

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**GRAZIELA SERAFIM CASAGRANDE**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE  
TERMOELÉTRICA E BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL EM MASSA  
PARA PRODUÇÃO DE *ADOQUÍN* CERÂMICO**

**CRICIÚMA**

**2017**

**GRAZIELA SERAFIM CASAGRANDE**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE  
TERMOELÉTRICA E BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL EM MASSA  
PARA PRODUÇÃO DE *ADOQUÍN* CERÂMICO**

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

Orientador: Prof. Dr. Michael Peterson

**CRICIÚMA**

**2017**

**GRAZIELA SERAFIM CASAGRANDE**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE  
TERMOELÉTRICA E BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL EM MASSA  
PARA PRODUÇÃO DE *ADOQUÍN* CERÂMICO**

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

Criciúma, 26 de Junho de 2017.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Michael Peterson – Eng. Dr. - (UNESC) - Orientador

Prof. Sérgio Luciano Galatto - Eng. MSc. Ambiental - (UNESC)

Prof<sup>a</sup>. Rosimeri Venâncio Redivo - Eng. MSc. Química - (UNESC)

**Dedico aos meus pais Geraldo e Glória,  
minha vó Massemira (*in memoria*) e a minha  
irmã Gabriela pelo amor e incentivo a mim  
sempre dado.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ser essencial em minha vida, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais pelo incentivo e apoio incondicional e por proporcionar esta realização que estou vivendo.

A minha irmã pelo incentivo e pelo apoio constante e que não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa.

Ao meu orientador pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível esse trabalho.

Ao engenheiro ambiental e Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Alexandre Zaccaron, que sou grata pela dedicação e atenção. Pela valiosa orientação e acompanhamento em cada etapa do desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Fabio Rosso do Laboratório de Materiais Cerâmicos Cocal – LaMaCC, em Cocal do Sul, aos acadêmicos Gustavo Sebastião Scheffer e Higor Daleffe Comin do Laboratório de Ensaio Mecânico - IDT, Parque Científico e Tecnológico – I. Parque, pela ajuda na realização dos testes.

A acadêmica do curso de Eng. Ambiental Julia Nuernberg, por ter me ajudado nos testes de fitotoxicidade.

Ao pessoal do laboratório da empresa Rio Deserto principalmente, Adriel Constantino Machado e Marcos Roberta Honorio, Cinthia Miottello e Karline Pereira Consoni, que muito me ajudaram.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

## RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica de incorporação do resíduo denominada torta proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão mineral e do resíduo proveniente de uma termoelétrica oriunda do processo da queima do carvão mineral denominado cinza pesada na massa cerâmica em escala laboratorial. Foram realizados ensaios de caracterização química, física e de classificação dos resíduos. Posteriormente, foram desenvolvidas 10 formulações através de planejamento experimental por delineamento de misturas simplex centroide, incorporando esses resíduos a uma massa padrão de cerâmica vermelha. Os corpos-de-prova foram conformados por extrusão sem vácuo e submetidos a tratamento térmico em estufa e queima em forno mufla a 900 °C. As propriedades tecnológicas avaliadas foram: retração térmica linear de secagem e de queima, absorção de água, perda ao fogo e resistência mecânica e por fim foram realizados teste de eflorescência e análise fitotoxicológico. Os resultados de classificação dos resíduos indicaram como não perigoso – Classe IIB – Inerte. Os testes físicos dos corpos-de-prova mostram que, comparados a formulação F1 (STD), as demais formulações obtiveram resultados satisfatórios, que podem ser posteriormente realizados em um ensaio de escala similar a industrial. Muito embora o ensaio mecânico as provas com incorporação de resíduo ficaram abaixo da F1 (STD) em demasia, não se descarta uma prova em escala similar a industrial. No ensaio de eflorescência, observou-se que não houve presença de sais solúveis. E por fim, no ensaio fitotoxicológico, com *Allium cepa L* apresentou resultados extremamente satisfatório da F7.

**Palavras-chave:** Cerâmica vermelha. *Adoquín*. Resíduos. Torta de rejeito. Cinza pesada.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Caracterização e classificação de resíduos sólidos, apresentando a metodologia (ABNT/NBR 10004:2004) empregada para a classificação dos resíduos sólidos. ....	23
Figura 2. Fluxograma do processo produtivo das indústrias mineradoras de carvão mineral. ....	28
Figura 3. Apresenta um modelo de um <i>adoquín</i> cerâmico. ....	34
Figura 4. Exemplos de aplicação de pavimentos cerâmicos extrudados. ....	35
Figura 5. Representação de um arranjo simplex. ....	38
Figura 6. Representação de um arranjo simplex com ponto central. ....	38
Figura 7. Fluxograma das atividades desenvolvidas. ....	41
Figura 8. Apresenta uma amostra de massa padrão que consiste numa uma blenda de argilas. ....	42
Figura 9. Apresenta uma amostra do resíduo denominado torta de rejeito proveniente do filtro prensa. ....	43
Figura 10. Apresenta uma amostra de cinza proveniente da queima do carvão. ....	44
Figura 11. Diagrama de misturas (a) com as extremidades de 100 % de cada uma das matérias-primas usadas, e (b) com a extremidade de 100 % de argila e 50 % de argila + 50 % dos resíduos usados. ....	47
Figura 12. Equipamento utilizado no método de determinação do índice de plasticidade de <i>Pfefferkorn</i> . ....	49
Figura 13. Misturador utilizado no processo de conformação dos corpos-de-prova. ....	51
Figura 14. (a) Prensa hidráulica realizado no processo de extrusão sem vácuo, e (b) funil de tecnil utilizado para conformação dos corpos-de-prova. ....	52
Figura 15. Máquina Universal de Ensaio utilizada no teste de resistência mecânica. ....	55
Figura 16. Ensaio de absorção de água em banho de imersão. ....	56
Figura 17. Disposição do ensaio realizando com <i>Allium cepa</i> L. ....	57
Figura 18. Apresenta os ensaios de eflorescência. ....	58
Figura 19. Gráfico da Curva do índice de plasticidade. ....	61
Figura 20. Representa graficamente o percentual (%) passante do resíduo bruto. ....	62
Figura 21. Representa graficamente o percentual (%) passante. ....	64
Figura 22. Gráfico com resultados de retração linear de secagem. ....	69

Figura 23. Superfície de resposta para retração térmica de secagem. ....	70
Figura 24. Gráfico com resultados da retração térmica linear de queima. ....	71
Figura 25. Superfície de resposta para retração térmica linear de queima. ....	72
Figura 26. Gráfico com resultados de perda ao fogo. ....	73
Figura 27. Superfície de resposta para perda ao fogo. ....	73
Figura 28. Gráfico com resultados da absorção de água (%). ....	74
Figura 29. Superfície de resposta para a absorção de água. ....	75
Figura 30. Gráfico com resultados da resistência mecânica (%). ....	75
Figura 31. Superfície de resposta para a resistência mecânica. ....	76
Figura 32. Resultado das análise de efluorescência. ....	77
Figura 33. Resultados obtidos pelo teste de fitotoxicidade com <i>Allium cepa</i> L. ....	78
Figura 34. Apresenta o gráfico com a média de crescimento das raízes. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características técnica de acordo com a norma UNE-NE 1344/2002, para produção de <i>adoquín</i> extrudado e prensado.....	36
Tabela 2. Formulações pelo delineamento de misturas. ....	48
Tabela 3. Resultados da umidade <i>in natura</i> das matérias-primas.....	59
Tabela 4. Valores obtidos no ensaio de plasticidade para as formulações 1, 2 e 3. .	60
Tabela 5. Representa a umidade ideal para as formulações. ....	61
Tabela 6. Valor do resíduo bruto, retido na peneira malha 325 (44 µm). ....	62
Tabela 7. Caracterização química.....	63
Tabela 8. Análises físicas químicas da torta de rejeito.....	66
Tabela 9. Resultado das análises do teste de corrosividade.....	66
Tabela 10. Resultado da análise do teste de reatividade.....	67
Tabela 11. Resultados de lixiviação do resíduo. ....	67
Tabela 12. Resultados da solubilização dos resíduos.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA - Absorção de Água  
ABCM - Associação Brasileira de Carvão Mineral  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
CE - Carvão Energético  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional  
DAM - Drenagem Ácida de Minas  
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral  
EIA - Estudo de Impacto Ambiental  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
ETA - Estação de Tratamento de Água  
ETE - Estação de Tratamento de Efluentes  
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente  
IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração  
IDT - Instituto de Engenharia e Tecnologia  
IPARQUE - Parque Científico e Tecnologia  
IPC – Institut de Promoció Ceràmica  
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
LABCER - Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha  
MPF- Ministério Público Federal  
NBR - Normas Brasileiras  
PF- Perda ao Fogo  
PRONAR- Programa Nacional de Controle de Poluição do Ar  
R<sub>b</sub>- Resíduo Bruto  
RB – Resíduo Bruto  
RLQ - Retração Térmica Linear de Queima  
RLS - Retração Térmica Linear de Secagem  
RIMA - Relatório de Impacto Ambiental  
ROM - Run Of Mine (carvão bruto de mina)  
SC - Santa Catarina  
SEBRAE - Serviço Brasileiro de apoio às Micro e Pequenas Empresas

SEMA - Secretaria Especial do Meio Ambiente

SINDICER - Sindicato da indústria de Cerâmica Vermelha

TAC - Termo de ajuste de conduta

VBPI - Valor Bruto da Produção Industrial

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1. ASPECTOS LEGAIS .....	17
2.1.1. Legislação Federal .....	18
2.1.2. Recuperação de Áreas Degradadas .....	19
2.1.3. Emissão de Gases.....	20
2.1.4. Padronização de <i>Adoquins</i> Cerâmico .....	21
2.1.5. Classificação dos resíduos sólidos.....	21
2.2 CARVÃO MINERAL .....	24
2.2.1 Produção mundial .....	24
2.2.2 Carvão em Santa Catarina .....	25
2.2.3 Produção Do Carvão Mineral .....	26
2.2.4 Impactos ambientais da atividade de mineração .....	29
2.2.5. Resíduos sólidos.....	30
2.2.6 Reaproveitamento de resíduos sólidos.....	31
2.3 CERÂMICA VERMELHA.....	32
2.3.1 <i>Adoquín</i> Cerâmico .....	33
2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	36
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
3.1 COLETA DE AMOSTRAS .....	42
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	44
3.2.1 Umidade <i>In Natura</i> .....	44
3.2.2 Resíduo Bruto.....	45
3.2.3 Distribuição do tamanho de partículas .....	46
3.2.4 Classificação dos resíduos .....	46
3.2.5 Caracterização química .....	46
3.3 METODOS .....	47
3.3.1 Formulação das composições .....	47
3.3.2 Plasticidade .....	48
3.3.3 Preparação das amostras.....	50
3.3.4 Tratamento térmico.....	52
3.3.5 Retração térmica linear de secagem .....	53

<b>3.3.6 Retração térmica linear de queima</b> .....	<b>53</b>
<b>3.3.7 Perda ao fogo</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3.8 Ensaio de resistência mecânica à compressão</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3.9 Absorção de Água</b> .....	<b>55</b>
<b>3.3.10 Teste de fitotoxicidade</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3.11 Ensaio de eflorescência</b> .....	<b>57</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1.1 Caracterização Física e Química</b> .....	<b>59</b>
4.1.1.1 Umidade e plasticidade .....	59
4.1.1.2 Resíduo Bruto .....	61
4.1.1.3 Caracterização Química .....	63
4.1.1.4 Distribuição granulométrica .....	64
<b>4.1.2 Classificação dos resíduos</b> .....	<b>65</b>
4.1.2.1 Análises físicas químicas .....	65
4.1.2.2 Corrosividade .....	66
4.1.2.3 Reatividade .....	66
4.1.2.4 Lixiviação.....	67
4.1.2.5 Solubilidade.....	68
<b>4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2.1 Retração Térmica Linear de Secagem</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2.2 Retração térmica linear de queima</b> .....	<b>70</b>
<b>4.2.3 Perda ao fogo</b> .....	<b>72</b>
<b>4.2.4 Absorção a água</b> .....	<b>74</b>
<b>4.2.5 Resistência mecânica à compressão</b> .....	<b>75</b>
<b>4.2.6 Eflorescência</b> .....	<b>76</b>
<b>4.2.7 Fitotoxicidade</b> .....	<b>77</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>81</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS LABORATORIAS</b> .....	<b>89</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O setor carbonífero é um dos principais setores econômico no extremo sul catarinense, porém, apesar de sua grande importância econômica, é uma atividade de mineração associada a impactos ambientais de grande relevância. Em paralelo aos problemas ambientais ocasionados com a mineração de carvão, existe uma série de resíduos que são gerados por conta da própria mineração e beneficiamento, que em sua grande maioria, são descartados em aterros industriais, o que gera uma série de outros novos problemas ambientais. Muito embora isso seja verdade, atualmente as mineradoras atuam de forma ativa para mitigar esses prejuízos.

Nos últimos anos o panorama da destinação dos resíduos gerados nas indústrias ficou em evidência, pois a sua inadequada disposição afeta profundamente o equilíbrio ambiental, e conseqüentemente, a qualidade de vida de todos. A caracterização dos resíduos industriais é um fator decisório, a partir da sua classificação obtivemos novos conhecimentos quanto aos prováveis problemas que estes podem ocasionar no meio ambiente, na saúde pública e de quais requisitos legais necessitam ser atendidos.

No que se referem à matéria-prima, os produtos da cerâmica vermelha, utilizam basicamente argilas comum, cuja obtenção, em geral, é baseada na experiência acumulada, visando uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, facilitando o manuseio e propiciando resistência mecânica na queima (ZACCARON *et al.*, 2014).

Nesse sentido, este nicho empresarial, não apresenta muitas exigências quanto à fabricação dos seus produtos, por isso, a incorporação de resíduos industriais dos mais variados tipos vem sendo utilizada como alternativa viável e possível de incorporar nas massas cerâmicas a fim de dar um destino ambientalmente correto para resíduos que, de outra forma, seriam fontes de poluição (LUCAS & BENATTI, 2008).

O rejeito do processo industrial do setor carbonífero conhecido como torta proveniente do filtro prensa do beneficiamento do carvão mineral com a junção das cinzas provenientes da queima do carvão mineral pode ser uma alternativa de reutilização no meio cerâmico.

Cabe destacar novamente que os resíduos industriais constituem-se um dos principais problemas ambientais a serem enfrentados pela indústria. Partindo

desta premissa, verificou-se a possibilidade de incorporar esses rejeitos na formulação da massa de cerâmica vermelha, para fabricação de um produto de pavimentação.

Baseado nessas informações, o estudo propõe analisar a viabilização técnica na aplicação de um resíduo mineral proveniente do processo de beneficiamento do carvão (torta de rejeito), com a junção de cinzas provenientes da queima do carvão incorporados na massa cerâmica, como forma de valorização desses resíduos e ampliação de produtos para a construção civil. Tendo como objetivo específico; classificar os resíduos conforme NBR10004/2004, fazer a caracterização físico-química dos resíduos, desenvolver formulações por delineamento de misturas, com diferentes percentuais dos resíduos incorporando a argila e realizar testes de qualidade com os corpos-de-prova em escala laboratorial. Em etapa final, foram realizados testes de fitotoxicidade com organismos vivos, a fim de analisar a resposta ambiental desse novo produto.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O carvão mineral é considerado uma das formas de produção de energia, mas agressiva ao meio ambiente, provocando impactos socioambientais desde o processo de produção, extração e combustão. Em contrapartida gera benefícios econômicos como empregos diretos e indiretos, aumento da demanda por bens e serviços na região e aumento da arrecadação tributária (ANEEL, 2017).

Destaca-se no setor energético, sendo a forma de energia elétrica menos cara e a, mais confiável para atender a crescente necessidade de energia (ABCM, 2014). Comumente o setor de mineração é um dos alicerces da economia do país (IBRAM, 2014).

No ano de 2015, o carvão mineral representou 5.9% da oferta interna de energia nacional, num total de 17,7 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (EPE, 2016). O uso do carvão mineral obteve um aumento em relação ao ano de 2014, apresentando 5,7% da oferta interna de energia, num total de 17,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (DNPM, 2016). Esse aumento está relacionado com a crise hídrica que o país enfrentou, maior parcela do carvão foi destinada para geração termelétrica.

O setor carbonífero destaca-se em relação ao salário médio do trabalhador. Durante os meses do 1º semestre de 2016 apresentou remunerações acima da média brasileira, ganhando posto de segundo setor com maior salário no país (R\$2.563,36) (DNPM, 2016).

O carvão apesar dos graves impactos sobre o meio ambiente é uma importante fonte de energia, se destaca pela abundância das reservas em todo mundo, os baixos custos e a distribuição geográfica das reservas (ANEEL, 2017).

### 2.1. ASPECTOS LEGAIS

A partir da publicação do Decreto nº 85.206 de 1980, que considera a bacia carbonífera como uma das 14 áreas críticas nacionais, para efeito de controle da poluição e conservação da qualidade ambiental, o governo começou a se preocupar e propor ações para reparar tais danos (RAVAZZOLI, 2013).

Em 1982 sobreveio a Portaria Interministerial nº 917 de 06/07/82 dos Ministros de Minas e Energia, do Interior e da Indústria e do Comércio, a qual, considerando a necessidade de conciliar a expansão da produção e uso do carvão mineral com a preservação da integridade do meio ambiente, passa a exigir das empresas mineradoras, em um prazo de 6 meses, a apresentação de projetos seguidos de cronograma de execução para tratamento dos efluentes líquidos originados da drenagem ácida da mina e do beneficiamento do carvão, de transporte, manuseio da disposição final e/ou parcial de subprodutos, produtos e resíduos sólidos originados da lavra ou beneficiamento e de recuperação ambiental. Esses projetos deveriam ser apreciados pela Secretaria Especial do Meio Ambiente – SEMA e aprovados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, condicionando as concessões de lavra ao cumprimento dessas exigências (RAVAZZOLI, 2013, p.185).

No ano de 1993, o Ministério Público Federal propôs a obrigatoriedade da recuperação das áreas degradadas. Nos anos de 2005 e 2010, o MPF propôs a assinatura de Termos de Ajustamento de Conduta (TACs) para adequação das minas que se encontrava em atividade (RAVAZZOLI, 2013).

O termo de ajustamento de conduta – TAC é um instrumento do Ministério Público Federal previsto na Lei nº 7.347/87. O TAC assinado teve como objetivo estabelecer condições e prazos para adequação legal e controle ambiental perante aos órgãos ambientais. Com previsão de interdição e aplicação de multas caso houvesse o descumprimento. As mineradoras eram responsáveis por grande carga poluidora, empresas com licenças vencidas e outras operavam sem ao mesmo estar licenciada. O protocolo abrange também a recuperação de áreas de passivo ambiental (RAVAZZOLI, 2012).

### 2.1.1. Legislação Federal

Como cita a Constituição Federal do Brasil de 1988, onde no capítulo VI, no artigo 225 prescreve que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para presentes e futuras gerações.

A resolução do CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, tendo em seu Art. 2º:

A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetivas ou potencialmente poluidoras, bem como os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento do órgão ambiental competente, sem prejuízo de outras licenças legalmente exigíveis.

No Art 3º da resolução do CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, apresenta:

A licença ambiental para empreendimentos e atividades considerados efetiva ou potencialmente causadoras de significativa degradação do meio dependerá de prévio estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto sobre o meio ambiente (EIA/ RIMA), ao qual dar-se-á publicidade, garantida a realização de audiências públicas, quando couber, de acordo com a regulamentação.

No Anexo 1 da Resolução do CONAMA nº 237/1997, é apresentada as atividades ou empreendimentos que estão sujeitas ao licenciamento ambiental. No caso da atividade carbonífera se enquadra a extração e tratamento de minerais, pesquisa mineral com guia de utilização, lavra a céu aberto, inclusive de aluvião, com ou sem beneficiamento, lavra subterrânea com ou sem beneficiamento, lavra subterrânea com ou sem beneficiamento, lavra garimpeira, perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural.

### 2.1.2. Recuperação de Áreas Degradadas

Um dos principais problemas ambientais na mineração de carvão mineral é a contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida de mina (DAM) provenientes de antigos depósitos de rejeitos. Para correção deste e outros impactos ambientais, existe a necessidade de atendimento a leis e resoluções, abaixo algumas vigentes.

- Novo Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 estabelece normas sobre proteção da vegetação, áreas de preservação permanentes e as áreas de reservas legal entre outros;
- Decreto Federal nº 97.632 de 10 de abril de 1989 que estabelece a realização de plano de recuperação de áreas degradadas para empreendimentos que destinam a exploração de recursos minerais e Portaria nº 237, de 18 de Outubro de 2001 aprova as Normas Reguladoras de Mineração;

- Resolução CONAMA nº 9, de 6 de dezembro de 1990 e 010/90, publicadas em 28 de dezembro de 1990, normas específicas e procedimentos para o licenciamento ambiental para o setor mineral;
- Lei 9.605 de 1998 que fala dos Crimes Ambientais, e;
- A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, especificando seus fins e mecanismos de formulações e aplicações.

As áreas mineradas no passado, grande parte eram utilizadas como depósitos de rejeitos e estéreis. A exposição dessas matérias em condições atmosféricas possibilitou a formação de drenagem ácida de mina, ocasionando graves impactos ambientais como alteração da qualidade da água pela diminuição do pH, afetando a água subterrânea e superfície de rios (SOARES, 2008).

### 2.1.3. Emissão de Gases

Há emissão de material particulado, dióxido de enxofre e os ácidos de nitrogênio, através da queima do carvão mineral utilizados principalmente em indústria e termoelétricas. Ocasionalmente graves problemas na saúde humana e a formação de chuva ácida provocando a acidificação do solo e da água e consequentemente alteração da biodiversidade (SOARES, 2008).

A resolução do CONAMA nº 003 de junho de 1990, estabelece padrões primários e secundários de qualidade do ar. No seu artigo 1º define que concentrações elevadas de poluentes atmosféricos, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora, à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral, de acordo com as resoluções especificadas abaixo.

- Resolução CONAMA 05/89 institui Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR;
- Resolução CONAMA 03/90 estabelece padrões primários e secundários de qualidade do ar;
- Resolução CONAMA 08/90. Estabelece limites máximos de emissão de poluentes do ar, previstos no PRONAR, e;

- Resolução CONAMA nº 382 de 26 de dezembro de 2006, estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

#### 2.1.4. Padronização de *Adoquins* Cerâmico

Atualmente no Brasil não existe uma norma que estabelece padrões tecnológicos para *adoquins* cerâmicos (artefato utilizado mais comumente em superfícies de pavimentação). O *adoquín* cerâmico surgiu no mercado brasileiro se apresentando como um produto novo para a indústria de cerâmica vermelha com futuro promissor (PINHEIRO, 2012). No Brasil algumas normas técnicas são aplicadas como:

- NBR 7170/1983, Tijolo maciço cerâmico para alvenaria tendo como objetivo, fixar condições no recebimento de tijolos maciços cerâmicos destinados a obras de alvenaria, com ou sem revestimento;
- NBR 6460/1983, Tijolo maciço cerâmico para alvenaria, verificação da resistência à compressão;
- NBR 8041/1983, Tijolo maciço cerâmico para alvenaria, forma e dimensões, e;
- NBR 15270/2005, define os termos e fixa os requisitos dimensionais, físicos e mecânico exigíveis no recebimento de bolos cerâmicos estruturais a serem utilizados em obras de alvenaria estrutural, com ou sem revestimento.

#### 2.1.5. Classificação dos resíduos sólidos

Segundo a norma ABNT 10004:2004, os resíduos sólidos são definidos como qualquer material sólidos e semi-sólido, resultante de atividades industriais, domésticas, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Os resíduos sólidos são divididos em duas classes de acordo com a norma técnica da ABNT NBR 10004/2004:

**a) Classe I – perigosos;** São aqueles resíduos que apresentam periculosidade podendo ter como característica;

- Inflamabilidade
- Corrosividade
- Reatividade
- Toxicidade

- Patogenicidade

São resíduos cujo manuseio inadequado pode causar sérios danos à saúde pública e/ou ao ambiente.

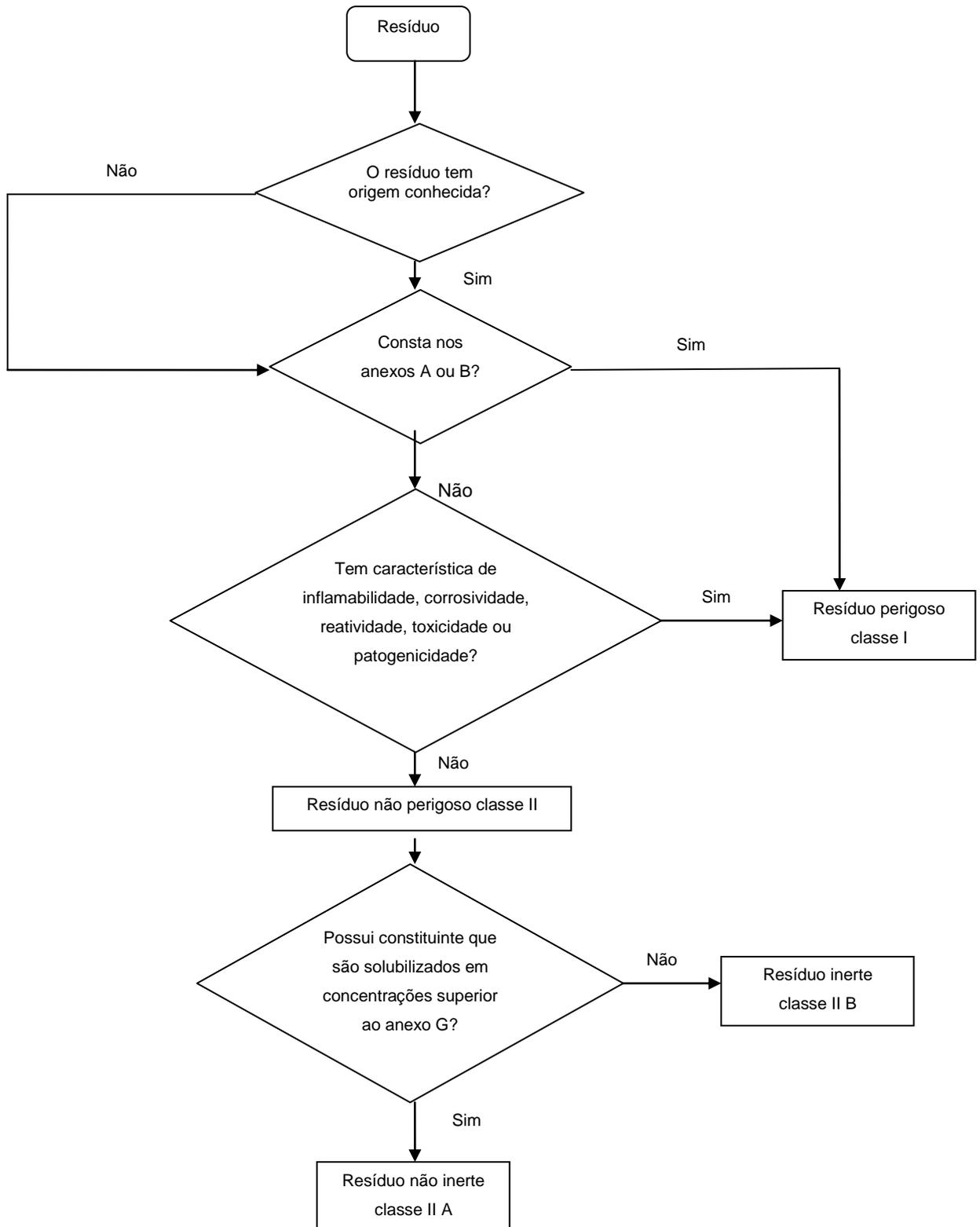
**b) Classe II - não perigoso**

- Classe II A: não inertes – são resíduos que podem conter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Classe II B: inertes - São classificados como resíduos inertes aqueles que não apresentam atividade, não reagem e são insolúveis em água.

Na Figura 1 demonstra a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos são definidos em dois grupos - perigosos e não perigosos (ABNT10004:2004).

Figura 1. Caracterização e classificação de resíduos sólidos, apresentando a metodologia (ABNT/NBR 10004:2004) empregada para a classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: ABNT/NBR 10004, 2004.

## 2.2 CARVÃO MINERAL

### 2.2.1 Produção mundial

O carvão mineral é um combustível fóssil retirado da terra através do processo de mineração. Encontra-se em grandes profundidades ou próximo de superfície. O carvão é proveniente de depósitos de restos de plantas, na qual, essa vegetação se acumulou ao longo dos anos. Possuem quatro estágios na formação do carvão mineral: turfa, linhito, carvão (hulha) e antracito (ABCM, 2017).

Constituiu uma das primeiras fontes de energia utilizada pelo homem. Sua utilização na geração de vapor para mover as máquinas foi um dos pilares da Primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII. No fim do século XIX, o vapor foi aproveitado na produção de energia elétrica. Com o decorrer dos anos perdeu espaço na matriz energética mundial para o petróleo e o gás natural. Voltando a se destacar na década de 70, em consequência da crise do petróleo, e se mantém em alta atualmente (ANEEL, 2008).

Segundo Agência Nacional de energia elétrica, (2008) esse minério compõe a maior disponibilidade do mundo, suas reservas totalizam 847,5 bilhões de toneladas, quantidade suficiente para atender a produção atual por 130 anos, são encontradas em quantidades expressivas em 75 países, sendo que três deles – Estados Unidos (28,6%), Rússia (18,5%) e China (13,5%) – concentram mais de 60% do volume total.

O maior produtor mundial de carvão é a China, devido seu desenvolvimento econômico e por ser o maior consumidor do minério. No ano de 2007, a China produziu 1.289,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) enquanto consumiu 1.311,4 Mtep. Entre os maiores produtores de carvão destaca-se Estados Unidos (587,2 Mtep), Índia (181,0 Mtep) e Austrália, maior exportador do minério do mundo, com 215,4 Mtep (ANEEL, 2008).

No Brasil, o carvão mineral foi descoberto no ano de 1800, no reinado de Dom João VI. Mas foi com a chegada da Primeira e Segunda guerra mundial que ganhou maior destaque e forçou o aparecimento do extrativismo de carvão, auxiliado pelo governo, que decretou várias isenções fiscais e leis especiais, fazendo com que as indústrias consumissem o carvão nacional. No ano de 1916 sua produção no país chegou a 350 mil toneladas por ano. Em 1931 Getúlio Vargas estabeleceu uma taxa

de aquisição obrigatória de 10% posterior a 20% para proteção da produção nacional, assim a produção brasileira em 1937 chegava a 762.789 toneladas, em 1939 conseguindo 1 milhão. Com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) obteve seu recorde de 2.078.250 toneladas (FONSECA, 1980).

As reservas carvoeiras no Brasil são compostas por tipos linhito e sub-betuminoso. As maiores jazidas encontram-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As reservas brasileiras totalizam 7 bilhões de toneladas. O estado do Rio Grande do Sul apresenta maior volume correspondendo por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional (ANEEL, 2008).

No ano de 2014, o carvão mineral apresentou um leve crescimento de 1,4% nas quantidades beneficiadas (energéticos + finos) e de 7,9% nas comercializadas em relação ao ano anterior. A participação por estado na produção (bruta + beneficiada) foi classificada como: Rio Grande do Sul (54,9%), Santa Catarina (43,7%) e Paraná (1,4%). No faturamento total de R\$ 1.209,12 Bilhões, a ordem se altera com Santa Catarina (63,7%), Rio Grande do Sul (33,75%) e Paraná (2,6%) (DNPM, 2015).

### 2.2.2 Carvão em Santa Catarina

No estado de Santa Catarina no século XIX, o carvão foi descoberto por tropeiros que faziam o trajeto entre Lages e Laguna. Dando início a sua exploração próximo à região de Minas, atual Lauro Müller (GOULART FILHO, 2004).

Na cidade de Criciúma, o extrativismo começou em fins da década de 10 e início da década de 20. As primeiras minas abertas foram as da Companhia Brasileira Carbonífera Araranguá e Companhia Próspera, concentrando-se inicialmente em torno do morro Cechinel, onde se encontrava as duas maiores minas (GOULART FILHO, 2004).

Os últimos dados levantados apontam que no estado de Santa Catarina apresenta 10 empresas ativas na extração do carvão mineral (Metropolitana, Criciúma, Comin, Catarinense, Rio Deserto, Cooperminas, Belluno, Gabriella, Siderópolis e Minageo) totalizando 2.031.041 anual de CE-4500 e ROM 6.507.617 anual (SIECESC, 2015).

### 2.2.3 Produção Do Carvão Mineral

O carvão nacional possui baixo poder calorífico e elevado teor de cinzas e enxofre. A quantidade de enxofre proveniente do carvão extraído de jazidas conhecido como ROM (carvão bruto extraído da mina), varia entre 0,5% e 8%. Estes carvões normalmente são laváveis, o que permite a redução dos teores de cinzas e de enxofre (FIEL & NETO, 2008).

A extração de carvão mineral ocorre geralmente em lavras no subsolo ou superfície. Na região de Santa Catarina predomina a extração no subsolo.

O ROM produzido e reduzido via britagem no subsolo, que consiste na necessidade de romper os blocos de carvão, possibilitando a separação entre a matéria carbonosa e a matéria mineral (CARNIATO, 2005), é enviado para superfície por correias transportadoras, onde são estocados em silos cobertos.

O carvão ROM estocados do silo passa por uma peneira vibratória deslamadora, onde a fração menor de 1,2 mm será removida e enviada pelo circuito de beneficiamento de finos compostos por hidrociclones, espirais concentradoras, peneiras desaguadoras e flotação. A fração maior de 1,2 mm será utilizada, no circuito carvão grosso, composto por dois ciclones por meio denso (REDIVO, 2010).

No processo de beneficiamento do carvão mineral, há a separação de duas fases bem distintas, o carvão (menos denso) e o rejeito (mais denso) pela diferença densimétrica, realizada em meio aquoso para promover a estratificação das camadas dispostas. Ocorrendo um maior aproveitamento da matéria-prima carbonosa (FIEL & NETO, 2008).

O beneficiamento consiste em processos que visam a redução da matéria inorgânica, tendo como finalidade melhorar sua qualidade e aumentar sua potencialidade para uso (ABCM, 2017).

O carvão com valor comercial é retirado pelo *over-flow* dos ciclones e retidos em peneiras desaguadoras com aberturas, a fração descartada no *under-flow* é desaguada por peneiras e são descartadas como rejeito grosso (REDIVO, 2010).

Todos os produtos e rejeitos finos são desaguados em peneiras com a finalidade de separar a fração passante juntamente com *over-flow* dos ciclones deslamadores, que posteriormente são enviados para células de flotação para recuperação das partículas, mais finas do carvão (REDIVO, 2010).

Após o circuito de beneficiamento de frações finas são obtidos os carvões para uso energético, carvões metalúrgicos, para uso de coqueria e indústrias de fundição (REDIVO, 2010).

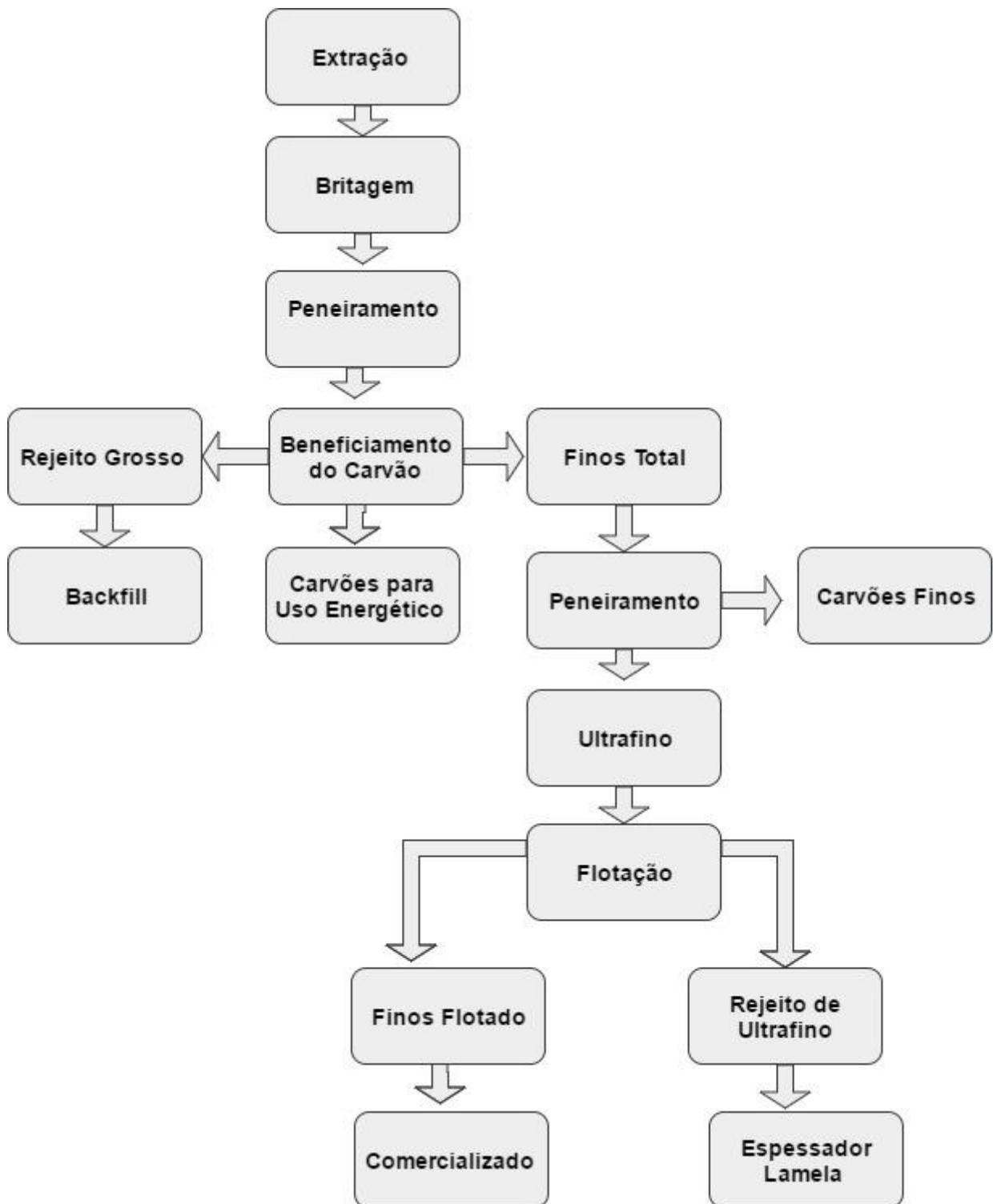
O rejeito proveniente da flotação e os passantes nas telas desaguadoras de rejeitos finos, são enviados para um sistema de espessamento e clarificação composto por um espessador de lamelas, onde sólidos são separados da água e podendo ser reaproveitado novamente no processo. Os *under-flow* do espessador (rejeito/ estéril) serão encaminhados para filtro prensa, sendo que o *under-flow* consiste em resíduos finos, ultrafino, lodos e resíduos do pátio e após seco, ele é misturado ao rejeito grosso (REDIVO, 2010).

Como demonstra a

Figura 2, o processo produtivo do carvão mineral inicia com a extração de lavra, seguindo para fase de britagem e a classificação granulométrica através do peneiramento.

O processo de beneficiamento é realizado por meio denso, onde ocorrem diversos tipos de carvão, classificados pela sua densidade, o que sobra do carvão tanto fino e mais volumoso são encaminhados para depósito, os rejeitos grossos encaminhados para o subsolo da mina, pelo Sistema *Backfill*, na maioria das minas, o depósito de rejeito são mais atuantes.

Figura 2. Fluxograma do processo produtivo das indústrias mineradoras de carvão mineral.



Fonte: adaptado de CARNIATO, 2005, p.15.

De acordo com Nascimento *et al* (2002) após o processo de lavra e beneficiamento os produtos finos conhecidos como CM finos, CE 4500 e CE 5400

são comercializados para fins energéticos especificamente para usinas termoelétricas.

Os rejeitos sem fins comerciais serão enviados para depósitos devidamente licenciados com parâmetros e técnicas necessários. Os efluentes líquidos sobressalentes, que não são reutilizados, são encaminhados para ETE, onde são devidamente tratados e condicionados aos padrões ambientais requeridos por legislação antes do descarte ao meio ambiente (REDIVO, 2010).

#### 2.2.4 Impactos ambientais da atividade de mineração

Toda extração de recursos naturais provoca uma série de impactos ambientais, podendo ser: poluição do ar, água, solo e sonora, sendo na retirada do minério ou mesmo na geração de resíduos (SILVA, 2007). No caso do carvão mineral gera uma grande quantia de CO<sub>2</sub> emitidos na sua utilização (RESTREPO, BAZZO & MIYAKE, 2015).

Um dos principais fatores para definir o grau de impacto ambiental é a definição do método de lavra utilizado na extração, tendo grande influência na dimensão dos impactos ambientais. No método de lavra a céu aberto se obtém um maior aproveitamento do corpo mineral gerando maior volume de estéril, poeira em suspensão, vibrações e riscos de poluição das águas, quando não adotadas medidas de controle ambiental (SILVA, 2007).

Durante o processo de lavra e beneficiamento do carvão mineral, um dos principais impactos ambientais está na disposição de resíduos sólidos estéreis e rejeitos, que são depositados em áreas não apropriadas. Estes estéreis e rejeitos ricos em sulfetos de ferro, oxidam-se na presença do ar, água e da ação de bactérias, desencadeando o processo de acidificação de drenagens e a dissolução de metais, que pode ocorrer em minas abandonadas ou em operação, ocasionando a drenagem ácida de mina. Além dos riscos de contaminação de águas superfícies e subterrâneas e destruição do habitat aquático, sua recuperação se torna de elevado valor, obtendo maior dificuldade no reflorestamento (FUNGARO & CIZIDORO, 2006).

Em consequência das lavras a céu aberto podemos verificar grandes impactos no uso do solo, a expulsão da fauna local, destruição da flora e florestas e perda da atividade agrícola. Na mineração subterrânea os impactos podem causar

subsistência no solo que consiste na queda das camadas, deixadas vazias pela extração, danificando as estruturas do solo e alterando a drenagem natural (MARGULIS, 1985).

Em decorrência da disposição dos resíduos sólidos os estéreis e rejeitos, e da infiltração das bacias de decantação o principal impacto ambiental é a formação da drenagem ácida, ocorrendo a oxidação de minerais principalmente a pirita que acarreta na redução do pH das águas e propicia a dissolução de metais (NASCIMENTO *et al.*, 2002).

Segundo Fungaro & Cizidoro (2006), a utilização de usinas termoeletricas provoca graves problemas ambientais em decorrências da produção de toneladas de cinzas de carvão e sua disposição inadequada, ocasionando contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

No Brasil aproximadamente 60 % do material bruto retirado das minas são considerados resíduos. Estima-se que beneficiados na região sul aproxima-se de 550 milhões de toneladas de carvão ROM, gerando em torno de 300 milhões de toneladas de resíduos sólidos (AMARAL FILHO, 2009).

#### 2.2.5. Resíduos sólidos

Na atividade de mineração existem dois tipos de resíduos sólidos, denominados rejeitos e estéreis. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de lavra no decapeamento da mina, não possui nenhum valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais (IPEA, 2012).

Em algumas carboníferas na região, o beneficiamento de carvão é composto por rejeitos grossos e finos, denominados rejeitos R1 (rejeito piritoso), R2 (rejeito misto) e R3 (rejeito carbonoso), gerando aproximadamente 50 % (KARAS, 2009). Estes rejeitos apresentam material com granulometria mais grosseira de 37 a 25 mm, os finos com 1 mm. Estes rejeitos/estéreis são formados por pirita, folhelhos, argilitos e carvão (SOARES, 2008).

Alguns rejeitos da mineração de carvão mineral, contêm em sua estrutura teores de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e metais pesados, tais como alumínio, ferro, manganês, níquel, cobre e zinco. Elevadas concentrações desses rejeitos podem ser

prejudiciais ao meio ambiente. Devido seu grau de risco, é necessário o isolamento desses resíduos, depositando em aterros controlados ocorrendo a impermeabilização da base e de cobertura (HUMMES, 2007).

#### 2.2.6 Reaproveitamento de resíduos sólidos

A Lei 12.305/2010 estabelece a diferença entre resíduo e rejeito. Os resíduos podem ser reaproveitados sendo processados e transformados em insumos ou novos produtos. Já os rejeitos por sua vez, depois de esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e viáveis, apresentam apenas a possibilidade de disposição final adequada. (BRASIL, 2010).

As possibilidades de redução dos resíduos e o seu reaproveitamento nos diferentes processos produtivos, gera inúmeros benefícios ao meio ambiente, podendo transformar uma fonte de despesa numa fonte de faturamento, reduzindo os custos de deposição (JOHN, 2000).

Segundo Yassine *et al.* (2016) a reutilização de resíduos de carvão é uma alternativa para amenizar os problemas dos resíduos das minas. Devido seu alto teor em alumino silicatos, os resíduos dos minérios de carvão podem ser uma alternativa na utilização como matéria prima para construção civil.

Com a perspectiva de expansão dos parques termoelétricos, o avanço da sustentabilidade no setor carbonífero para garantir a capacidade de sustentar o aumento da produção, se faz necessário à reinserção dos rejeitos de carvão no mercado, através de maximização do seu aproveitamento e da minimização de seu potencial poluidor (AMARAL FILHO, 2009).

Nas usinas termelétricas á uma grande abundância na geração de cinzas volantes, uma maneira eficaz de reduzir este impacto ambiental é utilizando as cinzas na fabricação e incorporação ao cimento, material fertilizante (FUNGARO & CIZIDORO, 2006), na fabricação de tijolos, blocos, aterros e na construção de agregados leves. Alguns estudos demonstram que essas cinzas têm uma plasticidade insuficiente para produzir tijolos fortes o suficiente para sobreviver ao manuseio e secagem, mas com a junção da argila e aglutinante apresentam resultados satisfatórios. Pois com o auxílio das partículas mais finas de cinzas

voláteis, enchem os poros para reduzir a proporção de vazios e aumentar a resistência dos tijolos (MANN, 2016).

Com o reaproveitamento dos rejeitos em fabricação de outros produtos, podemos ter uma redução dos teores de enxofres e metais nos depósitos, diminuindo a DAM, redução dos níveis de poluentes lixiviados. Gerando assim um aumento no índice de sustentabilidade no setor carbonífero, reduzindo a extração dos recursos naturais, maior movimentação na economia e abrindo novos mercados (AMARAL FILHO, 2009).

A necessidade da criação de novos produtos visando propriedades funcionais vem ganhando atenção, em especial direcionado à aplicação de matérias de baixo custo. Pesquisas recentes afirmam a importância da reciclagem na proteção ambiental e no desenvolvimento tecnológico, considerando a utilização de poluentes como matérias-primas importantes para aplicações com maior valor agregado visando a sua transformação em bens úteis para a sociedade e a proteção do meio ambiente. A utilização dos resíduos pelas indústrias cerâmicas pode ser viabilizada pela substituição de uma ou mais matérias-primas da composição original por resíduo, mantendo-se o processo de produção igual ao convencionalmente utilizado, fazendo com que as propriedades do produto sejam reproduzidas (SCARINCI, 2000 *apud* CASAGRANDE, 2008).

### 2.3 CERÂMICA VERMELHA

A cerâmica vermelha é o segmento que produz tijolos furados, tijolos maciços, tabelas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. É uma atividade de base ao possibilitar a construção civil, em geral, desde a mais simples à mais sofisticada. Distribui-se por todo país, muito pulverizada, em micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar (BUSTAMANTE & BRESSIANI, 2000).

A produção anual mundial de tijolos é em torno de 1391 bilhões de unidades e a procura deve ser continuamente crescente, aumentando a demanda de material argiloso. Países como Índia e China, encabeçam a lista dos maiores produtores mundiais de cerâmica vermelha no mundo. Com uma produção anual estimada em 700 bilhões de tijolos, a China lidera a produção global, com um alto investimento em tecnologias para desenvolvimento do setor. O avanço da

construção civil na Índia registra um crescimento de 9 % ao ano, e a produção de tijolos chega à marca de 250 bilhões ao ano, sendo a espinha dorsal do setor, dando importantes números à economia indiana (KAMYOTRA, 2015; KUMBHAR *et al.* 2014; RAJGOR, HAKWANA & PITRODA, 2013; SCHMIDT, 2013; ZHANG, 2013)

Segundo SEBRAE (2015) o setor no país é composto por 9071 pequenas empresas, com uma produção de 1,3 bilhões de telhas/mês e 4 bilhões de blocos/mês, gerando uma estimativa de 2 milhões de empregos, direta e indiretamente. Isso representa 4,8 % da indústria da construção civil. A arrecadação da cerâmica vermelha no país chega a R\$ 18 bilhões, representando cerca de 1% do Valor Bruto da Produção Industrial (VBPI).

Um estudo apresentado pela FEAM (2013) aponta que o setor cerâmico destaca-se importante no ponto de vista ambiental com a incorporação de resíduos à massa cerâmica visando o reaproveitamento de resíduos sólidos de outras indústrias, trazendo benefícios no setor com redução do custo e da quantidade de matéria-prima utilizada, redução do consumo de combustível, além de evitar que estes resíduos tenham destinação ambientalmente incorreta.

No meio científico, estudos que trazem essa temática estão se tornando cada vez mais comum, o que aponta possibilidades a determinadas indústrias de destinarem seus resíduos, ora descartados em aterros industriais. Resíduos como: vidro (LORYUENYONG *et al.*, 2009), areia de fundição (FRASSON, PELLEGRIN & MANTAS, 2012), bagaço de cana-de-açúcar (KAZMI, 2016), cinzas volantes (ÇIÇEK, *et al.*, 2015), cinzas de casca de arroz (QUINTANA & SOARES, 2000), lama galvânica (BALATON, GONÇALVES & FERRER, 2002) drenagem ácida de mina – DAM (GALATTO *et al.*, 2009) e até mesmo quebras próprias oriundas do processo produtivo vem sendo estudado para a aplicação na massa (ZACCARON *et al.*, 2014).

### 2.3.1 Adoquín Cerâmico

O *adoquín* cerâmico (Figura 3) é um artefato utilizado mais comumente em superfícies de pavimentação. São fabricados a partir da junção de argila e outros materiais argilosos, a massa após homogeneização passa pelo processo de moldagem que consiste normalmente por uma forma retangular. São modelados, secados colocados no forno com uma temperatura suficiente para obter um produto cerâmico duradero. (IPC, 2017).

Figura 3. Apresenta um modelo de um *adoquín* cerâmico.



Fonte: Piera, 2017, p.1.

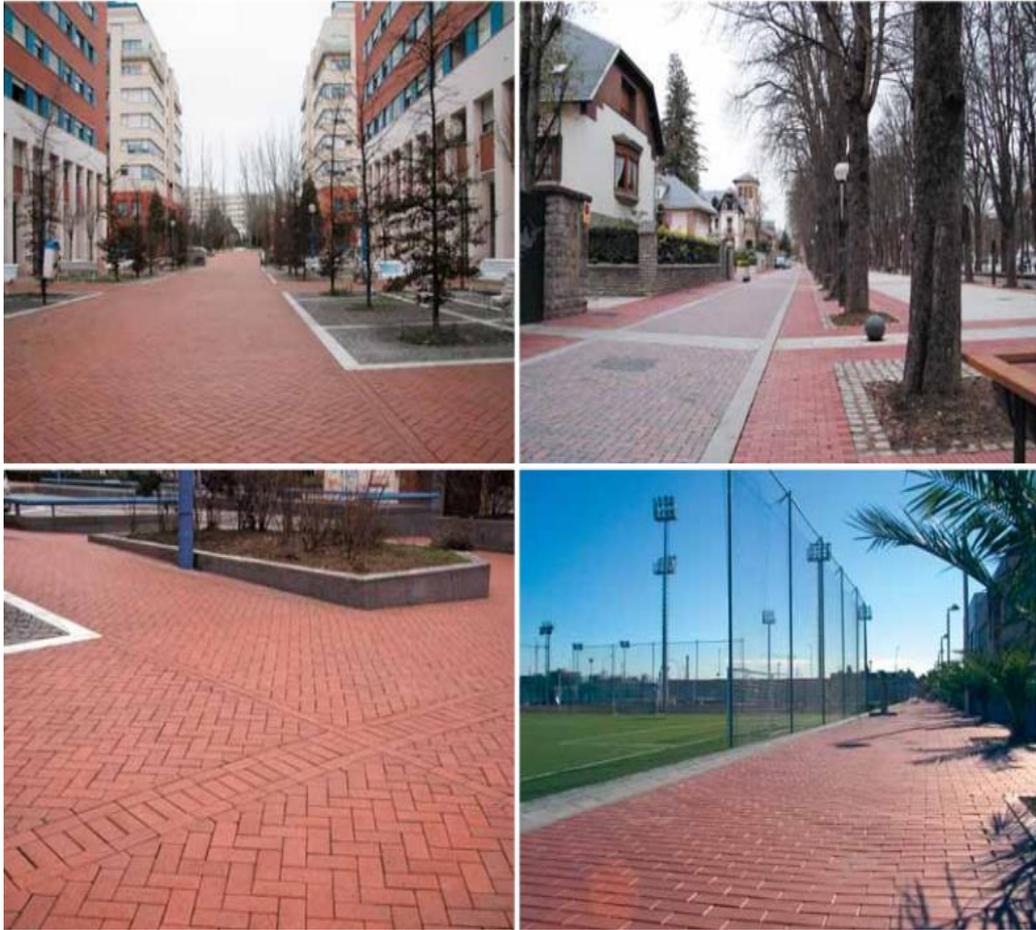
Segundo Dias *et al.* (2016), os *adoquín* são processados com o uso de diferentes tipos de argila, tendo como vantagem a não utilização de corantes, pois apresentam um *designer* rústico, uma coloração natural. Podendo variar da paleta vermelha a cinza, dependendo o tipo de argila utilizada na composição da massa.

As vantagens da utilização de *adoquín* cerâmico na pavimentação consistem na durabilidade, alta resistência mecânica, beleza natural, cor constante e qualidades físicas que permitem obter resistência em temperaturas muito extremas (SAEZ, 2005).

Ao contrário de outros produtos cerâmicos disponíveis, permanece inalterado ao longo dos anos (SAEZ, 2005).

Segundo Conorsa (2017), os *adoquíns* cerâmico podem ser utilizados em pavimentação de estradas para todos os tipos de tráfego, calçadas, zonas de pedestres, pátios e jardins. Como o concreto é antiderrapante é ideal para condições meteorológicas adversas recomendando para áreas de pavimentação e de lazer dos pedestres (Figura 4).

Figura 4. Exemplos de aplicação de pavimentos cerâmicos extrudados.



Fonte: Malpesa, 2010, p. 8.

Atualmente no Brasil não existe uma legislação vigente para a fabricação dos *adoquín* cerâmico. Em outros países como a Espanha, Colômbia e os Estados Unidos, a produção do *adoquín* cerâmico é mais concretizada que no Brasil.

Nesses países existem normas como a UNE-EN (Espanha), NTC (Colômbia) e ASTM (Estados Unidos) que visam determinar as especificações tecnológicas para a produção desse tipo de produto (CANDIDO, 2012).

A Tabela 1 apresenta as características técnicas de acordo com norma da UNE-EN-1344/2002 para a produção do *adoquín* cerâmico na Espanha.

Tabela 1. Características técnica de acordo com a norma UNE-NE 1344/2002, para produção de *adoquín* extrudado e prensado.

<b>Propriedades</b>	<b>Adoquín cerâmico extrudado</b>	<b>Adoquín cerâmico prensado</b>
Resistência ao gelo/degelo	Resistente	Resistente
Carga de ruptura transversal	Valor médio $\geq 80$ N/mm	Valor médio $\geq 30$ N/mm
Resistência à abrasão	Valor médio $\leq 450$ mm <sup>3</sup>	Valor médio $\leq 450$ mm <sup>3</sup>
Resistência ao deslizamento	$\geq 45$	$\geq 45$
Resistência aos ácidos (perda de massa média de 5)	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$
Tolerância dimensional por dimensão.	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm

Fonte: Candido, 2012, p. 17.

Malpesa (2010) ressalta as vantagens da utilização dos *adoquíns* cerâmicos, como uma vida útil superior a 30 anos e sua escala de cores fica inalterada ao longo dos anos tendo uma aparência de juventude permanente.

Após a colocação das peças são possíveis o levantamento das peças e sua reutilização, quantas vezes forem necessárias, não ocorrendo nenhum dano nas peças. Obtém baixa manutenção e mão de obra de baixo custo (MALPESA, 2010).

## 2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento de misturas permite escolhas de modelos matemáticos significativamente eficazes para previsão das propriedades mecânicas a partir do conhecimento prévio das propriedades de cada componente original, bem como das composições em determinadas proporções fundamentais, fazendo apenas alguns experimentos. Essa metodologia otimiza custos no desenvolvimento de novos materiais, tendo em vista a quantia de matérias-primas destinadas à cerâmica. Portanto, é possível através do uso de metodologia de superfícies de resposta delimitar a gama de composições que permite produzir um corpo cerâmico com

características pretendidas, sujeito a restrições impostas pelo processo fabril (MEDEIROS, 2010).

O propósito geral de experimento com composições é tornar possível, por meio de superfícies de resposta, a estimativa das propriedades de um sistema multicomponente, a partir de um número limitado de observações. Essas observações são obtidas de combinações pré-selecionadas dos componentes na tentativa de se determinar quais delas, de alguma maneira, otimizam a resposta (BARROS NETO, SCARMINIO & BRUNS, 2001).

Em um planejamento de misturas, Medeiros (2010) e Barbosa (2006) explanam que as propriedades de uma composição são determinadas pelas proporções de seus componentes, onde a soma de todas elas deve totalizar 100 %, através da equação 1:

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (\text{Equação 1})$$

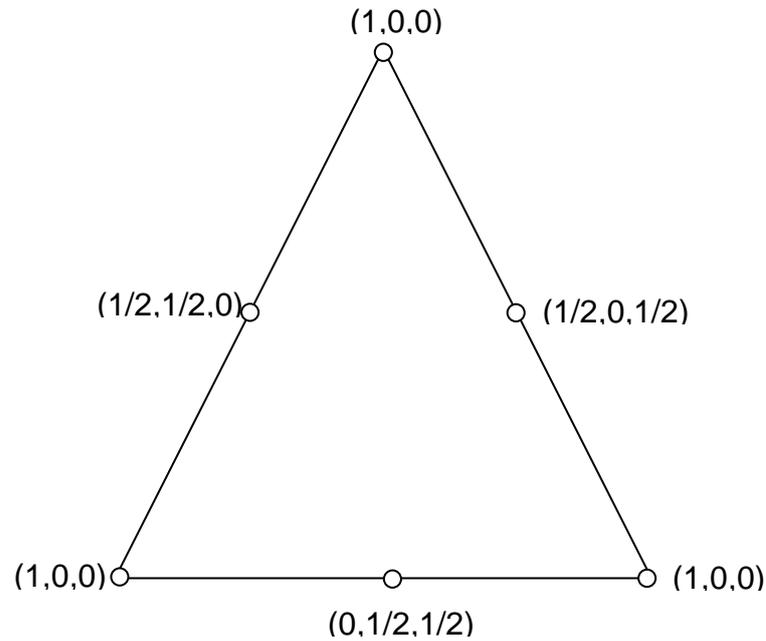
Sendo  $x_i$  a proporção do  $i$ -ésimo componente numa escala em que 100 % corresponde a 1 (um), sendo variáveis dependentes, ou seja, a alteração da proporção de um dos componentes da formulação causará mudança na proporção de pelo menos um dos demais componentes.

A existência dessa restrição torna o espaço disponível para experimentação mais restrito. No caso de planejamento de misturas de três componentes, a equação 1, torna-se a equação 2:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1 \quad (\text{Equação 2})$$

A equação 2 pode ser transferida geometricamente a um triângulo equilátero conforme observado na Figura 5.

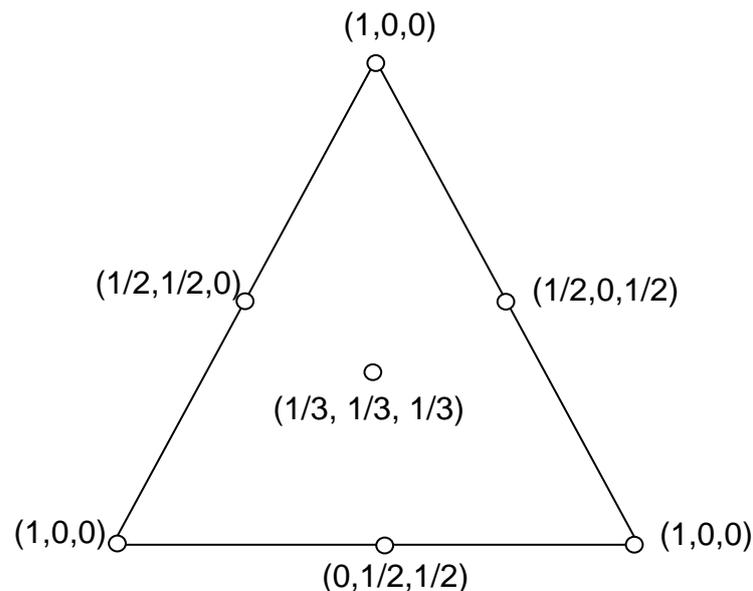
Figura 5. Representação de um arranjo simplex.



Fonte: Adaptado de Cornell, 1990 *apud*. Medeiros 2010, p. 56.

O ponto central ( Figura 6) representa uma mistura de todas as composições iguais juntos, os meios dos lados uma mistura de duas composições cada uma com 50%, os pontos de interseção apresentam 1/3 das composições (MEDEIROS, 2010).

Figura 6. Representação de um arranjo simplex com ponto central.

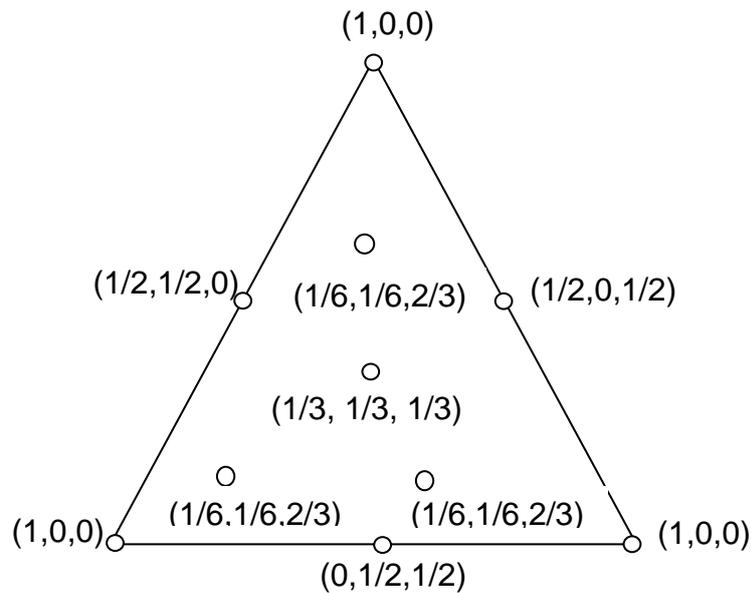


Fonte: Adaptado de Cornell, 1990 *apud*. Medeiros 2010, p. 56.

As composições são formuladas através do planejamento experimental utilizando o delineamento de misturas. Para realizar o desenvolvimento das

composições é efetuado um delineamento *simplex* simples, aumentado com ponto central (Figura 6) e utilizando-se restrições no teor de matérias-primas. São estabelecidos limites de 50 e 100 % de argila, respectivamente, e limites de 0 e 50 % de resíduos (MEDEIROS, 2010). Na Figura 7, representa um arranjo simplex com a representação dos dez pontos.

Figura 7. Representação de um arranjo simplex com todos os pontos.



Fonte: Adaptado de Cornell, 1990 apud. Medeiros 2010, p. 56

### 3 METODOLOGIA

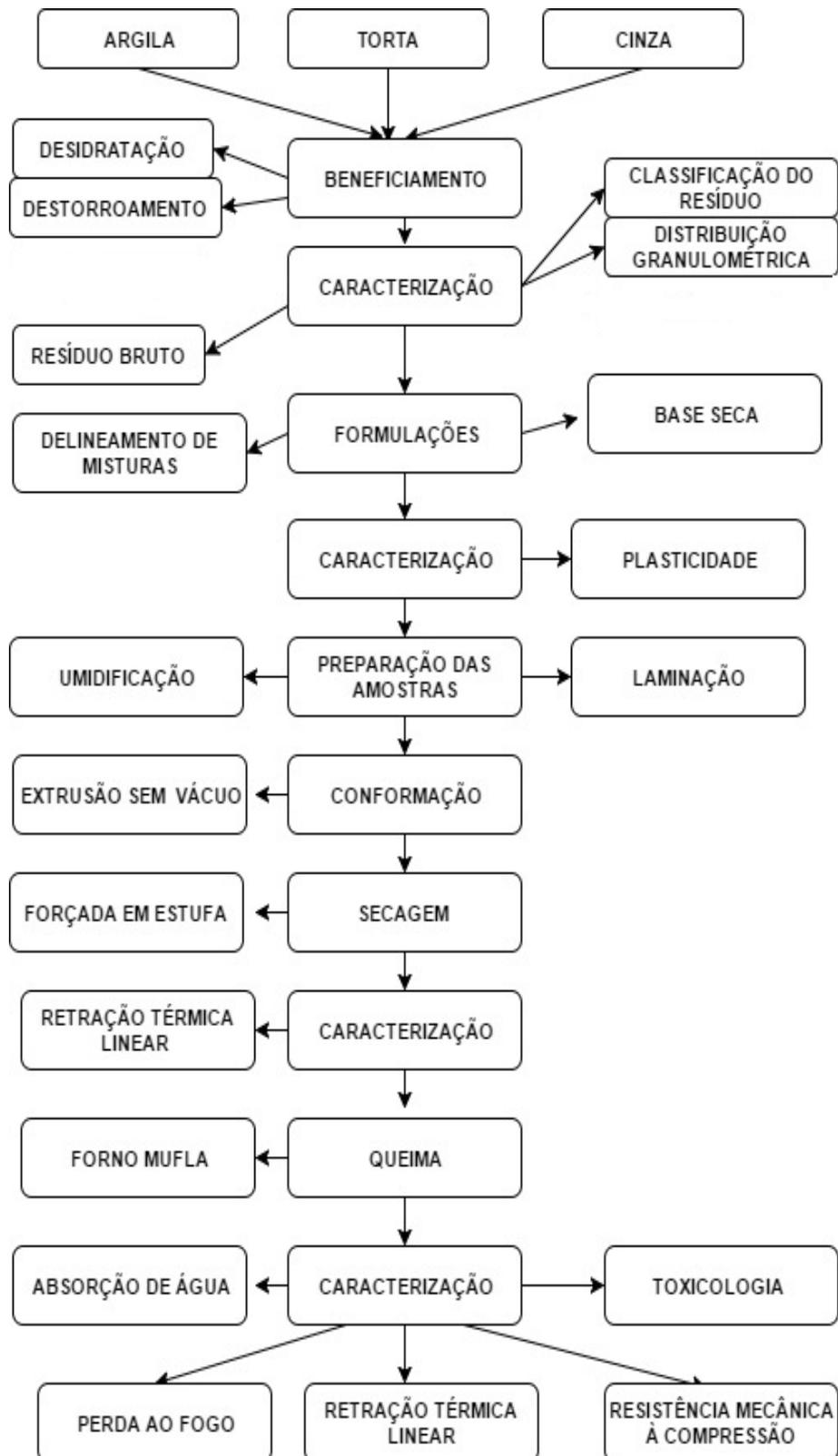
Primeiramente realizou-se o estudo de caso em uma empresa carbonífera para desenvolver um projeto de reaproveitamento de dois resíduos sólido gerado pelo processo de beneficiamento de carvão e a queima do carvão mineral proveniente de termoelétrica. Nesse estudo utilizou-se o rejeito da torta derivado do filtro prensa, cinzas pesadas de carvão, incorporados a massa de cerâmica vermelha, para produção de *adoquín* cerâmico.

O projeto consiste em duas etapas, a primeira trata-se da caracterização da massa cerâmica (composta por uma blenda de argilas) bem como dos rejeitos utilizados (torta proveniente do processo de beneficiamento e cinza da queima do carvão mineral), nos quais foram classificados conforme a ABNT/NBR 10004/2004, e a segunda etapa, vem a ser o desenvolvimento de formulações com diferente percentuais destes resíduos à massa cerâmica através de delineamento de mistura, e posteriormente analisando tecnicamente a qualidade dos corpos-de-prova.

A caracterização das matérias-primas utilizadas no estudo, bem como a classificação dos resíduos foi realizada no Laboratório Divisão – Empresas Rio Deserto e no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer. O desenvolvimento dos corpos-de-prova e a caracterização físico-mecânica das amostras estudadas foram realizados no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer, Laboratório de Materiais Cerâmicos Cocal – LaMaCC, Laboratório de Ensaio Mecânico, do Instituto de Engenharia e Tecnologia - IDT, Parque Tecnológico e Científico – I.Parque. O ensaio de distribuição granulométrica realizada no Laboratório do Carvão- Empresas Rio Deserto e os ensaios de eflorescência e fitotoxicológicos no Laboratório Labrepi Parque Tecnológico e Científico – I.Parque.

O fluxograma da Figura 7, apresenta esquematicamente as atividades desenvolvidas no estudo.

Figura 7. Fluxograma das atividades desenvolvidas.



Fonte: Da autora, 2017.

### 3.1 COLETA DE AMOSTRAS

#### a) Argila

Para realização dos estudos, foi utilizada a massa padrão de uma Indústria de Cerâmica Vermelha, localizada no município de Morro da Fumaça, SC.

A massa padrão (Figura 8), composta de uma blenda de argilas, foi coletada diretamente do *box* de armazenamento pós-mistura. Primeiramente, foram coletados aproximadamente 100 kg de massa e através do processo de quarteamento, homogeneizadas e reduzidas para um volume de 30 kg de argila.

Posterior a isso, a massa foi encaminhada ao Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer, localizado em Morro da Fumaça, SC, onde passou pelo processo de beneficiamento, por desintegração mecânica com o auxílio do laminador (laboratorial, marca Bertan).

Figura 8. Apresenta uma amostra de massa padrão que consiste numa blenda de argilas.



Fonte: Da autora, 2017.

#### b) Torta de Rejeito

A amostra denominada torta de rejeito (Figura 9), proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão, que consiste em resíduos finos,

ultrafino, lodos e resíduos do pátio. Segundo dados internos da carbonífera, são gerados aproximadamente 9.400,00 toneladas/mês para uma unidade de produção.

O resíduo foi coletado pela própria carbonífera, acondicionado e encaminhado ao Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer, posterior ao processo de filtragem. Ao todo, aproximadamente 60 kg foram recolhidos.

Figura 9. Apresenta uma amostra do resíduo denominado torta de rejeito.



Fonte: Da autora, 2017.

### c) Cinza

As cinzas pesadas utilizadas no estudo ( Figura 10) são provenientes de uma usina termoelétrica. As cinzas são oriundas das fornalhas do processo de combustão do carvão mineral, para produção energética. O processo de geração de tal resíduo inicia-se com o transporte do carvão mineral estocado no pátio para uma plataforma, onde encontra-se o equipamento chamado dosador que é responsável por dosar quantidades exatas de carvão dependendo da necessidade de geração de calor.

Após esse processo, o carvão é encaminhado para um moinho, onde apresenta uma granulometria inferior a 200 mesh. Após realizar o processo de moagem o carvão é secado a uma temperatura média de 90 °C para então ser pulverizado na câmara de queima. No processo de queima a cinza mais pesada desce para uma calha com água de onde ela sai do processo e é transportada hidraulicamente para as bacias de decantação. A cinza leve, suspensa no ar, é

sugada e passa por placas eletrostáticas tendo grande parte do material retido e transportado para silos (KARAS, 2009).

As cinzas leves são encaminhadas para indústrias cimenteiras, enquanto as cinzas pesadas são encaminhadas as bacias de sedimentação ou utilizadas na recuperação de áreas degradadas. Estima-se que na termoelétrica que o material foi recolhido, geram-se aproximadamente 200.000,00 toneladas/mês de cinza pesada.

O resíduo foi recolhido na termoelétrica, por responsáveis acondicionadas em sacos, onde posteriormente foram encaminhadas ao Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer. Foram encaminhadas entorno de 30 kg de cinza.

Figura 10. Apresenta uma amostra de cinza proveniente da queima do carvão.



Fonte: Da autora, 2017.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

### 3.2.1 Umidade *In Natura*

A quantidade de umidade presente nas amostras é a quantidade de água presente nos materiais após o processo de beneficiamento (no caso da argila) e de retirada do processo (no caso dos resíduos). A umidade se calcula através da pesagem das massas secas e pesagem das massas cruas por meio da equação 3.

Para obter os valores de umidade *in natura*, foram pesadas 100 g (balança Marte, AC 10K, precisão de 0,1 g) de cada matéria-prima, e colocadas em

estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo nº 2211, tipo 8) a  $50 \pm 10$  °C por 24 h, utilizou-se a equação 3, para obter os valores.

$$U(\%) = \frac{(m_u - m_s) \times 100}{m_u} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

$U(\%)$ : percentual de umidade das amostras (%);

$m_u$ : massa úmida (g);

$m_s$ : massa seca (g).

### 3.2.2 Resíduo Bruto

É classificado como resíduo bruto, toda a porção de material que não pode ser desagregado sem o auxílio de alguma ferramenta ou método de cominuição. Para realização dos testes foram desidratadas em estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo nº 2211, tipo 8) a  $50 \pm 10$  °C por 24 h da amostra padrão. Após a secagem foram pesadas 100g da amostra e diluídas em água até a formação de solução aquosa, deixando em repouso por 24 h para a desagregação dos grãos.

Logo após a amostra foi passada em peneira 325 mesh (abertura de 44  $\mu$ m) utilizando água para eliminar os argilominerais passantes, deixando apenas os resíduos. Com a retirada de toda a matéria, o resíduo bruto foi colocado em estufa  $50 \pm 10$  °C por 24 h, após seco foi realizado a pesagem. Para obter o cálculo de resíduo bruto foi utilizado a equação 4.

$$R_b(\%) = \frac{m_r}{m_{am}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$R_b(\%)$ : resíduo bruto (%);

$m_r$ : massa retida na peneira (g);

$m_{am}$ : massa da amostra inicial.

Esse ensaio foi realizado apenas com a massa padrão (STD), com intuito de se obter o percentual de não argilominerais constituintes. Posterior a isso, o resíduo bruto passou por processo de distribuição granulométrica por agitador

eletromagnético (Bertel), para a análise da distribuição dos grãos. O ensaio de RB (%) foi realizado no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer, já a distribuição granulométrica foi realizada no Laboratório do carvão- Empresas Rio Deserto.

### 3.2.3 Distribuição do tamanho de partículas

Os ensaios de distribuição de partículas têm a finalidade de efetuar ensaios de separação de materiais sucessíveis a serem classificados pelo tamanho do seu grão. O ensaio consiste com o fichamento do tamanho da amostra em peso e definição do tempo que serão utilizados, tempo de peneiramento está relacionado com o tamanho do grão acima de 50 mesh 10 minutos para grãos abaixo de 20 a 30 minutos. Após são posta num agitador eletromagnético (Bertel), disposta de maior granulometria para menor, com duração de 15 minutos, utilizando as peneiras de 18, 35, 60, 70, 100, 200 e 325 mesh.

Esse ensaio foi realizado com as matérias-primas usadas no estudo para obtenção do tamanho médio de partículas dos materiais. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Carvão- Empresas Rio Deserto, seguindo normas internas LAB 512 (Determinação do ensaio granulométrico ) seguindo padrões NBR 8629.

### 3.2.4 Classificação dos resíduos

Classificar os resíduos envolve uma série de fatores como os aspectos físicos- químico e biológico. Com os parâmetros e a identificação dos seus constituintes e características de substâncias presentes podemos determinar qual o correto gerenciamento dos resíduos na coleta, transporte e destinação final, conseqüentemente evitando impactos ambientais e a saúde pública.

Para a análise de caracterização e classificação do resíduo foi realizada seguindo as normas NBR 10004:2004, NBR 10005:2004, NBR 10006:2004 e NBR 10007:2004.

### 3.2.5 Caracterização química

Para realização das análises químicas, foi utilizado o equipamento de absorção atômica (marca Pelkin Elmer), realizado no laboratório de Divisão - Empresas Rio Deserto. Na preparação das amostras, foi utilizado a ABNT/NBR

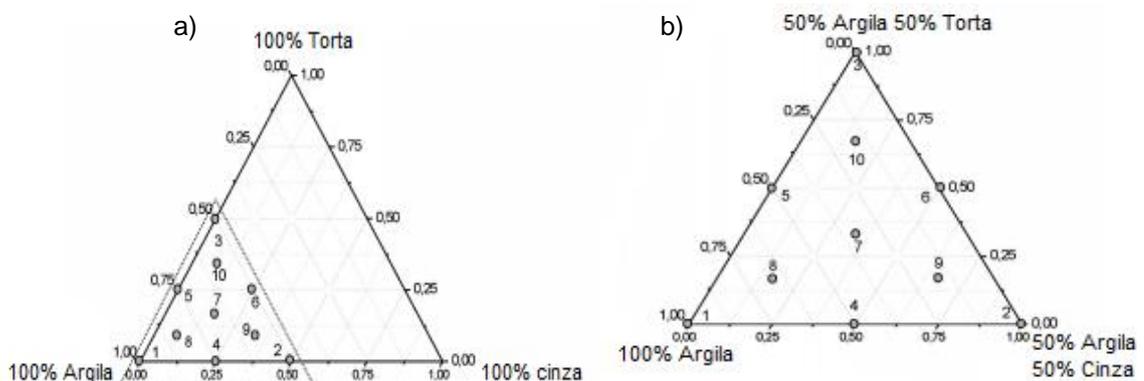
13809/1997 referente a tratamento preliminar de amostras para determinação de metais. Este ensaio laboratorial visa determinar os percentuais dos seguintes óxidos: dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de manganês ( $\text{MnO}$ ) e perda ao fogo.

### 3.3 METODOS

#### 3.3.1 Formulação das composições

As formulações foram desenvolvidas através de planejamento experimental por delineamento de misturas simplex centroide, onde foram formatadas 10 formulações distintas, que contempla as extremidades e o centro do diagrama, apresentado na Figura 11.

Figura 11. Diagrama de misturas (a) com as extremidades de 100 % de cada uma das matérias-primas usadas, e (b) com a extremidade de 100 % de argila e 50 % de argila + 50 % dos resíduos usados.



Fonte: adaptado Medeiros, 2010, p. 71.

As formulações desenvolvidas no estudo, com diferentes teores das matérias-primas, estão apresentadas na Tabela 2, e foi utilizado o software estatística.

Tabela 2. Formulações pelo delineamento de misturas.

Formulações	Matérias – primas (%)		
	Argila	Cinza	Torta
1	100	0	0
2	50	50	0
3	50	0	50
4	75	25	0
5	75	0	25
6	50	25	25
7	66,68	16,66	16,66
8	83,34	8,33	8,33
9	58,34	33,33	8,33
10	58,34	8,33	33,33

Fonte: Da autora, 2017.

### 3.3.2 Plasticidade

Com o conhecimento do percentual e índice de plasticidade de uma massa ou matéria-prima, podemos estimar a adequação da massa cerâmica com relação à conformação de peças. Podendo determinar a composição apropriada para confecção de materiais cerâmicos por prensagem ou por extrusão (CORREIA, *et. al.*, 2002 *apud* CARGNIN 2012).

O método de *Pfefferkorn* é a técnica, mas utilizada para avaliar a plasticidade de uma argila ou massa, medindo o grau de compressão exercido num um corpo-de-prova cilíndrico. O coeficiente de plasticidade determinado por *Pfefferkorn* corresponde à porcentagem de água presente, para a qual o corpo-de-prova apresenta uma deformação de 30 %, em relação à sua dimensão inicial (RIBEIRO, 2003). O equipamento utilizado para este método é o plasticímetro e está, apresentado pela Figura 12.

Figura 12. Equipamento utilizado no método de determinação do índice de plasticidade de *Pfefferkorn*.



Fonte: Da autora, 2017.

O teste foi realizado no Laboratório Técnico de Cerâmica Vermelha – Labcer, com auxílio de um plasticímetro (Natreb). Esse método constitui em preparar 400g para cada amostra com diferentes percentuais de umidade. Para esse estudo foram avaliadas as formulações 1, 2 e 3 (Tabela 2) sendo que a umidade avaliada para a realização do ensaio variou de 12 a 26 %. A deformação plástica foi obtida através da Equação 5.

$$\varepsilon (\%) = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100$$

(Equação 5)

Sendo:

$\varepsilon (\%)$  = deformação plástica;

$h_0$  = altura inicial;

$h_f$  = altura final.

Com a descoberta da umidade ideal de cada uma das amostras avaliadas através de índice de deformação, aplicaram-se valores da equação da média ponderada (Equação 6), onde pode-se descobrir a quantia exata de água que se deve adicionar para cada um das demais formulações.

$$U_{ideal}(\%) = \frac{(m_A \times U_A\%) + (m_B \times U_B\%) + (m_C \times U_C\%)}{m_t}$$

(Equação 6)

Sendo:

$U_{ideal}(\%)$ : teor de umidade ideal (%);

$U_A\%$ : umidade ideal de plasticidade da formulação 1 (STD) (%);

$U_B$ : umidade ideal de plasticidade da formulação 2 (STD+cinza) (%);

$U_C\%$ : umidade ideal de plasticidade da formulação 3 (STD+torta) (%);

$m_A$ : massa seca da formulação 1 (STD) (g);

$m_B$ : massa seca da formulação 2 (STD+cinza) (g);

$m_C m_B$ : massa seca da formulação 3 (STD+torta) (g).

### 3.3.3 Preparação das amostras

As amostras de massa padrão (STD), torta do filtro prensa e cinza proveniente da queima do carvão mineral, seguiram o mesmo procedimento preparatório, ambas foram desidratadas em estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo nº 2211, tipo 8) a  $50 \pm 10$  °C e laminadas (laminador laboratorial Bertan) a fim de homogeneizar partículas mais grosseiras.

Após realizou-se a pesagem e dosagem (balança Marte, AC 10K, precisão de 0,1 g) das 10 formulações (Tabela 2) com posterior umidificação para conformação dos corpos-de-prova. A umidificação teórica se faz necessário para encontrar a plasticidade ideal da formulação. As massas formuladas sofreram um descanso de 24 h para homogeneização da umidade.

As conformações dos corpos-de-prova foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos Cocal – LaMaCC, em Cocal do Sul, SC, onde as formulações foram passadas por um misturador de laboratório, conforme Figura 13.

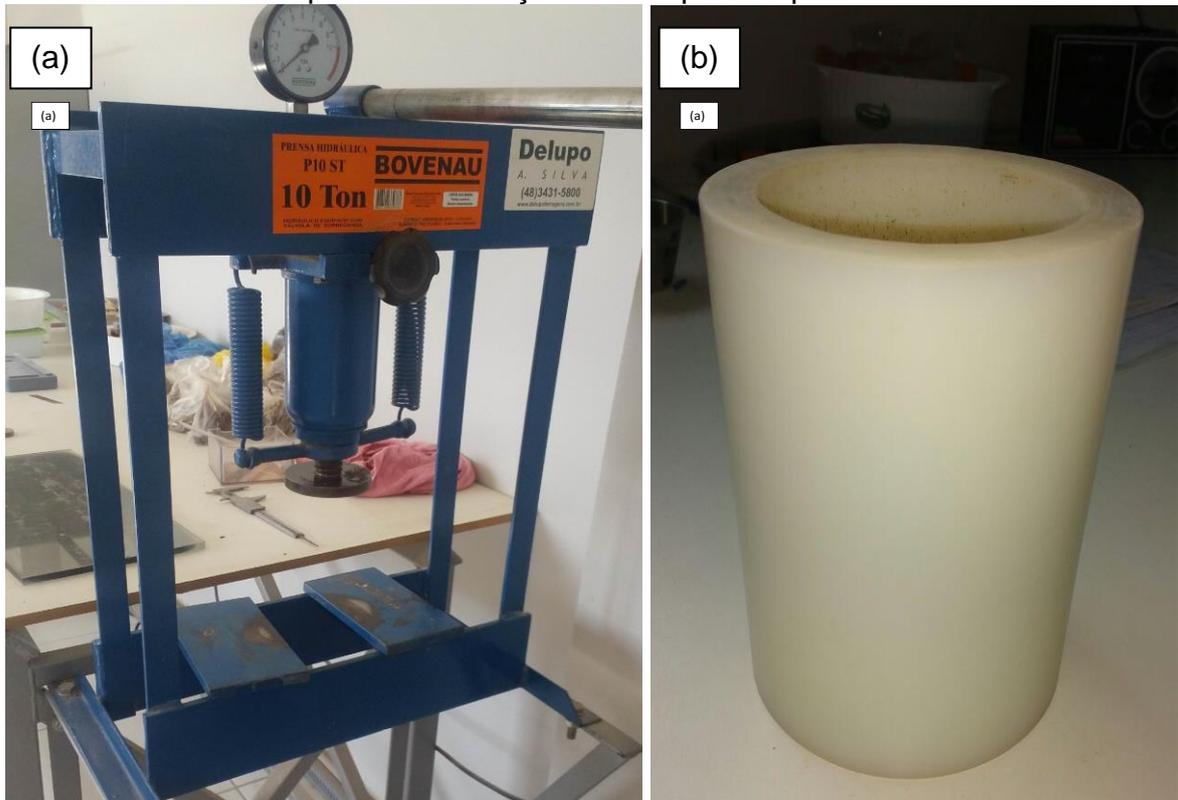
Figura 13. Misturador utilizado no processo de conformação dos corpos- de- prova.



Fonte: Da autora, 2017.

Os corpos-de-prova foram conformados no Laboratório de Materiais Cerâmicos - LaMaCC, pelo processo de extrusão sem vácuo por êmbolo: funil com redução de 250mm para 27mm com ângulo de 45° pressão registrada por manômetro com auxílio de uma prensa hidráulica (Figura 14) conforme estudo de Crozetta *et. al* (2016), no qual foram produzidos 12 corpos-de-prova (27 × 45 mm) para cada formulação. Todas as peças foram pesadas (balança Marte AD 5002 pesagem Máxima 5000 g e precisão 0,01 g) e medidas com Paquímetro (Digmess digital com precisão de 0,01 mm) para obter a massa e tamanho úmido.

Figura 14. (a) prensa hidráulica utilizada no processo de extrusão sem vácuo, e (b) funil de tecnil utilizado para conformação dos corpos-de-prova.



Fonte: Da autora, 2017.

Os corpos-de-prova da formulação 2, por possuir uma maior granulometria devido à alta concentração de cinza na amostragem, não se adaptou ao processo de conformação adotada, tendo que ser confeccionadas manualmente, com o auxílio de um molde de PVC com dimensões aproximadas do método de extrusão.

### 3.3.4 Tratamento térmico

Na etapa seguinte, as amostras passaram pelo tratamento térmico, por secagem (marca DeLeo nº 2211), a uma temperatura de  $80 \pm 5$  °C em um período de 24 h e posteriormente queimados em forno mufla (Jung, modelo J200), com taxa de 2 °C/min, temperatura de queima de 900 °C e tempo de patamar de 120 min. Tais condições foram adotadas conforme estudo de Zaccaron *et. al* (2014).

Após a queima, os corpos-de-prova passaram por testes para avaliar a qualidade técnica, sendo elas apresentadas nos subcapítulos a seguir.

### 3.3.5 Retração térmica linear de secagem

Determinou-se retração linear de secagem como sendo a variação dimensional que o corpo-de-prova sofre devido à saída de água durante o processo de secagem. O ensaio consiste em medir as unidades de comprimento com a peça verde e após com ela seca, com auxílio de um paquímetro digital (Digimess digital com precisão de 0,01 mm).

As unidades de comprimento foram padronizadas em 35 mm com exceção da formulação 2 (adotou-se a medida do molde, de 55 mm), todas medidas com um paquímetro digital, após a secagem mediu-se a retração ocorrida nos pontos marcados, e a Formulação 2 o tamanho final da peça. Os valores de retração de secagem foram obtidos através da Equação 7.

$$RLS = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

$RLS$  = retração linear de queima (%);

$L_i$  = Comprimento inicial da peça crua (mm);

$L_f$  = comprimento final pós-secagem (mm).

### 3.3.6 Retração térmica linear de queima

Determina-se retração linear de queima como sendo a variação dimensional que o corpo-de-prova sofre devido à saída de gases de decomposição e densificação do material. O ensaio consiste em medir as unidades de comprimento da peça seca e após ela queimada, com auxílio de um paquímetro digital. Os valores de retração de queima foram obtidos pela equação 8.

$$RLQ = \frac{L_s - L_q}{L_s} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

$RLQ$  = retração linear de queima (%);

$L_s$  = comprimento inicial das peças secas (mm);

$L_q$  = comprimento final pós queima (mm).

### 3.3.7 Perda ao fogo

A perda ao fogo corresponde à quantidade de material que volatilizou em virtude das decomposições que ocorreram durante as etapas de aquecimento e queima no forno. O ensaio constitui em pesar os corpos-de-prova secos e depois de queimados. Após a queima, são resfriados em temperatura ambiente. Os valores de perda ao fogo foram utilizados a Equação 9.

$$PF(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo:

$PF(\%)$  = perda ao fogo;

$P_i$  = peso inicial (g);

$P_f$  = peso final (g).

### 3.3.8 Ensaio de resistência mecânica à compressão

Para realização do ensaio de resistência mecânica, foram separados cinco corpos-de-prova. O ensaio consiste em colocar as amostras em uma máquina universal de ensaios (EMIC DL 10000; com velocidade de 1 mm/min) (Figura 15) que possui um sistema computacional ao êmbolo, onde é possível verificar a força submetida no corpo-de-prova até seu rompimento.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânico-Parque Científico e Tecnológico e – I.Parque. Através do software calcula a resistência mecânica através da Equação 10.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 10})$$

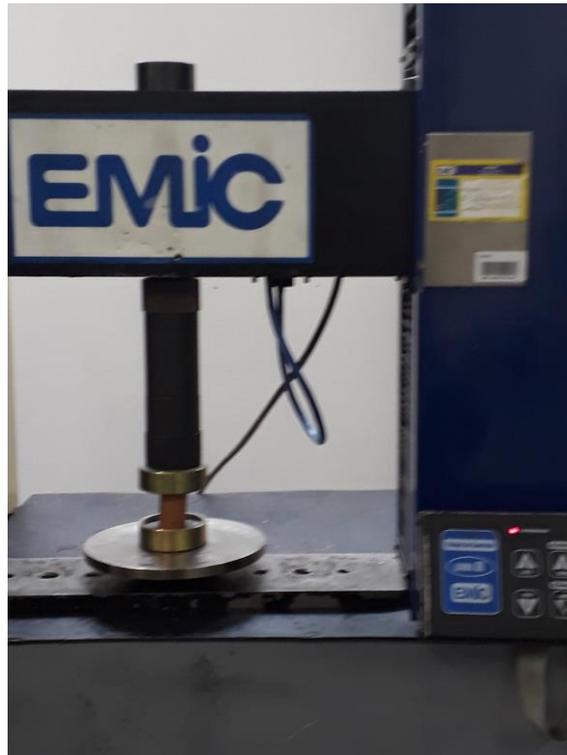
Sendo:

$\sigma$  = resistência mecânica a compressão (MPa);

$F$  = Carga de ruptura (N);

$A$  = área de contato (mm<sup>2</sup>).

Figura 15. Máquina Universal de Ensaio utilizada no teste de resistência mecânica.



Fonte: Da autora, 2017.

### 3.3.9 Absorção de Água

A absorção da água é utilizada para medir a porosidade e avaliar a fundência do material se define como ganho em peso, expresso em porcentagem, que as peças apresentam após ser submersas a água durante um determinado período (CASAGRANDE, 2002). Ressalta a importância do teste na durabilidade dos materiais, pois está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente (MEDEIROS, 2010).

A absorção de água é determinada através da diferença entre a massa queimada (secas) e a massa queimada úmida (imersas) do corpo-de-prova. O ensaio consiste em pesar uma amostra seca, e após submetê-la em banho de imersão em água em temperatura ambiente por 24 h (Figura 16). Após o processo retirar o excesso de água com auxílio de pano umedecido. Os valores de absorção de água foram obtidos utilizando a Equação 11.

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$

(Equação 11)

Sendo:

$AA$  : absorção de água (%);

$m_u$  : massa úmida (g);

$m_s$  : massa seca (g).

Figura 16. Ensaio de absorção de água em banho de imersão.



Fonte: Da autora, 2017.

### 3.3.10 Teste de fitotoxicidade

Para realizar os testes de fitotoxicidade *Allium cepa L*, utilizou-se amostra da formulação 7, e os ensaios foram baseados de acordo com Fiskejo (1988), com adaptações. As *Allium cepa L*, foram preparadas, com a retirada de sua casca e suas raízes, os bulbos ( $n=6$ ) colocados sobre os tubos Falcon de 55 mL, contendo concentrações da formulação em 1,0 g, 1,5 g, 3,0 g, 3,5 g, 5,0 g em concentrações de água deionizada ( Figura 17).

Para obter um controle negativo foi utilizada uma amostragem, apenas com água deionizada. As amostras foram reabastecidas nos 7 dias, deixadas à temperatura ambiente e ao abrigo de luz. Depois de retirado as raízes dos bulbos, realizou-se a medida (régua 30 cm) do comprimento das raízes. A metodologia foi adotada conforme Nuernberg (2017).

Figura 17. Disposição do ensaio realizado com *Allium cepa* L.



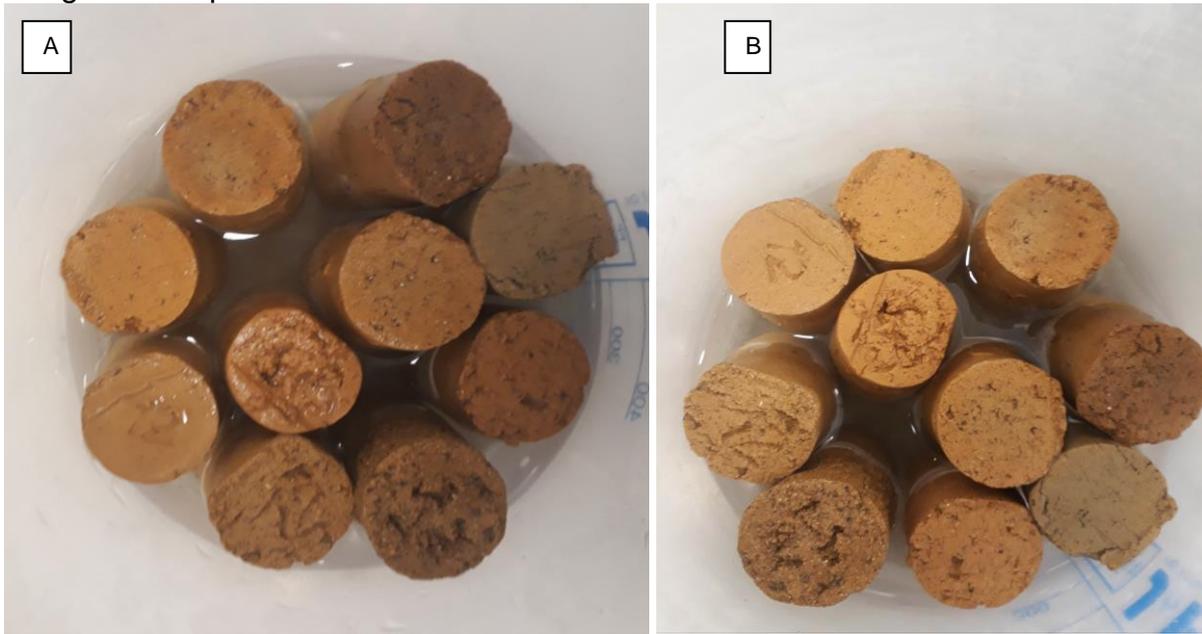
Fonte: Da autora, 2017.

### 3.3.11 Ensaio de eflorescência

A formação de eflorescência pode ocasionar problemas na estrutura. Essa formação em peças cerâmicas atua como indicador para baixa qualidade da peça. Estes depósitos surgem quando os sais solúveis, presentes nos componentes ou no solo são transportados pela água utilizada na construção ou por umidade, formando um líquido viscoso que migra para a superfície, perdendo a água por evaporação e em contato com o ar solidificam, causando depósitos, geralmente de cor branca (RIBEIRO, 1996 *apud* BEZERRA *et al.*, 2012).

A Figura 18, apresenta o ensaio realizado para verificar a formação de eflorescência. O teste foi realizado conforme norma ASTM C 67-92<sup>a</sup>, que consiste em submeter as peças cerâmicas submerso em água deionizada em um recipiente impermeável, num período de sete dias, após as amostras foram colocadas em estufas com temperatura de 100 °C, durante 24 horas para secagem.

Figura 18. Apresenta os ensaios de eflorescência.



Fonte: Da autora, 2017.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

As análises dos resultados apresentados nesse capítulo foram divididas em duas partes. i) caracterização das amostras e classificação dos resíduos, e ii) análise e discussão dos resultados dos testes laboratoriais.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 4.1.1 Caracterização Física e Química

##### 4.1.1.1 Umidade e plasticidade

A umidade *in natura* dos materiais estudados pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da umidade *in natura* das matérias-primas.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Umidade <i>in natura</i> (%)</b>
Massa Padrão	18,8
Cinza	23,8
Torta	22,7

Fonte: Da autora, 2017.

O teor de umidade ideal foi calculado através a fórmula da média ponderada, onde se utilizou as umidades encontradas das formulações 1, 2 e 3.

Na Tabela 4 são apresentados os valores em uma média de cinco corpos-de-prova, com suas respectivas deformações com diferentes percentuais de umidade, obtidos através do método de *pfefferkorn*,

Tabela 4. Valores obtidos no ensaio de plasticidade para as formulações 1, 2 e 3.

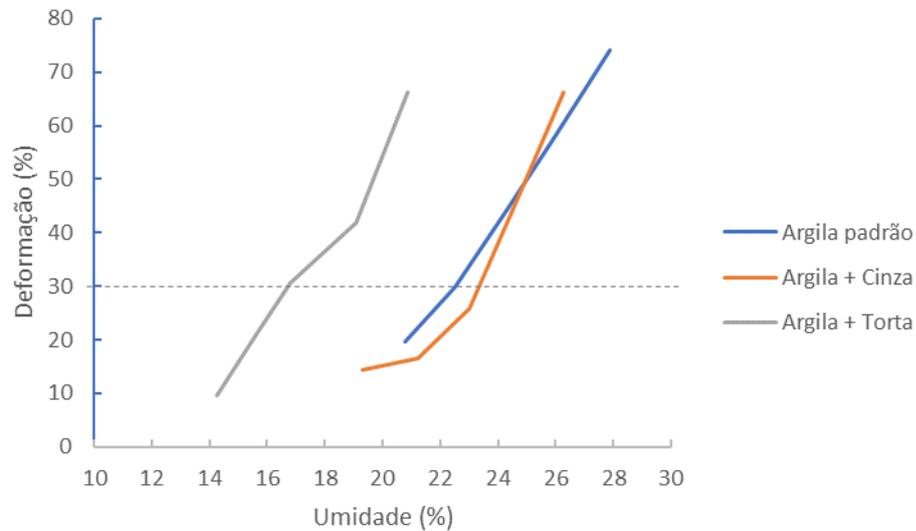
Formulação	U(%)	$h_i$ (mm)	$h_f$ (mm)	$\varepsilon$ (%)
1	20,80	40	32,16	19,60
	22,54	40	28,00	30,00
	24,31	40	22,30	44,25
	25,95	40	16,82	57,95
	27,90	40	10,36	74,1
2	19,29	40	34,22	14,45
	21,22	40	33,38	16,55
	23,01	40	29,62	25,95
	24,68	40	21,50	46,25
	26,27	40	13,54	66,15
3	14,24	40	36,12	9,70
	15,67	40	31,38	21,55
	16,80	40	27,78	30,55
	19,07	40	23,30	41,75
	20,88	40	13,50	66,25

U: Umidade;  $h_i$ : Altura Inicial;  $h_f$ : Altura Final;  $\varepsilon$ : Percentual de Deformação no corpo -de- prova.

Fonte: Da autora, 2017.

A Figura 19, apresenta a melhor curva de plasticidade ideal para cada tipo de amostra. Com uma deformação de 30 %, obtêm-se o índice de plasticidade ideal. Nas amostras de massa padrão apresentou um índice de plasticidade de 22,54 %, enquanto as amostras de cinzas apresentaram 23,35 % e as amostras de torta, um índice de 16,84 %.

Figura 19. Curva do índice de plasticidade.



Fonte: Da autora, 2017.

Uma vez descoberta a umidade ideal das formulações 1, 2 e 3, utilizou-se a média ponderada para identificar a umidade ideal para as demais formulações, que é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Representa a umidade ideal para as formulações.

Formulações	U Ideal (%)
F4	22,94
F5	19,69
F6	20,09
F7	20,91
F8	21,72
F9	22,13
F10	18,88

Fonte: Da autora, 2017.

#### 4.1.1.2 Resíduo Bruto

A descoberta do percentual de resíduo bruto se faz necessário para identificar a quantidade que não são argilomineral presente na argila e determinar a qualidade final do produto.

Quantidades maiores de resíduo contidos ocasionam um aumento na velocidade de extrusão e secagem, gerando maiores problemas na queima causando uma menor resistência mecânica e desgaste interno com porcentagens menores podemos verificar problemas na redução da produção, trincas e deformações (OLIVEIRA, 2011).

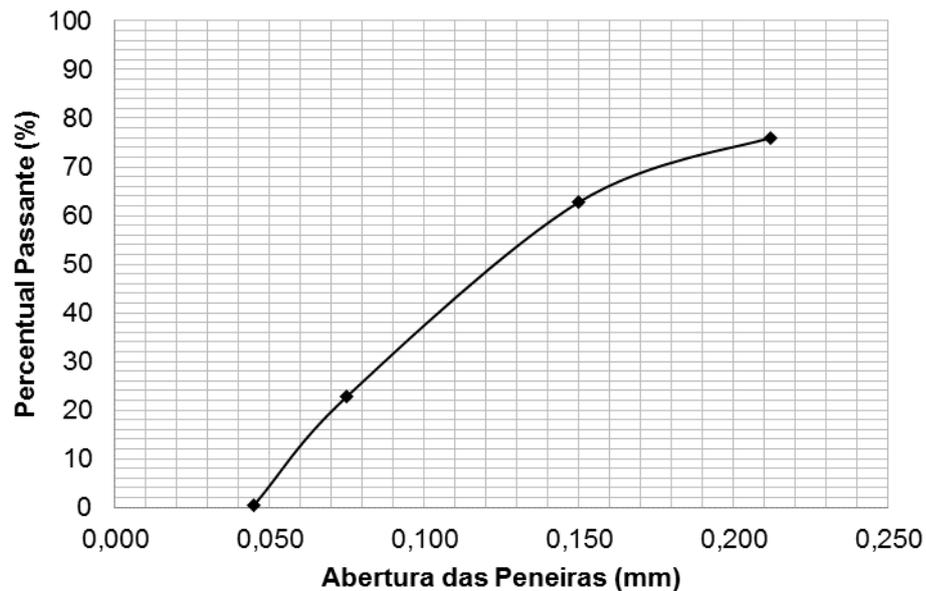
Na Tabela 6 e Figura 20, é possível observar o percentual encontrado de resíduo bruto.

Tabela 6. Valor do resíduo bruto, retido na peneira malha 325 (44  $\mu\text{m}$ ).

<b>Matéria-Prima</b>	<b>Resíduo (%)</b>
Massa padrão (STD)	17,90

Fonte: Da autora, 2017.

Figura 20. Percentual (%) passante do resíduo bruto.



Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2017.

Figura 20, podemos observar a curva granulométrica da amostra de resíduo bruto contido na Formulação 1 (STD), usada como massa padrão para cerâmica vermelha. Com uma abertura de 0,212 mm (70 mesh) reteve 24,01 % do resíduo bruto, a 0,150 mm (100 mesh) reteve 13,22% do resíduo bruto, na peneira 0,075 mm (200 mesh) com 39,94 %, com 0,045 mm (325 mesh) apresenta 22,32 %.

Segundo Oliveira (2011), para manter uma qualidade final do produto é essencial utilizar uma porcentagem de 10 a 15 % e realizar constantemente os ensaios granulométricos.

#### 4.1.1.3 Caracterização Química

Na Tabela 7, podemos verificar a composição química dos resíduos torta de rejeito proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão, e cinza proveniente da queima do carvão mineral.

Tabela 7. Caracterização química.

Parâmetros	Torta de rejeito (%)	Cinza pesada (%)
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	63,06	61,54
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25,80	24,60
Titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,47	0,49
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,73	5,92
Cálcio (CaO)	1,70	1,63
Magnésio (MgO)	0,64	0,72
Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,21	0,73
Potássio (K <sub>2</sub> O)	2,36	2,85
Manganês (MnO)	0,02	0,03
Perda ao Fogo	0,51	0,74
Soma de óxidos + PF	99,50	99,25

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2012 e 2017.

Através do resultado da Tabela 7, é possível observar uma grande similaridade dos resíduos, devido ao fato de ser oriundo da mesma fonte, carvão mineral.

Muito embora sejam distintos, esses resíduos também se assemelham quimicamente com materiais argilosos para cerâmica vermelha, segundo Crozetta *et al.*, (2016) a sílica (SiO<sub>2</sub>) representa 65,20 %, alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 21,54 %, óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 4,20 %, cálcio (CaO) 0,20 %, potássio (K<sub>2</sub>O) 2,65 %, magnésio (MgO) 0,69 %, sódio (Na<sub>2</sub>O) 0,19 % e Titânio (TiO<sub>2</sub>) 0,89 %.

Observa-se então, que as matérias-primas estudadas, apresentam maior percentual de sílica (SiO<sub>2</sub>) 63,06 % para a torta de rejeito proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão mineral e 61, 54 % para a cinza pesada proveniente da queima do carvão, que para o estudo é de grande relevância, pois

age como fundente, sendo os materiais fundentes eficientes na redução da porosidade (VIERA, 2004).

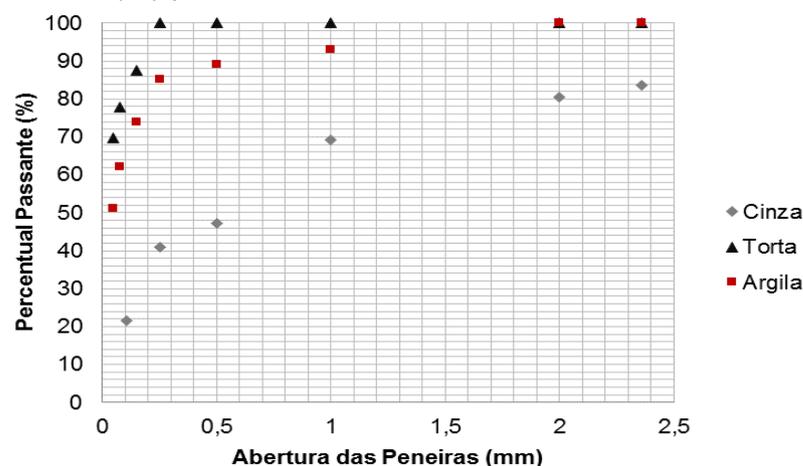
A presença de teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) podem melhorar a qualidade da peça, sobretudo na resistência mecânica, já que são óxidos fundentes relacionados à vitrificação do material, a presença de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido que vem em seguida com altos percentuais nos resíduos, contendo 25,80 % na torta de rejeito e 24,60 % na cinza pesada, apresentam desempenho e aumento da resistência mecânica.

O óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que aparece com 4,73 % na torta de rejeito e 5,92 % na cinza pesada, na massa cerâmica confere a cor avermelhada após queima (NANDI, *et al.*, 2014). O cálcio ( $\text{CaO}$ ), magnésio ( $\text{MgO}$ ) e potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), também se fazem presentes, em teores menores, e esses apresentam funções de estabilidade a ataques de agentes atmosféricos e aumento da resistência a mudanças bruscas de temperatura (ZACCARON, *et al.*, 2016).

#### 4.1.1.4 Distribuição granulométrica

O gráfico da Figura 21, ilustra a distribuição do tamanho de grãos da argila, torta de rejeito proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão, sendo que as cinzas pesadas são provenientes de uma usina termelétrica.

Figura 21. Percentual (%) passante.



Fonte: Da autora, 2017.

É possível observar que nas peneiras com maiores aberturas (10 e 60 mesh), a argila e a torta de rejeito proveniente do filtro prensa no processo de

beneficiamento do carvão mineral, foram 100 % passante, tendo a cinza proveniente da queima do carvão mineral 16,30 % de material retido na 8 mesh, mostrando que esse resíduo possui grãos maiores.

A partir da malha 18 mesh, a argila começa a reter algum material (6,85 %), a cinza pesada proveniente da queima do carvão mineral até essa peneira, acumula aproximadamente 31 % de material. Já a torta de rejeito proveniente do filtro prensa, manteve-se passante ainda nessa malha. A partir da malha 35 mesh, obtém-se os maiores percentuais de material retido, sendo para a cinza pesada 12,21 % (35 mesh), 16,30 % (60 mesh), 19,37 % (150 mesh) e 21,43 % passante nessa última.

O resíduo da torta de rejeito proveniente do filtro prensa, possui uma granulometria bastante fina, uma vez que cerca de 70 % do material foi passante em 325 mesh, e do material retido, 12,54 % foi em malha 100 mesh, 9,68 % em malha 200 mesh e 8,12 % em 325 mesh. A argila concentrou maiores percentuais de material retido entre as peneiras 100 e 325 mesh, sendo 11,16 % (100 mesh), 11,85 % (200 mesh) e 10,96 % (325 mesh) e por ter frações mais finas, 51,18 % do material foi passante nessa última. Vale destacar que para o ensaio de distribuição do tamanho de grãos da argila, o teste de peneiramento não é o mais indicado, pois os argilominerais se concentram em pequenos blocos que não desagregam durante o processo.

#### 4.1.2 Classificação dos resíduos

O ensaio de classificação dos resíduos foi disponibilizado pela empresa, com intuito de verificar a classe dos mesmos, a fim de minimizar possíveis problemas ambientais e de saúde pública.

##### 4.1.2.1 Análises físicas químicas

Na Tabela 8, consta à análise físico-química da torta de rejeito proveniente do filtro prensa e cinza pesada proveniente do processo de queima do carvão mineral.

Tabela 8. Análises físicas químicas.

<b>Parâmetro</b>	<b>Torta Filtro Prensa</b>	<b>Cinza</b>
Umidade Higroscópica (%)	1,35	0,57
Cinzas (%)	68,11	96,04
Mat. Voláteis (%)	14,84	0,88
Carbono Fixo (%)	17,05	3,08
Enxofre Total (%)	1,33	0,97

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2014 e 2017.

Na Tabela 8, podemos verificar que a torta de rejeito apresenta um grande percentual de cinzas (próximo aos 70 %), o que é extremamente comum, ao tipo de carvão brasileiro (RESTREPO, 2015). Esse alto percentual de cinzas determina a quantidade de material inorgânico, ou seja, que não sofre combustão. Podemos observar que a cinza, que por já ter passado por um processo de combustão (no qual o resíduo é gerado), ele possui um alto teor de cinza 96,04 %, oriundos das transformações físico-químicas no qual o carvão mineral passou.

#### 4.1.2.2 Corrosividade

Para a classificação do resíduo foi, primeiramente, realizado a análise de corrosividade (Tabela 9). Para um resíduo ser caracterizado como corrosivo deve apresentar pH inferior ou igual a 2, ou superior e igual a 12,5.

Tabela 9. Resultado das análises do teste de corrosividade.

<b>Corrosividade</b>	<b>Torta Filtro Prensa</b>	<b>Cinza</b>
Ph	7,65	8,66

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2014 e 2017

Como apresentado, os resíduos são caracterizados como não corrosivo.

#### 4.1.2.3 Reatividade

Para ser considerado reativo o resíduo deve apresentar 500 mg de H<sub>2</sub>S liberável por quilograma de resíduo. Conforme a Tabela 10 é observado, que o sulfeto, não foi detectado, esse resultado é reflexo da torta de rejeito (Tabela 8) apresentar baixo percentual de enxofre total.

Tabela 10. Resultado da análise do teste de reatividade.

<b>Reatividade</b>	<b>Torta Filtro Prensa</b>	<b>Cinza</b>
Sulfeto (mg/ Kg)	Não Detectado	9,6

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2014 e 2017

#### 4.1.2.4 Lixiviação

A lixiviação (Tabela 11) consiste na capacidade de transferência de substâncias orgânica e inorgânica, presentes no resíduo, por meio de dissolução no meio extrato, tem finalidade para classificar se os resíduos são Classe I (perigosos) ou Classe II (não perigosos).

Tabela 11. Resultados de lixiviação do resíduo.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Torta Filtro Prensa</b>	<b>Cinza</b>	<b>Limite Máximo no Extrato (mg/L) de acordo com o anexo F da NBR 10004:04</b>
pH lixiviado	(mg/L)	5,24	4,95	-
Chumbo	(mg/L)	0,05	0,00	1,0
Cromo Total	(mg/L)	<0,005	-	5,0
Bário	(mg/L)	0,29	0,410	70,0
Cádmio	(mg/L)	ND	0,00	0,5
Prata	(mg/L)	ND	0,00	5,0
Arsênio	(mg/L)	<0,001	0,02	1,0
Fluoreto	(mg/L)	<0,1	0,08	150
Mercúrio	(mg/L)	<0,001	<0,001	0,1
Selênio	(mg/L)	<0,01	<0,01	1,0

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2014 e 2017.

ND: Não Detectado

Podemos perceber na Tabela 11, que os contaminantes não demonstraram concentrações superiores aos valores constantes no anexo F da ABNT/NBR 10004:2004. Desta forma, de acordo com os resultados obtidos das análises de teste de lixiviação, corrosividade e reatividade, as amostras de torta de rejeito e a cinza é caracterizada como não perigoso.

## 4.1.2.5 Solubilidade

O teste de solubilização (Tabela12) tem como finalidade diferenciar os resíduos classificados como classe II A e classe II B.

Tabela 12. Resultados da solubilização dos resíduos.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>Torta Filtro Prensa</b>	<b>Cinzas</b>	<b>Limite Máximo no Extrato (mg/L) de acordo com o anexo G da NBR 10004:04</b>
pH Solubilizado		7,77	7,32	-
Sulfato	(mg/L)	197	11,14	250
Cloretos	(mg/L)	16,46	10,44	250
Fenol	(mg/L)	ND	0,00	0,01
Ferro Total	(mg/L)	0,02	0,07	0,3
Manganês	(mg/L)	0,02	0,00	0,1
Cobre	(mg/L)	ND	0,00	2,0
Zinco	(mg/L)	0,02	0,00	5,0
Alumínio	(mg/L)	ND	0,00	0,2
Chumbo	(mg/L)	0,01	0,00	0,01
Sódio	(mg/L)	19,46	4,27	200
Cádmio	(mg/L)	ND	0,00	0,005
Cromo Total	(mg/L)	<0,005	-	0,05
Prata	(mg/L)	ND	0,00	0,05
Bário	(mg/L)	0,29	<0,010	0,7
Arsênio	(mg/L)	<0,001	<0,01	0,01
Fluoreto	(mg/L)	0,22	0,29	1,5
Mercúrio	(mg/L)	<0,001	<0,001	0,001
Nitrogênio Nitrato	(mg/L)	1,19	0,24	10,0
Selênio	(mg/L)	<0,01	<0,01	0,01

Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda – Divisão Laboratório, 2014 e 2017. ND: Não Detectado.

Conforme apresentado na Tabela 12 acima, os resíduos não apresentaram parâmetros com resultados superiores ao limite máximo estabelecido pelo anexo G, da ABNT/NBR 10004/2004, sendo assim, estas amostras são classificadas como resíduos não perigoso inerte, ou seja, classe II B.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

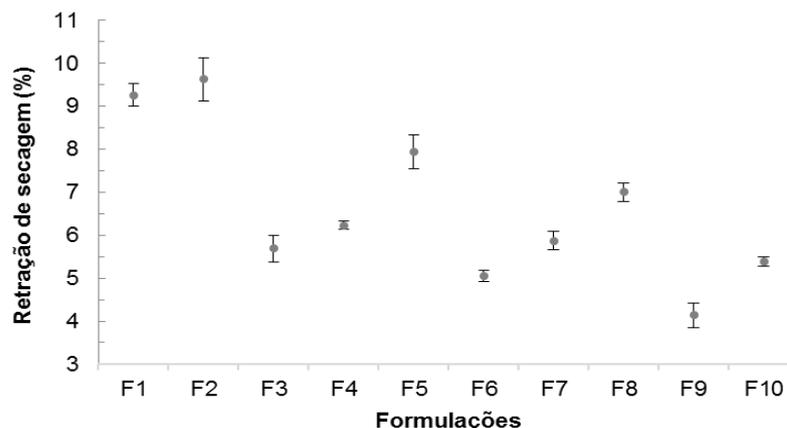
Nessa etapa serão descritos os resultados físico-mecânicos obtidos em laboratório, dos ensaios dos corpos-de-prova (Apêndice A).

### 4.2.1 Retração Térmica Linear de Secagem

Com a retração térmica linear de secagem pode-se controlar a dimensão final das peças cerâmica, a formatação do maquinário de conformação. Conforme a Figura 22, verifica-se que a formulação F2, obteve maior valor de retração de secagem, ou seja 9,63 %. Por ter sido confirmado através de um método alternativo, é possível entender que haja algum erro na medição dos corpos-de-prova, uma vez que a bibliografia (PETERSON, 2016) aponta que a utilização de cinza, se mantém inertes durante o processo de secagem, o que diminui a retração das peças.

De acordo com Dondi (2006), no processo industrial a retração térmica linear de secagem, é considerada ótima de 5 a 8 % e aceitável 3 a 10 %. Os resultados obtidos comprovam que todas as formulações (exceto a F2), atendem aos valores proposto por Dondi (2006). Já comparados a F1 (STD) que chegou a 9,26 %, todas as demais formulações (com exceção de F2) tiveram uma menor retração, mostrando que para esse teste, os resultados foram satisfatórios.

Figura 22. Resultados de retração linear de secagem.

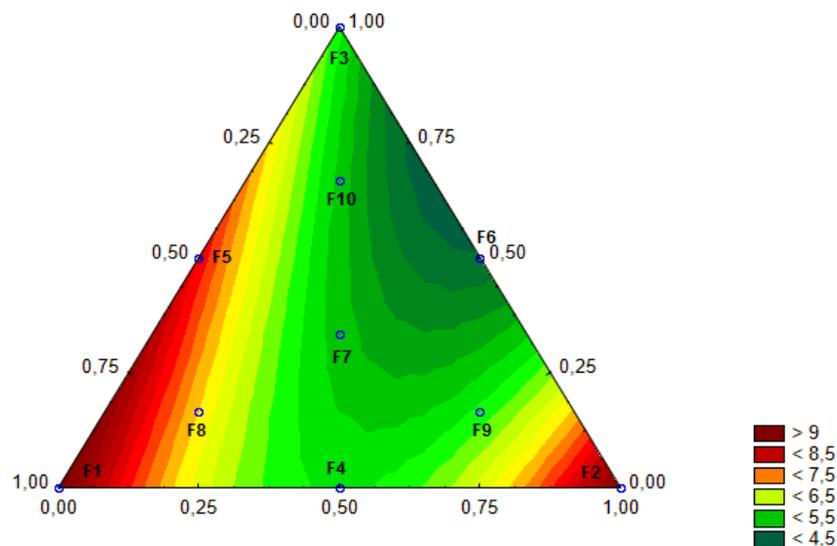


Fonte: Da autora, 2017.

A Figura 23 apresentam as superfícies de resposta e suas projeções dentro do triângulo das composições, para a retração linear de secagem da argila, a torta de rejeito proveniente do filtro prensa e a cinza pesada proveniente da queima do carvão mineral. A superfície de resposta é a representação gráfica dos resultados obtidos em laboratório, com ela permite uma estimativa fácil e rápida das composições em estudo.

Portanto, na superfície de resposta podemos observar que os resíduos da torta de rejeito proveniente do filtro prensa e a cinza pesada se classificam como inibidores de retração, no qual apresentaram menores valores. Muito embora a F2, mostrou maior retração, afere-se esse valor, a problemas de conformação.

Figura 23. Superfície de resposta para retração térmica de secagem.



Fonte: da autora, 2017.

#### 4.2.2 Retração térmica linear de queima

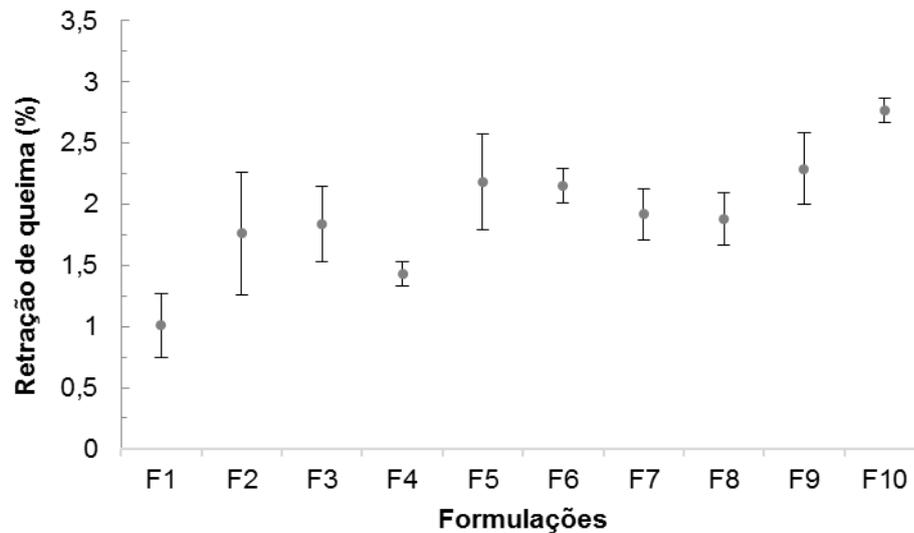
O gráfico da Figura 24, mostra, que comparados a F1 (STD), as demais Formulações que possuem resíduos incorporados, obtiveram maiores percentuais de retração de queima. O que comprova que os resíduos, em altas temperaturas, sofrem transformações que promovem o aumento da retração dos corpos cerâmicos. Observaram-se na literatura, fenômenos similares com a utilização de resíduos de vidro (NANDI, *et. al*/2014).

No processo de retração térmica linear de queima para produtos como tijolos e telhas são considerados variações ótima; valores acima de 1,5 % e variações aceitáveis de 1,5 a 3,0 % (DONDI, 2006). Os resultados obtidos

comprovam-se que todas as formulações, exceto a F1 (STD), atendem aos valores proposto.

Se realizarmos uma comparação com a formulação F1(STD) com (1,01 %) pode observar que todas as demais formulações apresentam valores acima F2 com (1,76 %), F3 com (1,84 %), F4 com (1,43 %), F5 com (2,18 %), F6 com (2,15 %), F7 com (1,92 %), F8 com (1,88 %), F9 com (2,29 %) e F10 apresenta (2,77 %) de retração termina linear de queima.

Figura 24. Resultados da retração térmica linear de queima.

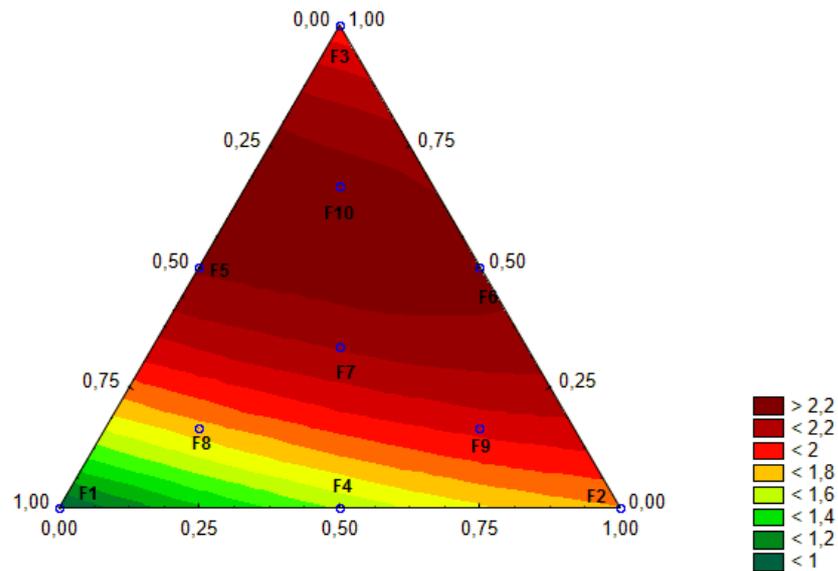


Fonte: Da autora, 2017.

A Figura 25, apresenta a superfície de resposta para a retração térmica linear de queima para as formulações estudadas.

Essa superfície de resposta mostra que os maiores percentuais de retração durante a queima, estão presentes nas formulações que contêm percentuais de torta de rejeito proveniente do filtro prensa, isso ocorre devido esse resíduo, possuir elementos que ajudam na sinterização interna da peça, aumentando a retração.

Figura 25. Superfície de resposta para retração térmica linear de queima.



Fonte: Da autora, 2017.

#### 4.2.3 Perda ao fogo

Os resultados de perda ao fogo podem ser observados na Figura 26 e a superfície de resposta na Figura 27.

Neste ensaio podemos observar que os resultados das formulações F2 e F4 apresentam menor perda ao fogo, ressaltando que essas formulações apresentam valores elevado de cinza, no qual apresentam baixos percentuais de materiais voláteis (0,88 %) e carbono fixo (3,08 %) com tendência de ter redução de perda ao fogo, devido ter passado por um processo de queima, e se manter inerte até a temperatura no qual foi submetida (entre 1600 a 1800 °C).

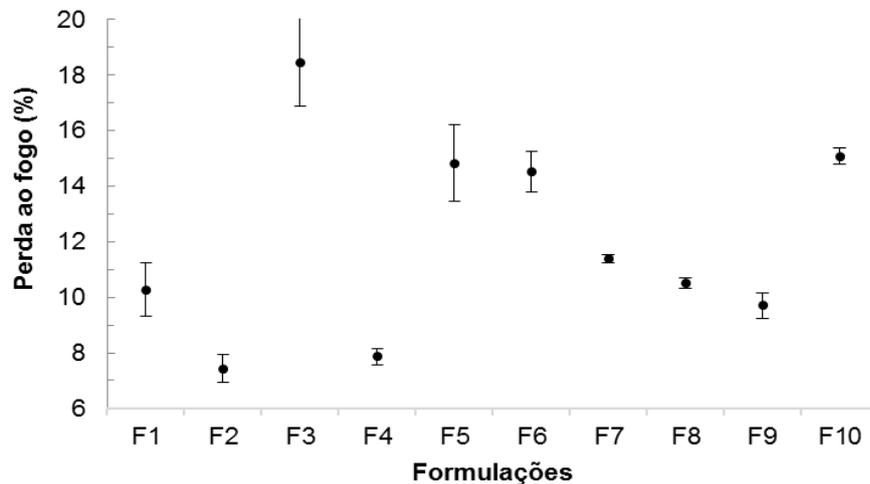
Já as formulações com altos teores de torta de rejeito proveniente do filtro prensa, apresentam maiores percentuais de perda ao fogo, uma vez que são constituídos de materiais voláteis (14,84 %) e carbono fixo (17,05 %), que são liberados durante o processo de queima.

A argila, presente em todas as formulações, em temperaturas com aproximadamente 200 °C verifica-se a eliminação da água coloidal conhecida como plasticidade ou água adsorvida. Entre 350 °C a 650 °C ocorre à decomposição das substâncias orgânicas com liberação da água de constituição e a eliminação de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Nessa temperatura também acontece à dissociação dos sulfetos e dos sulfatos com a liberação de gás sulfuroso. Em temperaturas entre 800 °C e 950

°C ocorre à decomposição dos carbonatos com a com liberação de gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

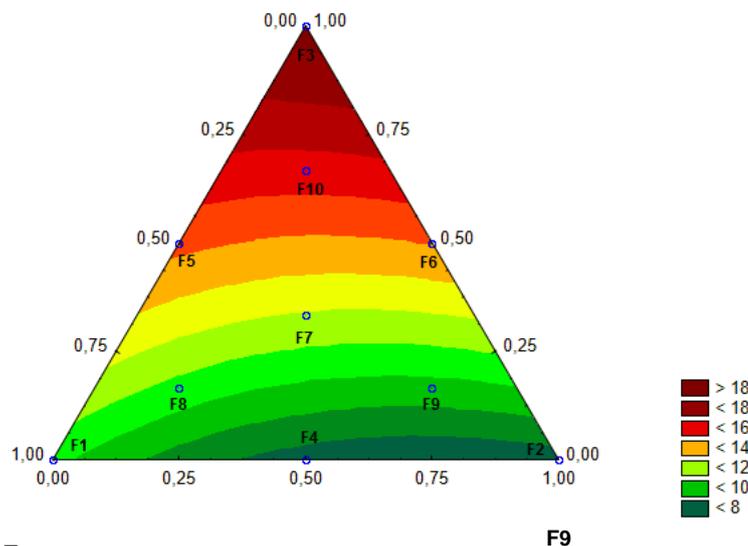
Em 900 °C verifica-se a reação química da sílica e da alumina com os elementos fundentes, reação que dá lugar à formação de silico-aluminatos complexos, que fornecem ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade e resistência a agentes químicos, acima de 1000 °C considerada a temperatura máxima de queima para a cerâmica vermelha, há variação de características de acordo com a composição química e mineralógica da massa, proporcionando a dureza, a compactação e a impermeabilidade desejadas (MEDEIROS, 2010).

Figura 26. Gráfico com resultados de perda ao fogo.



Fonte: Da autora, 2017.

Figura 27. Superfície de resposta para perda ao fogo.



Fonte: Da autora, 2017.

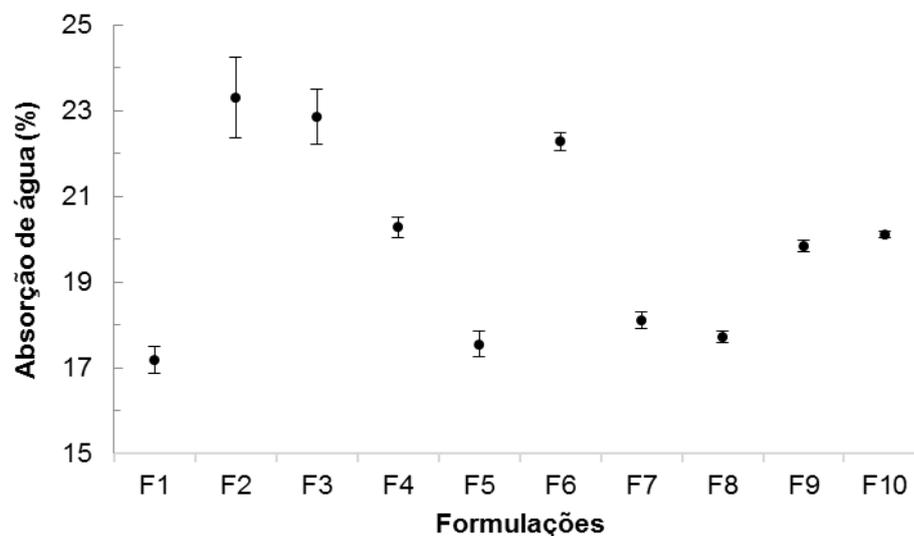
#### 4.2.4 Absorção a água

Verifica-se na Figura 28, os resultados do ensaio de Absorção de água, bem como a Figura 29, com a superfície de resposta no diagrama para o mesmo ensaio. As formulações que apresentam valores com maior absorção de água são as formulações F2, F3 e F6 respectivamente. Podemos definir que são peças com maiores percentuais de resíduos, 50 % em massa, que geraram maior porosidade, e com isso uma maior absorção de água, uma vez, que a umidade, tende a preencher os espaços vazios (poros), ocasionando essa propriedade.

Se compararmos com a NBR 15270:2005 que apresenta que o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8 %, nem superior a 22 %, as demais formulações atende a legislação.

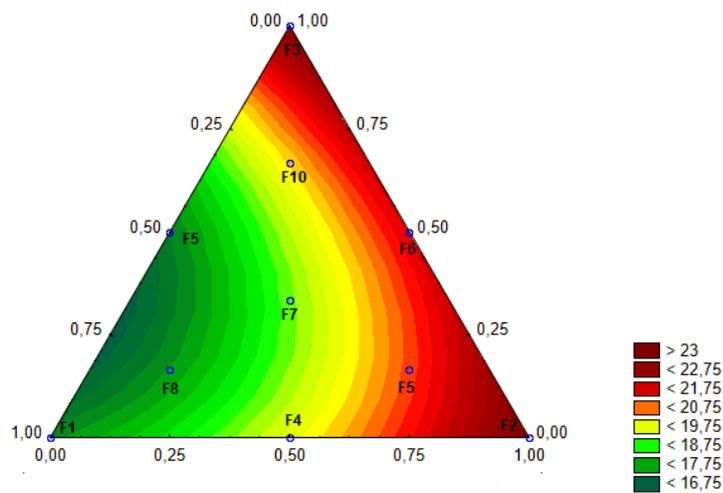
Segundo Dondi (2006), para processamento cerâmico industrial, os valores de referência geralmente aceitos na prática industrial, no caso tijolo e telhas usam-se na absorção de água a variação ótima entre 12 e 24 % e variação aceitável 10 e 30 %, comparando com estas informações todas as demais formulações são consideradas aceitáveis.

Figura 28. Resultados da absorção de água (%).



Fonte: Da autora, 2017.

Figura 29. Superfície de resposta para a absorção de água.



Fonte: da autora, 2017.

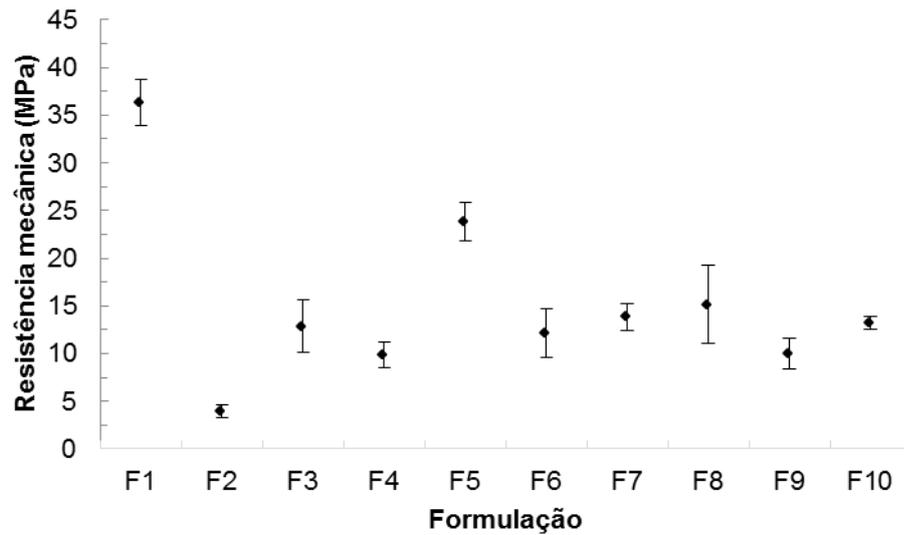
#### 4.2.5 Resistência mecânica à compressão

Analisando o gráfico com os dados obtidos do ensaio de resistência mecânica, apontados na Figura 30, pode-se observar a instabilidade da formulação F2 com 3,91 MPa, devido ao fato de ter sido confeccionado manualmente, e também por ter um alto teor de resíduo com granulometria grosseira, o que pode não ter ocorrido uma compactação entre STD e cinza.

Observa-se que F1 (STD) alcançou 36,33 MPa, e comparado as demais formulações com adição de resíduo, como F2 (3,91 MPa), F3 (12,8,7 MPa), F4 (9,91 MPa), F5 (23,86 MPa), F6 (12,17 MPa), F7 (13,85 MPa), F8 (15,15 MPa), F9 (10,00 MPa) e F10 (13,19 MPa), diminuiu consideravelmente, porém, como as provas não possuem geometria de blocos cerâmicos para pavimentação, não é possível compará-las a uma determinada norma, devido a isso, o ensaio tem característica comparativa entre as formulações.

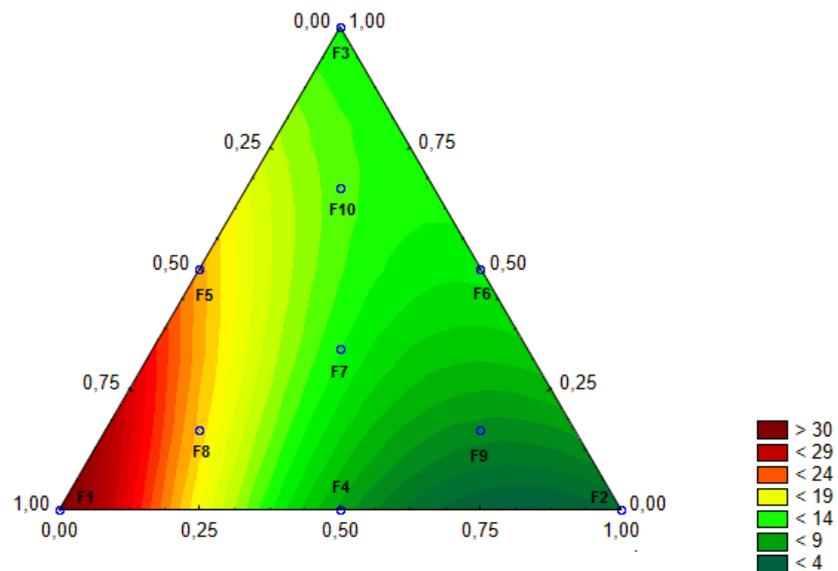
Dadas essas informações, a Figura 31, apresenta a superfície resposta com os valores alcançados para esse teste. Aconselha-se que em trabalhos futuros, os corpos-de-prova sejam confeccionados conforme normativa, para uma comparação mais aprofundada.

Figura 30. Resultados da resistência mecânica (%).



Fonte: Da autora, 2017.

Figura 31. Superfície de resposta para a resistência mecânica.



Fonte: Da autora, 2017.

#### 4.2.6 Eflorescência

O ensaio de eflorescência buscou investigar a possível presença de manchas de sais solúveis no material cerâmico, oriundo dos resíduos utilizados, e conforme a Figura 32, pode-se observar que não houve presença de sais, o que conclui-se que não ocasionou eflorescência.

Figura 32. Resultado das análises de eflorescência.



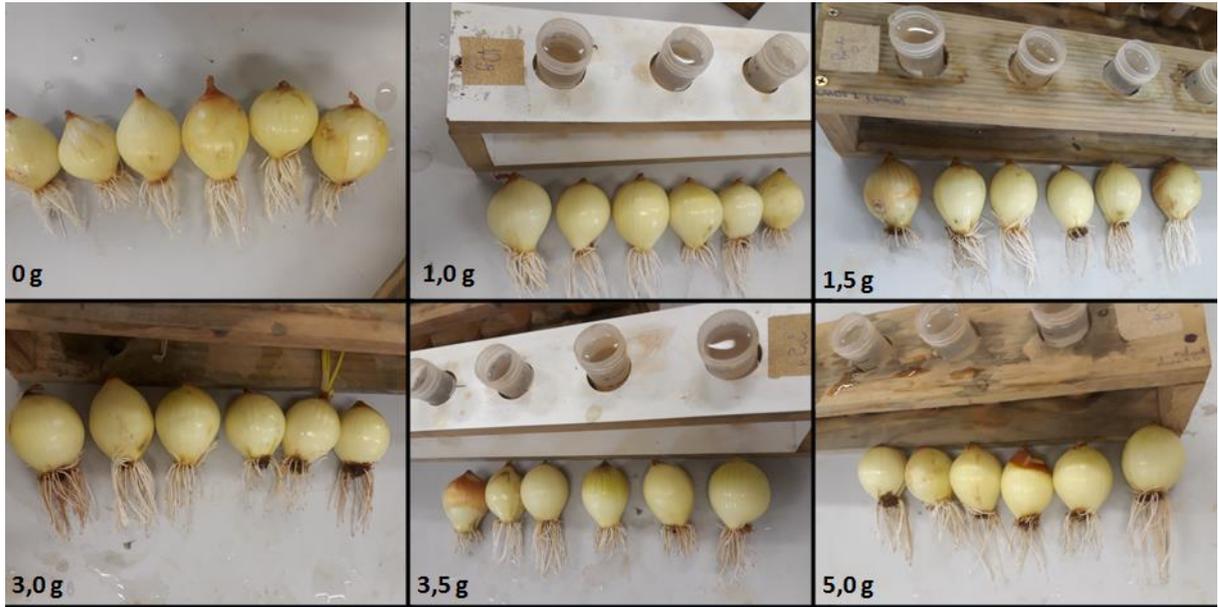
Fonte: Da autora, 2017.

#### 4.2.7 Fitotoxicidade

Pode-se observar diante dos resultados obtidos que não houve uma inibição do crescimento das raízes nas diferentes concentrações da formulação 7 (F7), quando comparado ao controle negativo. Foi também constatado que houve um crescimento radicular.

Comparando com os estudos que apresentam toxicidade expressiva, observar-se que o uso da pirita com níveis de concentração (0,03 g, 0,05 g, 0,1 g, 0,15 g e 0,2 g) interferiram de forma significativa no crescimento das raízes. Tendo valores expressivamente baixos quando comparadas a uma amostra padrão (0 g) e concentração de pirita em 0,2 g, não havendo crescimento da raiz (NUERNBERG, 2017). A síntese dos resultados obtidos está apresentada na Figura 33.

Figura 33. Resultados obtidos pelo teste de fitotoxidade com *Allium cepa* L.

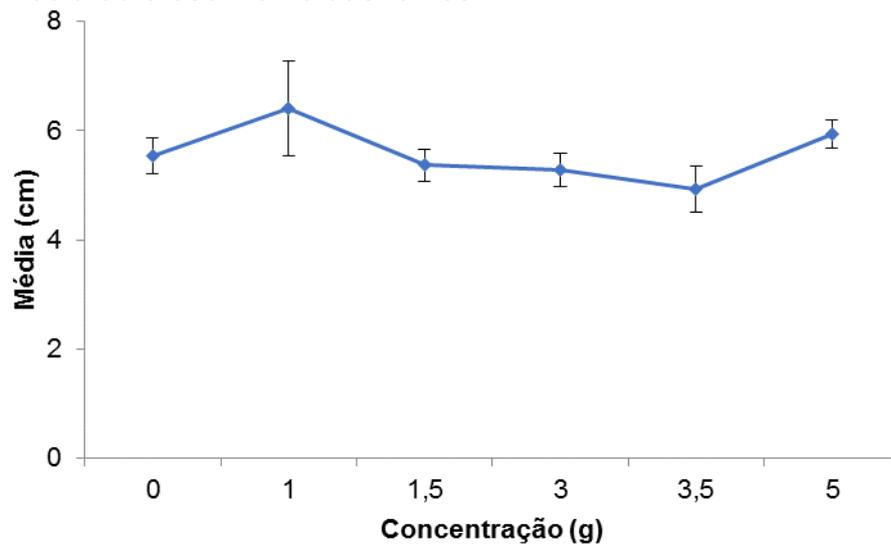


Fonte: Da autora, 2017.

A Figura 34, apresenta o gráfico, com a média de crescimento das raízes, e mostra um desenvolvimento médio padrão, comprovando que F7 não afeta negativamente o equilíbrio do ambiente. Sabe-se que o potássio, constituinte no resíduo da torta de rejeito e cinza, sob forma de óxido  $K_2O$ , é um micronutriente podendo ter auxiliado no crescimento das raízes.

Devido ao elevado número de raízes que obtiveram crescimento foram selecionadas as 25 maiores raízes de cada concentração.

Figura 34. Média de crescimento das raízes.



Fonte: Da autora, 2017.

## 5 CONCLUSÃO

Toda extração de recursos naturais, provoca uma serie de impactos ambientais e conseqüentemente a geração de resíduos. Partindo dessa premissa, há uma busca contínua para promover o desenvolvimento sustentável e o reaproveitamento dos resíduos industriais, devido ao seu elevado custo envolvido no armazenamento, tratamento, transporte e disposição final.

Uma forma de minimizar os impactos envolvendo os resíduos é o reaproveitamento destes rejeitos, gerando assim um aumento no índice de sustentabilidade, reduzindo a extração dos recursos naturais e gerando novos produtos a partir de resíduos que seriam encaminhados para aterros controlados.

A região sul do estado de Santa Catarina é um polo cerâmico e carbonífero, e apresenta um papel fundamental na economia no nosso país, gerando elevadas quantias de resíduos/rejeitos carbonosos. Em contrapartida a cerâmica vermelha tem possibilidades reais de absorver tais resíduos. O estudo viabiliza o reaproveitamento do resíduo denominado torta de rejeito proveniente do filtro prensa do beneficiamento do carvão mineral e a cinza pesada proveniente do processo de queima do carvão mineral incorporando no setor cerâmico, possibilitando reduzir os custos com extração de matéria-prima e conseqüentemente aumentar a vida útil das jazidas, e agregando valor econômico ao resíduo.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode se afirmar que a incorporação de resíduos da torta de rejeito proveniente do filtro prensa do processo de beneficiamento do carvão mineral com e a cinza pesado do processo de queima do carvão mineral apresentou resultados físico-mecânicos dos testes tecnológicos bastante interessantes, nos quais destaca-se a diminuição da retração linear de secagem, fenômeno físico que apresenta maior variação dimensional, na qual contraiu de 9,26 % (F1/STD) para 5,05 % (F6), diminuindo 4,21 %.

Essa propriedade é extremamente importante para controlar dimensionalmente à peça cerâmica. Além da secagem, na queima ocorrem transformações físico-químicas que alteram a dimensão, e para essa avaliação, a peça retraiu de 1,01 % (F1) para 2,77 % (F10), valor extremamente pequeno. O teste de absorção de água é de grande relevância, pois sabe-se que a peça cerâmica tem seu pior desempenho em contato com a umidade, apresentaram resultados aceitáveis, sendo entre 17,18 % (F1) e 23,31, % (F2).

No teste de perda ao fogo, a F3 obteve um alto percentual (18,47 %) devido ao alto teor de materiais voláteis que possui no resíduo de torta de resíduo proveniente do filtro prensa. Já o menor percentual, está em F2 (7,41 %), uma vez que a cinza já passou por um processo de queima, e essa formulação, vem a ter 50 % desse resíduo incorporado. Para o teste mecânico, observa-se uma grande diminuição da resistência da peça, sendo F1 (STD) a maior resistência (36,33 MPa), e com a incorporação de resíduos tenderam a diminuir a resistência, F2 (3,91 MPa), F4 (9,91 MPa) e F9 (10,0 MPa).

O ensaio de eflorescência não mostrou a presença de manchas oriundas de sais solúveis, concluindo que os resíduos não apresentaram problemas para esse teste.

O ensaio fitotoxicológico mostrou, que a F7, usada como base para esse teste, não apresentou toxicidade, com o uso de *Allium cepa L.*, em diferentes concentrações em comparativo a um negativo. Esse teste comprova que o uso dos resíduos incorporados na massa cerâmica, não acarreta problemas ambientais.

Com base nos resultados apresentado, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realizar teste em escala semi-industrial;
- Realizar testes fitotoxicológico para as demais formulações com a verificação do de pH das soluções.
- Avaliação das emissões atmosféricas das formulações.

## REFERÊNCIAS

- ABCM [Associação Brasileira de Carvão Mineral]. **O carvão**: Sobre o carvão. 2017. Disponível em: <[http://www.carvaomineral.com.br/interna\\_conteudo.php?i\\_subarea=6&i\\_area=4](http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=6&i_area=4)>. Acesso em: 04 de março de 2017.
- ABCM [Associação Brasileira de Carvão Mineral]. **O beneficiamento**: Sobre o carvão. 2014. Disponível em: <[http://www.carvaomineral.com.br/interna\\_conteudo.php?i\\_subarea=11&i\\_area=2](http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=11&i_area=2)>. Acesso em: 04 de março de 2017.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Métodos, Norma Brasileira no. **10004, Classificação de Resíduos, NBR 10004**. 2004.
- AMARAL FILHO, Juarez Ramos do. **Avaliação ambiental e do potencial de aproveitamento de um módulo de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina**. 2009.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Carvão mineral**. 2017 < Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-carvao\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-carvao(2).pdf). >. Acesso em: 06 de mar. 2017
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília : Aneel, p.131-135.,2008.
- BALATON, V.T., GONÇALVES, P.S., FERRER, L.M. **Incorporação de Resíduos Sólidos Galvânicos em Massas de Cerâmica Vermelha**. Cerâmica Industrial, 7 (6), p.42-45, 2002.
- BARBOSA, M.I.R. **Bentonitas aditivadas com polímeros para aplicação em fluídos de perfuração**. Dissertação. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Campo Grande-PB,98p., 2006.
- BARROS NETO, B.,SCARMINIO, J.S., BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**, 2a Edição. Editora UNICAMP, Campinas, SP. 300p. 2001.
- BEZERRA, Ana Priscila Leite; FERREIRA, Telma Sueli de Sousa Silva. **Ensaio de eflorescência baseado na norma da ASTM C 67-92a**. In: VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. 2012.
- BUSTAMANTE, G.M. & BRESSIANI, J.C. **A indústria cerâmica brasileira**. Cerâmica Industrial, 5 (3), p. 31-36, 2000.
- BRASIL. (2010a) Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**.

- CANDIDO, V. S., (2012) **Utilização de Argilito e Chamote de Blocos de Vedação na Composição de Massa de Pavimento Intertravado Cerâmico – Adoquim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 156p.
- CARNIATO, Antônio. **Planejamento da Produção e Mistura de Carvão Mineral**: Programação Matemática e Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 122 f.
- CAROLA, C.R. (Org.). **Memória e Cultura do Carvão em Santa Catarina: Impactos Sociais e Ambientais**. Santa Cruz Do Sul: Edunisc, 2010. 327 p.
- CARGNIN, Maykon et al. **Estudo da Determinação da Plasticidade de Matérias-Primas Cerâmicas Utilizando o Método de Pfefferkorn**. Revista Técnico Científica do IFSC, v. 1, n. 2, p. 226, 2012.
- CASAGRANDE, M. C. *et al.* **Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico**. Cerâmica Industrial, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.
- CASAGRANDE M. N., **Efeito da Adição de Chamote Semi-Gresificado no Comportamento Físico de Massa Cerâmica para Pavimento**. 2002. 66 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002.
- ÇIÇEK, T., ÇINÇIN, Y. **Use of fly ash in production of light-weight building bricks**. Construction and Building Materials v. 94, p. 521–527, 2015.
- CONORSA. **Adoquines**. 2017. Disponível em: < <http://www.conorsa.es> > Acesso em : 30 mai 2017.
- CROZETTA, Jacqueline Ribeiro *et al.* **Influência da Granulometria na Plasticidade e Retração de Secagem das Argilas**. Cerâmica Industrial, Criciúma, v. 21, n. 1, p.1-9, jan. 2016. Disponível em: <<http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v21n1/v21n1a03.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2017.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (Brasil). **Sumário Mineral**. 2015. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (Brasil). **Informe Mineral**. 2016. Disponível em: < [http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe\\_mineral\\_2\\_2016](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2_2016)>. Acesso em: 10 abr. 2017.
- DIAS, Lilian Lima *et al.* **Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas**. Ambiente Construído, v. 16, n. 4, p. 155-165, 2016.

DONDI, M. **Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados.** Cerâmica Industrial, v. 11, n. 3, p. 39, 2006.

EPE- Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional.** Brasil, 2016–Ano base 2015: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, EPE, 2016. Disponível em: < <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha.** Belo Horizonte: 2013. Disponível na internet em: <[http://www.feam.br/images/stories/producao\\_sustentavel/GUIAS\\_TECNICOS\\_AMBIENTAIS/guia\\_ceramica.pdf](http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf)>. Acesso: 09 de março de 2017.

FEIL, Norton Ferreira; NETO, Francisco José Kliemann. **Produção conjunta no processo de beneficiamento de carvão mineral: custos conjuntos.** Produto & produção, v. 9, n. 2, 2008.

FISKESJÖ, G. The Allium test – **an alternative in environmental studies: the relative toxicity of metal ions.** Mutation Research, v.197, n.2, p.243 – 260, 1988.

FONSECA, E. **Biblioteca Educação é Cultura: Carvão.** Rio de Janeiro, RJ: Editora Bloch, 1980. 61 p.

FUNGARO, Denise Alves; DE CIZIDORO, J. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão.** Química Nova, v. 29, n. 4, p. 735, 2006.

FRASSON, B.B., PELLEGRIN, T.P., MANTAS, P.Q. **Estudo da viabilidade de utilização da areia de fundição em massa de cerâmica vermelha.** In: 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense - SICT-Sul, Rev. Técnico Científica (IFSC), v. 3, n. 1, p. 688-698, 2012.

GALATTO, S.L., PETERSON, M., ALEXANDRE, N.Z., DA COSTA, J.A.D., IZIDORO, G., SORATO, L., LEVANTI, M. **Incorporação de resíduo do tratamento de drenagem ácida em massa de cerâmica vermelha.** Cerâmica, 55, P. 53-60, 2009.

GOULART FILHO, Alcides (Org.). **Memória e cultura do carvão em Santa Catarina.** Florianópolis: Cidade Futura, 2004. 400 p.

HUMMES, Rodrigo André *et al.* **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral em equipamentos de grandes dimensões.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2007.

IBRAM [ Instituto Brasileiro de Mineração]. **A Indústria da Mineração: Para o Desenvolvimento do Brasil e a Promoção da Qualidade de vida do Brasileiro.** 2014. disponível em: < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005649.pdf>>. Acesso em: 04 de março de 2017.

Institut de Promoció Ceràmica (Castellón). **Característica Técnicas: El Adoquín Cerámico Según EN 1344.** 2017.6 p.

IPEA [Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada]. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas.** 2012.

JOHN VM, AGOPYAN V. **Reciclagem de resíduos da construção.** São Paulo, SP, 2000, 13 p.

KAMYOTRA, J.S. Brick Kilns in India. **Presentation in Central Pollution Control Board at Anil Agarwal Dialogue 2015:** Poor in climate change, India Habitat Centre, New Delhi, March 11 – 12, 2015.

KARAS, R. L; **Relatório de Atividades: Parcial.** 2009. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Projeto11-Backfill.pdf>>. Acesso em: 30 mai 2017.

KAZMI, S.M.S., ABBAS, S., SALEEM, M.A., MUNIR, M.J., KHITAB, A. **Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes.** Construction and Building Materials, 120, p. 29–41, 2016.

KUMBHAR, S., KULKARNI, N., RAO, A.B., RAO, B. **Environmental Life Cycle Assessment of Traditional Bricks in Western Maharashtra, India,** *In:* 4th International Conference on Advances in Energy Research 2013, ICAER 2013. Energy Procedia, v. 54, p. 260 – 269, 2014.

LORYUENYONG, V., PANYACHAI, T., KAEWSIMORK, K., SIRITAI, C. **Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks.** Waste Management v. 29, n. 10, p. 2717–2721, 2009.

LUCAS, Denis; BENATTI, Cláudia Telles. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 1, n. 3, p. 405-418, 2008.

MALPESA. Adoquín Klinker Cerámico. 2010. Disponível em: <[http://www.malpesa.es/en/area\\_descarga.jsp](http://www.malpesa.es/en/area_descarga.jsp)> Acesso em: 30 mai 2017.

MANN, Harjinder Singh *et al.* **Experimental Investigation of clay fly ash bricks for gamma-ray shielding.** Nuclear Engineering and Technology, v. 48, n. 5, p. 1230-1236, 2016.

MARGULIS, Sérgio. **Uma avaliação econômica dos impactos ambientais decorrentes da produção de carvão mineral.** Pesquisa Planejamento Econômico 15 (1),1985.

MEDEIROS, E.N.M. **Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA.** Tese, Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF. 166p., 2010.

MEDEIROS, E. N. M. *et al.* **Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planejamento.** Cerâmica, v. 56, p. 399-404, 2010.

NANDI, V. S. *et al.* **Adição de Vidro Reciclado de Lâmpadas na Fabricação de Cerâmica Vermelha.** Revista cerâmica industrial, v. 19, n. 5, setembro/dezembro de 2014.

NASCIMENTO, F. M. F. *et al.* **Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina (Environmental Impacts in the water resource exploration in Santa Catarina).** In: Anais do Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte. 2002.

NUERNBERG, J. B. *et al.* **Caracterização da pirita quanto a danos ambientais, utilizando parâmetros físico-químicos e bioensaio.** 2017.

OLIVEIRA, Amando Alves. **Tecnologia em Cerâmica.** Criciúma-SC. Editora Lara, 2011, 176 p.

PETERSON, Michael *et al.* **Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na formulação de massa de uma indústria cerâmica do Sul-Catarinense, Brasil.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 11, n. 2, 2016.

PINHEIRO, Regina Maria. **Desenvolvimento de pavimento argiloso extrudado: Adoquim cerâmico.** 2012. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

PIERA, **Adoquín eco klinker brinck rojo,** 2017. Disponível em: <<http://www.pieraecoceramica.com/es/productos/adoquin-eco-klinker-brick-rojo/>>. Acesso em 25 abr. 2017.

QUINTANA, L.M.H., SOARES, J.M.D. **The use of Rice husk ash in the production of structural ceramics.** Construction & Environment – CIB2000, São Paulo-SP, 9 p, 2000.

RAJGOR, M.B., HAKWANA, A.H., PITRODA, J. **Automation in clay and thermal industry waste products.** International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), v.4 (7), p.2870-2877, 2013.

RAVAZZOLI, Cláudia *et al.* **As Mudanças no controle ambiental das minas ativas de carvão em Santa Catarina com a promulgação dos termos de ajustamento de conduta entre os anos de 2005 a 2010.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2012

RAVAZZOLI, Cláudia. **A problemática ambiental do carvão em Santa Catarina: sua evolução até os termos de ajustamento de conduto vigente entre os anos de 2005 e 2010**. Revista Geografia em questão, v. 6, n. 01, p. 179-201, 2013.

REDIVO, Rosimeri Venâncio. **Coordenação de Atualização do EIA/RIMA Empresa Rio Deserto**. 2010.

RESTREPO, Álvaro; BAZZO, Edson; MIYAKE, Raphael. **A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation**. Journal of Cleaner Production, v. 92, p. 179-186, 2015.

RIBEIRO, Manuel J.; FERREIRA, António AL; LABRINCHA, João A. **Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas**. Cerâmica Industrial, v. 8, n. 1, p. 37-42, 2003.

SEBRAE [Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas], **Cerâmica Vermelha: Panorama do mercado no Brasil**. Boletim Inteligente, 5 p., 2015.

SAEZ, Rafael Garcia. **Manual para El Uso Dell Adoquín Cerámico** .2005.

SIECESC , **Carvão Mineral – Dados estático**. Disponível em: <  
[http://www.siecesc.com.br/pdf/dados\\_estatisticos\\_ano\\_2015.pdf](http://www.siecesc.com.br/pdf/dados_estatisticos_ano_2015.pdf)> Acesso em: 30 mai 2017.

SILVA, João Paulo Souza. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista espaço da Sophia, v. 8, p. 1-13, 2007

SOARES, Paulo Sergio Moreira et al. **Carvão brasileiro: tecnologia e meio ambiente**. 2008.

SOUZA, KG de; MARTINS, L. R. **Recursos Minerais Marinhos: Pesquisa Lavra e Beneficiamento**. Gravel (Porto Alegre. CD-Rom), v. 6, p. 1, 2008.

SCHMIDT, C.W. **Modernizing Artisanal Brick Kilns: A Global Need**. Environ Health Perspect. 121(8): p. a242–a249, 2013.

Tolmasquim, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. – EPE: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <  
<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>> Acesso em: 10 abr. 2017.

VIEIRA, C. M. F.; SALES, H. F.; MONTEIRO, S. N. **Efeito da adição de argila fundente ílítica em cerâmica vermelha de argilas cauliníticas (Effect of illitic flux clay addition in red ceramic of kaolinitic clays)**. Cerâmica, v. 50, p. 239-246, 2004.

ZACCARON, A., GALATTO, S.L., NANDI, V.S., FERNANDES, P.F. **Incorporação de chamote na massa de cerâmica vermelha como valorização do resíduo**. Cerâmica Industrial, v. 19, n. 3, p. 33-39, 2014.

ZACCARON, A., BERNARDINA, M.B. *et al.* **Utilização de Vidro de Garrafas para Redução da Absorção de Água em Produtos de Cerâmica Vermelha.** *Cerâmica Industrial*, v. 21, n. 2, p. 6, 2016.

ZHANG, L. **Production of bricks from waste materials – A review**, *Construction and Building Materials*, 47, p. 643–655, 2013.

## APÉNDICE

## APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS LABORATORIAS

Retração Térmica Linear de Secagem (%).

Amostra	Retr. de secagem	Desvio Padrão
F1	9,26	0,76
F2	9,63	1,02
F3	5,69	0,31
F4	6,23	0,37
F5	7,94	0,70
F6	5,05	0,55
F7	5,87	0,66
F8	7,00	0,47
F9	4,14	0,57
F10	5,39	0,22

Fonte: Da autora, 2017.

Retração Térmica Linear de queima (%).

Amostra	Retr. De queima	Desvio Padrão
F1	1,01	0,26
F2	1,76	0,50
F3	1,84	0,31
F4	1,43	0,10
F5	2,18	0,39
F6	2,15	0,14
F7	1,92	0,21
F8	1,88	0,21
F9	2,29	0,29
F10	2,77	0,10

Fonte: Da autora, 2017.

Perda ao fogo

Amostra	Perda ao fogo	Desvio Padrão
F1	10,27	0,95
F2	7,41	0,50
F3	18,47	1,57
F4	7,87	0,29
F5	14,83	1,37
F6	14,52	0,72
F7	11,38	0,16
F8	10,52	0,19
F9	9,71	0,46
F10	15,07	0,29

Fonte: Da autora, 2017.

Absorção de água (%).

Amostra	Abs. de água	Desvio Padrão
F1	17,18	0,31
F2	23,31	0,94
F3	22,85	0,64
F4	20,28	0,24
F5	17,56	0,30
F6	22,28	0,22
F7	18,12	0,18
F8	17,72	0,13
F9	19,85	0,13
F10	20,11	0,07

Fonte: Da autora, 2017.

Resistência mecânica (MPa)

Amostra	Resistência Mecânica	Desvio Padrão
F1	36,33	2,41
F2	3,91	0,66
F3	12,87	2,71
F4	9,91	1,34
F5	23,86	2,04
F6	12,17	2,59
F7	13,85	1,37
F8	15,15	4,09
F9	10,00	1,59
F10	13,19	0,65

Fonte: Da autora, 2017.