquemática de uma grelha fixa.

Figura 2 – Representação esquemática grelha fixa.



Fonte: Carrisso e Correira, 2004.

#### 2.5.1.2 Peneiras Fixas

Esta compreende uma base curva formada por fios paralelos entre si, formando um ângulo de 90° com a alimentação. A alimentação é feita por bombeamento na parte superior da peneira sendo distribuída ao longo de toda a extensão da peneira (CORREIRA; CARISSO, 2004).

Mines (2014) aborda que as peneiras fixas são comumente utilizadas para desaguamento de suspensões e para uma separação precisa de suspensões de partículas finas, evitando assim potenciais danos a filtros e outros equipamentos conectados em série.

#### 2.5.1.3 Grelhas Vibratórias

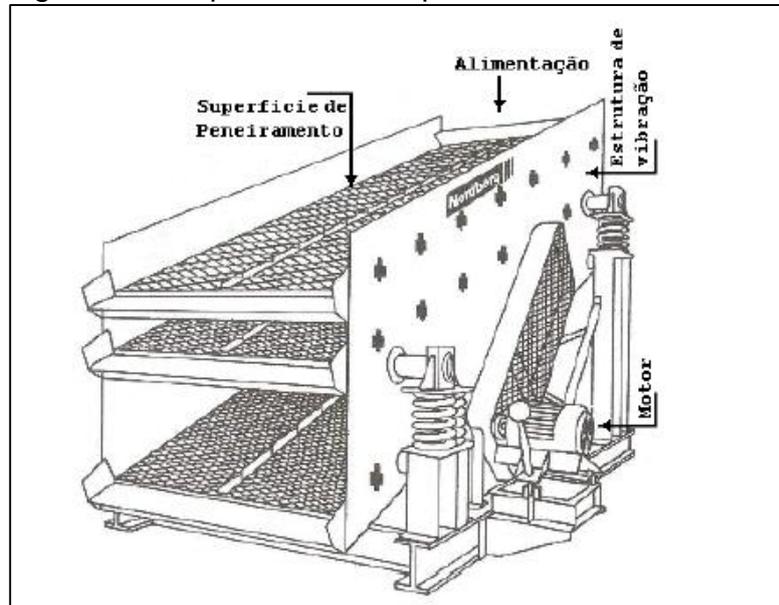
As grelhas vibratórias se assemelham muito às grelhas fixas. O diferencial é justamente pela sua superfície estar sujeita a vibração e a outra não. Assim como as grelhas fixas, as grelhas vibratórias são ocasionalmente utilizadas antes da britagem primária, na separação de blocos e materiais grosseiros (CORREIRA; CARISSO, 2004).

#### 2.5.1.4 Peneiras Vibratórias

A Figura 3 caracteriza esquematicamente uma peneira vibratória. O movimento vibratório é caracterizado por impulsos rápidos, normais à superfície, de pequena amplitude (1,5 a 25 mm) e de alta frequência (600 a 3.600 movimentos por

minuto), sendo produzidos por mecanismos mecânicos ou elétricos (CORREIRA; CARISSO, 2004).

Figura 3 – Esquema de uma peneira vibratória.



Fonte: Correira e Carisso, 2004.

Segundo Correira e Carisso (2004) estas peneiras são largamente usadas no setor minerário, sendo muito empregadas nos circuitos de britagem e de preparação de minério para os processos de concentração e entre outros. A sua capacidade varia entre 50 a 200 t/m<sup>2</sup>/mm de abertura em 24 h.

### 2.5.2 Filtração

De acordo com Perry e Green (2008), a filtração consiste na separação de uma mistura líquido-sólida, a qual envolve a passagem de grande parte do líquido por meio de um tecido poroso, cuja função é reter a maior quantidade de partículas sólidas possíveis.

A filtração é uma das aplicações mais comuns do escoamento de fluidos através de leitos compactos (FOUST, 1982). O principal objetivo do sistema é o da separação de um sólido do fluido que o carrega.

A separação ocorre, necessariamente, devido à passagem forçada de um fluido qualquer em uma membrana porosa. As partículas sólidas ficam retidas nos poros da membrana e acumulam-se, formando uma camada sobre esta membrana.

O fluido, que pode ser ou um gás ou um líquido, passa pelo leito de sólidos e através da membrana retentora (FOUST, 1982).

Os autores Warren et. al (2005) discorrem sobre o mecanismo de filtração como podemos ver abaixo:

Os fluidos fluem por meio de um filtro devido à diferença de pressão ao longo do meio. Os filtros também são classificados, portanto, naqueles que operam com pressões abaixo da atmosférica na entrada no meio filtrante e naqueles que operam com uma pressão atmosférica na entrada, e vácuo na saída do meio filtrante. Pressões acima da atmosférica podem ser geradas pela ação da força da gravidade agindo na coluna do líquido, por uma bomba ou por um sopro ou uma força centrífuga. No filtro a gravidade, o meio filtrante não pode ser mais fino que uma tela para material grosseiro. Filtros a gravidade são, portanto, restritos na aplicação industrial para drenar o líquido de cristais grosseiros, na clarificação de água potável e em tratamento de efluentes (WARREN et. al, 2005).

Segundo Foust (1982) a maioria do equipamento industrial opera por meio da diminuição da resistência ao escoamento, fazendo com que a área filtrante seja a maior possível. Isto faz com que as dimensões do filtro não aumentem proporcionalmente, economizando assim, espaço em pátios industriais.

Um método que auxilia na filtração é a aplicação de adjuvantes. Para Mines (2014) deve-se misturar o adjuvante na suspensão para que o mesmo se distribua por toda a torta, aumentando assim a adesão de sólidos. Os adjuvantes são utilizados principalmente quando se filtram sólidos coloidais. Alguns tipos de adjuvantes são citados pelo mesmo autor, como por exemplo, a celulose, calcário e polímeros.

A maioria dos filtros na área industrial são filtros a pressão, filtros a vácuo, ou separadores de centrifugação (WARREN et. al, 2005).

Paralelamente a isto, Perry e Green (2008) explana que além dos filtros serem classificados de acordo com a força motriz (citado acima), eles também podem ser qualificados em relação ao mecanismo de filtração (filtro prensa, filtração por clarificação, filtração por torta), objetivo da filtração (se o sistema possui objetivo de clarificar o líquido ou secar os sólidos), ciclo de operação (contínuo ou descontínuo) e pela natureza dos sólidos (relaciona a granulometria dos sólidos).

De acordo com Foust (1982) a escolha do equipamento filtrante depende em grande parte da viabilidade econômica do sistema. Porém estas vantagens econômicas serão variáveis de acordo com:

- Viscosidade, densidade e reatividade química do fluido;

- Dimensões da partícula sólida distribuição granulométrica, forma da partícula, tendência a floculação e deformabilidade;
- Concentração da suspensão de alimentação;
- Valores absolutos e relativos dos produtos líquido e sólido;
- Grau de separação a efetuar;
- Custos relativos à mão-de-obra, do capital e da energia.

Para Perry e Green (2008), entretanto, os fatores relevantes para a escolha do método de filtragem é o tipo do ciclo, a força motriz, a taxa de produção, bem como a confiança e os custos.

Os filtros ainda podem operar em ciclos contínuos e descontínuos. Durante a maioria da operação em filtros de ciclo descontínuo, o fluxo do fluido por meio do dispositivo é contínuo, mas o mesmo tem que ser interrompido periodicamente para permitir o volume descarga dos sólidos (WARREN et. al, 2005).

A vasta maioria dos filtros contínuos usam vácuo como força motriz para a filtração. O objetivo da maioria dos filtros contínuos é produzir uma torta seca. A maioria dos filtros a vácuo facilmente descartam uma consolidada torta seca, uma vez que operam em espaços abertos e semiabertos (PERRY; GREEN, 2008).

Alguns dos filtros mais utilizados na mineração são apresentados a seguir.

#### 2.5.2.1 Filtro Prensa

O filtro prensa é um dos tipos de filtros mais comuns na indústria química e agora na mineração. Embora esteja sendo substituído nas grandes instalações por dispositivos de filtragem continua, o filtro prensa tem as vantagens de baixo custo na inversão inicial, custo de manutenção pequeno e extrema flexibilidade de operação (FOUST, 1982).

Uma das principais vantagens da filtragem a pressão é a produção de tortas com menor taxa de umidade, em comparação com outras tecnologias de filtragem (GUIMARÃES, 2011).

O modelo mais comum de filtro-prensa, segundo Guimarães (2011) consiste em placas e quadrados, porém não é raro encontra em indústrias o modelo de diafragma.

Segundo Perry e Green (2008) o meio filtrante pode ser tanto uma lona, ou um tecido sintético, ou um papel de filtro ou tela metálica. O meio filtrante dependerá dos objetivos da filtração, do material, bem como de fornecedores.

Foust (1982) pondera que embora haja uma automatização, os filtros-prensa possuem operação cíclica e por isso são frequentemente adotados nos processos em batelada (descontínuo) ou quando a produção é de modesto e/ou pequeno porte. Filtros prensas com sistema em batelada, possuem a necessidade de desmontagem manual o que constitui um dispêndio de mão-de-obra que é, frequentemente, excessivo. Portanto, para empresas que possuem grandes volumes de sólidos ou líquidos a ser filtrado, o modelo de ciclo contínuo é mais indicado. Nestes filtros, a suspensão é injetada continuamente, e o bolo e o filtrado são produzidos também continuamente, fazendo com que a mão-de-obra não seja demasiadamente excessiva (FOUST, 1982).

Os filtros-prensa podem ser feitos em qualquer material de construção, como de aço inoxidável, borracha, madeira e ferro fundido. Podem ser construídos para operar com pressões da suspensão até 1000 psi (68atm) e operar com suspensões grossas (FOUST, 1982).

Os filtros prensas são divididos em dois tipos em relação ao seu formato, sendo os de formato vertical e os de formato horizontal. A seguir será explanado o funcionamento do formato horizontal devido sua maior utilização em escala industrial.

#### *2.5.2.1.1 Filtro Prensa Horizontal*

Segundo Mine (2014) existem duas categorias de filtro prensa horizontais: os de quadros/pratos (câmara) e os de diafragma.

Guimarães (2011) discorre que o ciclo de operação em filtros prensa do tipo câmara pode ser dividido em três etapas principais: o enchimento, a filtragem sob pressão máxima, e descarga de torta. O sistema de filtração começa com o enchimento das câmaras (consistem em uma serie de quadros circulares ou retangulares) com a polpa através do sistema de alimentação até que se tenha a formação completa das tortas. Com isto, à medida que a filtração avança, formam-se tortas (bolos), sobre o meio filtrante, até que as tortas acumulem e encontram-se no centro de cada face dos quadros/pratos. Quando isto ocorre, a vazão do filtrado, que

diminui continuamente à medida que as tortas aumentam, cai bruscamente e se reduz a um mero gotejamento (FOUST, 1982).

Desta forma a pressão de alimentação é mantida por um tempo preestabelecido no sentido de extrair o maior volume de filtrado. A pressão obriga o filtrado a atravessar o meio filtrante que escoar pelas ranhuras das placas e é conduzido para fora do filtro (GUIMARÃES, 2011).

Em concordância com Mines (2014), chegado ao fim do ciclo, têm-se a expulsão do canal central através da injeção de ar comprimido. Logo após, quando aplicável, ocorre à lavagem da torta e em seguida, o filtro é aberto e a torta descarregada.

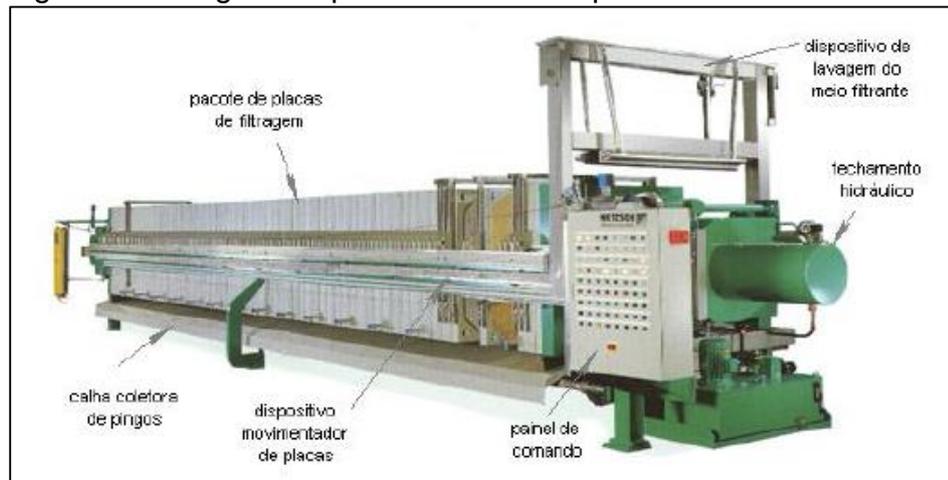
Os filtros prensas do tipo quadro/placa (câmara) produz as lamas (25-30% de umidade) mais secas em relação a qualquer dispositivo de drenagem comum YOUNGER et. al, 2002).

Já para os filtros de placas com formato de diafragma, Guimarães (2011) explica que o mesmo é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas diafragma são constituídas por um diafragma elástico, formando assim um pacote de placas denominado misto. O processo de filtração inicia com o enchimento das câmaras com a polpa a ser filtrada. Após seu enchimento, as bombas de alimentação são desligadas e os diafragmas são pressurizados hidráulicamente com intuito de extrair mais filtrado progressivamente.

A vazão de filtrado aumenta com a elevação da pressão de pressurização, sem que ocorra alimentação de polpa ao filtro prensa. Com o sistema diafragma, o processo de separação sólido líquido habitualmente se reduz no tempo de filtragem (GUIMARÃES, 2011).

Ao final do ciclo, acontece a despressurização dos diafragmas com a consequente descarga das tortas. Como pode-se ver, a Figura 4 mostra a disposição e o esquema de um filtro prensa horizontal.

Figura 4 – Imagem esquemática do filtro prensa horizontal.



Fonte: Guimarães, 2011.

### 2.5.2.2 Filtros a Vácuo

Grande parte dos filtros contínuos empregam o vácuo para fornecer a força motriz para a filtração.

O objetivo dos filtros contínuos são produzir uma torta seca. A maioria dos filtros a vácuo conseguem produzir uma torta seca e consolidada facilmente, uma vez que eles operam em ambientes abertos ou semiabertos (PERRY; GREEN, 2008).

O circuito de filtragem consiste do filtro (equipamento principal), dos sistemas de transporte da torta e transporte do filtrado, das linhas de vácuo e da bomba de vácuo (GUIMARÃES, 2011).

De acordo com Guimarães (2011) os aparelhos de filtragem a vácuo são contínuos. Os mesmos realizam diversas tarefas dentro do ciclo, como: a formação de torta, secagem, lavagem e descarga da torta.

Younger et. al (2002) classifica os filtros a vácuo correlacionando-os com a posição da alimentação da polpa, seja a alimentação por cima, como no filtro horizontal de correia, ou alimentação por baixo nos casos do filtro de disco convencional e de tambor.

Segundo Foust (1982) os meios filtrantes dos filtros a vácuo geralmente são compostos por uma tela de tecido. Sua escolha está relacionada às características do material a ser tratado, bem como sua permeabilidade, sua capacidade de reter sólidos e uma adequada resistência mecânica. Por sua vez, os tecidos podem ser elaborados de poliéster, nylon, polietileno e polipropileno.

### 2.5.2.2.1 Filtros a Vácuo de Disco Rotatório

O filtro a vácuo de Disco Rotatório é um filtro que consiste em uma serie de discos verticais ligados em intervalos, num eixo central oco horizontal em rotação continua. A rotação é gerada por uma engrenagem (PERRY; GREEN, 2008).

Cada disco é composto de múltiplos setores independentes, cobertos com o tecido filtrante. Cada setor é conectado a um dos tubos do eixo central (GUIMARÃES, 2011).

Este filtro possibilita uma taxa de filtração especialmente elevada, para um dado espaço de ocupação do piso da fábrica. O elemento filtrante é, também, uma folha (comum o uso de saco de pano) com a forma de um setor circular, recoberta pelo meio filtrante. A folha gira num plano vertical, em torno de um eixo horizontal (FOUST, 1982).

A suspensão a ser filtrada enche a bacia do filtro, até quase a altura do eixo horizontal. À medida que a folha mergulha na suspensão, coleta a torta na sua superfície, enquanto o filtrado sai por um sistema central de descarga (FOUST, 1982).

Durante o ciclo de filtragem (uma rotação completa), forma-se, conforme Guimarães (2011), uma camada de partículas sólidas nas quais ficam atadas no tecido filtrante pela ação do vácuo, quando ainda os discos estão submersos na bacia. Porém, ao emergir, a etapa de secagem inicia-se. Nesta etapa a água é extraída da polpa ainda sob efeito do vácuo (pressão negativa), secando o material coletado. O filtrado passa através do meio filtrante, onde se encaminha para o eixo central, e deste, é drenado para o vaso separador.

Depois, a torta é raspada da folha mediante facas apropriadas ou então é retirada a sopro, mediante ar comprimido injetado no interior da folha, antes de ela novamente mergulhar na suspensão (FOUST, 1982).

Perry e Green (2008) destaca que a principal vantagem deste filtro é a sua grande capacidade de filtração em comparação ao tamanho que o mesmo ocupa. Dentre os filtros a vácuo, seu custo é o menor por unidade de área filtrada. Quanto a sua construção, o mesmo é comumente elaborado em aço ou ferro. Ultimamente veem sendo muito empregado na indústria mineral (mineração de ferro) pelas vantagens citadas acima. Sua principal limitação se baseia na inadaptabilidade a lavagem das tortas.

#### 2.5.2.2.2 Filtro de Tambor a Vácuo

Os filtros de tambor a vácuo são os mais usados entre os filtros contínuos. Existem muitas variações em seu design, incluindo o método de operação, seja ele por pressão e/ou vácuo. A maior diferença entre os designs está na maneira como o bolo é removido (PERRY; GREEN, 2008).

Para Mines (2014) este filtro pode ser construído de metal ou plástico e seus tamanhos (relacionada à área filtrante) variam desde 0.87 até 142 m<sup>2</sup>. Seu diâmetro varia de 0.9 a 4.1m.

A maioria dos filtros de tambor opera a uma rotação que varia de 0.1 a 10 rotações por minuto. A variação da velocidade está intimamente ligada a ajustes na formação do bolo, bem como nas taxas de drenagem (PERRY; GREEN, 2008).

O filtro a vácuo funciona de forma contínua, filtrando, lavando e descarregando a torta constantemente durante o processo. O sistema constitui de um tambor, uma válvula (localizada no centro do tambor), uma bomba a vácuo e uma caixa suspensa, aonde se recebe o material a ser filtrado e aonde se descarrega a torta filtrada.

Segundo Amarante (2002) o filtro de tambor a vácuo é representado num grande cilindro que gira em um ao eixo longitudinal, no qual é conectado a uma válvula automática. Sua alimentação é efetuada a partir de uma bacia posicionada abaixo do tambor e disposta de forma que a porção inferior desse cilindro fique submersa, conforme Figura 5.

Figura 5 – Ilustração de filtro de tambor a vácuo localizado na empresa.



Fonte: Do autor, 2015.

O tambor é coberto com um meio filtrante, geralmente um tecido e/ou malha porosa. A válvula, como falado anteriormente, atua no centro do tambor e faz com que o mesmo ative o ciclo de filtração, secagem, lavagem e retirada da torta. O funcionamento é muito semelhante ao filtro a vácuo horizontal (FOUST, 1982).

Warren et. al (2005) discorre sobre o mecanismo de funcionamento do filtro de tambor a vácuo. O mecanismo é referente a um ciclo, ou seja, uma rotação completa. No início do ciclo, o tambor é submergido no líquido em suspensão, ativando o sistema de vácuo por meio da válvula rotatória. Neste mesmo tempo, uma camada de sólidos se forma na superfície do tambor enquanto o líquido é puxado através do tecido, passando pelos canos internos, válvulas e finalmente caindo dentro do tanque de coleta. Quando o tambor emerge, o mesmo entra na zona de lavagem e secagem, e devido à ação do vácuo (sistema de vácuo separado), o líquido e o ar são sugados por meio do bolo sólido. Após isto, o tambor deixa a zona seca, o vácuo é cortado e o bolo é raspado e removido com o auxílio de uma espátula. Existem sistemas em que ar é soprado embaixo do bolo para facilitar a remoção do mesmo.

Uma vez que o bolo é desalojado, o tambor reentra na lama/líquido e o ciclo começa novamente. (WARREN et. al, 2005).

Para o auxílio na retirada da torta, geralmente se utiliza uma raspadeira. Em contrapartida, o material filtrado sai pelo eixo de rotação, onde existem passagens separadas para o material filtrado e para o líquido de lavagem (FOUST, 1982).

Como falado anteriormente, os estilos de filtros tambores são diferenciados pela forma de retirada da torta. Portanto, a descarga pode ser efetuada por meio de um raspador, por um rolo ou por fios.

As vantagens dos filtros rotativos são a grande capacidade de filtração e a pequena mão de obra exigida e a baixa manutenção. Suas desvantagens permeiam sobre o elevado custo de aquisição e operação.

## 2.6 PRINCIPAIS DESTINAÇÕES DO REJEITO

Dentre os principais destinos para o rejeito tratado do processo de beneficiamento do feldspato na mineradora em questão está à cerâmica.

A indústria cerâmica tradicional está baseada no emprego de matérias-primas naturais e no caso das peças cerâmicas para pavimento e revestimentos, essas matérias-primas são essencialmente de natureza argilosa.

Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas que incluem: matérias-primas naturais; matérias-primas beneficiadas; e matérias-primas sintéticas de características controladas (SANTOS, 1992).

A cerâmica vermelha compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de decoração (CETESB, 2006).

A cerâmica branca abrange os produtos obtidos a partir de uma massa de coloração branca, em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor, como por exemplo, louça de mesa, louça sanitária e isoladores elétricos (CETESB, 2006).

Grande parte das matérias-primas que são utilizadas na indústria cerâmica se encontra na natureza em depósitos espalhados na crosta terrestre. Comumente o beneficiamento constitui de desagregadores ou moinhos e por fim a classificação da granulometria. O processo de fabricação, propriamente dito, tem início somente após essas operações.

Santos (1992) fala que as fontes de matéria-prima podem ser naturais ou sintéticas. A primeira consiste naquelas extraídas da natureza e que podem passar por um tratamento físico (para eliminação de estéril ou ajuste de granulometria), como por exemplo, argilas, feldspato, quartzo, calcita entre outros. Já o segundo é caracterizado por aqueles produtos que foram submetidos a algum tratamento térmico e/ou químico (calcinação, fusão e etc.), como a alumina.

O estudo de novas matérias-primas empregadas nas indústrias de cerâmica vermelha tem como objetivo a busca de materiais que possam auxiliar no desenvolvimento de melhores produtos e processos. O resultado poderá ser refletido através da obtenção de tijolos e telhas de melhor qualidade, seja por mudanças nas formulações das misturas, seja por melhorias no processo de fabricação, através do controle das propriedades das matérias-primas (GRUN, 2005).

Além das argilas, existem outros materiais que, quando misturados a elas, podem produzir as chamadas pastas cerâmicas, promovendo melhoras nas propriedades físico-químicas e mecânicas. Além destes materiais, podemos adicionar à massa outros ingredientes como quartzo, feldspato, caulim, talco, dolomita, carbonato de cálcio e bentonita (CETESB, 2006).

Outro destino para o rejeito objeto de estudo pode ser no setor de materiais refratários, como fundente. Estes envolvem uma grade variedade de produtos que suportam altas temperaturas em condições específicas de processo e operação. Via de regra, estes materiais são sujeitos a grandes esforços mecânicos, operações químicas e variações bruscas de temperatura.

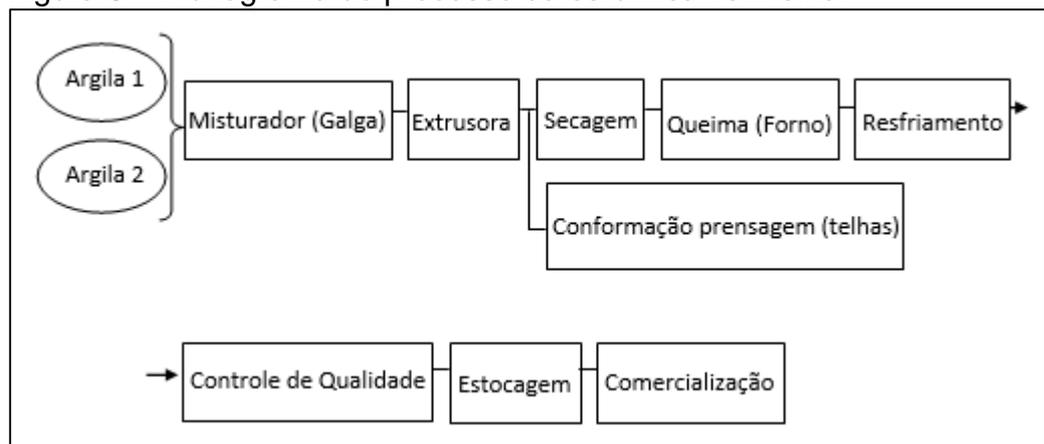
## 2.7 CERÂMICA VERMELHA

Santos (1992) discorre sobre as três principais etapas do processo produtivo da cerâmica vermelha, sendo: a preparação da massa cerâmica pela mistura de argila(s) com água, a conformação da massa para dar forma ao produto acabado e a queima da peça cerâmica em temperatura adequada para que a peça cerâmica adquira as propriedades necessárias para sua adequação as normas vigentes.

### 2.7.1 Processo

A Figura 6 ilustra um fluxograma com as etapas e processos para a fabricação de tijolos e telhas, bem como as etapas seguidas para obtenção dos corpos de prova neste estudo.

Figura 6 – Fluxograma do processo da cerâmica vermelha.



Fonte: Elyseu, 2014.

### 2.7.1.1 Preparação da Matéria-Prima

As instalações que precedem a extrusora são configuradas para uma preparação mínima da matéria-prima com equipamentos como o desintegrador, misturador e laminador (ELYSEU, 2014).

Quando feita a homogeneização da(s) argila(s), as misturas são conduzidas por meio de uma correia transportadora ao misturador, onde o grau de homogeneização é acentuado.

Logo após, a matéria-prima é direcionada ao desintegrador, que tem como função a de desmanchar os torrões e depois segue para o misturador, o qual reduz os torrões às dimensões requeridas.

O processo é rápido, pois a matéria-prima passa em segundos do misturador ao laminador, cujo objetivo é desagregar os pedriscos e os torrões, sendo os laminadores compostos por dois cilindros que se aproximam até uma distância precisa e controlada (MAS, 2003, *apud* ELYSEU, 2014).

### 2.7.1.2 Conformação

Após o preparo da matéria-prima, tem-se a etapa de conformação, que dará a forma final ao produto, salvo pequenas variações dimensionais e de cor (ELYSEU, 2014).

Neste sentido, para a fabricação de tijolos e telhas, a conformação é feita por meio do método de extrusão. A extrusão é um processo que dá forma a um produto cerâmico através da passagem da massa cerâmica (plástica ou semifirme), pela abertura, na seção transversal do objeto extrudado (ZACCARON, 2013).

A escolha do processo de extrusão para a conformação de materiais de cerâmica vermelha é feita quando há disponibilidade de matérias-primas suficientemente plásticas para permitir sua passagem pela boquilha, parte da extrusora que dará a forma final ao produto extrudado (ELYSEU, 2014).

### 2.7.1.3 Secagem

Em prosseguimento a conformação da cerâmica, seja em massa úmida ou semi-seca faz-se necessária a secagem como processo preparatório aquele sucessivo de queima (FACINCANI, 2002).

A massa, após conformada, deve ser seca para a retirada da umidade residual, e queimada para adquirir as propriedades requeridas ao produto final (ELYSEU, 2014).

A secagem pode ser feita de forma natural quando as peças são alocadas em prateleiras dispostas em galpões abertos onde há a livre passagem do ar e em estufas, onde a fonte térmica é composta de gases quentes provenientes dos fornos ou calor gerado em fornalhas (CUNHA, 2002).

#### 2.7.1.4 Queima

Após a secagem, a peça cerâmica é geralmente queimada a temperaturas que variam entre 950 e 1150 °C (TUBINO, 2006).

Elyseu (2014) descreve que as propriedades como, a porosidade, absorção de água, retração linear de queima e a resistência mecânica estão intrinsecamente correlacionadas com o processo de queima da peça cerâmica.

Esta etapa requer um grande consumo energético, e consiste na etapa que gera o maior valor agregado ao produto final. Devido a isso, buscam-se constantemente meios que forneçam o menor custo, tanto pela redução da temperatura de queima, quanto pela redução do tempo de queima, de forma a manter e por vezes melhorar os parâmetros de qualidade do produto final (ELYSEU, 2014).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados neste presente trabalho. Os ensaios foram realizados nos laboratórios do Serviço Nacional da Indústria – SENAI e no Instituto de Desenvolvimento Tecnológico – IDT o qual pertence ao Parque Científico e Tecnológico – IPARQUE, ambos pertencentes a Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

A quantificação de sólidos no efluente que tem como destino as bacias de decantação, bem como a medição da vazão foram as primeiras etapas desta metodologia, as quais serviram para o cálculo da vazão mássica. A caracterização do resíduo e da argila, através de testes de Fluorescência de Raio-x (FRX), Difração de Raio-x (DRX), Tamanho de Partícula, e Calcinação a 900°C e 1.200°C, constituíram a segunda etapa. Em paralelo, estudou-se por meio de bibliografias e pelas características do resíduo um sistema de reaproveitamento do mesmo, afim de prepara-lo para sua inserção no setor industrial de provável destino. Posteriormente se analisou possíveis usos para o resíduo sólido e apontou-se algumas possibilidades, a saber: uso do rejeito na produção de cerâmica vermelha; uso do resíduo em materiais vítreos e porcelanatos e uso do resíduo em materiais refratários. Feito isto, foram confeccionados corpos de prova de acordo com a destinação do resíduo (cerâmica vermelha). Por fim, com intuito de analisar o comportamento mecânico das peças, realizaram-se e avaliaram-se ensaios de retração linear de queima, absorção de água, flexão e cor de queima.

#### 3.1 QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS E VAZÃO DA CALHA

A medição da vazão da calha que destina o efluente às bacias de decantação foi elaborada pela a equipe de hidrologia do Instituto de Pesquisas Ambientais Tecnológicas com o auxílio de um molinete e seguiu a Norma NBR 13403/1995 (discorre sobre a medição de vazão em efluentes líquidos).

Mediou-se a vazão da calha duas vezes pelo mesmo método e com iguais intervalos de seções para uma melhor precisão nos resultados. A limpeza (retirada de sedimentos) da calha se fez necessária pelo mesmo motivo citado acima. A calha é mostrada na Figura 7 a seguir.

Figura 7 – Calha que conduz o efluente até as bacias de decantação.



Fonte: Do autor, 2015.

Logo após, foram realizadas 5 (cinco) coletas deste efluente em baldes de 20 litros para a quantificação de sólidos. Depois de coletadas as amostras, esperou-se a sedimentação dos sólidos por um tempo de 24h, até que a decantação fosse completa. Então, com o auxílio de um sifão, retirou-se toda a água, ficando apenas o sólido, apresentando ainda água residual.

Para retirar esta umidade, o material foi colocado em formas e as mesmas foram colocadas sobre um fogareiro para a evaporação completa do líquido. A secagem completa ocorria em média após 30min ao fogo.

Deve-se ressaltar que foram pesados os baldes antes da coleta do efluente, após a coleta dos efluentes e dos sólidos secos (5 amostras finais). Com os devidos pesos anotados, quantificaram-se os sólidos e a vazão mássica (produção de resíduo por hora).

A quantificação de sólidos é resultado do peso final (em kg) do material seco em razão do peso líquido do efluente. Já a vazão mássica foi calculada através da Equação 1 abaixo.

$$Q_{mássica} = \text{Concentração} \left( \frac{Kg}{m^3} \right) \times \text{Vazão da calha} \left( \frac{m^3}{h} \right) \text{ Eq. 1}$$

Onde, a concentração de sólidos é igual à razão da quantidade de sólidos pelo peso do efluente.

Estes dados são importantes para o correto dimensionamento e funcionamento do processo de tratamento. Ademais, os experimentos foram realizados no laboratório da mineradora em questão.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO E DOS CORPOS DE PROVA

Com o intuito de caracterizar e identificar possíveis destinos ao resíduo foram realizados os seguintes testes nos laboratórios do Parque Científico e Tecnológico – IPARQUE e SENAI:

- FRX;
- DRX (900, 1200 e in natura e após queima a 1050 °C);
- Tamanho de Partícula (Granulometria);
- Calcinação a 900°C e a 1200°C (DRX);

Para os testes citados acima, utilizou-se as amostras do resíduo obtido na primeira etapa desta metodologia. Após a realização dos testes, os resultados para FRX, DRX e tamanho de partícula foram plotados no software Origin para a geração e interpretação dos dados. Os resultados dos testes da granulometria e da calcinação foram agregados à base de dados.

Uma vez feita à interpretação das informações, buscou-se em revisões bibliográficas as possíveis destinações do resíduo. Sua destinação levou em consideração as restrições técnicas da indústria cerâmica e as propriedades avaliadas do material.

Além disto, avaliou-se as características do resíduo, em distintas formulações nos corpos de provas, por meio dos seguintes ensaios:

- Absorção de Água;
- Retração Linear de Queima;
- Resistência Mecânica a Flexão;

Com os resultados destas análises, aplicou-se uma análise de variância (ANOVA) para verificar a significância ou não significância entre os valores obtidos.

Na sequência, tem-se uma breve explanação para cada teste proposto neste estudo.

### 3.2.1 Fluorescência de Raio-X (FRX)

Esta técnica foi empregada para caracterizar quimicamente as matérias-primas utilizadas neste trabalho. Realizou-se o trabalho em equipamento PHILIPS PW2400, e confeccionou-se pastilhas das amostras em pó. Foi coletado 10g de resíduo e então se deu início o teste em questão.

### 3.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

Foi realizada usando um difratômetro de raios-X marca Shimadzu XRD-6000 utilizando tudo de cobre de 30 mA de corrente e 30 kvolts de ddp e identificou-se por comparação de um perfil desconhecido com o conjunto de difração padrão coletado e mantido pelo Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS), na geometria  $\theta$ - $2\theta$  para determinar-se as fases presentes. O ânodo utilizado foi o de cobre com  $\lambda_1 = 1,54060\text{Å}$  e  $\lambda_2 = 1,54439\text{Å}$  com filtro de níquel sem monocromador e a faixa angular analisada de  $3,00^\circ$  a  $80,00^\circ$ . Efetuou-se as difrações em temperatura e pressão ambiente. Identificou-se as fases por comparação de um perfil desconhecido com o conjunto de difração padrão coletado e mantido pelo JCPDS. Coletou-se aproximadamente 1g do resíduo para a realização do teste de DRX.

### 3.2.3 Tamanho de Partícula

Neste experimento, uma amostra do resíduo de aproximadamente 100g foi peneirada em peneiras de 45 a 100 mesh para a determinação da granulometria do produto. Elaborou-se esta análise com o equipamento de Granulometria Cilas 1064, marca Acil Weber, modelo Cilas 1064L com uma faixa entre 0,04 e 500  $\mu\text{m}$ . Ao final, anotou-se o tamanho das partículas do resíduo.

### 3.2.4 Calcinação

Na calcinação, foram separadas duas amostras do resíduo. As mesmas foram colocadas em cadinho de cordierita (resistente a altas temperaturas) e em seguida postas no forno. Neste experimento, trabalhou-se com duas temperaturas diferentes. Uma amostra de 50g foi submetida a  $900\text{ }^\circ\text{C}$  e a outra a  $1.200^\circ\text{C}$  por um tempo de 2h de patamar em ar atmosférico. Ao final do teste, analisou-se o aspecto

do resíduo, como sua coloração, retração e as fases presentes, entre outros.

### 3.2.5 Dilatometria

A análise dilatométrica foi realizada nos laboratórios do SENAI de Criciúma, SC, utilizando um dilatômetro da marca NETZSCH modelo DIL 402 C. A atmosfera empregada foi a de ar sintético e o patamar de aquecimento foi de 20 até 1250 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

### 3.2.6 Caracterização Mecânica após Produto Acabado

Entende-se como produto acabado após a extrusão e consequente queima dos corpos de prova. Para a caracterização do produto acabado foram efetuados ensaios mecânicos como segue: retração linear de queima, resistência mecânica à flexão, resistência a compressão e absorção de água. A seguir são demonstrados os ensaios realizados.

#### 3.2.6.1 Módulo de Resistência à Flexão

É definida por valores de limite mínimo de solicitações à ruptura por flexão de peças inteiras ou partes de cerâmica vermelha (FACINCANI, 2002).

O equipamento utilizado para execução deste ensaio foi uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 10.000, com capacidade máxima de 10.000 kgf. Adotou-se o procedimento de ensaio com três pontos de apoio, sendo que a distância entre os apoios e o aumento de carga foram especificados conforme método de ensaio e procedimento interno do IDT da UNESC.

A Equação 2 determina o valor da tensão de ruptura dos corpos de prova após a queima.

$$TRF = \frac{1,5 \times P \times L}{a^2 \times b} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

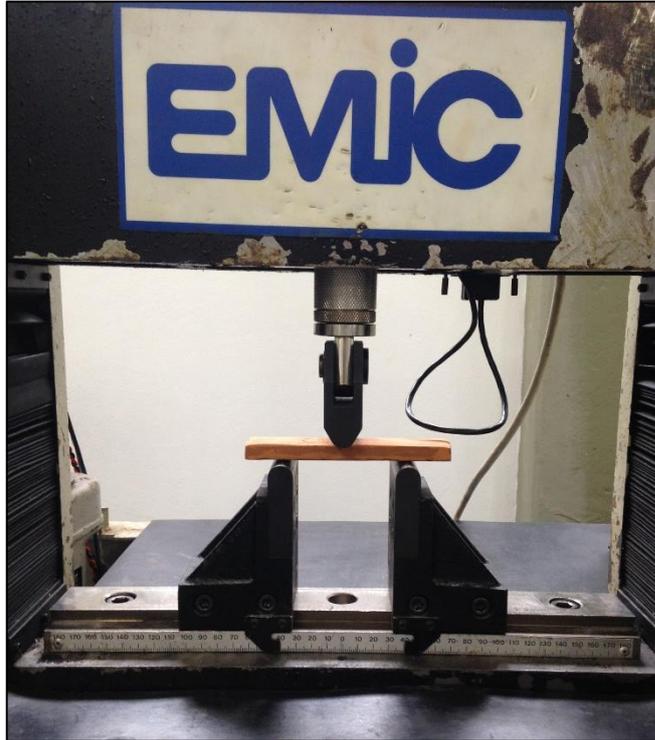
TRF = tensão de resistência à flexão (MPa);

P = carga máxima atingida no momento da ruptura (N);

L = distância entre os apoios (mm);  
 a = espessura do corpo de prova (mm);  
 b = largura do corpo de prova (mm).

Os pontos de apoio foram separados em 40 mm para cada lado, numa distância total de 80 mm entre os mesmos, conforme a Figura 8. A velocidade utilizada para a carga foi de 1 mm/min.

Figura 8 – Ilustra o ensaio de resistência a flexão.



Fonte: Do autor, 2015.

### 3.2.6.2 Retração Linear de Secagem e Queima

Com o auxílio de um paquímetro digital mediu-se o comprimento das amostras após a secagem em estufa a 110 °C ( $L_s$ ) e após a queima em um forno a rolos a 850, 950 e 1050 °C ( $L_q$ ), sendo calculado o valor da retração linear de queima (RLQ) pela Equação 3 (WOLFF, 2008).

$$RL_Q(\%) = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

O equipamento usado para medição do comprimento das peças foi um paquímetro digital Digimess, com precisão de 0,01 mm. Nesta etapa além da medição

do comprimento após a secagem e queima, foram medidas também o comprimento das peças logo após extrusão.

### 3.2.6.3 Absorção de Água (AA)

O método de ensaio foi executado conforme a norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Assim, os corpos de prova após a queima foram resfriados na saída do forno e pesados logo em seguida ( $M_s$ ). Posteriormente eles foram acondicionados em um recipiente onde foi adicionada água e o conjunto foi aquecido por uma manta, permanecendo sob fervura durante 2 h.

Durante a fervura os corpos de prova foram mantidos cobertos pela água e afastados do fundo do recipiente. Após as 2 h completas, o aquecimento foi interrompido e as amostras deixadas resfriar por um período de 2 h em temperatura ambiente.

Então, os corpos de prova foram retirados do recipiente, eliminando-se o excesso de água com um pano úmido. Eles foram então pesados para a determinação da massa do corpo de prova saturado ( $M_{sat}$ ).

Segundo as normas NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) e NBR 15270-2 (ABNT, 2005b) a absorção de água para peças cerâmicas para alvenaria deve ser superior a 8% e inferior a 22%.

Com a Equação 4 foi possível calcular a absorção de água (AA) dos corpos de prova.

$$AA = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

AA = absorção de água (%);

$M_s$  = massa do corpo de prova após a queima (g);

$M_{sat}$  = massa do corpo de prova saturado em água (g).

### 3.2.6.4 Cor de Queima

A cor de queima é uma característica importante a ser considerada na cerâmica vermelha, pois ela agrega valor estético do produto final e em alguns casos

limita a definição do tipo de aplicação da argila ou das formulações usadas na massa cerâmica.

Desta forma, analisou-se visualmente os corpos de prova visualmente quanto a cor de queima e procurou-se entender as possíveis correlações entre as cores apresentadas pelas peças e as composições estudadas.

#### 3.2.6.5 Análise da Variância

A análise de variância (ou ANOVA, de “Analysis Of VAriance”) é uma poderosa técnica estatística desenvolvida por R.A. Fisher. Ela consiste em um procedimento que decompõe, em vários componentes identificáveis, a variação total entre os valores do experimento (CALLEGARI-JACQUES, 2004).

Este método segundo Callegari-Jacques (2004) basicamente compara todas as médias em um único teste e tem como objetivo o de identificar a existência de uma ou mais diferenças e/ou significâncias entre grupos amostrais, se alguma existir.

Caso o resultado seja estatisticamente significativo, aplica-se posteriormente uma das várias técnicas existentes de comparação múltiplas entre as médias (CALLEGARI-JACQUES, 2004).

Desta forma, analisou-se para cada ensaio mecânico realizado quais amostra ou grupos (temperatura de queima e diferentes composições das peças) se diferem entre si, mantendo controlado o nível de significância do teste.

Deve-se lembrar que os resultados foram interpolados com 95% de significância. Logo, para p-valores igual a zero, há a significância entre os fatores (temperatura e composição). Para aqueles p-valores maiores que 0,05 os efeitos de interesse nos fatores são não-significativos.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA

Com o objetivo de caracterizar as argilas do tipo A e B que foram utilizadas na composição dos corpos de prova, os seguintes testes foram analisados:

- FRX;
- DRX;
- Plasticidade;

Para os testes citados acima, utilizou-se e analisou-se as amostras realizadas por Zaccaron (2013), conforme citado na referência bibliográfica.

### 3.4 SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO INDICADO

Tendo em vista a pesquisa elaborada na revisão bibliográfica, o material a ser tratado e da disponibilidade de equipamentos, indicou-se um sistema de tratamento do resíduo. A sensibilização e o conhecimento do orientador deste projeto e de diretores da empresa na área de engenharia e no processo de beneficiamento, bem como as características do resíduo também foram considerados para a proposição do tratamento do mesmo.

### 3.5 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As etapas a seguir referem-se aos procedimentos para a preparação da matéria-prima, a formulação das composições, a conformação dos corpos de prova (extrusão) e os processos de secagem e queima.

#### **3.5.1 Preparação matéria-prima**

No que tange a confecção dos corpos de provas, primeiramente foram coletadas 26 kg de argila do tipo A e B em uma lavra localizada na Estação Cocal, município de Morro da Fumaça. Posteriormente, dividiu-se a argila em 3 (três) formas e as mesmas foram aquecidas durante 2 dias à 60°C numa estufa do Grupo de Materiais Cerâmicos - GMC. Este processo foi repetido várias vezes até que toda a argila estivesse seca e teve como objetivo retirar a umidade presente na mesma.

#### **3.5.2 Conformação**

Com as argilas secas, as mesmas foram encaminhadas a um moinho de bolas a seco. Antes de submeter à argila ao moinho, uma pré-moagem foi realizada para desagregar pedaços maiores. Previamente à confecção dos corpos de prova, as amostras de argilas foram moídas a seco em moinho de bolas por um período de 1 h, com elementos moedores de alumina.

Estas duas etapas tiveram o objetivo de eliminar o excesso de umidade e reduzir o tamanho dos aglomerados. O material processado foi passado em malha 45  $\mu\text{m}$  (#325 ABNT).

Depois de toda a argila ser moída, o próximo passo foi fazer os corpos de prova por meio da extrusão, conforme Figura 9. A extrusora tem a função de homogeneizar, desagregar e compactar a massa cerâmica dando forma ao produto desejado (TUBINO, 2006).

Figura 9 – Imagem da Extrusora utilizada no GMC.



Fonte: Do Autor, 2015.

A mistura teve como componentes a argila e/ou o resíduo deste estudo. A extrusora utilizada foi da marca Servitech, modelo C.T 083/1. As proporções foram elaboradas com 6 Kg de argila no GMC do IPARQUE e obedeceram às seguintes composições conforme abaixo:

- Branco (100% argila);
- Argila + 5% de resíduo;
- Argila + 15% de resíduo;
- Argila + 25% de resíduo;

Ressalta-se que antes da realização da extrusão, determinou-se a plasticidade para cada composição no intuito de verificar a melhor porcentagem de umidade para o processamento. Para isto, adicionou-se para cada composição, 15, 20, 25, 30 e 35% de água até que a mesma atingisse a sua melhor condição.

Com o teor de umidade determinado adicionado nas composições corretas, utilizou-se a extrusora, aonde foram confeccionados 30 corpos de provas para cada composição. Após os corpos de prova estarem extrudados, estes foram submetidos a um ajuste superficial e de seu comprimento.

### **3.5.3 Secagem**

Na etapa da secagem, os corpos extrudados foram acondicionados em uma estufa Odontobras, modelo 1.1 por 48h a 60 °C para retirar toda a umidade das peças. Ademais, para evitar a formação de trincas e/ou o rompimento dos corpos de provas, submeteram-se os mesmos novamente à estufa a uma temperatura de 110 °C por aproximadamente 2h.

### **3.5.4 Processo de Queima**

O processo de queima incide em submeter os corpos de prova conformados e secos a uma dada temperatura para que elas adquiram as propriedades desejadas, dentro de valores especificados. Na cerâmica vermelha os produtos são queimados em fornos a temperaturas entre 850 °C e 1150 °C (TUBINO, 2006).

Para o desenvolvimento do trabalho utilizaram-se as peças cerâmicas pós-secagem para o processo de queima por um período de 45 min com temperatura de entrada de 650 °C e temperaturas de queima de 850, 950 e 1050 °C (faixa de temperaturas para queimas na cerâmica vermelha). Para isto foi escolhido o forno a rolos elétricos da marca SERVITECH presente no laboratório do GMC (Figura 10) como equipamento de queima.

Figura 10 – Imagem do forno elétrico utilizado neste projeto.



Fonte: Do Autor, 2015.

Após a queima, as peças foram colocadas em uma estufa a 100 °C e posteriormente a 60 °C com intuito de evitar possíveis trincas e rachaduras. Ademais, antes de submeter as peças aos ensaios de flexão e compressão, as mesmas foram lixadas para maximizar suas propriedades mecânicas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção serão apresentadas as informações obtidas ao longo deste projeto, bem como os resultados de todas as análises dos ensaios e procedimentos realizados que por sua vez tiveram o objetivo de avaliar o comportamento mecânico e físico-químico do resíduo e a possível destinação do mesmo no setor da cerâmica vermelha (telhas e tijolos).

### 4.1 QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS E VAZÃO DO EFLUENTE

Como explicado no referencial teórico, o efluente que segue para tratamento nas bacias de decantações é gerado na primeira fase do processo de beneficiamento (lavagem/peneiramento), onde partículas entre 1 e 13 mm seguem no processo, e as menores que 1 mm têm o destino citado acima.

Os resultados da quantificação de sólidos, da vazão da calha, bem como a vazão mássica, no qual constitui a quantidade de resíduo produzido por hora e que é conduzido para as bacias de decantação estão demonstrados pela Tabela 1.

Tabela 1 – Quantificação de sólidos, vazão e vazão mássica da calha.

Situação	A1*	A2*	A3*	A4*	A5*	Média
<b>Pbalde (kg)</b>	1,110	1,110	1,110	1,110	1,110	1,110
<b>Pbalde+eflu (kg)</b>	21,5	21,7	22,0	22,5	22,5	22,0
<b>Psólidos (kg)</b>	1,030	1,720	1,420	1,620	1,810	1,520
<b>C** (g/L)</b>	51,5	86,0	71,0	81,0	90,5	76,0
<b>Qcalha (m³/h)</b>	126	126	126	126	126	126
<b>Qmássica (kg/h)</b>	6.489,0	10.836,0	8.946,0	10.206,0	11.403,0	9.576,0
<b>Sólidos (%)</b>	5,05	8,35	6,80	7,57	8,46	7,25

\*A corresponde a amostra

\*\* Concentração

Fonte: Do Autor, 2015.

Ao analisar a tabela acima, percebe-se que existe uma inconstância nos valores obtidos quando calculado a concentração (g/L) do resíduo no efluente. Isto interfere diretamente e proporcionalmente em relação a vazão mássica, bem como na porcentagem de sólidos como mostrado na tabela.

Este padrão irregular na quantidade de sólidos pode ser explicado devido à duas situações. A primeira consiste na má homogeneização (mistura com minério

de diferentes partes da jazida) do minério antes de sua entrada no processo de beneficiamento. Já a segunda, coincide na natural granulometria (menores 1 mm são destinados as bacias de decantação) do minério explorado da jazida.

Diferentemente da quantificação de sólidos, a vazão da calha obteve valores regulares nas duas medições realizadas, uma vez que o processo de beneficiamento é constante (24h/dia). Portanto, a vazão só tende a mudar enquanto houver reparos no sistema de produção ou seu completo desligamento.

Ademais, fatores como a precipitação e a própria drenagem de bacias de contribuição não afetam o valor da vazão da calha.

## 4.2 ANÁLISES QUÍMICAS RESÍDUO

Com o objetivo de obter informações confiáveis e que atendessem os objetivos deste presente projeto, a caracterização das amostras em que se submeteram o resíduo e os corpos de provas foram realizadas segundo ensaios normativos e não normativos.

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises físico-químicas citadas nesta metodologia e que tiveram como principal objetivo analisar as características do resíduo objeto de estudo.

### 4.2.1 FRX

A análise química apresentada na Tabela 2 teve por objetivo verificar a presença no resíduo de algum elemento e/ou óxido essencial ou prejudicial para as propriedades físico-químicas desejadas ao setor de cerâmica vermelha, seja para a elaboração de tijolos ou de telhas. Esta análise pode ser vista de maneira mais detalhada e a título de exemplo no Anexo A.

Tabela 2 – Análise química do resíduo objeto de estudo.

Elementos	Teor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,15
CaO	1,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,30
K <sub>2</sub> O	4,54
MgO	0,73
MnO	0,07

Elementos	Teor (%)
Na <sub>2</sub> O	3,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17
SiO <sub>2</sub>	64,05
TiO <sub>2</sub>	0,56
Perda ao Fogo	2,45

Fonte: Do Autor, 2015.

A amostra do resíduo apresenta composições típicas de argilas para cerâmica vermelha, de acordo com Santos (1992), com predominância de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e K<sub>2</sub>O.

O teor elevado de SiO<sub>2</sub> (64,05%) encontrado no resíduo está relacionado principalmente com a existência de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos (SANTOS, 1992).

A sílica livre pode ser proveniente de quartzo (variedade cristalina), opala (variedade amorfa), ágata e calcedônia (variedades criptocristalinas, com minúsculos cristais) e ácidos silícicos amorfos (SANTOS, 1992).

De acordo com Santos (1992), uma das propriedades da sílica livre é a de reduzir a plasticidade em argilas, bem como diminuir sua retração linear. Contudo, se a composição for altamente aluminosa e com baixos teores de agentes fundentes, seu efeito é o de reduzir a refratariedade.

A alumina existente em uma argila está em sua maior parte combinada formando os argilominerais, geralmente caulinita (SANTOS, 1992).

Com base nos resultados obtidos em relação a alumina não caracterizam o resíduo como refratário, uma vez que o teor de 18,15% deste óxido, conforme Santos (1992) estão abaixo dos 46% normatizados pela ABNT (NBR 8.826/14), sendo as argilas estudadas denominadas como silico-aluminosas.

Em relação ao teor de óxido ferroso (4,30%), o mesmo possui efeitos na coloração avermelhada após sua queima e na redução da refratariedade do material.

Conforme Tavares et. al (2005) valores elevados de perda ao fogo indicam que há uma grande perda por escape de compostos voláteis e materiais orgânicos e ainda fluidos da estrutura do mineral-minério. Para o resíduo objeto de estudo, esta perda foi considerada baixa, com apenas 2,45%.

Essa grande taxa de escape de fluidos pode causar danos à estrutura da cerâmica, uma vez que os fluidos saem à medida que a temperatura vai aumentando

e quando o minério já não apresenta estrutura cristalina, tornando-se um material amorfo (TAVARES et. al, 2005).

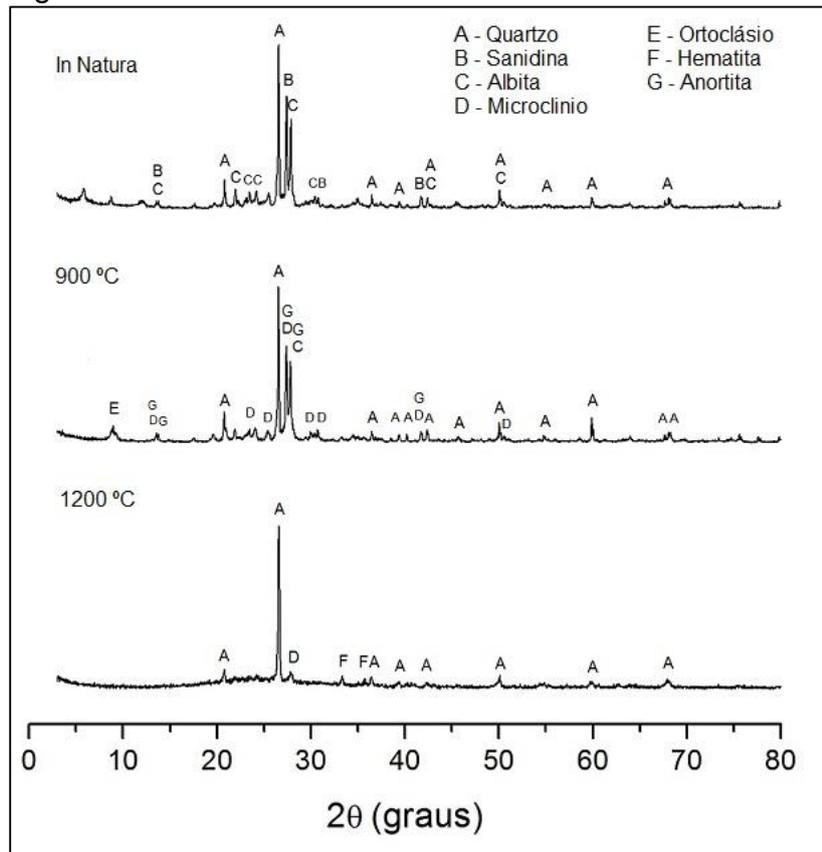
Em concordância com Elyseu (2014) os teores de compostos álcalis, seja  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , proporcionam um efeito fundente e tendem a diminuir a refratariedade.

A presença de  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  proporcionam pouco efeito fundente em temperaturas abaixo de  $1100^\circ\text{C}$ , sendo comumente provenientes da calcita, dolomita e gipsita. Já o  $\text{Na}_2\text{O}$  e o  $\text{K}_2\text{O}$  proporcionam um efeito fundente intenso abaixo de  $1100^\circ\text{C}$  e são comumente provenientes de feldspatos (SANTOS, 1992).

#### 4.2.2 DRX

Os difratogramas de raios-x das amostras analisadas apresentados na Figura 11 mostram essencialmente as fases cristalinas do quartzo, sanidina e albita para o resíduo *in natura*; quartzo, microclinio e anortita para o ensaio a  $900^\circ\text{C}$  e quartzo e hematita a  $1200^\circ\text{C}$ . Nota-se que todos os ensaios possuem em comum a fase cristalina quartzo. Esta análise pode ser vista de maneira mais detalhada e a título de exemplo no Anexo A.

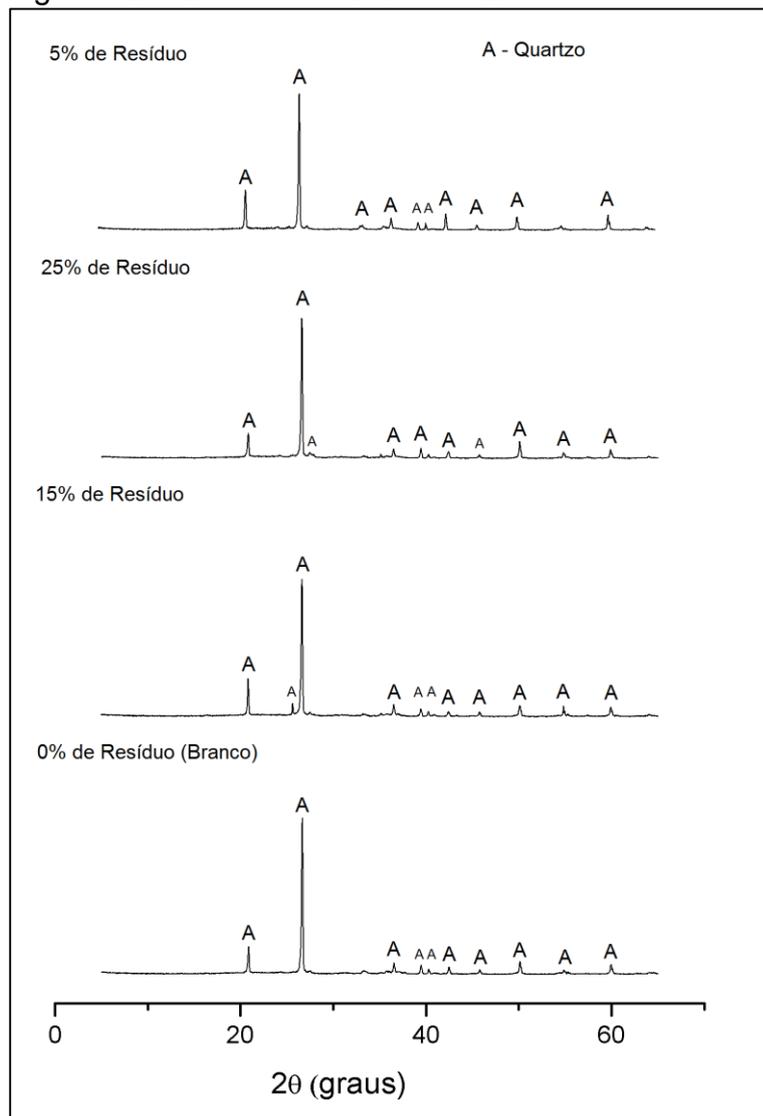
Figura 11 – Ensaio de DRX realizados com o resíduo.



Fonte: Do Autor, 2015.

Os difratogramas realizados com os corpos de prova após serem queimados a 1050 °C mostraram apenas a fase cristalina do quartzo, conforme Figura 12. Isto se deve a temperatura e ao grau de sinterização do material, que fez com que outras fases fossem transformadas.

Figura 12 – Ensaio de DRX realizados com o resíduo.



Fonte: Do Autor, 2015.

#### 4.2.3 Classificação do Resíduo ABNT 10.004/04

A classificação do resíduo proveniente do beneficiamento do feldspato foi classificado como Resíduo Sólido Classe II A – Não Inerte, segundo artigo elaborado pela graduanda em Eng. Civil Thabata de Aguiar Martins.

De acordo com Martins e Santos (2012), o resíduo, quando em contato com água, solubiliza, liberando assim alguns de seus componentes químicos, como por exemplo o alumínio, ferro, fluoretos e manganês.

O estudo, elaborado no ano de 2012 e que tem como nome “Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentação”, apresenta todos os ensaios e os

resultados para a classificação do resíduo segundo norma vigente, dentre eles: FRX, DRX, corrosividade, reatividade, lixiviação e solubilização.

#### 4.2.4 Distribuição de Tamanho de Partícula (DTP)

A Tabela 3 apresenta os valores de tamanhos de partícula em função do tamanho máximo retido nestes percentuais para o resíduo objeto de estudo.

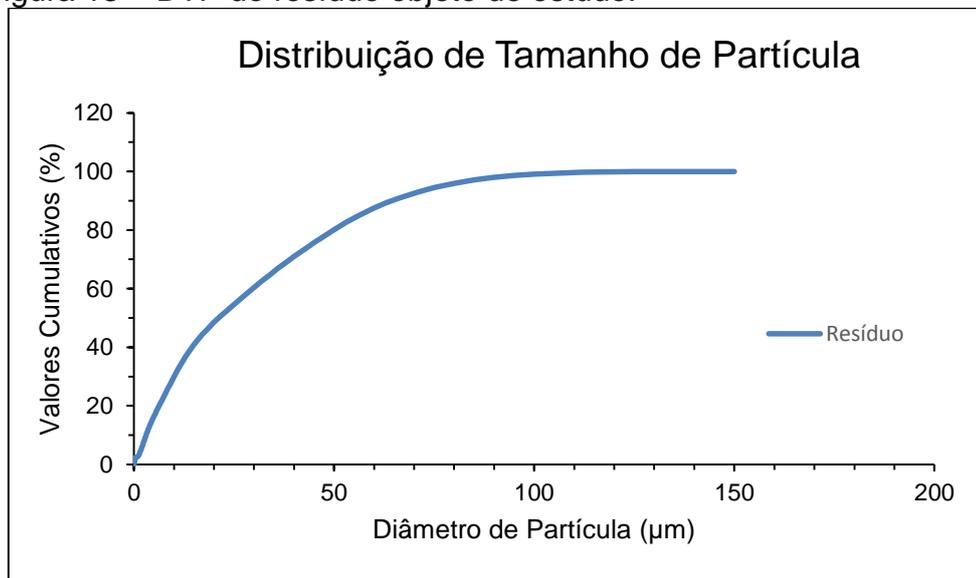
Tabela 3 – Valores obtidos para o ensaio de DTP.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Valor Cumulativo (%)
Ø a 10%	3,05
Ø a 50%	21,16
Ø a 90%	64,44
Ø médio	28,47

Fonte: Do Autor, 2015.

Analisando a tabela acima, percebe-se que aproximadamente 85% da granulometria está presente na faixa entre D10 e D90, onde os diâmetros que se destacam são justamente para o D50 e D90, como se pode ver na tabela e no gráfico que segue (Figura 13).

Figura 13 – DTP do resíduo objeto de estudo.



Fonte: Do Autor, 2015.

Os resultados obtidos da DTP para o resíduo mostram que o mesmo pode ser misturado na massa argilosa para sua conformação a massas cerâmicas destinadas a cerâmica vermelha sem precisar de uma pré-moagem e/ou peneiramento.

### 4.3 ANÁLISES QUÍMICAS ARGILA

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises químicas realizadas e apresentadas por Alexandre Zaccaron em seu projeto de conclusão de curso, que teve como título “Incorporação de chamote na massa cerâmica vermelha como valorização do resíduo”, no ano de 2013. A argila A e B são da mesma lavra que foi utilizada no presente trabalho.

#### 4.3.1 FRX

A análise química apresentada na Tabela 4 demonstra os valores obtidos para FRX das argilas A e B, utilizadas na conformação dos corpos de prova.

Tabela 4 - Análise química da argila objeto de estudo.

Amostras – Teor (%)		
Elementos	Argila A	Argila B
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,60	18,52
CaO	0,15	0,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,92	8,87
K <sub>2</sub> O	1,24	2,48
MgO	0,43	0,67
MnO	<0,05	<0,05
SiO <sub>2</sub>	70,66	69,29
Na <sub>2</sub> O	0,20	0,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,05	0,9
TiO <sub>2</sub>	1,02	0,96
Perda ao Fogo	6,70	5,88

Fonte: Adaptado de Zaccaron, 2013.

A amostra das argilas apresenta composições típicas para cerâmica vermelha, de acordo com Santos (1992), com predominância de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e K<sub>2</sub>O.

O teor elevado de SiO<sub>2</sub> encontrado no resíduo está relacionado principalmente com a existência de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos (SANTOS, 1992).

Ademais, os valores obtidos para alumina, em respeito a Santos (1992) não classifica as argilas como argilas refratárias, uma vez que seus teores estão abaixo dos 46% normatizados pela ABNT (NBR 8.826/14). As argilas em questão, são denominadas como silico-aluminosas.

Em relação ao teor de óxido ferroso em ambas amostras incidem em efeitos na coloração avermelhada após sua queima e na redução da refratariedade do material.

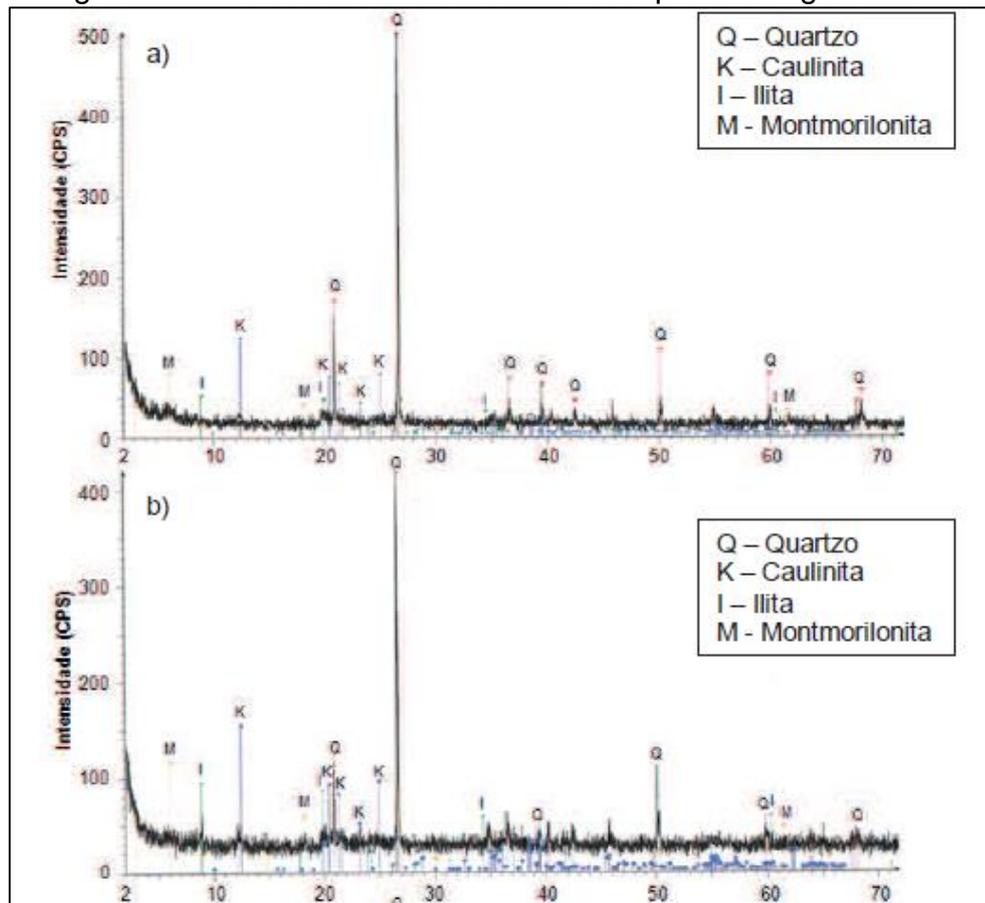
Em concordância com Elyseu (2014) os teores de compostos álcalis, seja  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , proporcionam um efeito fundente e tendem a diminuir a refratariedade. Neste caso, os valores foram baixos e, portanto, não se atribui estas características as argilas.

Tavares (2005) discorre que valores elevados de perda ao fogo indicam que há uma grande perda por escape de compostos voláteis e materiais orgânicos e ainda fluidos da estrutura do mineral-minério. Para o resíduo objeto de estudo, esta perda foi de 6,70 e 5,88% respectivamente.

#### **4.3.2 DRX**

Os difratogramas de raios-x das amostras analisadas apresentados na Figura 14 mostram em “a” as fases cristalinas para a argila A e em “b” para a argila B. Nota-se que, essencialmente, as fases cristalinas identificadas foram a do quartzo, caulinita, illita e montmorilonita para ambas amostras

Figura 14 – Fases cristalinas identificadas para as argilas A e B.



Fonte: Adaptado de Zaccaron, 2013.

### 4.3.3 Plasticidade

O teor de umidade ideal foi calculado através da fórmula da média ponderada, onde se usaram as umidades encontradas no plasticímetro, das argilas A e B (ZACCARON, 2013).

De acordo com Zaccaron (2013), após o método utilizado para encontrar a melhor condição de umidade, os resultados indicam que a argila A apresentou uma plasticidade de 29,50%, enquanto a argila B de 30,34%.

## 4.4 ANÁLISES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA

Com o objetivo de obter informações confiáveis e que atendessem os objetivos deste presente projeto, a caracterização das amostras em que se submeteram o resíduo e os corpos de provas foram realizadas segundo ensaios normativos e não normativos.

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises mecânicas citadas nesta metodologia e que tiveram como principal objetivo analisar as ações do resíduo no corpo cerâmico.

#### 4.4.1 Umidade a Extrusão

A Tabela 5 mostra a porcentagem de água para a sua melhor condição para a extrusão e posterior formação dos corpos de prova para cada composição feita.

Tabela 5 – Valores com melhores desempenhos plásticos.

Composição	Umidade a Extrusão (%)
L	30
A	35
C	35
I	37

Fonte: Do Autor, 2015.

Percebe-se ao analisar a tabela acima que a melhor umidade a extrusão entre todas as composições estudadas foi a com 35%. É importante lembrar que a umidade foi mensurada de acordo com as características (uniformidade do corpo de prova, presença ou não de trincas, entre outros) apresentadas na passagem pela extrusora.

Em referência a Santos (1992) as composições A, C e I possuem 5% e 7% a mais de água em sua formulação do que as formulações para a cerâmica vermelha (tijolo e telha). Neste setor, o limite de plasticidade está entre 15 a 30%.

Paralelo a isto, Macedo et. al (2008) descreve que a presença de feldspato e quartzo em grandes quantidades nas composições cerâmicas influenciam o comportamento de plasticidade, e conseqüentemente do teor de umidade para a extrusão. Segundo os mesmos autores, estes compostos causam uma redução na plasticidade, o que explica uma maior quantidade de água com o aumento do resíduo.

#### 4.4.2 Dilatometria

A Figura 15 mostra o comportamento dilatométrico dos corpos de provas com composições diferentes (A, L, C e I), submetidas a um ciclo de queima com taxa de aquecimento de 10 °C/min de 22 °C a 1000 °C em atmosfera de ar sintético.

Neste tipo de ensaio, as variações dimensionais dos corpos de provas, presentes no gráfico abaixo, podem ser explanadas em função de diversos fatores físico-químicos que ocorrem durante o processo da queima.

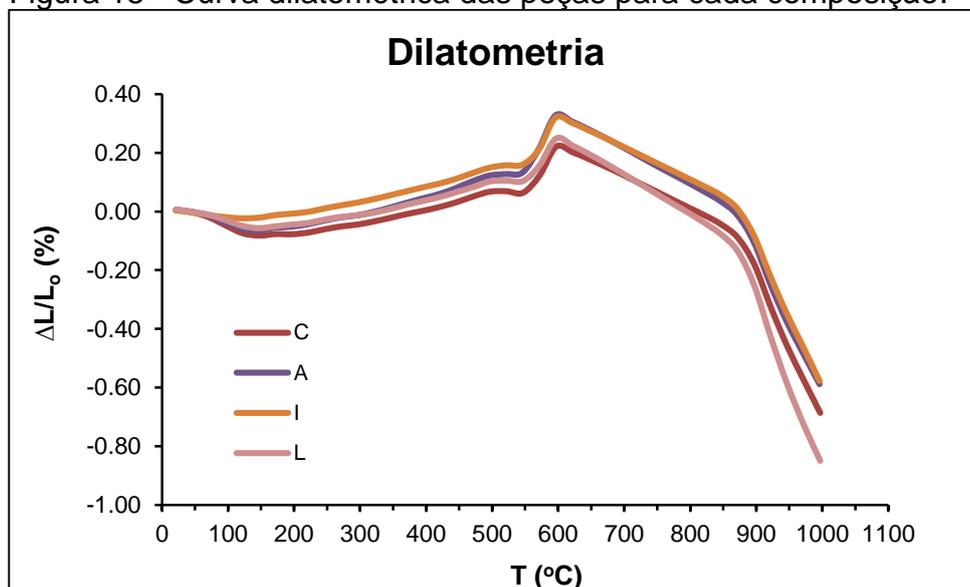
De um modo geral, pode-se dizer que as quatro composições obtiveram o mesmo comportamento. Portanto, o resultado da dilatometria apresentou uma uniformidade reproduzível independentemente da composição.

O diferente grau de dilatação entre os corpos de prova se deu pelas diferentes composições de resíduo com argila.

Todas as peças sofreram retração entre a temperatura ambiente e 200 °C. Isto pode ser atribuído a evaporação da água adsorvida dos corpos de prova, bem como da volatilização da matéria orgânica. A temperaturas mais elevadas, dos 400 °C aos 600/650 °C são expulsos os últimos percentuais da água de constituição (FACINCANI, 2012).

Paralelamente a isto, Ranieri (2007) discorre que a volatilização da matéria orgânica ocorre em temperaturas abaixo dos 900 °C.

Figura 15 - Curva dilatométrica das peças para cada composição.



Fonte: Do Autor, 2015.

Observou-se também uma rápida expansão dos corpos de prova entre 500 e 620 °C. Este comportamento pode ser explicado, segundo Elyseu (2014) pela transição e transformação do quartzo  $\alpha$  para quartzo  $\beta$ .

Callister (2008) descreve que a transformação do quartzo alfa para beta acontece devido a um pequeno giro num dos tetraedros em sua estrutura cristalina.

Logo após o pico de expansão ocorre novamente uma retração do material

até a temperatura de 900 °C, onde a partir desta temperatura, uma retração acentuada decorrente da formação de fase vítrea (líquida), favorecendo a sinterização. Durante esta faixa de queima, de acordo com Callister (2008), explana que os corpos apresentam uma contração em volume e uma redução na porosidade, melhorando a integridade mecânica dos mesmos.

De acordo com Ranieri (2007) a transição para a fase vítrea/líquida faz com que os poros sejam preenchidos, diminuindo a porosidade e provocando uma maior aproximação das partículas, que por sua vez, causa a retração dos corpos.

Essas alterações ocorrem mediante a coalescência das partículas de pó para formar uma massa mais densa, em um processo conhecido por sinterização (CALLISTER, 2008).

Nota-se que a semelhança dos comportamentos das diferentes composições é um indicativo de que o resíduo não apresenta e/ou acrescenta uma propriedade fundente nos corpos de prova, uma vez que não foram observadas uma considerável redução a temperatura de formação de fase vítrea (sinterização).

Entretanto, quando exposto 1200 o resíduo in natura inicia um processo de sinterização/fusão com grande redução de volume conforme pode ser visto na Figura 16 e na Figura 17

Figura 16 – Resíduo calcinado a 900 °C.



Fonte: Do Autor, 2015.

Figura 17 – Resíduo calcinado a 1.200 °C.

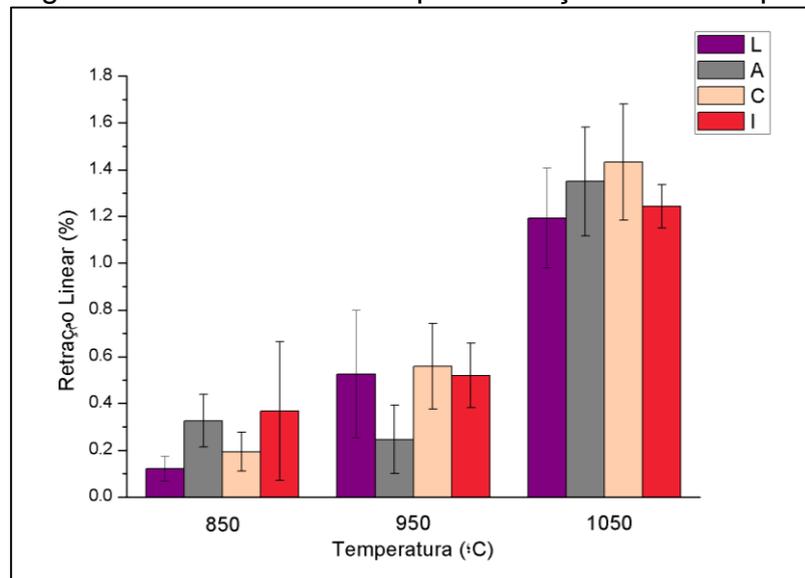


Fonte: Do Autor, 2015.

#### 4.4.3 Retração Linear de Queima

A Figura 18 mostra os valores obtidos para os ensaios de queima para as composições L, A, C e I queimados a 850 °C, 950 °C e 1050 °C em um ciclo de queima com uma duração de 45 minutos.

Figura 18 – Valores obtidos para retração linear de queima.



Fonte: Do Autor, 2015.

Comparando as quatro composições e as faixas de temperatura de queima, pode-se observar que houve uma maior variação dimensional ao passo em que a temperatura de queima foi aumentada, sendo a maior delas à 1050 °C devido a sinterização das partículas.

Os diferentes percentuais de resíduo apresentaram, na sua maioria, uma maior retração de queima do que a composição branca, embora todos os valores ficaram dentro dos 1,5%, considerado como ótimo, de acordo com Dondi (2006). Considera-se que quanto menor a retração, menor a possibilidade de trinca na peça.

O aumento da retração linear se apresenta de forma evidente com o aumento da temperatura. Isso ocorre devido ao aumento do grau de sinterização pela formulação da fase líquida, o que contribui para o preenchimento dos poros e conseqüentemente para a densificação da estrutura dos corpos de prova.

#### 4.4.3.1 Análise Estatística (ANOVA)

Os resultados obtidos para a análise da variância do ensaio de retração linear podem ser vistos na Tabela 6 que segue.

Tabela 6 – p-valores para o ensaio de retração linear de queima.

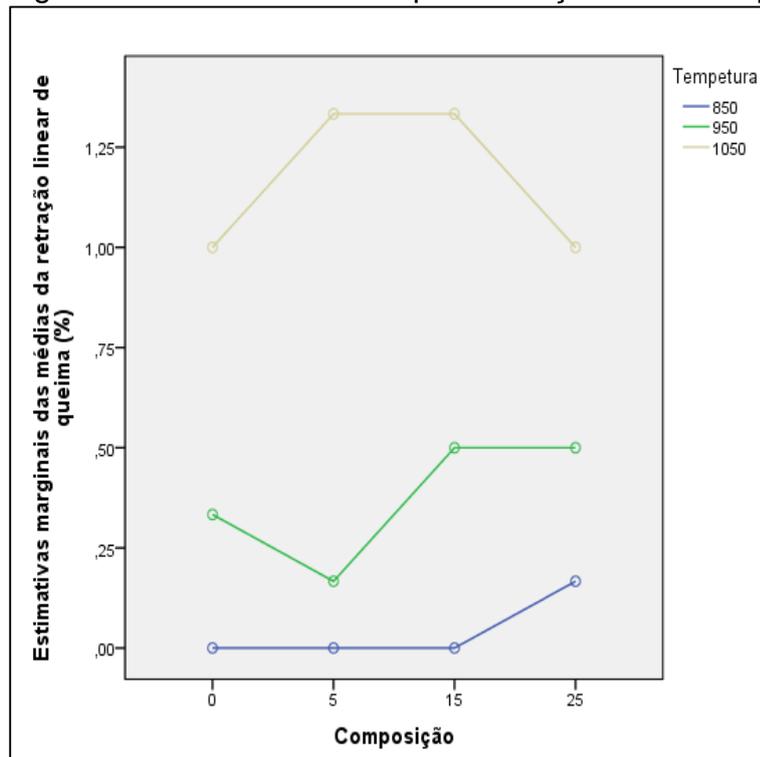
Fatores	Significância (p-valor)
Tempetura	,000
Composicao	,592
Tempetura * Composicao	,361

Fonte: Do Autor, 2015.

Pelo resultado da ANOVA, o efeito de interesse na temperatura foi significativa (p-valor igual a zero), já a composição das peças não mostrou significância para as amostras (p-valor > 0). Da mesma forma, a interação entre as temperaturas e as composições também não apresentou significância.

Isto implica em dizer que a faixa de temperatura apresentou uma maior contribuição (resultado da amostra para temperatura vai acontecer nas peças se reproduzido novamente, caracterizando a amostra como reais. A composição não possuiu evidencias suficientes, e por isso se atribui ao acaso) para o grau de tração linear de queima nas peças, como pode ser visto na Figura 19 abaixo.

Figura 19 – Gráfico ANOVA para retração linear de queima.



Fonte: Do Autor, 2015.

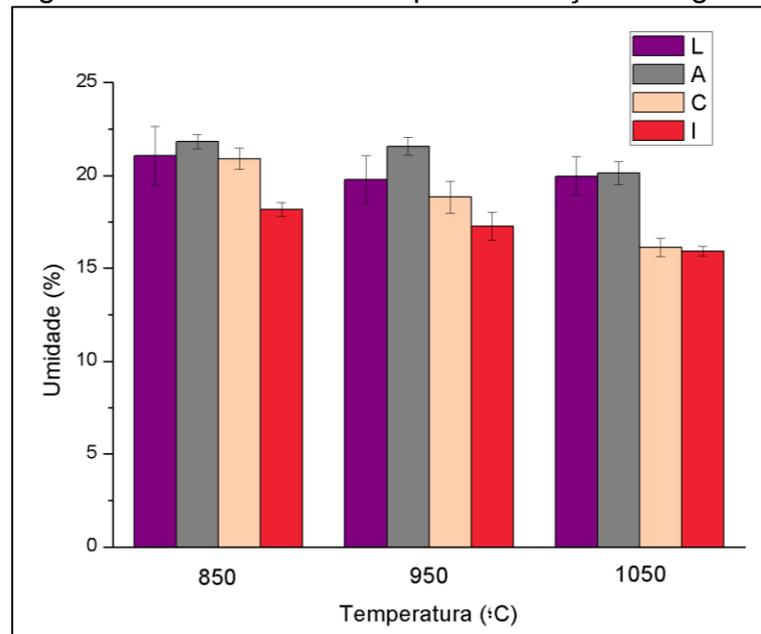
#### 4.4.4 Absorção da Água

A Figura 20 apresenta que os valores obtidos para os ensaios de absorção de água segundo estão dentro dos indicados pela NBR 15270 (não inferior a 8% nem superior a 22%).

Ao analisar o gráfico, a absorção de água tende a diminuir em função do percentual de resíduo incorporado nas composições, cujo o melhor resultado alcançado foi pela composição I, seguida da composição C.

Observa-se ainda que, independentemente da composição da massa, quanto maior for a temperatura de queima (exceto pela composição L), menor a absorção de água.

Figura 20 – Valores obtidos para absorção de água.



Fonte: Do Autor, 2015.

A diminuição da absorção pode ser explicada pela distribuição granulométrica (influenciada pelas ligações entre argila e água) e o preenchimento dos poros durante a fusão dos óxidos fundentes presentes no resíduo, ocasionando assim uma redução na porosidade (RIBEIRO et. al, 2012).

Segundo Facincani (2002) a absorção de água está diretamente relacionada com a quantidade de poros que os corpos de provas possuem. A queda da absorção de água evidencia o preenchimento dos poros.

Durante a sinterização da peça cerâmica, há a formação de materiais vítreos que recobrirão uma determinada quantidade de poros, resultando num produto de melhores qualidades intrínsecas, tais como: menor absorção de água, maior resistência mecânica, entre outros (NORTON, 1973).

Ademais, Riella et. al (2002), explana que os feldspatos (o resíduo possui características próximas a de um feldspato) são responsáveis por diminuir a porosidade das peças cerâmicas, induzindo num menor índice de absorção de água.

#### 4.4.4.1 Análise Estatística (ANOVA)

Os resultados obtidos para a análise da variância do ensaio de absorção de água podem ser vistos na Tabela 7 que segue.

Tabela 7 – p-valores para o ensaio de absorção de água.

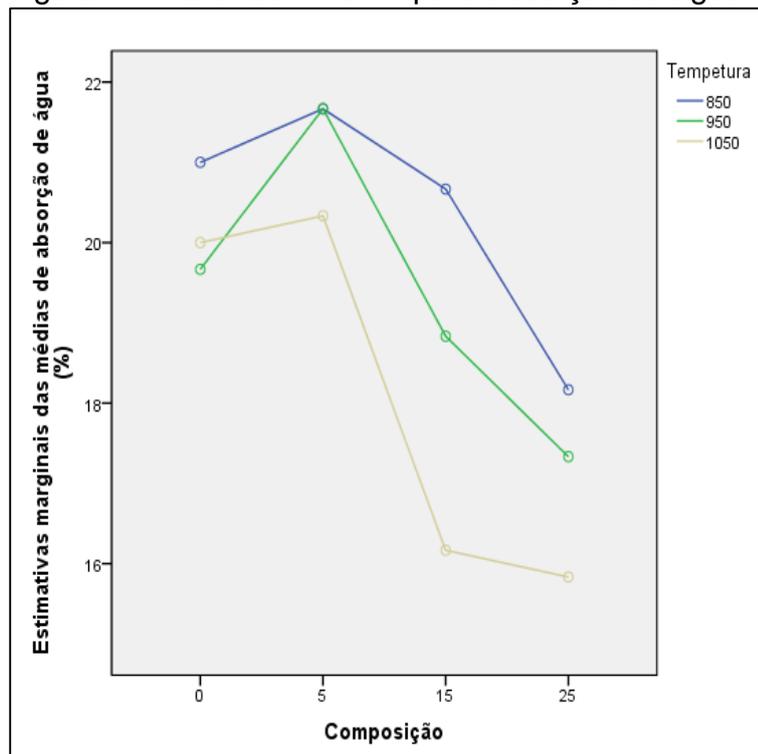
Fatores	Significância (p-valor)
Tempetura	,000
Composicao	,000
Tempetura * Composicao	,000

Fonte: Do Autor, 2015.

Pelo resultado da ANOVA, o efeito de interesse na temperatura, composição e a interação entre ambas foram significativas (p-valor igual a zero). Portanto, pode-se dizer que os fatores são reprodutíveis na população, ou seja, as amostras analisadas são caracterizadas como reais e não casuais.

Deste modo, analisando a Figura 21 abaixo, percebe-se que tanto a composição quanto a temperatura influenciam e possuem significância na absorção de água presenciadas nas peças.

Figura 21 – Gráfico ANOVA para absorção de água.



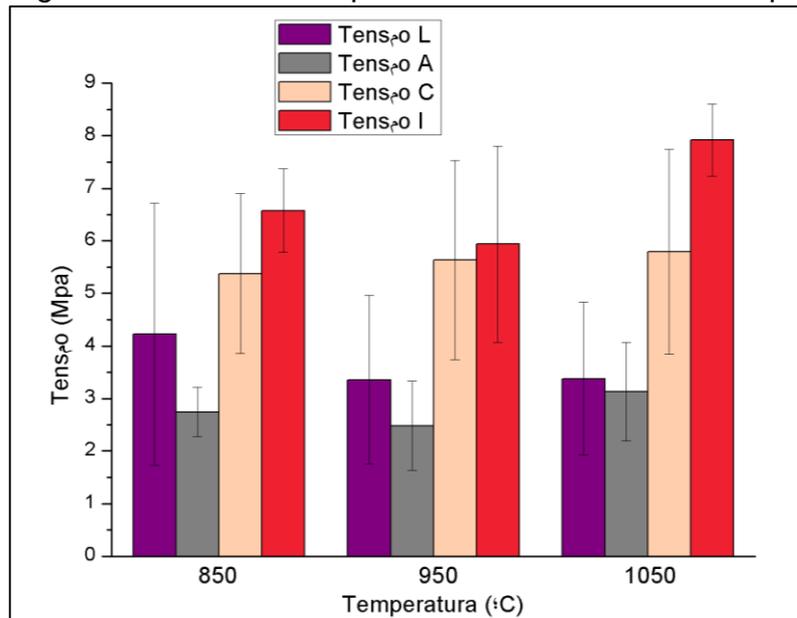
Fonte: Do Autor, 2015.

#### 4.4.5 Resistência Mecânica à flexão de três pontos (MRF)

A tensão de ruptura depende da distribuição granulométrica e da composição mineralógica da argila (SANTOS, 1992). A Figura 22 apresenta os resultados do MRF (média e desvio padrão) dos corpos de provas queimados a 850, 950 e 1050 °C.

Observa-se que quanto maior a temperatura de queima e a porcentagem do resíduo na formulação das peças, melhores foram os valores para resistência a flexão, como pode ser analisado nas composições C e I. Por sua vez, as composições L e A (0% e 5% de resíduo respectivamente), obtiveram uma menor resistência a flexão.

Figura 22 – Resultados para resistência a flexão das peças.



Fonte: Do Autor, 2015.

A composição A obteve os menores valores para o ensaio de MRF. Isto se deve pelo fato desta composição ter em suas estruturas pequenas trincas e rachaduras, baixando assim sua resistência mecânica a flexão.

A composição L apresentou valores parecidos com a composição analisada anteriormente. Contudo, obteve-se também algumas peças com pequenas rachaduras/trincas, o que explica os resultados amostrados.

O melhor desempenho nas composições C e I pode estar relacionado às diferenças encontradas nas formulações, sendo de 15% para “C” e 25% para I.

Norton (1973) explica que uma maior resistência mecânica na cerâmica é resultante de um maior grau de sinterização (fase líquida/vítrea), associado com a redução da porosidade e a formulação das peças.

Portanto, os corpos de provas que não tinham danificações em suas estruturas (trincas/rachaduras), que foram submetidos a um maior grau de sinterização e a uma maior porcentagem do resíduo em sua formulação, obtiveram os melhores resultados.

#### 4.4.5.1 Análise Estatística (ANOVA)

Os resultados obtidos para a análise da variância do ensaio de resistência a flexão podem ser vistos na Tabela 8 que segue.

Tabela 8 – p-valores para o ensaio de absorção de água.

Fatores	Significância (p-valor)
Tempetura	,464
Composicao	,000
Tempetura * Composicao	,524

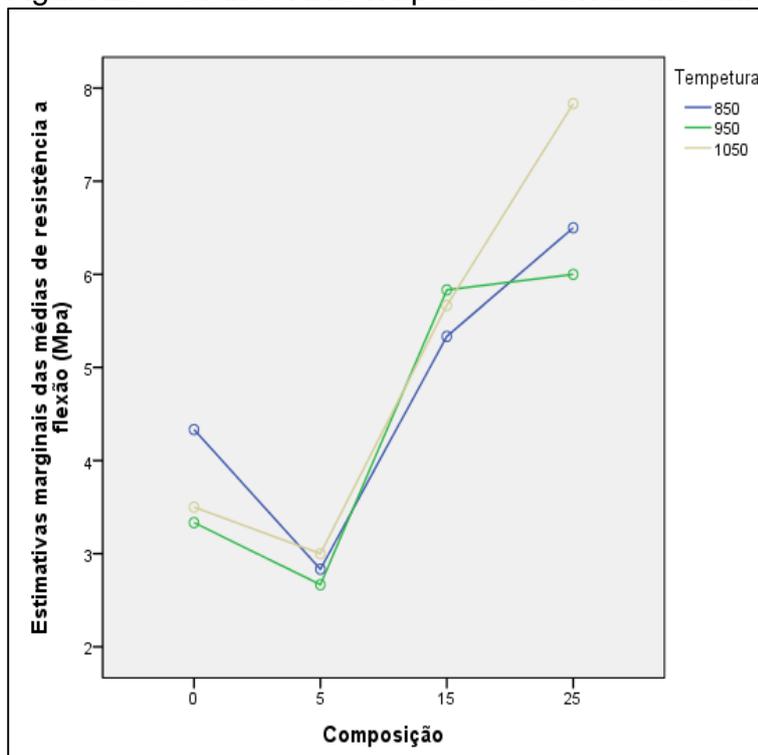
Fonte: Do Autor, 2015.

Os valores da ANOVA consideram que o efeito de interesse na composição foi significativa (p-valor igual a zero). Portanto, pode-se dizer que os fatores são reprodutíveis na população, ou seja, as amostras analisadas são caracterizadas como reais e não casuais. Entretanto, para o fator temperatura e a interação entre temperatura e composição não se observou significância (p-valor maior que 0), apesar de ambos os fatores auxiliarem numa maior resistência a flexão das peças.

Recomenda-se uma maior amostra deste ensaio para que se possa ter mais evidências e assim, uma melhor interpretação estatística.

Deste modo, apresenta-se a Figura 23 que demonstra o gráfico gerado dos resultados estatísticos.

Figura 23 – Gráfico ANOVA para resistência mecânica a flexão.



Fonte: Do Autor, 2015.

#### 4.4.6 Cor de Queima

A variação da tonalidade apresentada pelos corpos de prova após a queima a 850, 950 e 1050 °C podem ser vista na Figura 24 e Figura 25. Nas imagens é possível observar tonalidades do bege claro ao alaranjado.

Figura 24 – Cor de queima resultante dos corpos de prova.



Fonte: Do Autor, 2015.

Figura 25 – Cor de queima resultante dos corpos de prova.



Fonte: Do Autor, 2015.

Todas as composições, para todas as faixas de temperatura constaram-se com cores de queima clara, tendendo para um alaranjado, sendo as composições C e I levemente mais claras, por conta do maior percentual de resíduo nas formulações.

Se uma argila exhibe cor de queima clara ou mesmo branca, quer dizer que ela possui baixo teor de óxidos corantes como o óxido de ferro, por exemplo, que é responsável pela coloração avermelhada (MOTTA et. al, 2004).

## 5 CONCLUSÃO

No que se diz respeito às questões ambientais pertinentes a mineradora em questão, observou-se que a valoração do resíduo deve ser realizada, uma vez que o valor médio obtido para a produção deste material é de aproximadamente 9 t/h, sendo considerado um resultado expressivo. Desta forma a utilização do resíduo vem a contribuir para a empresa, visto que atualmente o mesmo é estocado, gerando despesas a entidade.

Com o intuito de indicar o tratamento necessário para o resíduo, por meio da revisão bibliográfica, indicou-se os processos de peneiramento e filtração. Sugere-se, com o objetivo de aperfeiçoamento, estudar também a possibilidade do sistema de decantação, seguido de filtração.

Os resultados físico-químicos do resíduo e da argila demonstram que o mesmo pode ser acrescentado a massa cerâmica para o setor cerâmica vermelha devido as propriedades do resíduo serem similares ao do feldspato. Em paralelo, o resíduo foi classificado como Não-Perigoso classe II A – Não Inerte.

Em relação aos ensaios mecânicos em que os corpos de provas foram submetidos e comparando as composições com 5, 15 e 25% de resíduo com a composição em branco (100% argila), notou-se, em geral, para os ensaios de resistência a flexão, absorção de água e retração linear um melhor desempenho para as formulações “C” e “I” (15 e 25% respectivamente).

Para a retração de queima, verificou-se que a retração linear de queima aumenta com o aumento da temperatura. Os diferentes percentuais de resíduo apresentaram, na sua maioria, uma maior retração de queima do que a composição branca. Considera-se que quanto menor a retração, menor a possibilidade de trinca na peça.

O desempenho para a absorção de água mostrou-se melhor com o aumento da temperatura de queima. Quando comparada as composições, aquelas com a maior quantidade de resíduo (“C” e “I”) indicaram ser as que menos absorveram água e, portanto, as com melhores resultados. Quanto menor a absorção de água, maior a resistência mecânica.

Quanto ao ensaio de flexão, observou-se que com o aumento da temperatura, há um aumento a resistência a flexão. Da mesma forma que quanto maior a concentração do resíduo na composição, maior foi a resistência ao teste

(exceto para a composição "A", onde os valores foram baixos devido a trincas/rachaduras).

A análise da variância nos mostrou que as amostras do ensaio de absorção de água e os fatores da temperatura no ensaio de retração linear de queima e a composição no ensaio de resistência a flexão são totalmente reprodutíveis na população e, portanto, são significativos e reais. Contudo, os fatores de composição para retração linear de queima e a temperatura para o ensaio de resistência a flexão mostraram serem não-significativos, ou seja, os resultados das amostras foram casuais. Assim, recomenda-se maiores evidências no intuito de melhorar a análise estatística para este último caso.

Portanto, depois de interpretadas todas as análises por composições e temperatura de queima, pode-se dizer que a adição de 15 e 25% do resíduo a massa cerâmica demonstraram uma melhora no produto em relação a composição branca, sendo assim tecnicamente viável.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos.** NBR 15270-1. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.** NBR 15270-2. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.** NBR 15270-3. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – Escoamento livre.** NBR 13403. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos - Classificação:** NBR 10.004. Rio de Janeiro, 2004.

AMARANTE, S.C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner.** 2002. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <<http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/600M.PDF>>. Acesso em: 16 out, 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos,** 2012. p.104. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_publicacao/253\\_publicacao02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf). Acessado em: 22 set, 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos,** versão preliminar – Brasília, 2011. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. **Bioestatística: princípios e aplicações.** Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7.ed Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

CARRISSO, R.C.C., CORREIRA, J.C.G. **Classificação e Peneiramento**. Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, cap. 5, 4 ed., 2004. p. 858, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1020/Cap%203%20Peneiramento.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 out, 2015.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). **Cerâmica branca e de revestimentos**. São Paulo [s.n.], 2006. Disponível em: <<http://www.crq4.org.br/downloads/ceramica.pdf>>. Acesso em: 16 out, 2015.

COELHO, J.M. **Impactos da reestruturação do setor de feldspato no Brasil sobre as empresas de pequeno porte: importância de uma nova abordagem na análise de investimentos**. 2001. 248 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Geociências, Área de administração e política de recursos naturais, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/jose\\_mariod.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/jose_mariod.pdf). Acesso em: 20 set. 2015.

CUNHA, Y. M. de. **Aspectos da Paisagem Oleira de Morro da Fumaça (SC)**. Florianópolis: dissertação de mestrado, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Curso de Mestrado em Geografia, UFSC, 2002. 249 p.

ELYSEU, F. **Desenvolvimento de cerâmica vermelha por monoqueima rápida a partir de massas compostas por argilominerais**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, UNESC, Criciúma, 2014.

FACINCANI, E. **Tecnologia Cerâmica: Cerâmica Estrutural**. Tradução de Géol Jaime Pedrassani. São Paulo: Faenza Editrice do Brasil, 2002. 276 p.

FILHO, J. R. **Avaliação ambiental e do potencial de aproveitamento de um módulo de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina**. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18343/000728099.pdf?sequence=11>>. Acesso em: 25 set. 2015.

FOUST, A.S.; CLUMP, C.W.; WENZEL, L.A. **Princípios de Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.

GRUN, E. **Caracterização de argilas provenientes de canelinha/sc e estudo de formulações de massas cerâmicas**. 2005. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PGCEM, UDESC, Joinville, 2005. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp032930.pdf>>. Acesso em: 15 out, 2015.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: < <http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1200M.PDF>>. Acesso em: 12 out. 2015.

JÚNIOR, R. F. **Feldspato sumario mineral 2014**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/feldspato-sumario-mineral-2014>. Acesso em: 18 set. 2015.

LIMA, J. D., **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**; Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2001. Disponível em: <[http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/01-girs\\_mdl\\_1.pdf](http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/01-girs_mdl_1.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2015.

MACEDO, R.S. et. al. **Estudo de argilas usadas em cerâmicas vermelhas**. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, 7 f. 2008.

MARTINS, T.A., SANTOS, A.A. **Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentação**. Curso de Engenharia Civil, UNESC, Criciúma, 18 f. 2012.

MÁS, E. **Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha**. São Paulo, SP, Brasil, Polo Produções, 2003. 191p.

MINES, R.O. **Environmental engineering: principles and practice**. 1 ed. Editors Wiley Blackwell, Georgia, United States, 2014.

MONTEIRO, José Henrique Penido. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. p. 26-191.

MOTTA, J.F. et al. **As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional**. Cerâmica Industrial, v.7, n.1, 33-40. São Paulo, 2002.

NORTON, F. H. **Ceramica para el artista Alfarero**. 10 ed. México: Companhia Editorial Continental, 1973. 593 p.

PELLENZ, E. **Diagnóstico preliminar dos impactos ambientais da mineração no Paraná**. 2001. Governo do Estado do Paraná, Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e do Turismo. p.217. Disponível em: [http://www.minerpar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatorios\\_concluidos/06\\_relatorios\\_concluidos.pdf](http://www.minerpar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/relatorios_concluidos/06_relatorios_concluidos.pdf). Acesso em: 20 set. 2015.

PERRY, R.H, GREEN, Don W. (Ed.). **Perry's chemical engineers' handbook**. 8. ed New York: McGraw-Hill, 2008.

RANIERI, M.G.A. **Caracterização tecnológica das argilas da cidade de Cunha para fins de cerâmica artística**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, UNESP, Guaratinguetá. 2007. Disponível em: <[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97084/ranieri\\_mga\\_me\\_guara.pdf?sequence=1](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/97084/ranieri_mga_me_guara.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 28 out, 2015.

RIBEIRO, M.J. et. al. **Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas**. Cerâmica Industrial, 8 (1) Janeiro/Fevereiro, 2003.

RIELLA, H.G. et. al. **Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas**. Revista Cerâmica Industrial, UFSC, Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2002/14181.pdf>>. Acesso em: 02 nov, 2015.

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2 ed. Editora Edgard Blücher, São Paulo 1992. v1. 499 p.

SILVA, A.P.M. et. al. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, Brasília, 2001. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/11\\_CADDIAG\\_Res\\_Sol\\_Minerao.pdf](http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/11_CADDIAG_Res_Sol_Minerao.pdf)>. Acesso em: 20 set, 2015.

TAVARES, S.T.P. et al. **A importância da caracterização química e mineralógica do feldspato para a sua utilização na indústria cerâmica e vidreira**. Revista Cerâmica Industrial, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v10n04/publicado\\_v10n4a04.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v10n04/publicado_v10n4a04.pdf)>. Acesso em: 18 out, 2015.

TUBINO, L. C. B.; BORBA, P. SENAI-RS / Centro de Educação Profissional Senai Nilo Bettanin. **DOSSIÊ TÉCNICO: Etapas do Processo Cerâmico e sua Influência no Produto Final - massa, extrusão, secagem e queima**. Esteio - Rio Grande do Sul, 2006, 18 p. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NDI>>. Acesso em: 21 out, 2015.

WARREN, McCabe. et al. **Unit Operations of Chemical Engineering**, 7th ed., 2004, McGraw-Hill, New York.

WOLFF, E. **O Uso do Lodo de Estação de Tratamento de Água e Resíduos da Indústria de Celulose (Dregs, Grits, e Lama de Cal) na Produção de Cerâmica Vermelha**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Escola de Engenharia, Belo Horizonte-MG, 2008, 188 p.

YOUNGER, P.L et al. **Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation**. 5 ed. Editors Kluwer Academic Publishers, London, England, 2002.

ZACCARON, A. **Incorporação de chamote na massa de cerâmica vermelha como valorização do resíduo**. 2013. 121 f. Monografia (Engenheiro Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental, UNESC, Criciúma, 2013.

**ANEXO(S)**

## ANEXO A - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO RESÍDUO (FRX E DRX)

