UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

HENRIQUE FERNANDO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO PIRITOSO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE CARVÃO PARA OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO

CRICIÚMA 2018

HENRIQUE FERNANDO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO PIRITOSO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE CARVÃO PARA OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO

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

Orientador: Prof. Dr. Michael Peterson

CRICIÚMA 2018

HENRIQUE FERNANDO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DO REJEITO PIRITOSO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE CARVÃO PARA OBTENÇÃO DE TIJOLO ECOLÓGICO

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

Criciúma, 26 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Michael Peterson – Dr. – (UNESC) – Orientador
Camila Machado de Oliveira – Ma. – (UFSC)
Prof. Sergio Luciano Galatto – Me. – (UNESC)

Dedico este trabalho a minha família e meus amigos que foram meu suporte durante toda esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por me darem apoio e condições de estar cursando esta graduação.

Ao Prof. Dr. Michael Peterson, pela paciência, apoio e confiança que depositou em minhas ideias.

Aos funcionários do meu local de estágio, que deram total apoio em todas as etapas deste projeto.

Aos amigos e colegas que me apoiaram durante a escrita deste trabalho.

Ao Técnico de Laboratório Fábio Elyseu, pelo apoio e ajuda, sem o qual não conseguiria realizar este trabalho.

"A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância." Mahatma Gandhi

RESUMO

Devido a grande quantidade de rejeito contida no ROM (run-of-mine / minério bruto), proveniente da mineração de carvão e a deposição incorreta da fração piritosa, o sul do estado de Santa Catarina vem sofrendo contaminações do solo, ar e água, interferindo na vida humana e no habitat de animais da região. Buscando alternativas para amenizar o problema, estudou-se maneiras de usar esse rejeito como matéria-prima. Por meio de análise térmica, mineralógica, química e tratamento térmico de calcinação, pode-se conhecer o comportamento do material. Por meio da montagem de um planejamento experimental 2³, pode-se definir a fração amostral de dois níveis e três variáveis, que foram o tamanho de partícula da amostra, a atmosfera do forno de termogravimetria (TG) e a taxa de aquecimento deste forno. A pirita, ao ser submetida a uma calcinação eficiente, transforma-se em hematita e libera gás tóxico de dióxido de enxofre. Com a difratometria de raios x, pode-se comprovar que o tratamento térmico foi eficiente para formação de hematita. O produto dessa calcinação se mostrou satisfatório quando incorporado como matéria-prima em um tijolo ecológico de mistura solo-cimento.

Palavras-chave: Pirita. Hematita. Tijolo Ecológico. Calcinação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivo específico	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	CARVÃO MINERAL NO BRASIL	14
2.2	INDÚSTRIA CARBONÍFERA EM SANTA CATARINA	15
2.3	CARVÃO MINERAL E O MEIO AMBIENTE	17
2.3.1	Ação civil pública do carvão	17
2.3.2	Indicadores ambientais	19
2.3.3	Passivos ambientais	21
2.3.4	Rejeito do carvão mineral	23
2.4	ANÁLISE MINERALÓGICA	26
2.5	ANÁLISE TÉRMICA	27
2.5.1	Análise térmica diferencial (ATD)	27
2.5.2	Termogravimetria (TG)	29
2.6	OXIDAÇÃO TÉRMICA DA PIRITA	30
2.7	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	31
2.8	TIJOLO ECOLÓGICO	32
2.8.1	Escolha do solo	33
2.8.2	Dosagem do cimento e obtenção da massa	33
2.8.3	Prensagem e cura	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	35
3.2	ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO PROJETO	35
4	RESULTADOS	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	49
4.2	ANÁLISE MINERALÓGICA	50
4.3	ANÁLISE TÉRMICA	52
4.4	CALCINAÇÃO	54
4.5	PRODUÇÃO DO TIJOLO ECOLÓGICO	55
5	CONCLUSÃO	58
6	SUGESTÕES	59

REFERÊNCIAS	60
-------------	----

1 INTRODUÇÃO

A descoberta do carvão mineral se deu no século XVII e desde então sua utilização pelo homem passou a ter grande destaque, por identifica-lo como uma matéria-prima para produção de energia, que poderia ser empregada na locomoção de máquinas. Devido a isso, o mineral tem grande participação na história do desenvolvimento tecnológico de diversos setores industriais.

Além de trazer o desenvolvimento tecnológico a vários setores e alavancar o crescimento econômico do país, mais significativamente para a região sul, a extração desse mineral de forma não regulamentada e desenfreada trouxe uma série de problemas ambientais causados pela deposição incorreta do rejeito proveniente da extração de carvão, que perduram até os dias atuais.

O rejeito da mineração de carvão é caracterizado pela presença da pirita, sendo esta extremamente prejudicial ao meio ambiente, gerando drenagem ácida de mina, produção de gases tóxicos e contaminação do solo, quando em contato com a água e o ar.

Dessa forma, o ponto principal deste trabalho compreende a agregação de valor ao rejeito piritoso, bem como propor o uso do mesmo como matéria-prima para a confecção de um tijolo ecológico de mistura solo-cimento-rejeito calcinado. O tijolo ecológico se mostra como uma opção viável e que pode ser avaliada por meio de testes laboratoriais.

Diante dos fatos expostos, foram realizadas análises térmicas, mineralógica e química para conhecimento do rejeito. A proposta de uso desse rejeito gerou as seguintes questões:

- Quais são os problemas ambientais gerados pelo rejeito piritoso oriundo da mineração de carvão?
- Qual proporção de solo-cimento-rejeito deve ser utilizada na fabricação do bloco?
- Quais os compostos presentes no rejeito calcinado? Eles podem prejudicar a integridade do bloco?
- Quais as características do bloco produzido quando comparado ao tijolo convencional?

1.1 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados os objetivos geral e específicos que se desejam alcançar com este trabalho de pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o rejeito piritoso proveniente da mineração de carvão por meio de análises laboratoriais e realizar um estudo de aproveitamento do subproduto deste rejeito obtido por meio da calcinação.

1.1.2 Objetivo específico

- Realizar análises laboratoriais físico-químicas no rejeito;
- Caracterizar o rejeito por TG (termogravimetria) com análise dos gases por espectrometria no infravermelho;
- Encontrar aplicação para o material;
- Testar experimentalmente a aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão descritos os princípios que modelam a base deste trabalho de pesquisa. Os principais tópicos abordados foram: carvão mineral no Brasil, indústria carbonífera em Santa Catarina, carvão mineral e o meio ambiente, caracterização por meio de análises térmicas, experimento fatorial e tijolo ecológico.

2.1 CARVÃO MINERAL NO BRASIL

O carvão mineral é um minério não metálico, classificado como um combustível fóssil. Apesar de ser um mineral não renovável, dentre os combustíveis fósseis, este se sobressai por ter a maior reserva natural do planeta. No Brasil, são encontradas reservas de carvão dos tipos linhito e sub-betuminoso, que se caracterizam pelo teor de carbono de 67% a 78% e 80% a 85%, respectivamente (BRANCO, 2014).

As maiores jazidas estão localizadas no estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, seguidos de Paraná e São Paulo. No ranking mundial, as reservas brasileiras ocupam o décimo lugar, totalizando 7 bilhões de toneladas, o que corresponde a 1% das reservas mundiais (ANEEL, 2008).

Da totalidade de reservas nacionais, Rio Grande do Sul corresponde a um total de 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. A jazida de Candiota, localizada no Rio Grande do Sul, possui o equivalente a 38% das reservas brasileiras (ANEEL, 2008).

O carvão mineral produzido no Brasil não possui boa qualidade, por apresentar uma baixa concentração de carbono e um alto teor de cinzas. A produção do mineral é insuficiente comparada à demanda necessária, portanto, o país importa cerca de 50% do total que é consumido anualmente (FRANCISCO, [20--?]).

Em 2010, foram consumidas cerca de 20 milhões de toneladas de carvão, sendo que destas, 14,2 milhões de toneladas foram importadas. Dos 20 milhões consumidos no ano em questão, 4,4 milhões de toneladas foram usadas para a geração de energia elétrica e o restante foi usado na indústria (BRASIL, 2011).

O carvão mineral é usado de forma mais significativa no ramo de siderurgia, porém, 98% do material usado é importado, devido à maior qualidade em termos de poder calorífico (BRASIL, 2011). Já na matriz de energia elétrica, o minério tem 1,5%

de participação. Em 2007, foram produzidos 435,68 TWh no país e o carvão foi responsável por 7,9 TWh do total, sendo estes oriundos de usinas termoelétricas localizadas na região sul do país, onde também se localizam as principais reservas do minério (ANEEL, 2008).

2.2 INDÚSTRIA CARBONÍFERA EM SANTA CATARINA

O carvão mineral em Santa Catarina foi descoberto no ano de 1822 pelos tropeiros que usavam a Serra do Rio do Rastro (na época conhecida como Serra do 12) para conduzir tropas de gado do Rio Grande do Sul até Sorocaba, em São Paulo (BELOLLI; QUADROS; GUIDI, 2002 e SCHNEIDER, 2008).

Os indígenas da região já conheciam essas pedras que queimavam. No entanto, os tropeiros que observaram esse material e reconheceram que teria um valor econômico. Os tropeiros acampavam no meio do caminho e usavam essas pedras pretas como "tripé" para um fogão improvisado, quando notaram que elas entravam em combustão e se reduziam a cinzas (BELOLLI; QUADROS; GUIDI, 2002).

A notícia sobre a pedra que queimava despertou o interesse da corte, levando a mesma a investir em pesquisas na região sul de Santa Catarina. Na época, chegou-se à conclusão de que o carvão catarinense era de boa qualidade. Os resultados positivos advindos dos estudos bastaram para que em 1876, o Visconde de Barbacena viesse a realizar a primeira tentativa de exploração comercial do carvão mineral na cidade de Lauro Müller (BELOLLI; QUADROS; GUIDI, 2002 e SCHNEIDER, 2008).

A primeira tentativa de lavra foi realizada por uma empresa de origem britânica, que não teve grande impacto na indústria, devido à baixa qualidade do produto. Com a eclosão da 1° Guerra Mundial (em 1914), houve um crescimento da produção de carvão mineral na região, fazendo com que empresas nacionais entrassem no ramo de mineração. Na região, as empresas foram a Companhia Carbonífera Urussanga, de 1918, e a Companhia Carbonífera Próspera, em 1921. Mais tarde, no Governo Vargas, foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em 1946. Além da implementação da CSN, no período 1940-1960, era muito significativa a presença de pequenos produtores na atividade de mineração (KOPPE; COSTA, 2008).

Em 1970, havia apenas 11 empresas em atividade na região, sendo a maioria pertencia a empresários da região. Com a primeira crise mundial do petróleo (1973), o governo investiu na indústria carboquímica, por conta das necessidades nacionais de combustível fóssil importado. Foram criadas linhas de crédito para implantar nas minas o que havia de mais novo e moderno em tecnologia. Esse programa foi responsável pelo rápido crescimento na produção do minério (SCHNEIDER, 2008 e KOPPE; COSTA, 2008).

A crise do petróleo veio a favorecer e garantir o desenvolvimento da lavra de carvão até meados de 1990, época em que o Estado interveio menos na atividade, chegando a desobrigar que as siderúrgicas comprassem o carvão metalúrgico nacional, o que acarretou em uma crise na atividade de mineração (SCHNEIDER, 2008 e KOPPE; COSTA, 2008).

Em relação ao ano de 1999, a produção de carvão mineral cresceu 58% nos anos 2000, quando foram produzidos 3 milhões e 643 mil ton/ano. O setor acompanha quedas e aumentos na produção de ROM nos últimos anos, conforme pode ser visto na Tabela 1 (SIECESC, [2017]).

Tabela 1 – Produção bruta (ROM) em toneladas.

Tabela i Trodução bruta (NOM) em toriciadas.						
Ano	Santa Catarina					
2010	6.278.327					
2011	6.570.292					
2012	6.097.496					
2013	7.756.568					
2014	6.946.549					
2015	6.507.617					
2016	6.207.149					

Fonte: SIECESC, 2016.

A indústria de carvão mineral é de suma importância para o desenvolvimento e a economia da região sul do país. Atualmente existe uma empresa em atividade no Paraná, três no Rio Grande do Sul e dez empresas em Santa Catarina. A indústria do carvão gera em torno de cinco mil empregos diretos e a cadeia termelétrica gera cerca de 53 mil empregos, aproximadamente (ZANCAN; MINERAÇÃO, 2017).

A indústria catarinense tem um papel importante na mineração de carvão mineral no âmbito nacional, porém, devido as suas características, não vem a ser o produto mais satisfatório. Através de um levantamento, verificou-se que o carvão catarinense tem uma baixa qualidade, dado o fato que cerca de 25% da produção de carvão bruto é beneficiável e os 75% restantes são caracterizados como rejeito (GOULART FILHO, 2007).

O carvão catarinense tem elevado teor de cinza e enxofre e sua qualidade muda do sul para o norte: o teor de cinza diminui e o de enxofre aumenta. O mesmo também possui um caráter metalúrgico de grande potencial, possibilitando a produção de coque, principalmente se extraído da camada Barro Branco (CHAVES, 2008).

Listam-se como as características do mineral extraído em Santa Catarina:

• Enxofre: 4,3% a 4,7%;

Cinzas: 58% a 62%;

Carbono: 21% a 26%;

Poder calorífico: 2750 kcal/kg (TEIXEIRA; SANTANA, 2008).

2.3 CARVÃO MINERAL E O MEIO AMBIENTE

Com a desregulamentação do uso do carvão metalúrgico no ano de 1990, o setor carbonífero sofreu as consequências diretamente em seu faturamento, reduzido em 60%. Quando a construção da Usina Jorge Lacerda IV foi finalizada em 1997, o segmento carbonífero se estabilizou novamente (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Com o objetivo de recuperação de danos ambientais que foram causados por uma mineração de carvão realizada de maneira irresponsável e sem preocupação com o impacto gerado, no ano de 1993, o Ministério Público Federal (MPF) decidiu entrar com uma ação civil pública (ACP) que desfavorecia as empresas carboníferas, sócios, diretores, o Estado de Santa Catarina e a União Federal (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

2.3.1 Ação civil pública do carvão

Em janeiro do ano 2000, a sentença da ACP foi proferida e os réus foram condenados. Ficou a cargo dos réus condenados a apresentação de projetos de

recuperação ambiental da região que está inserida da Bacia Carbonífera do Sul do Estado, abrangendo, segundo o Grupo Técnico de Assessoramento (2007, p.3):

[...] as áreas de depósitos de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto e minas abandonadas, bem como o desassoreamento, fixação de barrancas, descontaminação e retificação dos cursos d'água, além de outras obras que visem amenizar os danos sofridos principalmente pela população dos municípios-sede da extração e do beneficiamento.

Entre o ano 2000 e 2004, algumas empresas começaram as atividades de recuperação e outras solicitaram que o prazo para cumprimento da sentença fosse aumentado. O prazo foi ampliado para dez anos para recuperação de bacias hidrográficas e lagoas, porém, o prazo para recuperação de área terrestre foi mantido em três anos da sentença. Ainda em 2004, o MPF formou uma equipe técnica para realizar levantamento de dados, vistorias e avaliação dos projetos anexados ao processo. A equipe identificou que no ano de 2004, havia 191 áreas que necessitavam de recuperação e que destas, apenas 68 tiveram projetos de recuperação apresentados pelas partes. Porém, grande parte desses, apresentava inconsistências e deficiências técnicas, bem como nenhuma padronização (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Com a reorganização da atuação do MPF junto ao cumprimento da sentença, foi possível que junto ao juiz, em abril de 2006, fosse deferido o pedido que determinava a apresentação de novos projetos de recuperação por parte dos réus. Esses novos projetos deveriam atender, segundo o Grupo Técnico de Assessoramento (2007, p.3):

[...] as normas técnicas – NBR 13030, e com os itens NRM-01 (normas gerais) e NRM-21 (reabilitação de áreas pesquisadas, mineradas e impactadas) da Portaria do DNPM nº 237, de 18/10/2001 [...].

Foram concedidos quatro meses para que os novos projetos fossem apresentados. Após o prazo concedido, os mesmos foram apresentados e analisados pelo MPF e FATMA (Fundação do Meio Ambiente). Instituiu-se também o Grupo Técnico de Assessoramento à Sentença (GTA), composto por representantes técnicos das partes, unindo esforços técnicos para maximizar os resultados obtidos pelos projetos propostos (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Ainda em 2006, as partes, em conjunto, apresentaram uma proposta de indicadores ambientais e plano de monitoramento. Os indicadores ambientais

propostos foram julgados suficientes para determinar a qualidade da recuperação ambiental solicitada na ACP, englobando a recuperação de áreas de rejeito, áreas mineradas a céu aberto, minas abandonadas, assim como a qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

2.3.2 Indicadores ambientais

Deste 2006, o Grupo de Assessoramento à Sentença vem fazendo o monitoramento dos indicadores ambientais que foram acordados nos autos do processo, apresentando estes dados na forma de relatórios anuais (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, cobertura do solo e meio biótico tiveram indicadores ambientais atrelados, bem como um plano de monitoramento destes indicadores (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Para os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, foram elencados os indicadores listados na Tabela 2:

Tabela 2 – Indicadores para recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Aquífero Rio Bonito e Legues Aluviais)

RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS	RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS		
Precipitação regional	Precipitação regional		
Vazão	Nível estático		
рН	рН		
Ferro total	Alcalinidade total		
Manganês total	Condutividade		
Acidez total	Ferro total		
Oxigênio dissolvido	Manganês total		
Condutividade	Acidez total		
Alumínio total	Cálcio total		
Sulfatos	Sódio total		
Temperatura	Potássio total		
	Sulfato		
	Magnésio total		
	Cloro total		
	Alumínio total		

Fonte: Grupo Técnico de Assessoramento, 2007.

Os indicadores de recursos hídricos superficiais foram monitorados através em 140 pontos de monitoramento distribuídos nas três bacias hidrográficas (Araranguá, Urussanga e Tubarão) (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Para o monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos, foram instalados três poços na bacia do rio Araranguá e dois poços na bacia do rio Urussanga (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

Para realizar o monitoramento da cobertura do solo, foi observada a situação encontrada nas áreas degradadas em questão, por meio de cartografia, imagens digitais e sistemas de processamento e armazenamento de informações geográficas, em conjunto com a validação das informações, realizadas em campo. A bacia carbonífera foi dividida em 18 distritos devido a sua grande área. Os distritos e sua identificação podem ser vistos na Tabela 3:

Tabela 3 – Divisão dos Distritos da Bacia Carbonífera e suas numerações

DISTRITOS					
00 – MORRO DA PALHA	09 – SIDERÓPOLIS				
01 – RIO HIPÓLITO	10 – CRICIÚMA NORTE				
02 – LAURO MULLER	11 – CRICIÚMA SUL				
03 – BARRO BRANCO	12 – LINHA BATISTA				
04 – SANTANA	13 – MINA 4				
05 – FORQUILHA	14 – SANGÃO				
06 – RIO CARVÃO	15 – VERDINHO				
07 – TREVISO	16 – IÇARA				
08 – RIO DESERTO	17 – ESTIVA DOS PREGOS				

Fonte: Grupo Técnico de Assessoramento, 2007.

Com o intuito de verificar a qualidade ambiental das obras de recuperação, fez-se necessário o monitoramento da fauna ictiológica, a avifauna, a mastofauna e também a flora em áreas recuperadas ou em processo de recuperação (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2007).

2.3.3 Passivos ambientais

Durantes décadas o Estado de Santa Catarina sofreu com a atividade de extração de carvão sem uma legislação específica, gerando rejeitos acumulados por toda a região sem os cuidados necessários, transformando o meio ambiente em um cenário de desastre. O Decreto federal nº 85206/80 sinalizou a região sul de Santa Catarina como a 14ª Área Crítica Nacional, para efeitos de controle da poluição gerada pelo setor carbonífero (MILIOLI et al., 2004).

Segundo Sanchéz (2001), a base de conhecimento que temos sobre passivo ambiental veio emprestada das Ciências Contábeis. Inicialmente, o passivo ambiental seria a representação de um valor monetário que se faz necessário para a recuperação e reparação dos danos ambientais causados. Considerado dessa forma, o custo estimado dessa recuperação ambiental pode ser incluído nos balanços financeiros da empresa.

O conceito ganhou força quando o custo de reparação da degradação ambiental começou a ser levado em consideração para calcular o valor de uma empresa, para efeitos de venda, privatização ou fusão com outra companhia. O

emprego do termo "passivo ambiental" também é utilizado para indicar a soma de danos ambientais causados por ações humanas ou determinadas atividades, impossibilitando muitas vezes, sua avaliação econômica. Em um sentido figurado, pode ser descrito como uma "dívida" para com as próximas gerações (SÁNCHEZ, 2001).

Em agosto de 2007, foram divulgados os dados do primeiro relatório do Grupo Técnico de Assessoramento, referente a Ação Civil Pública do carvão, onde constatou-se um total de 6171,24 hectares de área degradada. Em 2017, um novo relatório foi realizado pelo GTA, com informações recolhidas das empresas da região, podendo-se assim fazer um balanço das áreas degradadas pela atividade de extração do carvão, distribuídas nos distritos da bacia carbonífera (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2017). O relatório pode ser visto na Tabela 4:

Tabela 4 – Áreas impactadas por distrito conforme status atual

DISTRITO	NÃO	ĖM	EM	OBRAS	Hectares
	INICIADO	EXECUÇÃO	MONITORAMENTO	ENCERRADAS	
00- Morro da Palha	-	-	16,47	-	16,47
01- Rio Hipólito	6,42	8,78	22,07	-	37,27
02- Lauro Muller	319,76	11,22	102,91	-	433,89
03- Barro Branco	122,48	56,12	102,99	-	281,59
04- Santana	490,64	27,89	7,82	-	526,35
05- Forquilha	58,96	74,87	0,59	-	134,42
06- Rio Carvão	308,98	97,59	0,71	-	407,28
07- Treviso	117,79	24,80	296,16	-	438,75
08- Rio Deserto	-	45,39	-	-	45,39
09- Siderópolis	200,25	221,09	491,69	-	913,03
10- Criciúma Norte	60,88	56,64	122,02	-	239,54
11- Criciúma Sul	3,95	21,32	181,97	2,03	209,27
12- Linha Batista	-	42,40	•	-	42,40
13- Mina 4	-	80,95	0,72	-	81,67
14- Sangão	192,22	120,41	-	-	312,63
15- Verdinho	-	3,74	-	-	3,74

16- Içara	51,87	-	10,3	-	62,17
17- Estiva dos Pregos	91,42	136,35	11,13	-	238,9
18- Caeté	1,93		3,77	-	5,7
Total	2027,55	1029,56	1371,32	2,03	4430,46

Fonte: Grupo Técnico de Assessoramento, 2017.

Além dos 4430,46 ha de áreas impactadas e que se encontram em diversos status de recuperação, soma-se também neste valor um total de 6,09 ha do distrito Criciúma norte, que não teve o status de recuperação divulgado (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2017).

De acordo com as informações disponibilizadas pelas empresas, existem 41,10 hectares de área de sobreposição, onde duas empresas ou mais assumem a responsabilidade conjunta. Descontando a sobreposição e acrescentando outros dados, o balanço de áreas tem o seguinte resultado:

- 764,49 ha de áreas ocupadas por pátios em operação;
- II. 4436,54 ha de áreas impactadas assumidas pelas empresas;
- III. 968,47 ha de áreas ocupadas pela urbanização (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2017).

Dessa forma, a diferença entre o monitoramento de cobertura do solo, equivalente a 6503,74 ha e o somatório das áreas impactadas assumidas pelas empresas, das áreas ocupadas por pátios em operação e áreas ocupadas pela urbanização (6169,5 ha), correspondem a áreas órfãs, ou seja, um total de 334,24 ha que ainda não foram atrelados a um responsável pela sua recuperação. Além dos distritos listados em 2007, o Distrito de Caeté foi incluído por ter áreas impactadas. (GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO, 2017).

2.3.4 Rejeito do carvão mineral

As atividades de mineração realizadas nas décadas passadas não foram conduzidas com o devido planejamento e cuidados para com o meio ambiente e sua posterior recuperação. O material estéril que cobria o local de mineração, e o rejeito foram dispostos sem controle por toda a região. Muitas dessas áreas foram simplesmente abandonadas, o que veio a acarretar em outros problemas, como drenagem ácida de mina, impacto visual, liberação de gases tóxicos para a atmosfera

e erosão do solo. Esses impactos vêm sendo causados por essas áreas até os dias de hoje (SOARES, SANTOS, POSSA, 2008).

No Distrito de Santana, localizado em Urussanga – SC, pode-se ver a ação que a deposição indevida pode causar e a magnitude de material depositado, conforme ilustra a Figura 1. Mesmo após décadas, o material depositado no local continua sendo nocivo ao meio ambiente.



O contato do rejeito piritoso com o ar e a água forma ácido sulfúrico pela sua oxidação. O produto dessa oxidação é conhecido como drenagem ácida de mina (DAM), que pode ser vista na Figura 2 (CHAVES, 2008).



Figura 2 – Deposição de rejeito e formação de DAM, Distrito de Santana, Urussanga – SC.

Fonte: Do autor, 2018.

A pirita é o principal constituinte do rejeito de carvão. O próximo tópico mostra a classificação do rejeito usado neste trabalho de pesquisa, conforme a norma ABNT NBR 10004:2004, que trata da classificação de resíduos sólidos.

A classificação do rejeito, realizada por meio da norma ABNT NBR 10004:2004, baseia-se no processo ou atividade que lhe deu origem, assim como suas características e composição química e a posterior comparação dos constituintes do rejeito com resíduos e substâncias que têm seu poder de impacto ao meio ambiente e ao ser humano conhecido (ABNT, 2004).

O rejeito utilizado neste trabalho é o rejeito piritoso com teor de pirita de 70,7%, concentrado pelo beneficiamento, e a sua classificação pode ser feita pela Figura 3.

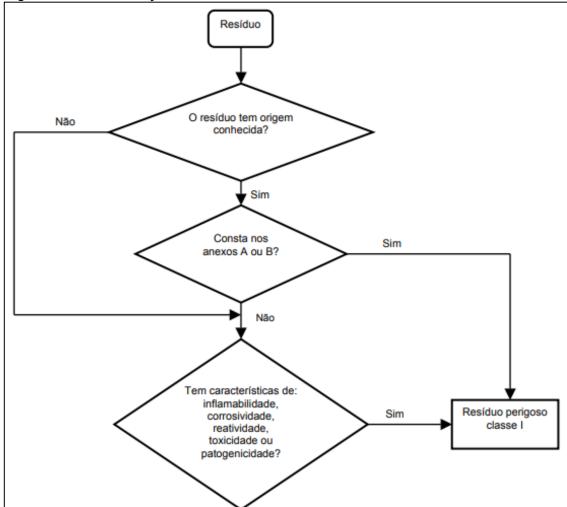


Figura 3 – Classificação conforme a ABNT NBR 10004:2004.

Fonte: ABNT, 2004.

Como o resíduo tem origem conhecida, não consta no Anexo A e B da norma e tem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade, classifica-se como resíduo perigoso classe 1.

2.4 ANÁLISE MINERALÓGICA

Na área de análise mineralógica, a técnica de difração de raios-x (DRX) se destaca como sendo a principal em caracterização e identificação de fases cristalinas presentes nos mais diversos minerais (RESENDE et al., 2011).

A técnica de DRX é a mais poderosa ferramenta para estudo de minerais em geral, pois permite a identificação dos mesmos, além da caracterização de matérias primas (RESENDE et al., 2011).

Esse método de análise constantemente tem seus horizontes ampliados quanto a identificação e caracterização (grau de cristalinidade, tamanho, substituintes isomórficos) dos componentes cristalinos que formam os mais diversos materiais. A técnica apresenta confiabilidade em seus resultados e possibilita analisar materiais compostos por mistura de fases (RESENDE et al., 2011).

2.5 ANÁLISE TÉRMICA

As técnicas de análise térmica citadas a seguir são de extrema importância para caracterizar as propriedades dos materiais. Outros métodos de análise aliados aos métodos de análise térmica podem proporcionar o total entendimento do comportamento de um material complexo, conciliando, suas propriedades térmicas à sua estrutura (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

As técnicas citadas a seguir são a Análise Térmica Diferencial (ATD) e a Termogravimetria (TG).

2.5.1 Análise térmica diferencial (ATD)

Análise térmica diferencial (ATD) é uma técnica térmica onde se mensura a diferença de temperatura entre a amostra e uma substância de referência termicamente inerte, na qual ambas são expostas ao aquecimento ou ao resfriamento dentro de um forno (Figura 4). Essas medições de temperatura são diferenciais, uma vez que se registra a diferença entre a temperatura da referência e a da amostra, sendo, em função da temperatura ou do tempo, ao passo que o aquecimento ou resfriamento sempre é realizado de maneira linear (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

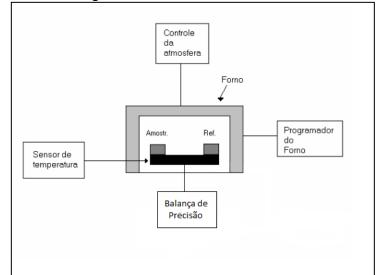
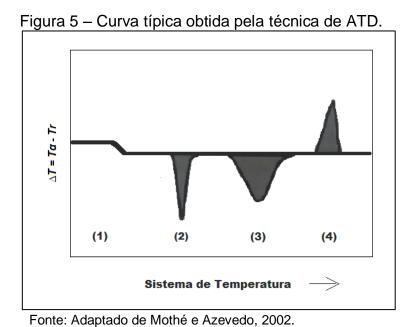


Figura 4 – Fluxograma de um Sistema Térmico Diferencial.

Fonte: Adaptado de Ionashiro, 2004.

Com a aplicação dessa técnica, é possível fazer o acompanhamento dos efeitos do calor em conjunto com as alterações físicas ou químicas da amostra, como transições de fase (fusão ebulição, sublimação, solidificação, inversões de estruturas cristalinas) ou reações de desidratação, de dissociação, de decomposição, de óxidoredução e outras que são capazes de causar variações de calor. Em geral, transições de fase, desidratações, reduções e algumas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações, oxidações e certas reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos (IONASHIRO, 2004 e MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).



Pode-se ver uma curva típica de ATD na Figura 5, onde são identificados quatro tipos de transições: (1) transição de segunda ordem detectada com mudança horizontal na linha base; (2) pico endotérmico causado pela fusão ou transição da fusão; (3) pico endotérmico devido a reações de decomposição ou dissociação; (4) pico exotérmico causado por mudança da fase cristalina. Conforme o número, forma e posição do conjunto de picos endotérmicos e exotérmicos, em função da temperatura, é possível identificar qualitativamente uma determinada substância. Já que a área do pico é proporcional à mudança de calor envolvido, a técnica se faz satisfatória para determinações parcialmente quantitativas ou, às vezes, quantitativas do calor de reação (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Assim, essa técnica pode ser útil para identificar de maneira qualitativa e quantitativa compostos inorgânicos e orgânicos, como argilas, minerais, metais, materiais poliméricos e outras substâncias (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

2.5.2 Termogravimetria (TG)

A termogravimetria baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, decorrente de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) que pode ser em função do tempo ou da temperatura. A técnica foi usada pela primeira vez em 1907 por P. Tuchot, que realizou o levantamento das curvas de decomposição térmica de piritas (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

De maneira simplificada, pode se dizer que a termogravimetria se caracteriza como um processo contínuo que mede a perda ou ganho de massa de uma substância ou material em função do tempo e/ou temperatura, representados por curvas tervogravimétricas (Figura 6) (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

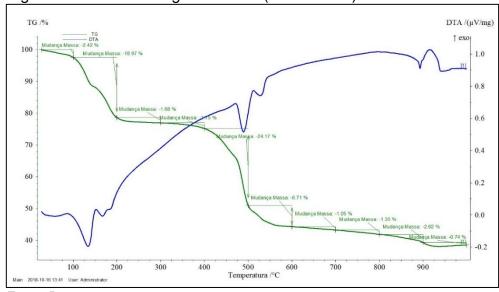


Figura 6 – Curva termogravimétrica (curva verde).

Fonte: Do autor, 2018.

A técnica de termogravimetria é empregada constantemente na caracterização do perfil de degradação de polímeros e outros diversos materiais. A exposição a altas temperaturas pode, em alguns casos, alterar a estrutura química e, em decorrência disso, alterar as propriedades físicas dos materiais. As curvas obtidas da TG são empíricas, pois a variação destas vai depender da amostra e do equipamento utilizado. Isso dificulta a comparação entre resultados de diferentes laboratórios (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

Em uma curva termogravimétrica de único estágio, a perda de massa é caracterizada por duas temperaturas. A temperatura inicial de decomposição, é a temperatura que a variação de massa acumulada é inserida e detectada pela balança. A temperatura final imputada no experimento é a temperatura na qual a variação de massa acumulada chega em seu valor máximo de decomposição, correspondendo ao término da reação. A diferença entre a temperatura inicial e final é conhecida como intervalo de reação. Quanto menor for o intervalo de reação, mais estável é o material à decomposição térmica (MOTHÉ; AZEVEDO, 2002).

2.6 OXIDAÇÃO TÉRMICA DA PIRITA

A oxidação de sulfetos foi estudada para a obtenção de ácido sulfúrico. Em uma atmosfera oxidante, o sulfeto de ferro se transforma em outros produtos, de acordo com a temperatura e as características da atmosfera em relação ao O₂ e SO₂,

que são gases que participam da reação de oxidação (NISHIHARA, KONDO, 1958 apud PETERSEN, 2008, p. 43).

A oxidação foi estudada e por este estudo, foram obtidos produtos como Fe₂O₃, Fe₃O₄. A atmosfera usada no estudo se caracterizou por ser oxidante, com a composição gasosa formada por O₂, SO₂ e N₂ (NISHIHARA, KONDO, 1958 apud PETERSEN, 2008, p. 43).

A análise de resultados mostra que entre 700 e 900 $^{\circ}$ C, ocorreu uma decomposição térmica com taxa de reação maior. A obtenção desses resultados se deu em uma pequena pressão parcial de O_2 . O produto resultante desta reação é o $S_{2(g)}$ e FeS_{1+x} , e estes somente podem ser obtidos em uma atmosfera praticamente inerte (NISHIHARA, KONDO, 1958 apud PETERSEN, 2008, p. 43).

As reações químicas a seguir ocorreram simultaneamente a uma temperatura entre 550 e 650 °C (NISHIHARA, KONDO, 1958 apud PETERSEN, 2008, p. 43).

$$FeS_2 \to FeS_{1+x} + \left[\frac{(1-x)}{2}\right]S_{2(g)}$$

$$FeS_{1+x} + \left[\left(\frac{7}{2}\right) + 2x\right]O_2 \to \frac{1}{2}Fe_2O_3 + (1+x)SO_2$$

$$FeS_2 + \frac{11}{4}O_2 \to \frac{1}{2}Fe_2O_3 + 2SO_2$$

2.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental é caracterizado por um agrupamento de ensaios estabelecidos através de critérios científicos, para que seja determinada a significância de uma ou diversas variáveis nos resultados obtidos de um processo ou sistema. Resumidamente, pode-se dizer que o planejamento experimental é o estudo da influência de uma variável na resposta final obtida (BUTTON, 2005 apud DUARTE; MEOLA, 2007, p. 6).

O planejamento experimental normalmente é representado por b^k , onde "k" representa o número de fatores e "b" representa o número de níveis escolhidos. Nesse caso, o planejamento experimental fica mais simples ao se selecionar um

experimento de apenas dois níveis, representado por 2^k . Sendo assim, se um planejamento contar com um experimento de dois níveis e três fatores, representado por 2^3 , serão realizados oito experimentos diferentes. As variáveis são definidas em níveis superiores (+) e inferiores (-), de maneira aleatória, conforme exemplo ilustrado na Figura 8 (CUNICO; MIGUEL; ZAWADZKI, 2008).

Figura 8 – Exemplo de Experimento Fatorial 2³

Tempe	ratura (°C)	Concentração (%)		Cat	alisador	
-	+	-	+	-	+	
160	180	20	40	Α	В	
	F:	atores C	odif cados			
Tem	peratura	Cor	centração	Cat	alisador	Resposta (y)
	-		-		-	60
	+		-		-	72
	-		+		-	54
	+		+		-	68
	-	-		+		52
	+	-			+	83
-		+			+	45
+		+			+	80
Níveis dos fatores						
Temperatura		Concentração		Cat	alisador	Resposta (y)
160		20			Α	60
180		20			Α	72
160		40			Α	54
180		40			Α	68
160		20			В	52
180		20			В	83
160		40			В	45
180		40			В	80

Fonte: https://www.escolaedti.com.br/como-implementar-um-experimento-fatorial/>

Para avaliar a linearidade da resposta para os fatores ou a existência de uma curvatura na variável resposta do experimento, também é acrescentado um ponto central no planejamento, ou seja, o nível 0 entre os níveis superiores e inferiores. O experimento de ponto central é replicado três vezes para que se possa ter uma estimativa de erro (MAYER, 2015).

2.8 TIJOLO ECOLÓGICO

O tijolo ecológico é conhecido por este nome porque a sua produção é completamente sustentável, pois o mesmo não necessita de queima, como o tijolo convencional, necessitando apenas de tempo de cura em temperatura ambiente, protegido do sol e chuva (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

A produção de tijolos convencionais cerâmicos é realizada em olarias, onde há a queima de madeira oriunda de desmatamento, além da emissão de gases tóxicos. Em contrapartida, a produção do tijolo ecológico se utiliza apenas de solo, cimento e procedimentos de umidade para a formação do produto e sua resistência. Além de usar somente o sistema solo-cimento, podem ser inseridas diversas matérias-primas, como bagaço de cana e resíduos siderúrgicos (IDEA BRASIL, 2018).

2.8.1 Escolha do solo

Para escolher o solo ideal para a produção do tijolo ecológico, são recomendadas as análises listadas a seguir:

- Exame visual: analisar a cor e composição da amostra;
- Exame de odor: detectar a presença de matéria orgânica;
- Exame tátil: identificar a composição do tamanho dos grãos do material;
- Teste de retração: para descobrir se o solo é adequado para a produção (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

Com essas análises preliminares, pode-se escolher o solo adequado para compor a massa do tijolo ecológico.

2.8.2 Dosagem do cimento e obtenção da massa

Para fabricar o tijolo ecológico, se obtém uma mistura de solo, cimento e água em quantidades determinadas por testes em laboratório e ensaios de corpo de prova (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

O teste de umidade da massa pode ser realizado de duas maneiras:

- 1º Pegar uma porção da mistura úmida e fazer uma "bolinha" com o auxílio das duas mãos. O teste é bem-sucedido quando é constatada a marca dos dedos na "bolinha", após apertada;
- 2º Jogar a "bolinha" no chão e analisar o que acontece. Se ela não se desfaz, há muita água. Se a "bolinha" se desfazer em diversos

pedaços, a umidade é adequada (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

2.8.3 Prensagem e cura

A compactação deve ser feita em uma prensa manual com uma compressão de oito toneladas. Para verificar se o tijolo saiu conforme o desejado, deve-se apoiar o dedo na parte superior do tijolo e verificar se a impressão ficou marcada. Se a impressão não for muito visível, a compressão está correta (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

A cura via úmida dos blocos é realizada durante sete dias. Seis horas após a confecção dos blocos, eles devem ser molhados. Após essa primeira umidificação, eles devem ser molhados uma vez ao dia durante sete dias (INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No decorrer desta seção, são apresentados os materiais utilizados na execução do presente trabalho, bem como suas etapas.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho de conclusão, foram usados os materiais listados a seguir:

- 1. Rejeito piritoso;
- 2. Peneiras de teste laboratorial;
- 3. Peneira vibratória
- 4. Balança de precisão;
- 5. Cadinhos para análise térmica;
- 6. Estufa de secagem;
- 7. Vidrarias gerais de laboratório;
- 8. Recipientes de mistura;
- 9. Forno rotativo laboratorial (para calcinação);
- 10. Lavador de gases adaptado;
- 11. Hidróxido de sódio (lavador de gases);
- 12. Ferramentas em geral;
- 13. Exaustor:
- 14. Moinho martelo:
- 15. Cimento CP-IV 32.

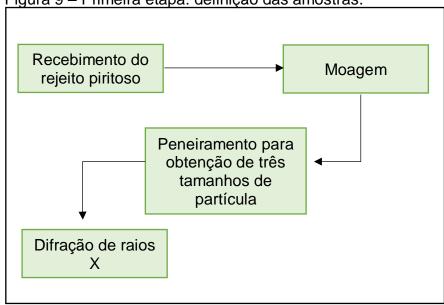
3.2 ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO PROJETO

O presente trabalho foi realizado em conjunto com o Laboratório de Valoração de Resíduos – LabValora, da UNESC, como parte de um estudo para valorização do rejeito piritoso oriundo da mineração de carvão, bem como aplicação deste rejeito na composição de outro material.

Neste trabalho foi utilizado um planejamento fatorial 2³ com três variáveis, dispostas em dois níveis (tamanho de partícula, atmosfera do forno de análise térmica e a taxa de aquecimento do forno), além da adição de um ponto central.

O trabalho foi dividido em quatro etapas, sendo que a primeira, representada no fluxograma da Figura 9 foi a definição da amostra a ser utilizada.

Figura 9 – Primeira etapa: definição das amostras.



Fonte: Do autor, 2018.

Primeira etapa – definição das amostras a partir de três tamanhos de partícula diferentes. Nessa etapa, foram realizadas as seguintes ações:

- Recebimento de tonel com rejeito piritoso concentrado;
- Moagem no moinho martelo, com velocidade de 1000 rpm;
- Peneiramento em três peneiras de teste laboratorial (150, 106 e 45 μm);
- Separação de três amostras por tamanho de partícula;
- Caracterização mineralógica de cada amostra por difração de raios x (DRX);

As peneiras utilizadas para a diferenciação dos tamanhos de partícula e o moinho martelo podem ser vistos na Figura 10. O rejeito piritoso usado para o estudo contém 70,7% de pirita, concentrado por beneficiamento pelo fornecedor. A análise de DRX foi realizada para as três amostras para verificar possível segregação dos constituintes.

Figura 10 – Peneiras de teste laboratorial e moinho martelo.



Fonte: Do autor, 2018.

Para a segunda etapa, seguiu-se o fluxograma da Figura 11.

Definição do planejamento experimental

Pesagem das amostras

Análises térmicas

Manipulação de gráficos

Figura 11 – Segunda etapa: realização de análises térmicas.

Fonte: Do autor, 2018.

Segunda etapa – Definição dos experimentos a serem realizados através de planejamento experimental e posterior realização das análises térmicas. Os passos realizados foram os seguintes:

- Definição do planejamento experimental 2³ (níveis superiores e inferiores das variáveis e ponto central);
- Retirada de umidade das amostras em estufa de secagem;
- Pesagem das amostras inseridas no cadinho;
- Realização de ensaio de correção no equipamento de análise térmica;
- Inserção do cadinho no equipamento de análise térmica e preparação do software para início do ensaio;
- Manipulação em software dos gráficos obtidos através do ensaio.

Antes de iniciar as análises térmicas, as amostras foram inseridas em uma estufa de secagem para retirada do excesso de umidade.

O planejamento experimental foi obtido pela definição de valores, conforme a Tabela 5. Os experimentos definidos por meio deste planejamento podem ser vistos nas Figuras 12 e 13.

Tabela 5 – Valores superiores e inferiores das variáveis do planejamento e ponto central

COTTU	AI .			
Variáveis	Superiores	Valores	Inferiores	Valores
Granulometria	(+)	150 µm	(-)	45 μm
Atmosfera	(+)	20% O ₂	(-)	0% O ₂
Taxa de Aquec.	(+)	15 °C/min	(-)	5 °C/min

Fonte: Do autor, 2018.

Figura 12 – Planejamento Experimental 2³ para análises térmicas.

Ensaio	Amostra	Atmosfera	Taxa de Aquecimento
1- DTA/TG	45 #325	0% O2	5°C/min
2- DTA/TG	150 #100	0% O2	5°C/min
3- DTA/TG	45 #325	20% O2	5°C/min
4- DTA/TG + FTIR	150 #100	20% O2	5°C/min
5- DTA/TG	45 #325	0% O2	15°C/min
6- DTA/TG	150 #100	0% O2	15°C/min
7- DTA/TG + FTIR	45 #325	20% O2	15°C/min
8- DTA/TG	150 #100	20% O2	15°C/min

Figura 13 – Ponto central do planejamento Experimental 2³.

Ensaio	Amostra	Atmosfera	Taxa de Aquecimento
1- DTA/TG	106	10% O2	10°C/min
	#150	2070 02	
2- DTA/TG	106	10% O2	10°C/min
	#150	10/0 02	
3- DTA/TG + FTIR	106	10% 00	10°C/min
	#150	10% O2	

Fonte: Do autor, 2018.

Por meio do planejamento experimental foram definidos oito experimentos diferentes e o ponto central do experimento (realizado em triplicata).

Para excluir possíveis variações que o equipamento poderia causar no experimento, realizou-se um ensaio de correção, que consistiu em inserir as características do ensaio, como teor de oxigênio, taxa de aquecimento e temperatura final do ensaio, porém, sem inserir uma amostra no equipamento. Todos os ensaios usaram 1000 °C como temperatura final.

Após realizadas as correções, a amostra a ser analisada foi pesada em um cadinho, com o auxílio de uma balança de precisão, conforme a Figura 14.



Figura 14 – Pesagem da amostra inserida no cadinho e inserção do cadinho no equipamento.

O mesmo procedimento foi seguido para todos os ensaios de análise térmica.

A terceira etapa foi elabora conforme ilustra o fluxograma da Figura 15:

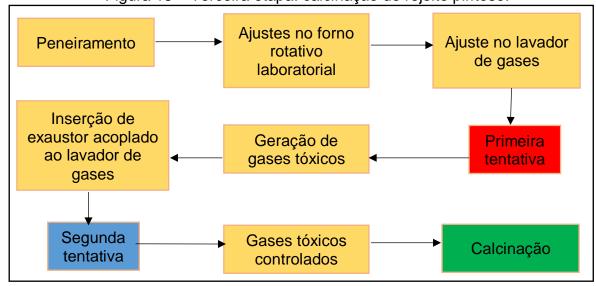


Figura 15 – Terceira etapa: calcinação do rejeito piritoso.

Fonte: Do autor, 2018.

Terceira Etapa – adaptação de um forno rotativo laboratorial comum para um forno rotativo laboratorial com sistema fechado. Para realizar a calcinação, foram realizadas as seguintes ações:

- Peneiramento em peneira vibratória, selecionando o material passante em malha com abertura de 2 mm;
- Ajuste de rolamentos e engrenagens do forno rotativo laboratorial;
- Ajustes no motor, vedação e conexões do lavador de gases;
- Inserção de hidróxido de sódio no lavador de gases;
- Conexão entre forno e lavador de gases;
- Inserção de corrente de ar na entrada de alimentação;
- Angulação do forno em 3º e 15 rotações por minuto (rpm);
- Constatação da liberação de gases tóxicos;
- Inserção de exaustor na saída do lavador de gases;
- Calcinação sem gases tóxicos.

O tamanho de partícula adotado para o rejeito calcinado foi o de 2 mm, pois era o menor tamanho de malha de peneira disponível.

O forno rotativo laboratorial do LabValora não foi adequado para a calcinação de pirita, por não possuir um sistema de exaustão e tratamento dos gases gerados, que são tóxicos.

Um lavador de gases laboratorial foi adaptado e revitalizado para que os gases gerados na calcinação fossem tratados. Foi inserido hidróxido de sódio juntamente com a água no lavador de gases até que a solução atingisse um pH de aproximadamente 14, para que este reagisse com o dióxido de enxofre gerado na calcinação. O lavador de gases foi acoplado ao forno rotativo, conforme ilustrado na Figuras 16 e 17.



Figura 16 – Lavador de gases acoplado ao forno rotativo laboratorial.



Figura 17 – Lavador de gases laboratorial.

Fonte: Do autor, 2018.

A primeira tentativa de calcinação se mostrou ineficaz quanto ao controle de emissão do dióxido de enxofre, pois o fluxo de ar comprimido inserido na entrada de alimentação não foi efetivo, assim como as conexões utilizadas entre o forno e o lavador de gases.

Para a segunda tentativa, novas conexões foram estabelecidas entre o fluxo de ar comprimido na entrada de alimentação, o forno e o lavador de gases, além da inserção de um exaustor no lavador de gases, como ilustra a Figura 18.

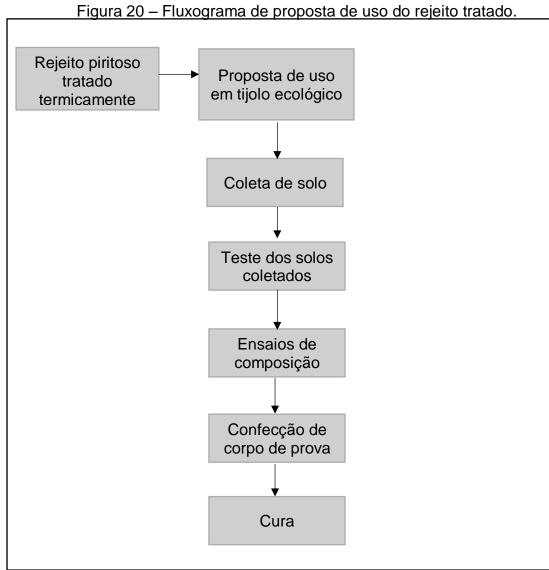


Fonte: Do autor, 2018.

Durante a calcinação, o pH da solução inserida no lavador de gases foi controlado para se manter alcalino, neutralizando o dióxido de enxofre. O sistema montado para a segunda tentativa de calcinação se mostrou efetivo quanto ao controle de gases tóxicos. Na Figura 19, pode-se observar a realização do controle de pH e a exaustão dos gases dentro do forno.



A quarta etapa deste trabalho de conclusão foi caraterizada pelos passos do fluxograma da Figura 20.



Quarta etapa – após o tratamento térmico do rejeito piritoso por calcinação, apresentou-se uma proposta de uso deste rejeito na composição de um tijolo ecológico. Para tal, foram tomadas as seguintes ações:

- Coleta e secagem do solo em estufa de secagem;
- Testes do solo, por ensaio de retração do solo úmido;
- Confecção de corpos de prova com diferentes concentrações de solo, cimento e material calcinado;

Cura seca dos corpos de prova durante sete dias.

Os solos utilizados na composição do bloco solo-cimento (BTC) foram coletados no Iparque - UNESC, local onde os experimentos foram conduzidos.

Para a coleta desse solo, foi retirada a capa superior de camada orgânica e realizada a coleta de maneira vertical, com profundidade de 10 cm. O solo coletado, após secagem em estufa, pode ser visualizado na Figura 21.



A escolha do solo é a parte mais importante da confecção do tijolo ecológico. Para a confirmação de que o solo é adequado para esta finalidade, foram realizados testes visuais, de odor, tátil e de retração, tanto do solo quanto do corpo de prova.

Foram produzidos três corpos de prova da mistura solo-cimento-rejeito, com concentrações diferentes, conforme ilustra a Tabela 6, a seguir:

Tabela 6 – Ensaios de corpo de prova com variação de concentrações.

Variáveis	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Quantidade de	3	3	3
corpos de prova			
Solo	78%	85%	90%
Cimento	12%	9%	6%
Rejeito	10%	6%	4%

Fonte: Do autor, 2018.

Os corpos de prova foram confeccionados com o auxílio de uma prensa hidráulica (Figura 22), com uma compressão de oito toneladas.

SERVITE STATE OF THE PARTY OF T

Figura 22 – Prensa hidráulica para confecção dos corpos de prova.

Fonte: Do autor, 2018.

Seis horas após a confecção dos corpos de prova (Figura 23), eles foram molhados e seguiram sendo molhados uma vez por dia, durante sete dias.

Figura 23 – Corpos de prova confeccionados com a mistura solo-cimento-rejeito.



Fonte: Do autor, 2018.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das etapas realizadas neste trabalho de conclusão.

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 7 apresenta a análise química de um rejeito piritoso obtido e beneficiado pela mesma empresa fornecedora do material utilizado neste trabalho, portanto, esta análise foi adotada como base para o estudado. A análise foi realizada pelos métodos de espectrofotometria de absorção atômica por chama, espectrometria de fluorescência de raios x e infravermelho.

Tabela 7 – Análise química da pirita estudada.

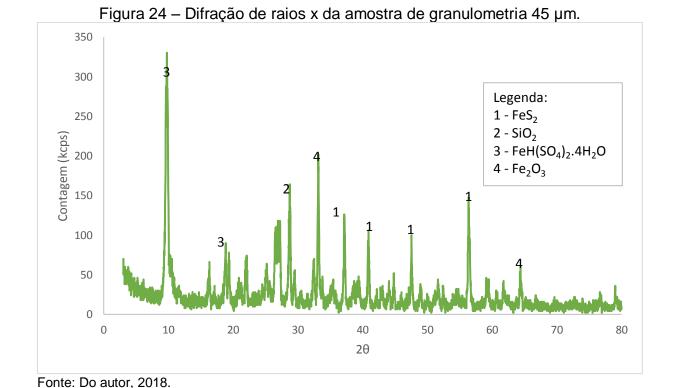
Elemento químico	Teor (% em massa)	Técnica analítica
Ferro	39,80	Frx
Enxofre	39,70	infravermelho
Silício	5,20	Frx
Alumínio	2,20	Frx
Cálcio	0,54	Frx
Potássio	0,13	Frx
Titânio	0,13	Frx
Chumbo	0,10	EAA
Tungstênio	0,05	Frx
Magnésio	0,04	Frx
Manganês	0,03	Frx
Cromo	0,02	Frx
Zinco	0,02	Frx
Níquel	0,01	Frx
Fósforo	0,01	Frx
Carbono	5,10	infravermelho
umidade	6,92	Secagem 100°C

Fonte: Peterson, 2008.

O teor inicial de pirita foi considerado como 70,7% em massa, obtido pelo cálculo da análise química para o percentual de ferro.

4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

O resultado da análise mineralógica se mostrou satisfatório, visto que as mesmas fases cristalinas foram identificadas nas três amostras, conforme pode ser visto nas Figuras 24 a 26.



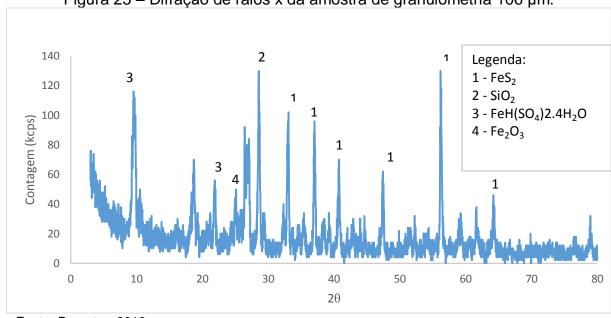


Figura 25 – Difração de raios x da amostra de granulometria 106 µm.

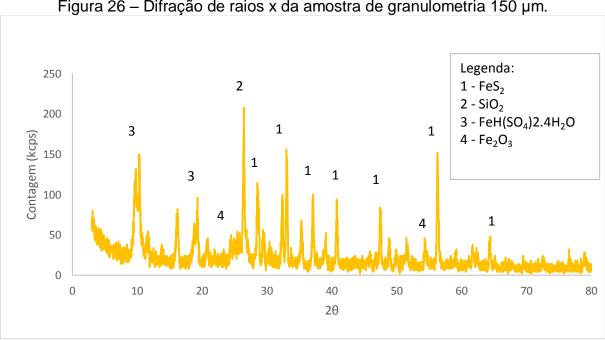


Figura 26 – Difração de raios x da amostra de granulometria 150 μm.

Fonte: Do autor, 2018.

Pode-se perceber que as três amostras têm as mesmas fases, inclusive os picos de pirita, porém com intensidades variantes.

4.3 ANÁLISE TÉRMICA

Os ensaios de TG foram executados em um equipamento com possibilidade de variação atmosférica, bem como o acompanhamento das reações ocorrentes durante a análise. As condições para o ensaio estão definidas no planejamento experimental (Figuras 12 e 13).

Pode-se ver a representação de todas as curvas de TG nas Figuras 27 a 29.

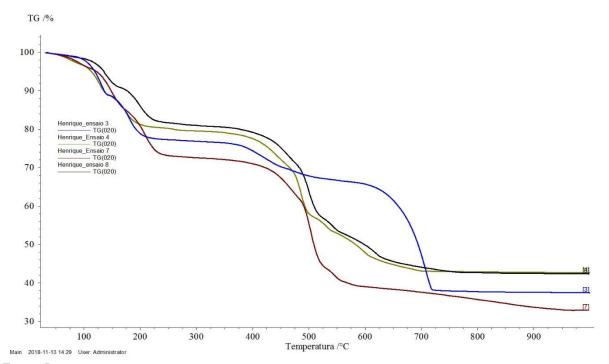


Figura 27 – Resultado dos ensaios de análise térmica com ar sintético (20% de O₂).

Fonte: Do autor, 2018.

TG /%

100

90

Henrique_Ensaio 21

Henrique_Ensaio 20

Henrique_Ensaio 31

TG(820)

Henrique_Ensaio 30

Henrique_Ensaio 30

Henrique_Ensaio 30

TG(820)

TG(8

Figura 28 – Resultado dos ensaios de análise térmica com N₂ (0% de O₂).

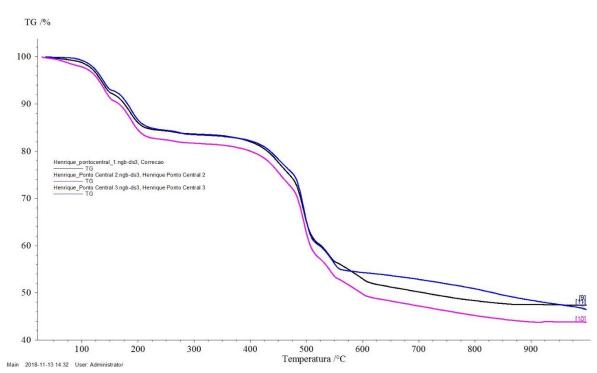


Figura 29 – Resultado dos ensaios de análise térmica do ponto central (10% de O₂).

Fonte: do autor, 2018.

Os ensaios de TG mostraram curvas típicas de decomposição de uma pirita concentrada. Apareceram os eventos de oxidação do carbono remanescente e

também a oxidação da pirita. Para a atmosfera de N₂, ocorreu a decomposição da pirita e para a atmosfera de ar ocorreu a oxidação.

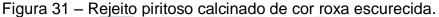
4.4 CALCINAÇÃO

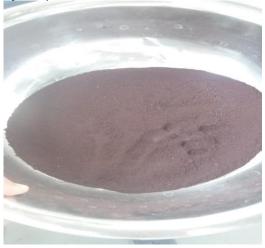
O material foi calcinado a uma temperatura de 1000 °C. Durante a primeira tentativa de calcinação, onde havia oxigênio em abundância no forno e o escape de gases tóxicos, o rejeito calcinado apresentou a cor esperada, que era vermelho (Figura 30). Durante a segunda calcinação, onde o oxigênio não era abundante no forno e não havia o escape de gases tóxicos, o rejeito calcinado atingiu uma cor roxa escurecida, conforme ilustrado na Figura 31.



Figura 30 – Rejeito piritoso calcinado de cor vermelho forte.

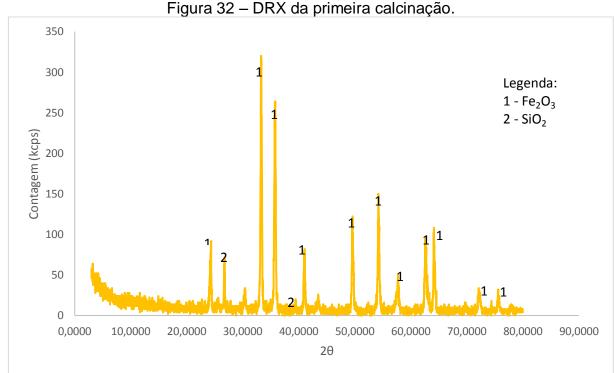
Fonte: Do autor, 2018.





Fonte: Do autor, 2018.

Coletaram-se as amostras após cada uma das calcinações que foram enviadas para o ensaio de difração de raios x, porém até o momento da entrega deste trabalho, obteve-se somente o resultado da primeira calcinação, que pode ser visto na Figura 32.



Fonte: Do autor, 2018.

4.5 PRODUÇÃO DO TIJOLO ECOLÓGICO

Os testes realizados nos solos obtiveram êxito, uma vez que foi possível identificar um solo adequado para a produção do tijolo ecológico e outro não adequado.

Durante o exame visual do solo, verificou-se que o solo adequado para produção tinha uma cor avermelhada, significando a presença de argila, e quando seco, observou-se que o mesmo também possuía os componentes arenosos desejados.

Na aplicação do exame de odor, não foi constatado o odor de húmus em um dos solos (presença de matéria orgânica), em estado seco ou úmido do solo. No solo que foi caracterizado como não adequado, pelo teste de retração, o odor de húmus era perceptível.

Com o exame tátil, pôde-se perceber que o solo adequado para a confecção do tijolo é considerado versátil, por ser arenoso, argiloso e limoso ao mesmo tempo.

O teste de retração consiste em misturar uma amostra de solo a água e deixar curar durante sete dias, molhando-o todos os dias. Após a cura, deve-se medir a retração ocorrida em todos os sentidos. Se houver uma retração superior a 2 cm ou rachaduras, o solo não é adequado para a produção do tijolo ecológico. O teste foi realizado com o solo úmido a uma textura em que a mistura grudasse na colher de pedreiro. A mistura solo-água foi inserida em uma caixa de madeira previamente untada com desengripante, com dimensões internas de 60 x 3,5 x 8,5 cm, como ilustra a Figura 33.



Figura 33 – Teste de retração com a mistura solo-água.

Fonte: Do autor, 2018.

Após o tempo de cura, foram medidas as retrações para o comprimento, largura e altura, somando 1 cm, ou seja, um dos solos se mostrou adequado para o processo e o outro não, apresentando retração superior a 2 cm e rachaduras. Os corpos de prova do solo após o tempo de cura são ilustrados na Figura 34.



Figura 34 – Corpo de prova do ensaio de retração solo-água após sete dias de cura.

Fonte: Do autor, 2018.

O teste de retração dos corpos de prova das misturas solo-cimento-rejeito, que não deveria somar mais que 5 mm também foram levados em consideração, e o resultado é apresentado a seguir:

- Corpo de prova 1, calcinação 1: retração de 2mm;
- Corpo de prova 2, calcinação 1: retração de 3mm;
- Corpo de prova 3, calcinação 1: retração de 3mm;
- Corpo de prova 1, calcinação 2: retração de 4mm;
- Corpo de prova 2, calcinação 2: retração de 2mm;
- Corpo de prova 3, calcinação 2: retração de 2mm.

5 CONCLUSÃO

O trabalho identificou uma boa possibilidade de utilização da pirita proveniente da extração do carvão mineral como matéria-prima para confecção de um tijolo ecológico. Ressalta-se que a pirita foi tratada termicamente para ser transformada em hematita de coloração avermelhada.

A pirita foi caracterizada pelos parâmetros químicos, mineralógicos e térmicos, identificando as possíveis reações em atmosferas controladas, com maior ou menor quantidade de O₂. Evidencia-se também que o procedimento para fabricação do tijolo ecológico com rejeito depende de uma calcinação efetiva, para que a pirita se transforme em hematita, como ocorreu em uma das calcinações realizadas neste trabalho.

Conclui-se que é possível valorizar o rejeito piritoso com investimentos em pesquisa e tecnologia. O valor que é utilizado para dispor esse rejeito adequadamente pode ser investido para que este material proporcione um valor econômico.

6 SUGESTÕES

- Realizar teste de resistência para tração e compressão;
- Verificação de dureza do bloco;
- Realizar a prova de imersão do tijolo ecológico em água;
- Utilizar forno adequado para calcinação de pirita;
- Verificar sinais de oxidação no tijolo ecológico, devido a inserção do rejeito;
- Realizar a análise de DRX para o rejeito calcinado oriundo da segunda calcinação;
- Verificar comportamento do bloco conforme o tempo;
- Confeccionar o bloco em tamanho para construção.

REFERÊNCIAS

ANEEL (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil:** Carvão Mineral. 2008. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 71 p.

BELOLLI, Mário; QUADROS, Joice; GUIDI, Ayser. **História do Carvão de Santa Catarina:** 1790-1950. Criciúma: Hexa Comunicação Integral, 2002. 300 p.

BRANCO, Pércio de Moraes. **Carvão mineral.** 2014. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html?from_info_index=16>. Acesso em: 23 ago. 2018.

Brasil (Ed.). **Carvão Mineral.** 2011. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2011/11/carvao-mineral. Acesso em: 21 ago. 2018.

CHAVES, Arthur Pinto. Os problemas do carvão em geral e do carvão brasileiro em particular. In: SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria DionÍsia Costa dos; POSSA, Mario Valente. **CARVÃO BRASILEIRO:** TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. Rio de Janeiro: Cetem/mct,, 2008. p. 13-24. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2039/1/carvao_brasileiro_tecnologia_e_meio_ambiente.pdf>. Acesso em: 28 set. 2018.

CUNICO, M. W. M; MIGUEL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.. PLANEJAMENTO FATORIAL: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA VALIOSA PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS EXPERIMENTAIS EMPREGADOS NA PESQUISA CIENTÍFICA.. **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 1, n. 9, p.23-32, jun. 2008. Disponível em: https://ojs.c3sl.ufpr.br/academica/article/view/14635/9823. Acesso em: 20 out. 2018.

DUARTE, Marcus Antonio Viana; MEOLA, Tatiana. **Curso de Planejamento Experimental**. Uberlândia: Femec, 2007. Disponível em: <ftp://mecanica.ufu.br/LIVRE/Duarte/PE/Aula1_05_03_2015/apostila_estatistica_Duarte.pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. **Carvão mineral no brasil.** [20--?]. Disponível em: https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/carvao-mineral-no-brasil.htm. Acesso em: 21 ago. 2018.

GOULARTI FILHO, Alcides. **Formação econômica de Santa Catarina**. 2. ed. Ver Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2007. 473 p.

GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO (Santa Catarina) (Org.). **PRIMEIRO RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DOS INDICADORES AMBIENTAIS:** ACP Nº 2000.72.04.002543-9/SC. Criciúma: Gta, 2007. 201 p. Disponível em: https://bit.ly/2Q1d6LV. Acesso em: 12 set. 2018.

GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO (Santa Catarina) (Org.). **DÉCIMO PRIMEIRO RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DOS INDICADORES AMBIENTAIS:** ACP Nº 2000.72.04.002543-9/SC. Criciúma: Gta, 2017. 308 p. Disponível em: < encurtador.com.br/awKW1>. Acesso em: 12 set. 2018.

IDEA BRASIL (Org.). **Tijolo ecológico:** O que é? Quanto custa? Vantagens e desvantagens?. 2018. Disponível em: http://ideabrasil.com.br/tijolo-ecologico/>. Acesso em: 28 out. 2018.

INSTITUTO EDUCACIONAL PIRACICABANO DA IGREJA METODISTA (Piracicaba) (Org.). **Produção de Tijolos de Solo-cimento**. 2016. Disponível em: https://dicasdearquitetura.com.br/cartilha-gratuita-ensina-fazer-tijolos-ecologicos/. Acesso em: 28 out. 2018.

IONASHIRO, Massao. **Giolito:** Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial, Calorimetria Exploratória Diferencial. Araraquara: Giz Editorial, 2004. Disponível em: http://www.uel.br/proppg/portal/pages/arquivos/ESPEC/livro%20-analise-termica-themal-analysis-Giolito.pdf. Acesso em: 18 set. 2018.

KOPPE, Jair Carlos; COSTA, João Felipe Coimbra Leite. A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina. In: SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria Dionísia Costa dos; POSSA, Mario Valente (Ed.). **Carvão Brasileiro:** tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Cetem/mct, 2008. p. 25-35. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2039/1/carvao_brasileiro_tecnologia_e e meio ambiente.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2018.

MAYER, Fernando de Pol. **CE 074 - Controle de Processos Industriais**. 2015. Disponível em: http://www.leg.ufpr.br/~fernandomayer/aulas/ce074-2015-02/ce074 aula06 2015-02.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

MILIOLI, Geraldo et al. **O SUL DO ESTADO DE SANTA CATARINA.** 2004. Disponível em: http://www.ib.usp.br/limnologia/Sul_catarinense/Sulcatarinense/>. Acesso em: 12 set. 2018.

MOTHÉ, Cheila Gonçalves; AZEVEDO, Aline Damico de. **Análise térmica de materiais.** São Paulo: iEditora, 2002. 300 p.

NASCIMENTO, Flávia M. F. et al. **IMPACTOS AMBIENTAIS NOS RECURSOS HÍDRICOS DA EXPLORAÇÃO DE CARVÃO EM SANTA CATARINA.** [20--]. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_nascimento.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

PETERSON, Michael. **PRODUÇÃO DE SULFATO FERROSO A PARTIR DA PIRITA:** DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. 2008. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

RESENDE, Mauro et al. Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações. 2. ed. Lavras: Ufla, 2011. 206 p.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Desengenharia:** o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais. São Paulo: Ed. Un de Sao Paulo, 2001. 252 p. ISBN 8531405998.

SCHNEIDER, Carlos Henrique. Evolução da gestão ambiental na indústria carbonífera em Santa Catarina: um caso de sucesso. In: SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria Dionísia Costa dos; POSSA, Mario Valente (Ed.). **Carvão Brasileiro:** tecnologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Cetem/mct, 2008. p. 39-55. Disponível em:

http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2039/1/carvao_brasileiro_tecnologia_e_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 21 ago. 2018.

SIECESC (Santa Catarina). **Carvão mineral:** Dados estatísticos. 2016. Disponível em: http://www.siecesc.com.br/pdf/dados_estatisticos_ano_2016.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2018.

SIECESC (Santa Catarina). **INFORMAÇÕES SOBRE O CARVÃO MINERAL EM SC.** [2017]. Disponível em: http://www.siecesc.com.br/siecesc/informacoes-sobre-o-carvao-mineral-em-santa-catarina>. Acesso em: 21 ago. 2018.

TEIXEIRA, Elba Calesso; SANTANA, Eduardo Rodrigo Ramos de. Poluição atmosférica associada ao uso do carvão no Brasil. In: SOARES, Paulo Sergio Moreira; SANTOS, Maria DionÍsia Costa dos; POSSA, Mario Valente. **CARVÃO BRASILEIRO:** TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. Rio de Janeiro: Cetem/mct,, 2008. p. 153-180. Disponível em:

http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2039/1/carvao_brasileiro_tecnologia_e_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 28 set. 2018.

ZANCAN, Fernando; MINERAÇÃO, Portal da (Ed.). Carvão Mineral gera mais de 5 mil empregos diretos no Brasil. 2017. Disponível em:

http://portaldamineracao.com.br/entrevista-fernando-zancan-carvao-mineral-geramais-de-5-mil-empregos-diretos-no-brasil/. Acesso em: 21 ago. 2018.