

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**

**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**KAMILA ALMEIDA DE OLIVEIRA**

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA  
PARA UTILIZAÇÃO EM INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

**CRISCIÚMA**

**2013**

**KAMILA ALMEIDA DE OLIVEIRA**

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA  
PARA UTILIZAÇÃO EM INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

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

Orientador(a): Prof. Dr. Michael Peterson

**CRICIÚMA**

**2013**

**KAMILA ALMEIDA DE OLIVEIRA**

**CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE LÃ DE ROCHA PARA  
UTILIZAÇÃO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de bacharel (a), 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, 29 de novembro de 2013.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Michael Peterson - Doutor - (UNESC) - Orientador

Prof. Elídio Angioletto - Doutor - (UNESC)

Prof. Fernando Pelisser - Doutor - (UNESC)

**Á meu pai, João Lourenço de Oliveira e mi-  
nha mãe Claudia Almeida de Oliveira pelo  
apoio, paciência e dedicação.**



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus;

A minha família, em especial meus pais João Lourenço de Oliveira e Claudia Almeida de Oliveira e meu irmão Rafael Almeida de Oliveira, pelo apoio incondicional;

Ao meu namorado Fernando Maccari pelo seu aporte técnico e pela sua paciência;

Aos meus amigos e colegas, em especial: Maiara Goulart Medeiros e Nathalia Vechi que contribuíram direta e indiretamente para a realização desse trabalho;

Ao Professor Michael Peterson pelas orientações e conhecimento transmitido.

**“Se avançarmos confiantes na direção de nossos sonhos e nos esforçarmos para levar a vida que imaginamos, de repente nos depararemos com o sucesso inesperado dos momentos simples”.**

**Henry David Thoreau**

## RESUMO

O presente trabalho consiste num estudo de caracterização e classificação de resíduos sólidos para o resíduo de isolamento térmico e acústico, lã de rocha. O desenvolvimento do país, fez aumentar a problemática da geração de resíduos sólidos, especialmente no setor industrial em virtude do montante e da periculosidade associada aos resíduos. Desse modo viabilizar mediante estudos de caracterização e classificação a reutilização de resíduos indústrias é um eficiente modelo de gestão. Segundo Cheng *et. al* a o resíduo de lã de rocha apresenta um satisfatório resultado quando aplicado a indústria cimenticea. Com base em análises realizadas é possível sugerir a aplicação do resíduo de lã de rocha na indústria cimenteira. O resíduo de lã de rocha apresenta segundo análises características pozonalicas classificando o resíduo como um agregado aplicável a indústria cimenteira.

**Palavras-chave:** Lã de Rocha, Caracterização e Classificação de Resíduos Sólidos.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Ciclo PDCA	16
Figura 02 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos sólidos.	22
Figura 03 - Difração de raios X por um cristal	25
Figura 04 - Difrátômetro esquemático de raios X	26
Figura 05 - Interação de elétrons com um átomo	27
Figura 06 – Fluxograma do Processo Produtivo	31
Figura 07 – Amostra de lã de rocha	42
Figura 08 – Moinho de Bolas	43
Figura 09 – Peneiramento	45
Figura 10 – Equipamento de FTIR	46
Figura 11 – Equipamento difratômetro de raios X	47
Figura 12 – Equipamento de análise térmica	48
Figura 13 – Microscópio Eletrônico de Varredura	49
Figura 14 – Espectros de Infravermelho do Resíduo de Lã de Rocha	51
Figura 15 - Difrátograma típico de um sólido ou líquido amorfo	53
Figura 16 – Difrátograma de raios X do Resíduo de Lã de Rocha	54
Figura 17 - Difrátograma de raios X do Resíduo de Lã de Rocha queimada a 1000°C	55
Figura 18 – DSC/TGA de Resíduo de Lã de Rocha	56
Figura 19 – Diagrama de Ellingham	58
Figura 20 – DSC/TGA da Lã de Rocha Comercial	59
Figura 21 – Partículas da amostra aglomeradas	60
Figura 22 – Diâmetro predominante entre as fibras	61
Figura 23 – Fibra com diâmetro aproximado a 15 µm	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Exigências Químicas	39
Tabela 02 – Exigências Físicas	39
Tabela 03 – Análises realizadas para cada amostra	41
Tabela 04 – Resultados pertinentes a classificação	50
Tabela 05 - Composição nominal, em óxidos, do resíduo de lã de rocha	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ADN – Ácidos Desoxiribonucléico
- AES e OES – Espectroscopia de Emissão Óptica
- ARN – Ácido Ribonucléico
- DRX – Difração de Raios X
- DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura
- DTA – Análise Térmica Diferencial
- FAAS – Espectroscopia de Absorção Atômica por Chama
- FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios X
- FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
- GFAA – Espectroscopia de Absorção Atômica por Forno de Grafite
- ICP – Espectrometria de Massa ICP
- IR – *Infrared* (Infravermelho)
- ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Padronização)
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- NR – Norma Regulamentadora
- PDCA – Planejar, Fazer, Checar e Agir
- P+L – Produção Mais Limpa
- RSD – Resíduos Sólidos Domésticos
- RSI – Resíduos Sólidos Industriais
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SGA – Sistema de Gestão Ambiental
- TG/ATG – Termogravimetria

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	12
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
3.1 GESTÃO AMBIENTAL .....	14
<b>3.1.1. Gestão Ambiental privada</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.2 Gerenciamento de Resíduo Sólido Industriais</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1.3 Produção Mais Limpa</b> .....	<b>18</b>
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	19
3.3 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	23
<b>3.3.1 Difração de Raios X (DRX)</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3.3 Termogravimetrica (TG)/Análise Térmica Diferencial (DTA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</b> ....	<b>28</b>
<b>3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	<b>29</b>
3.4 LÃ DE ROCHA .....	30
<b>3.4.1 Processo Produtivo</b> .....	<b>30</b>
<b>3.4.2 Geração de Resíduo</b> .....	<b>31</b>
<b>3.4.3 Aplicações do resíduo de lâ de rocha</b> .....	<b>32</b>
3.4.3.1 Produção de lâ de rocha .....	33
3.2.3.2 Cultivo Agrícola .....	33
3.2.3.3 Vidro .....	33
3.2.3.4 Cimenteira .....	34
3.3 CIMENTO.....	34
<b>3.3.1 Cimento Portland</b> .....	<b>35</b>
3.4 CONCRETO .....	36
<b>3.4.1 Concreto seco</b> .....	<b>36</b>
3.4.1.1 Agregados .....	36
3.4.1.2 Agregados Pozolânicos .....	38
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>

4.1 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA .....	41
<b>4.1.1 Classificação do resíduo .....</b>	<b>44</b>
4.1.1.1 Testes Iniciais.....	44
4.1.1.2 Lixiviação.....	44
4.1.1.3 Solubilização .....	45
<b>4.1.2 Caracterização do material.....</b>	<b>45</b>
4.1.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX) .....	45
4.1.2.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	46
4.1.2.3 Difração de Raios X (DRX).....	47
4.1.2.4 Análise Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) / Análise Termogravimétrica (TGA/TG).....	47
4.1.2.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....	48
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>50</b>
5.1 CLASSIFICAÇÃO.....	50
5.2 CARACTERIZAÇÃO .....	50
<b>5.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX) .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)....</b>	<b>51</b>
<b>5.2.3 Difração de Raio X (DRX).....</b>	<b>53</b>
<b>5.2.4 Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) / Análise Termogravimétrica (TGA/TG) .....</b>	<b>55</b>
5.4.1 Lã de Rocha – Resíduo.....	55
5.4.2 Lã de Rocha – Comercial.....	59
<b>5.2.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....</b>	<b>59</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
6.1 CONCLUSÃO.....	62
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	63
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas ambientais do Brasil consiste na geração de resíduos sólidos. O modelo de desenvolvimento do país propiciou um crescimento centralizado no aspecto econômico, desconsiderando pontos importantes para o correto crescimento sustentável de um país, tais como, a questão ambiental. Desse modo a problemática dos resíduos sólidos é reflexo da falta de programas, projetos e tecnologias coerentes ao tratamento, reutilização e destinação final dos resíduos.

O problema fundamental dos resíduos sólidos para o ambiente resume-se ao fato que o destino final dos resíduos, seja urbano ou industrial é o próprio ambiente.

Em decorrência de legislações específicas, os resíduos sólidos especialmente industriais são encaminhados para aterros sanitários. Uma destinação final, dita ambientalmente correta. Embora ambientalmente adequados, os aterros sanitários não podem ser considerado a melhor alternativa, uma vez que os espaços úteis a essa técnica tornam-se cada vez mais escassos.

Outro ponto relevante deve-se ao fato que os resíduos são depositados em aterros sem qualquer segregação, estes resíduos urbanos. Aos resíduos industriais é importante ressaltar o grau de periculosidade, toxicidade que pode estar envolvido nestes. Assim caracterizar e classificar de modo a estabelecer o reaproveitamento dos resíduos gerados em uma atividade para outra caracteriza uma eficaz solução em termos de volume gerado e destinado a aterros. Além de favorecer a imagem da empresa, aumentando a vantagem econômica e competitiva

## 2 OBJETIVOS

Segue abaixo descrito os objetivos pretendidos com esse trabalho.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer a classificação de resíduos sólidos e caracterização físico-química do resíduo proveniente da lã de rocha, material de isolamento acústico e térmico. De modo a sugerir a reutilização deste.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Classificar e Caracterizar o resíduo de lã de rocha como um agregado;
- Verificar aplicar o resíduo de lã de rocha na indústria cimenteira;
- Caracterizar o resíduo de lã de rocha para aplicação em blocos de concreto seco;
- Atribuir valor agregado maior ao resíduo;
- Enquadrar a reutilização do resíduo como prática de Produção Mais Limpa.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O crescimento populacional e a mudança de hábitos de consumo da sociedade, em relação aos bens e serviços prestados, fez aumentar a problemática da geração e destinação dos resíduos sólidos, tanto no Brasil quanto no mundo. (LIMA; FERREIRA, 2007). Especificamente no Brasil, o desafio é ainda maior no setor industrial, em virtude do volume gerado e da carência de informações e alternativas para as empresas quanto à disposição de seus resíduos sólidos. O principal problema evidenciado consiste no descaso por parte de algumas empresas, quanto a sua responsabilidade. Somado a isso, há a falta de fiscalização por parte dos órgãos responsáveis (SISINNO, 2003).

A responsabilidade atribuída aos resíduos industriais dá-se ao fato da agressão que causam ao ambiente, em decorrência de suas características específicas.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de agosto de 2010, resíduos industriais constitui-se daqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais. Para a NR 25 estes podem encontrar-se nas formas sólida, líquida, gasosa ou em suas combinações, sendo que suas características físicas, químicas ou microbiológicas não se assemelhem a resíduos domésticos, assim como aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Têm-se, portanto, os resíduos sólidos, produtos descartados, consequentes de atividades humanas (BRASIL, 2010).

Para Lima e Ferreira (2007) além da definição e classificação dos resíduos a legislação brasileira invoca o princípio da responsabilidade do gerador, onde as empresas têm a responsabilidade desde a geração, estocagem, armazenamento, transporte, tratamento até sua disposição final (LIMA; FERREIRA, 2007. p.2). Cabe, portanto a cada setor dispor corretamente seus resíduos gerados, de modo ambientalmente correto e economicamente eficaz.

Diante da constante evolução tecnológica, uma saída vista para a minimização dos impactos gerados em decorrência dos resíduos sólidos é propor a reciclagem e/ou a reutilização destes. Atualmente é visto nas empresas como um processo preventivo e integrativo, uma vez que visa reduzir impactos e consequentemente, os danos ao homem e ao meio ambiente. Além de propiciar o aumento da eficiência no uso de matérias-primas (PIMENTA; GOUVINHAS, 2007).



Desse modo, para que o resíduo sólido seja reciclado/reutilizado adequadamente é necessário classificá-lo segundo a Norma Técnica Brasileira NBR 10.004/2004, bem como caracterizá-lo quanti-qualitativamente.

A caracterização de um material, seja resíduo ou não, dá-se por meio de técnicas específicas que estabelecem o comportamento ou elucidam fenômenos físicos, químicos ou biológicos específicos de cada material, seja de natureza orgânica ou inorgânica.

### 3.1 GESTÃO AMBIENTAL

Define-se gestão ambiental como um ato ou efeito de gerir, administrar ou gerenciar atividades humanas, públicas e/ou privadas (TASSARA; MLYNARZ, 2008). Para Floriano (2007) a gestão ambiental consiste na administração dos recursos ambientais de modo a atender o estabelecido no desenvolvimento sustentável.

Analisando o conceito de desenvolvimento sustentável pode-se dizer que a prática efetiva da gestão ambiental é um adequado modelo à sustentabilidade, uma vez que a gestão ambiental visa atender aspectos, tais como, preservação dos ecossistemas, proteção à biodiversidade, prevenção/recuperação à degradação, uso responsável dos recursos naturais, adequação de atividades produtivas, melhor qualidade de vida, entre outros aspectos (TASSARA; MLYNARZ, 2008).

Embora os conceitos sejam harmoniosos ainda são difíceis transferir da teoria para uma gestão prática e sustentável. A relação entre crescimento econômico e meio ambiente, peças-chaves num sistema de gestão ambiental, ainda apresentam conflitos.

Antigamente era nítida a divisão entre os que defendiam o ambiente e aqueles que pregavam o desenvolvimento a todo custo, desconsiderando a excessiva e errônea exploração dos recursos naturais.

Entretanto, em 1962, quando Rachel Carson, em seu livro *Silent Spring* (Primavera Silenciosa) despertou no mundo a questão ambiental ao apontar os efeitos dos fertilizantes e outros produtos sintéticos para com a natureza e o próprio homem. Anos mais tarde, grandes acidentes ambientais, como a contaminação por despejo industrial contendo metais, na Baía de Minamata, no Japão, tomaram conta do debate ambiental. Passando a discussões relevantes e cada vez mais frequentes na década de 70 especialmente, em virtude da Conferência das Nações Unidas para

o Meio Ambiente da Organização das Nações Unidas, em Estocolmo, em 1972. Marcada ainda por movimentações culturais populares, nesta década iniciou-se a abordagem sustentável, marcada pela ação reativa, controle do tipo “*End of Pipe*” (Fim de Tubo) e exigência de Estudo de Impacto Ambiental (MARQUES, 2005).

Seguindo a tendência dos anos 70, a década de 80 foi marcada pela formulação do Estudo do Impacto Ambiental em âmbito legal, seguida por diversas legislações regulamentadoras em diversos países (MARQUES, 2005).

Porém, foi na década de 90, especialmente no setor industrial, que o meio ambiente foi incorporado ao Sistema de Gestão em empresas, desenvolvendo uma atitude pró-ativa no setor. Preocupando-o com o desempenho ambiental, ciclo de vida do produto, custos ambientais, impactos e riscos ambientais. Tudo atendendo ao estabelecido na Agenda 21, elaborada na segunda Conferência Mundial sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente, realizada no Rio de Janeiro, em 1992.

Em uma breve contextualização histórica é possível perceber a evolução ambiental em âmbito legal, político e empresarial. Considerando juntamente com a questão econômica. Chegando à atualidade, em políticas públicas e privadas de gestão ambiental.

### **3.1.1. Gestão Ambiental privada**

Os diferentes comportamentos apontados, com o passar do tempo, caracterizam a postura do homem para com a natureza, postura essa fortemente influenciada pelo setor privado, especialmente a atividade industrial. Seguida pela normatização ISO 9001 a atividade industrial percebeu que a questão ambiental é determinante para a qualidade e reconhecimento do serviço e/ou produto e não somente uma necessidade em atender a legislação.

A Gestão Ambiental empresarial traz benefícios, tais como redução de custo diante da economia de matéria prima, redução do consumo de água e energia, além da diminuição/eliminação de multas e penalidades por dano ambiental. Realizada de maneira estratégica, a gestão ambiental reflete um número maior de benefícios, podendo-se citar: melhoria da imagem, aumento da produtividade, adequação aos padrões ambientais, crescimento para mercado externo, comprometimento pessoal, melhor condição de trabalho, entre outros (COSTA, 2006).

Como ferramenta ao Sistema de Gestão Ambiental (SGA) empresarial há algumas normas da série ISO 14000 que motivam as empresas na busca de melhorias ambientais na produção, resíduos e rejeitos gerados e satisfação dos clientes. A ISO 14001, define os requisitos para estabelecer e operar um SGA, sendo somente esta certificável. Vale ressaltar, também, ISO 14004 que estabelece diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio ao SGA, entre outras, que são diretrizes gerais relacionadas a critérios de auditorias ambientais visando a melhoria contínua.

Como forma de assegurar a melhoria contínua, há uma ferramenta denominada de Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act* – Planejar, Fazer, Checar e Agir). Criada por William Edward Deming, constitui de um sistema de ações que considera o todo de um processo, atendendo igualmente processos estratégicos, mediante ao planejamento do SGA. As ações são estabelecidas em quatro fases básicas, que devem ser repetidas continuamente (NEVES, 2007). Tais etapas, constituídas de seis fases, conforme a Figura 01.

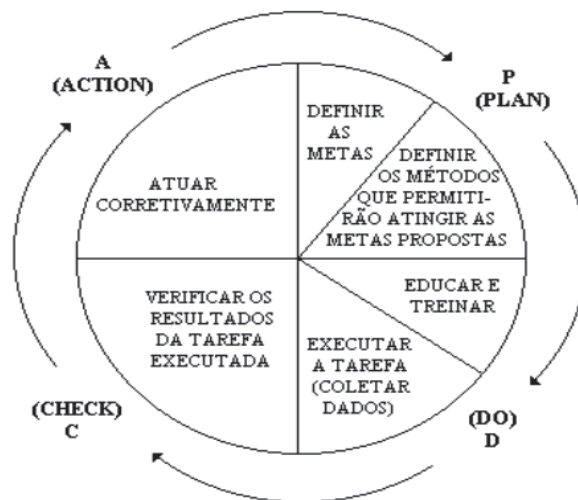


Figura 01 - Ciclo PDCA

Fonte: Silva (2006) *apud* Neves (2007).

- Planejamento (P): estabelece as metas a serem alcançadas mediante aos problemas diagnosticados, de modo que se ressalte os métodos para atingir as metas pré-estabelecidas.
- Execução (D): constitui em colocar em prática os métodos já definido na etapa da etapa anterior.

- Verificação/Checar (C): mediante a execução dos métodos, se verifica os resultados obtidos, comparando com a meta desejada.
- Agir (A): com base nos resultados é possível aplicar um plano de ações visando às metas estabelecidas ou atuar preventivamente caso não se possa atender determinada meta (NEVES, 2007).

Para Dias (2007), esse é o principal instrumento administrativo aplicado ao desenvolvimento sustentável. Fundamentado nas especificações legais aplicáveis, o setor empresarial se desenvolve respeitando a capacidade do ambiente sem comprometer o desenvolvimento econômico.

### **3.1.2 Gerenciamento de Resíduo Sólido Industriais**

O gerenciamento de resíduos sólidos constitui um conjunto de procedimentos de gestão, visado na minimização da geração de resíduos, adequada coleta, armazenamento, tratamento, transporte e destinação. Desenvolver e implantar o gerenciamento de resíduo sólido, resulta na maximização de oportunidades e na redução de custos (MAROUM, 2006).

Basicamente, o gerenciamento de resíduos sólido assemelha-se a metodologia do SGA, aplicando os mesmos preceitos da implantação de qualquer sistema de gestão.

Como qualquer plano de gestão, deverá apresentar objetivos e metas. Os objetivos são direcionamentos gerais vinculados ao que se pretende, enquanto as metas devem ser numéricas e temporais. Sendo assim, o gerenciamento de resíduo sólido deve estar organizado da seguinte maneira:

- Planejamento: durante o planejamento levantam-se os aspectos ambientais, bem como os requisitos legais de maneira a se definir os objetivos e metas que se pretende atingir.
- Implementação e Operação: nessa etapa defini-se a estrutura de gestão e as responsabilidades de cada envolvido no gerenciamento.

Para isso, faz-se necessário a realização de treinamento e a sensibilização de todos os envolvidos. Durante essa etapa, é necessário o correto entendimento e operacionalização das etapas de coleta, manuseio, armazenamento, tratamento, transporte e destino final dos resíduos além da documentação necessária.

- Verificação e Ações corretivas: Além das etapas funcionais de operação, é mister e de fundamental importância ter definidas, e em operação, as técnicas de verificação, tais como: monitoramento e medições, controle de não-conformidades ações preventivas e corretivas, registros e auditorias.
- Revisão da Gestão: Sempre estar de acordo com a legislação, com parâmetros e dados operacionais em funcionamento, visando dessa maneira à melhoria contínua (MAROUM, 2006).

No setor empresarial, o correto funcionamento do gerenciamento dos resíduos sólido deve seguir um planejamento ancorado nas etapas acima citadas, bem como quantificar custos e atender aos requisitos legais aplicáveis.

Quando corretamente realizado o gerenciamento de resíduos sólidos, estabelece estratégias para reuso, recuperação e redução, possibilitando a prevenção do impacto ambiental do processo, reduzindo a geração de resíduos e o consumo de recursos naturais. Com a expansão do correto gerenciamento, a tendência é diminuir a reciclagem externa de materiais (TOCCHETTO, 2005).

É válido destacar que há resíduos que não podem ser reintroduzidos na produção, muitos decorrentes de atividades paralelas à produção de produto ou serviço prestado. Assim faz-se necessário viabilizar a otimização da gestão de resíduos, seguindo um planejamento orquestrado em 10 etapas, a saber: Geração (fontes); Caracterização; Manuseio; Acondicionamento; Armazenamento; Coleta; Transporte; Reúso/reciclagem; Tratamento e; Destinação, seguindo sempre final princípio dos 3'R. Redução na fonte geradora, Reutilização e Reciclagem (TOCCHETTO, 2005).

### **3.1.3 Produção Mais Limpa**

Uma maneira de minimizar os impactos negativos decorrentes de uma atividade industrial consiste na utilização da melhor tecnologia disponível, estabelecer programas ambientais e gerenciar adequadamente os resíduos, ou seja, estabelecer uma gestão ambiental integrada. Dessa maneira, a Produção mais Limpa auxilia no desenvolvimento eficiente da gestão empresarial, uma vez que aplicado e efetivado na empresa caracteriza uma estratégia integrada ao processo.

De acordo com Pimenta; Gouvinhas (2007) a P+L é entendida como uma estratégia preventiva, integrativa e continuada aplicada a diferentes serviços, pro-

cessos e produtos, a qual tem como objetivo a aplicação de uma combinação entre as estratégias econômica, ambiental e tecnológica, a fim de diminuir os impactos gerados por um processo, visando à redução de riscos que possam atingir ao homem e ao meio ambiente, como também aumentando a eficiência no uso de matérias-primas.

A Produção Mais Limpa esta ancorada em três níveis de priorização, a saber: evitar a geração de resíduos e emissões, Nível 1; Reintegrar os resíduos gerados no processo produtivo, Nível 2; e Na sua impossibilidade das estratégias dos níveis 1 e 2, a reciclagem externa pode ser utilizadas, Nível 3 (SENAI, 2012). Dos três níveis apresentados é de fundamental importância estabelecer a o balanço dos fatores ambiental, econômico e tecnológico do setor produtivo em que se encontra a necessidade de implantação de uma estratégia viável a esses fatores.

Segundo Werner, Bacarji e Hall (2009) a P+L ocorrem de maneira eficiente quando o balanço ambiental consegue responder as indagações a respeito das situações críticas da geração de resíduos, como as causas e conseqüências. O balanço econômico, por sua vez, deve estabelecer os custos com o controle dos resíduos, ou seja, o somatório dos gastos com tratamento, transporte, acondicionamento e disposição final dos resíduos gerados. Deve também quantificar os gastos com matéria-prima. Por fim, o balanço tecnológico ressalta a importância da constante busca por soluções através de pesquisas e parcerias.

Quando sanadas todas as alternativas cabíveis a redução na fonte e reutilização é importante viabilizar a reciclagem externa do resíduo, de modo que este sirva de matéria-prima a outro processo industrial – Reciclagem externa, nível 3.

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos podem apresentar diversas classificações, tais como: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Resíduos Sólidos Domésticos (RSD), Resíduos Sólidos Industriais (RSI), entre outros. Embora seja possível dar diversas denominações/classificação aos resíduos, considerando especialmente sua origem, é de fundamental conhecer o grau de riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública que cada resíduo representa, para possibilitar o seu correto gerenciamento. Faz-se necessário estabelecer a sua classificação de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10004/2004.

Segundo a referida norma, os resíduos são classificados em comparação às características de riscos e impactos conhecidos, quanto ao processo ou atividade de origem, quanto aos seus constituintes e características específicas.

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

De acordo com a NBR 10004/2004 os resíduos podem apresentar quatro classificações:

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

**Resíduos Classe I – Perigosos:** conferem àqueles resíduos que apresentam periculosidade associadas à características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Para ser considerado inflável o resíduo deve, quando em estado líquido apresentar ponto de fulgor inferior a 60°C. Quando não estiver em estado líquido e em condições normais de temperatura e pressão, produz fogo por fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas. Como oxidante, o resíduo resultar em combustão ao liberar oxigênio, ou ser um gás inflamável (ABNT, 2004).

Referente à corrosividade:

a) ser aquosa e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5, ou sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5; b) ser líquida ou, quando misturada em peso equivalente de água, produzir um líquido e corroer o aço (COPANT 1020) a uma razão maior que 6,35 mm ao ano, a uma temperatura de 55°C, de acordo com USEPA SW 846 ou equivalente (ABNT, 2004, p 3-4.).

Quanto à reatividade, o resíduo para ser considerado reativo, deve:

a) ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar; b) reagir violentamente com a água; c) formar misturas potencialmente explosivas com a água; d) gerar gases, vapores e fumos tóxicos em quantidades suficientes para provocar danos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando misturados com a água; e) possuir em sua constituição os íons CN ou S<sup>2-</sup> em concentrações que ultrapassem os limites de 250 mg de HCN liberável por quilograma de resíduo ou 500 mg de H<sub>2</sub>S liberável por quilograma de resíduo, de acordo com ensaio estabelecido no USEPA - SW 846; f) ser capaz de produzir reação explosiva ou detonante sob a ação de forte estímulo, ação catalítica ou temperatura em ambientes confinados; g) ser capaz de produzir, prontamente, reação ou decomposição detonante ou explosiva a 25°C e 0,1 MPa (1 atm); h) ser explosivo, definido como uma substância fabricada para produzir um resultado prático, através de explosão ou efeito pirotécnico, esteja ou não esta substância contida em dispositivo preparado para este fim (ABNT, 2004, p 4.).

A patogenicidade consiste no último fator determinante da periculosidade de um resíduo. Um resíduo patogênico será aquele que contiver ou suscitar a presença de microorganismos: “patogênicos, proteínas virais, ácidos desoxiribonucléico (ADN) ou ácido ribonucléico (ARN) recombinantes, organismos geneticamente modificados, plasmídios, cloroplastos, mitocôndrias ou toxinas capazes de produzir doenças em homens, animais ou vegetais” (ABNT, 2004).

**Resíduos Classe II – Não Perigosos: constituem dos resíduos que não apresentam perigo, sendo eles:** Resíduos de restaurantes (restos de alimentos), Resíduos de madeira, Sucata de metais ferrosos, Resíduos de materiais têxteis, Sucata de metais não ferrosos, Resíduos de minerais não-metálicos, Resíduos de papel e papelão, Areia de fundição, Resíduos de plástico polimerizado, Bagaço de cana e Resíduos de borracha (ABNT, 2004).

**Resíduos Classe II A – Não Inertes:** conferem aqueles resíduos que não se enquadram nas demais classificações, ou seja, não são Perigosos, nem Não Perigosos e nem Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

**Resíduos Classe II B – Inertes:** representam qualquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos ao contato com água destilada ou desionizada em temperatura ambiente, não apresentem nenhum de seus constituintes solubilizados a uma concentração superior ao estabelecido pela potabilidade de água, exceto parâmetros como: aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, de acordo com o anexo G da própria NBR 10.004/04.



A metodologia de classificação de resíduo baseia-se na resposta dada a perguntas pertinentes ao resíduo, conforme apresentado na Figura 02 abaixo.

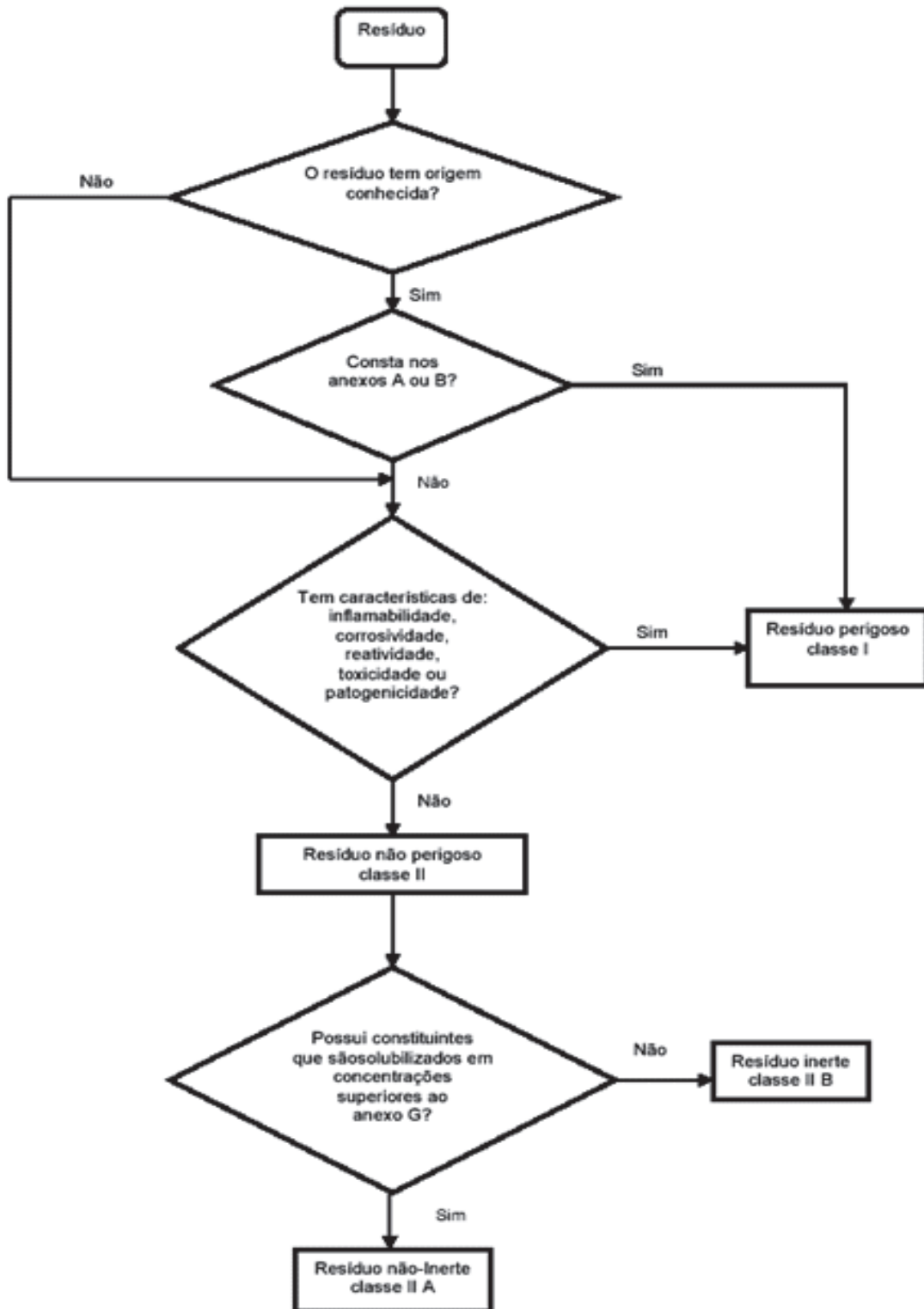


Figura 02 – Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos sólidos.

Fonte ABNT NBR 1004, 2004.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Segundo Morris Cohen *apud* Padilha (2000):

materiais são substâncias com propriedades que as tornam úteis na construção de máquinas, estruturas, dispositivos e produtos. Em outras palavras, os materiais do universo que o homem utiliza para “fazer coisas” (PADILHA, 2000, p 13.).

Materiais sólidos são classificados em três principais grupos, a saber, materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos. Esta classificação é baseada na estrutura atômica e nas ligações químicas predominantes em cada grupo. Além desses três grupos há outros dois incorporados a classificação, são eles: compósitos e semicondutores (PADILHA, 2000).

Basicamente pode-se dizer que os materiais metálicos são aqueles com combinações metálicas, através do compartilhamento de uma “nuvem eletrônica”. (CALLISTER, 1991).

Os materiais cerâmicos são compostos entre elementos metálicos e não-metálicos, muito frequentemente óxidos, nitretos e carbetos. Há um número elevado de materiais que se enquadram nessa classificação. Exemplo: compostos de minerais, argilas, cimento e vidro.

Estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de eletricidade e de calor, e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes rudes do que metais e polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, cerâmicas são duras, mas muito frágeis (CALLISTER, 1991).

Classificam os polímeros como compostos orgânicos quimicamente baseados em carbono, hidrogênio, e outros elementos não metálicos. O compósito por sua vez constitui o material composto por mais de um material, de modo a apresentar as melhores características. Os semicondutores apresentam propriedades elétricas e sensíveis a impurezas (CALLISTER, 1991).

Para estabelecer a classe na qual o material se enquadra é necessário conhecer a estrutura físico-química do mesmo, com base nas ligações e composição química, estrutura cristalina e comportamento térmico. Para tal, é necessário análises para determinação dessas propriedades.

### 3.3.1 Difração de Raios X (DRX)

A Difração de Raios X constitui de uma análise voltada à determinação da estrutura cristalina de materiais. Possibilita à identificação dos arranjos atômicos e molecular de sólidos, invisíveis a observação direta. Através da difração é possível estabelecer o estudo detalhado do reticulado cristalino, de modo a possibilitar a determinação de distâncias interatômicas, ângulos de ligação e vários outros aspectos estruturais (PADILHA, 2000).

Basicamente pode-se dizer que a difração ocorre quando fótons de raios X encontram obstáculos regularmente espaçados, com ordem de grandeza semelhante ao seu comprimento de onda.

A difração segundo Callister é “uma consequência de correlações físicas específicas que são estabelecidas entre duas ou mais ondas que foram espalhadas pelos obstáculos” (CALLISTER, 1991, p 31.). Ou seja, a introdução de um determinado feixe de comprimento de onda a um cristal desconhecido, faz que o feixe seja difratado por este, possibilitando a obtenção da distância dos átomos no cristal e, conseqüentemente, a estrutura cristalina.

Assim, a obtenção da estrutura cristalina se dá mediante a combinação entre o espalhamento do feixe incidente de raios X por cada átomo do cristal, e a interferência entre as ondas espalhadas pelos diferentes átomos. Com a diferença entre o caminho percorrido pelos raios X e o comprimento de onda da radiação incidente, será possível verificar a estrutura cristalina do material (PADILHA, 2000). Essa condição é expressa pela lei de Bragg, ou seja,  $n \lambda = 2 d \sin \theta$ , (Figura 03) onde:

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação incidente;

$n$  = número inteiro (ordem de difração);

$d$  = à distância interplanar para o conjunto de planos  $hkl$  (índice de Miller) da estrutura cristalina; e

$\theta$  = o ângulo de incidência dos raios X (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos) (PADILHA, 2000)

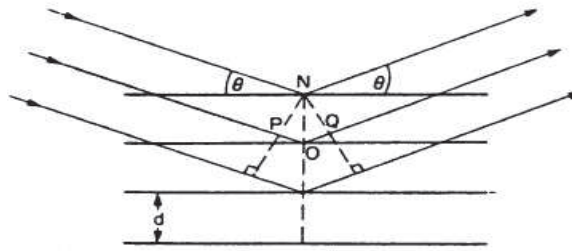


Figura 03 - Difração de raios X por um cristal

Fonte: PADILHA, 2000

A análise de Difração de Raios X pode apresentar diferentes métodos quando considerado a estrutura monocristalina e policristalina de um material. Basicamente a diferença entre esses métodos consiste na fixação do ângulo e na radiação incidente a amostra.

Em análise de policristais o método de difração consiste na incidência de radiação monocromática, comprimento de onda específico com um ângulo de incidência variante.

Também conhecido como método de pó, a análise de policristais é realizada por meio de dois equipamentos: câmara de Debye-Scherrer e Difrátômetro.

O princípio básico da Difração consiste na emissão de feixes de raios-x, ondas, que ao bater em um obstáculo, a amostra, são capazes de espalhar ou refletir o mesmo comprimento de onda.

A onda ao interagir com o material da amostra é absorvida e remetida pelo elétron desta. Se os átomos que geram o espalhamento estiverem arranjados será possível estabelecer a estrutura cristalina do material (KAHN, 2004).

De maneira esquemática, conforme a Figura 03 é possível entender o funcionamento de um difratômetro.

Nesse equipamento o feixe de raios-x é gerado pela fonte (S) em seguida passa pelo colimador (A) e incide na amostra C, a qual é fixada sobre o suporte H. A amostra sofre movimento de rotação em torno do eixo O, perpendicular ao plano do papel. O feixe difratado passa pelos colimadores B e F e incide no detector de raios x G, o qual está sobre o suporte E. Os suportes E e H são acoplados mecanicamente de modo que o movimento de 2 x graus do detector é acompanhado pela rotação de x graus da amostra. Este acoplamento assegura que o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão serão iguais à metade do ângulo de difração  $2\theta$ . O detector pode varrer toda a faixa de ângulos com velocidade constante ou ser posicionado manualmente em uma posição desejada (PADILHA, 2000. p 95).

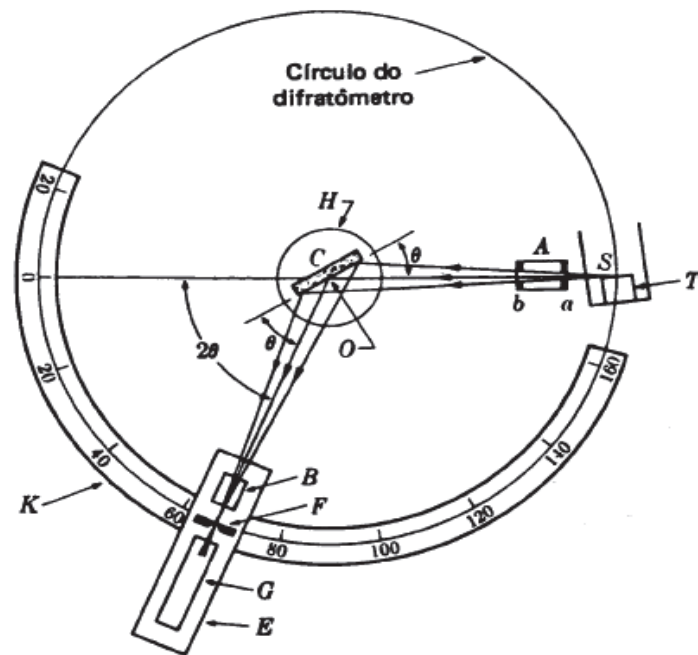


Figura 04 - Difratômetro esquemático de raios X

Fonte: B.D. Cullity *apud* PADILHA, 2000.

O espectro de radiação gerado a partir do tubo de raios X não é monocromático, apresenta radiação característica do material empregado como ânodo e um espectro contínuo. Portanto, para que haja a difração, conforme acima apresentado, é necessário remover a radiação referente à linha  $K\beta$ , assim com parte do espectro contínuo.

Segundo Kahn (2004) há duas alternativas aplicáveis a essa situação. A primeira delas consiste na utilização de filtros, que permitam a passagem da radiação referente da linha  $K\alpha$  e a absorção da linha  $K\beta$ . Exemplo: filtro de Níquel (Ni) sobre a emissão de ânodo de cobre (Cu). A segunda alternativa, por sua vez a mais usual, consiste na utilização de um filtro monocromador, situado na passagem dos raios X entre a amostra e o detector, permitindo somente a passagem da radiação de comprimento de onda de interesse ( $K\alpha$ ), esse procedimento remove ainda radiações de espalhamentos não coerentes, resultantes da interação amostra e raios-x.

### 3.3.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A técnica analítica nuclear de fluorescência de raios X (FRX) consiste na avaliação quali-quantitativa da composição química de uma determinada amostra.

A fluorescência de raios X dos elementos presentes numa amostra ocorre quando esta é atingida por raios X oriundos de um tubo de raios X. Ao incidirem nos átomos da amostra, esses raios X primários ejetam elétrons das camadas próximas do núcleo. As vacâncias assim criadas são imediatamente preenchidas por elétrons das camadas mais externas e simultaneamente há emissão de raios X (fluorescentes ou secundários) cuja energia corresponde à diferença entre as energias dos níveis e sub-níveis das transições eletrônicas envolvidas (ENZWEILER, 2010, p. 01).

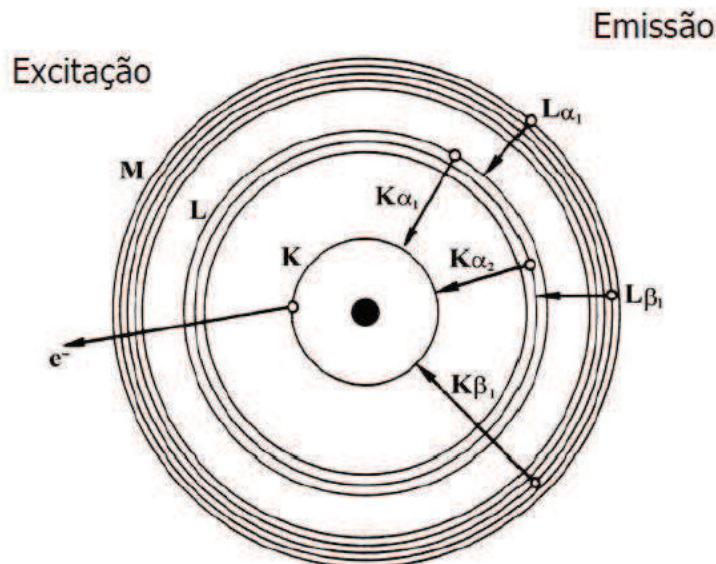


Figura 05 - Interação de elétrons com um átomo.

Fonte: ENZWEILER, 2010.

Na fluorescência os raios X incidentes sobre um elétron da camada mais interna no átomo é arrancado da camada, mais próxima do núcleo, camada K, sequencialmente as camadas L, M e N podem transmitir elétrons para preencher a vacância da camada K. Como consequência, há a emissão de radiação eletromagnética correspondente a região dos raios X.

Cada transição entre sub-níveis específicos, possui uma energia característica e por isto, uma denominação única. Por exemplo, a vacância da camada K pode ser preenchida por elétrons de dois sub-níveis da camada L, o que origina raios X com dois valores de energia,  $K\alpha_1$  e  $K\alpha_2$ . Elétrons da camada M também podem ocupar a vacância da camada da K e tal transição dá origem a raios X  $K\beta$ . Da mesma forma, vacâncias da camada K são preenchidas por elétrons das camadas M e N, e os raios X característicos emitidos recebem denominações  $L\alpha$ ,  $L\beta$  com índices específicos (ENZWEILER, 2010, p. 02).

Sendo assim as energias dos raios X, emitidas em decorrência das transições eletrônicas, correspondem às diferenças de energia dos sub-níveis envolvidos.

### 3.3.3 Termogravimetria (TG)/Análise Térmica Diferencial (DTA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A caracterização térmica constitui num grupo de técnicas onde propriedades físicas e químicas são monitoradas em função do tempo e temperatura. Sendo a amostra submetida a uma determinada variação de temperatura, atmosfera específica e programação controlada (WENDHAUSEN; RODRIGUES; MARCHETTO, 2004)

Resumidamente pode-se dizer que Termogravimetria representa a mudança de massa devido à interação de temperatura com a atmosfera, podendo gerar oxidação, vaporização e/ou decomposição. Análise Térmica Diferencial (DTA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) correspondem a processos físicos e químicos envolvendo variação de energia comparando-a com uma amostra inerte de referência (WENDHAUSEN; RODRIGUES; MARCHETTO, 2004)

O DSC foi desenvolvido de modo a sanar as dificuldades encontradas no DTA ou compensá-las, criando um equipamento capaz de quantificar a entalpia envolvida nas reações (WENDHAUSEN; RODRIGUES; MARCHETTO, 2004).

Análise de DTA e DSC são aplicáveis segundo Wendhausen; Rodrigues e Marchetto (2004) a: alívio de tensões, análises de copolímeros e blendas, catálises, capacidade calorífica, condutividade térmica, controle de qualidade, determinação de pureza, diagramas de fase, entalpia das transições, estabilidade térmica e oxidativa, grau de cristalinidade, intervalo de fusão, nucleação transição vítrea, transições mesofase e taxas de cristalização e reações.

### 3.3.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Utilizada para três finalidades básicas, a análise de infravermelho possibilita identificar materiais desconhecidos, determinar a qualidade ou consistência de uma amostra, assim como, determinar a quantidade de componentes de uma mistura, quando possível.

O método consiste na passagem da radiação IR (*infrared* – infravermelho) através de uma amostra. Sendo que parte dessa radiação seja absorvida, espectro de absorção e parte transmitida, espectro de transmissão, pela amostra. Mediante a quantidade da radiação absorvida e transmitida é possível se obter um espectro mo-

lecular, tendo assim uma impressão digital molecular da amostra (TERMO NICOLET, 2001).

A impressão digital da amostra representa os picos de absorção (bandas) que correspondem às frequências de vibrações entre as ligações dos átomos que compõem o material. Como duas moléculas não podem transmitir o mesmo espectro infravermelho devido a combinação única entre os átomos, o que torna essa ferramenta uma importante análise quantitativa (TERMO NICOLET, 2001).

A frequência de absorção presente num espectro de infravermelho corresponde a uma frequência de vibração da molécula. Para que se consiga observar em espectro é necessário que haja uma mudança no momento dipolar de uma molécula, ou seja, a cada nível de energia vibracional corresponde a mudanças de níveis rotacionais. O espectro formado constitui de bandas de vibro-rotação, uma vez que as linhas do espectro se sobrepõem em virtude da mudança de níveis na molécula (HAACK, 2010).

Então as bandas possibilitam identificar as reações presentes na molécula pelas características principais dos grupos funcionais, tais como: C=O (1800 a 1650  $\text{cm}^{-1}$ ), OH (3500 a 3200  $\text{cm}^{-1}$ ), banda larga para OH de ácidos (3400 a 2700  $\text{cm}^{-1}$ ), C-O (1300-1000  $\text{cm}^{-1}$ ), N-H (3400-3200  $\text{cm}^{-1}$ ) C-H alifáticos saturados (3000-2800  $\text{cm}^{-1}$ ), =C-H insaturados (3100-3000  $\text{cm}^{-1}$ ), C=C aromáticos (1650-1450  $\text{cm}^{-1}$ ) entre outras (HAACK, 2010).

### **3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

O MEV constitui de uma análise microestrutural capaz de se obter a imagem tridimensional da superfície de um determinado material. Além de possibilitar uma análise microestrutural, possibilita também uma microanálise química. Para Callister (1991) o MEV constitui de uma útil e excelente ferramenta para caracterização de materiais.

Basicamente, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um microscópio que utiliza-se de elétrons para formar imagens tridimensionais da superfície do material. Ao ser analisado a superfície da amostra é varrida com um feixe de elétron de modo que seja coletado e exibido na mesma taxa de varredura sobre um tubo de raio catódico, uma tela similar a de TV. A imagem exibida represente as características específicas da superfície da amostra (CALLISTER, 1991).



Para a realização da análise, a amostra não precisa ser necessariamente polida, entretanto, deve ser eletricamente condutiva, sendo que um fino revestimento metálico deve ser aplicado à amostras não condutivas. O MEV possibilita ampliações de 10 a mais de 50000 diâmetros, assim como possíveis profundidades de campo (CALLISTER, 1991).

### 3.4 LÃ DE ROCHA

Encontrada na forma de placas rígidas ou semi-rígidas, feltros e flocos. A lã de rocha é adequada ao isolamento térmico e acústico, devido à capacidade de suportar altas temperaturas, ter baixa condutividade térmica e elevada absorção acústica (MILENA, 2006 *apud* CHENG; LIN; HUANG, 2010).

#### 3.4.1 Processo Produtivo

Tendo como principal matéria-prima, rocha vulcânica, a lã de rocha é uma substância fibrosa mineral inorgânica produzida pela fusão de uma mistura de 60% de diábase, 20% de pedra calcária e 20% de coque a uma temperatura de cerca de 1600°C. Basicamente, a fabricação de lã de rocha se dá pela formação de fibras, que passam a ser constituídas por um aglutinante de resina e aditivos ao final de sua fabricação (CRUM et al, 1985).

É a partir de vários tipos de rochas de diábase, com composições químicas específicas que a lã de rocha é produzida. Embora utilize alta tecnologia, o processo de fabricação é considerado simples (RODRIGUES, 2009). O processo de fabricação dá-se por meio de sete etapas essenciais, a saber: Recebimento da matéria-prima, Preparo da matéria-prima, Fusão, Formação das Fibras, Resina, Resfriamento, Aplicação e Corte/Embalagem, conforme Figura 06.

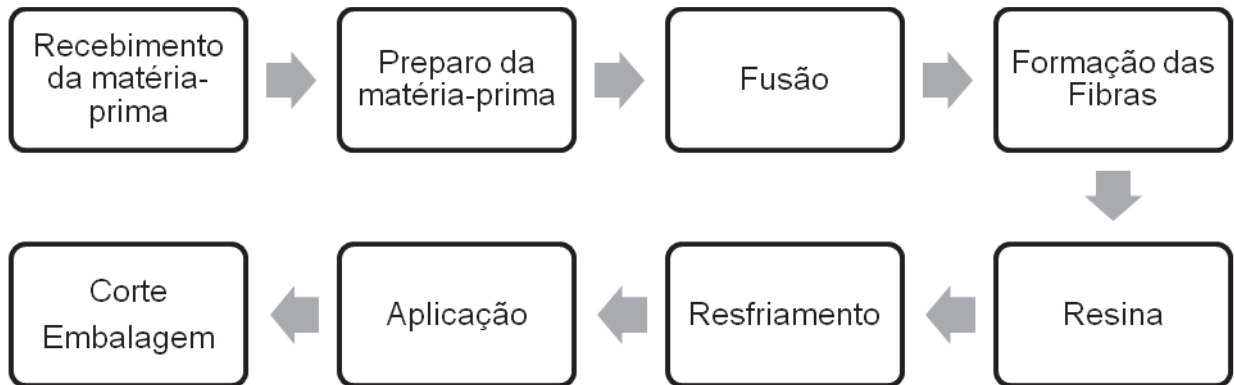


Figura 06 – Fluxograma do Processo Produtivo.

Fonte: Autora, 2013.

O início do processo produtivo dá-se pelo recebimento da matéria-prima, sendo, especificamente, diábase, calcário, coque e aditivos. Após este processo, as matérias-primas são preparadas de acordo com as especificações químicas de cada material, onde passaram por uma prensagem e serão transformadas até a fusão em altas temperaturas, entre 1300°C a 1500°C. A mistura fundida é centrifugada em um cilindro giratório de metal resfriado, sob pressão de gás argônio ou nitrogênio. Ocasionalmente o brusco resfriamento de material, dando origem as fibras. A elas é adicionada a resina, denominada de resina ligante, de modo, a promover a ligação das partículas dos materiais (LABRINCHA, 2006; ROCHA, 1998; TRDIC et al, 1999; UEDA et al, 1999 *apud* RODRIGUES, 2009). Por fim é aplicada a lã de rocha um revestimento, em seguida é cortada, moldada da forma em que se deseja e embalada (DUNSTER, 2007).

### 3.4.2 Geração de Resíduo

Indicada para vários ambientes, devido às propriedades térmicas e acústicas, a lã de rocha consiste num eficaz método de economia de energia, conforto ambiental e segurança para ambientes que a utilizem.

Geralmente aplicada à indústria, a lã de rocha é vastamente usada nos seguimentos industriais da construção civil, naval, petroleiro, termoelétrico, proteção passiva contra o fogo, hidropônico, entre outros. Sendo assim, a lã de rocha apre-

senta boa empregabilidade em paredes de interiores, fachadas, pavimentos e coberturas. Também, como proteção anti-incêndios, barreiras corta-fogo, construção de arcas frigoríficas, correções acústicas, e em diversos setores industriais (LA ROCHA, 2013)

A lã de rocha promove a barreira na transferência de calor, com o isolamento térmico e o amortecimento das ondas sonoras, evitando a propagação do som por reverberação e vibração dos conjuntos construtivos, com o isolamento acústico (LA ROCHA, 2013)

A determinação da capacidade isolante de um material consiste na baixa capacidade térmica ( $k$ ) deste, ou seja, quanto menor a capacidade térmica de uma material, maior será o isolamento desempenhado por ele (SANTOS, 2008).

Por se tratar de um material isolante é importante considerar sua estrutura do material, especialmente a espessura. Pois a espessura, que é inversamente proporcional ao seu grau de isolamento quanto menor a espessura de um material, maior poderá ser sua capacidade térmica, tendo assim menor desempenho como isolante (SANTOS 2008).

Quando instalado um sistema de isolamento térmico e acústico deve-se considerar o desgaste do material, especialmente pela diferença de temperaturas interna e externa do isolamento, fazendo com que o material apresente redução da espessura e conseqüentemente, redução de sua capacidade isolante, necessitando de uma substituição, gerando assim o resíduo.

### **3.4.3 Aplicações do resíduo de lã de rocha**

Diversas são as aplicações encontradas a nível mundial, referente ao resíduo de lã de rocha. Segundo Milena (2006) *apud* Cheng, Lin e Huang (2010) há duas aplicações de maior viabilidade: agregado na produção de cimento ou como reforço de solos para crescimento de plantas.

Todavia, mediante a caracterização do resíduo de lã de rocha é possível encontrar alternativas também viáveis a esse material. Segundo Dunster (2007) o resíduo de lã de rocha poderia ser facilmente reciclado uma vez que estivesse livre de contaminantes. Para isso é fundamental identificar a natureza da instalação na qual a lã de rocha está sendo utilizada.

#### 3.4.3.1 Produção de lã de rocha

De acordo com Dunster, o resíduo de lã de rocha pode ser reciclado na própria produção original, uma vez que haja um procedimento adequado entre a empresa produtora e o consumidor. Para viabilizar essa prática seria necessário a realização de análises por parte do consumidor, demonstrando a não contaminação do material. Somente assim viabilizaria a reutilização do resíduo na produção original, formalizando um ciclo fechado entre produtor e consumidor (DUNSTER, 2007).

#### 3.2.3.2 Cultivo Agrícola

Conforme acima citado, há estudos que apontam a viabilidade da utilização de resíduo de lã de rocha no cultivo agrícola. Tiwari, Pathak e Lehri (1989) utilizaram o resíduo de lã de rocha como adubo para produção de trigo e grão de bico. Depois de um período de doze semanas em compostagem, o cultivo que utilizou a lã de rocha compostada, apresentou significativo rendimento na absorção de nutrientes pelas culturas, em especial, no cultivo de grão de bico.

#### 3.2.3.3 Vidro

Ainda considerando a característica do resíduo de lã de rocha, propõem-se segundo alguns autores, a reutilização desse resíduo na indústria vítrea. A lã de rocha apresenta propriedades características da produção de constitucionais favoráveis para a obtenção de vidros e vitrocerâmicos, conforme estabelece Neves, Kniess e Della (2012), diante da mistura dos óxidos  $\text{SiO}_2$  e  $\text{NaO}$  majoritários, além de outros em menores teores.

O processo de vitrificação envolvendo um resíduo ocorre mediante a conversão do resíduo em um perfil estável e homogêneo, através de um tratamento térmico de vidro a fusão, acrescentando e modificando a composição inicial e aditiva específicos para o vidro. Embora aplicável a esse material, lã de rocha, essa tecnologia apresenta um considerado valor quando comparado ao depósito em aterro sanitário (COLOMBO *et. al*, 2003).

#### 3.2.3.4 Cimenteira

Além das aplicações acima citadas, a utilização da lã de rocha possui satisfatória aplicabilidade em compostos a base de cimento. Segundo Ceng; Lin e Huang (2010). A lã de rocha deve ser amassada e moída para ser utilizada como agregado fino, dependendo de sua composição química e do tamanho da partícula.

A utilização da lã de rocha em compostos de cimento acontece mediante a sua característica de pozolanicidade. Quando analisadas suas características químicas e mineralógicas foi possível estabelecer a relação de semelhança com materiais pozolânicos. (CENG; LIN; HUANG, 2010).

Ainda, de acordo com Ceng; Lin e Huang (2010) a adição de resíduos de lã rocha em compósitos à base de cimento melhora significativamente a sua resistência à compressão, resistência à tração, divisão, absorção, resistividade e resistência à penetração de cloreto de lítio, e aumenta a resistência à abrasão ligeiramente. Além das vantagens acima citadas, há a melhora na microestrutura de compostos de cimento a base de adição de lã de rocha (LIN et al, 2013). De acordo com, para que a lã de rocha seja considerada uma pozolana, deve, apresentar propriedades característicos aglutinantes desses materiais deve ser utilizada como agregado em concreto com granulometria de 75 microns.

### 3.3 CIMENTO

Os primeiros indícios da utilização de cimento ocorreram na antiguidade, por meio da utilização de gesso impuro calcinado pelos antigos egípcios. Porém, o primeiro concreto da história foi feito pelos gregos e romanos, em decorrência da mistura de cal, água, área, brita e pedra, tijolos e/ou telhas em metralha. Desse modo a sílica e a alumina proveniente de telhas queimadas ou da trituração de cal com cinzas vulcânicas, se combinaram com o calcário e originaram o que hoje conhecemos por cimento pozolânico, nome dado em homenagem a cidade de Pozzuoli, onde se encontrou a cinza vulcânica pela primeira vez (NEVILLE, 1923)

Foi no século XVIII que John Smeaton, desenvolvendo seu trabalho de reconstrução do farol de Eddystone, descobriu e reconheceu a importância das propriedades químicas da cal hidratada ao misturar o cimento ao calcário de elevada taxa de argila. À medida que outros cimentos foram surgindo, como o cimento hi-

dráulicos, até se obter o cimento considerado moderno, descoberto em 1845 por Isaac Johnson. Johnson queimou uma mistura de argila e greda (giz) até a formação de um clínquer, possibilitando reações que vieram a originar compostos de alta resistência ao cimento (NEVILLE, 1923).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, somente mediante a hidratação é capaz de desenvolver propriedades ligantes, como resultado da hidratação. É o material mais importante que constitui o concreto.

### 3.3.1 Cimento Portland

O Cimento constitui-se de um material mundialmente conhecido denominado em virtude da semelhança de cor e de qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland, um calcário extraído em Dorset, Inglaterra.

Cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento de massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (DABIEL, 2004).

Diante do processo de produção e das matérias-primas utilizadas, tem-se diferentes tipos de cimentos Portland: Cimento Portland de Alta Resistência inicial; Cimento Portland Branco; Cimento Portland de Moderada Resistência aos sulfatos; Cimento Portland de Alta Resistência a sulfatos; Cimento Portland Pozolânico e Cimento Portland Comum (DANIEL, 2004).

Segundo M.L. Berndt (2009) o processo produtivo de cimento Portland é considerado um dos processos produtivos mais poluentes. A poluição referente à produção do cimento esta relacionada a produção de Clíquer, em virtude da necessidade de se alcançar elevadas temperaturas para sua produção. As emissões diretas de CO<sub>2</sub> são em decorrência da queima de combustível para o aquecimento; as emissões indiretas são provenientes do consumo de energia elétrica durante a produção (KLEE, 2009).

De acordo com Gartner (2004) a produção de um metro cúbico de concreto, as emissões médias de CO<sub>2</sub> é de 0,2 toneladas , o que equivale a cerca de 0,08 t de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento. Sendo que 1 toneladas métricas de cimento produzido, resulta na emissão de cerca de 1 tonelada métrica de CO<sub>2</sub> (KLEE, 2009).

### 3.4 CONCRETO

O concreto constitui-se basicamente da mistura de cimento Portland com areia, brita e água (BRUNAUER; COPELAND, 1964 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Mehta e Monteiro (2008) 11 bilhões de toneladas métricas por ano de concreto são consumidos em todo o mundo.

Para que o concreto seja considerado bom é necessário a avaliação das propriedades – compacidade, durabilidade, resistência à tração, impermeabilidade, resistência à abrasão, resistência aos sulfatos dentre outras.

#### 3.4.1 Concreto seco

O concreto seco constitui-se de cimento Portland de Alta Resistência Inicial, agregados e areia. Para a produção de concreto seco é necessário considerar e analisar diversos pontos, de modo que todos atribuam:

a necessidade de uma consistência tal, que possa ser adensado pelos métodos previstos a produção de maneira que não haja excesso de trabalho e que a mistura seja suficientemente coesiva para o método de aplicação. Evitando assim a perda de homogeneidade do produto final (NEVILLE, 1923).

Essa necessidade está diretamente relacionada à características do concreto seco em apresentar consistência significativamente superior aos concretos plásticos, devido ao menor consumo de água. Sendo assim, são necessário para a sua fabricação um equipamentos de vibro-compressão (PETTERMANN, 2006).

##### 3.4.1.1 Agregados

O tamanho dos agregados utilizados no concreto pode variar mediante ao objetivo que se pretende atender com a utilização deste. Há concretos que aceitam uma grande variação granulométrica de seus agregados. Para concretos de maior qualidade usam-se agregados de dois tamanhos, sendo: agregados miúdos, partículas menores que 5 mm e os agregados graúdos, com no mínimo 5 mm (NEVILLE, 1982).

Os agregados podem ou não apresentar características específicas ao concreto. Segundo Neville (1982) é difícil definir um bom agregado, a menos que seja possível dizer que com a utilização desse agregado consegue-se um bom con-

creto. Nem sempre, um agregado aparentemente com características satisfatórias tem um bom desempenho. Este pode ser utilizado sem causar qualquer dano ao concreto, entretanto a sua influência é determinada mediante realização de análises específicas.

Segundo a norma C 294-69/ 1975 da ASTM há dez minerais de maior relevância para aplicação como agregado em concreto: Minerais de sílica (quartzo, opala, calcedônia, tridimita, cristobali); Feldspatos; Minerais micáceos; Minerais carbonatos; Minerais de sulfato de ferro; Minerais ferro-magnesianos; Zeolitos; Óxido de ferro e; Minerais argilosos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Além dos aspectos mineralógicos dos materiais é importante identificar a forma e textura da partícula, uma vez que ambas influenciam no adensamento e aderência das partículas no concreto. O agregado deve ser identificado, quanto a forma como arredondado, irregular, lamelas, anguloso ou outros. Quanto à textura, verifica-se se é vítrea, lisa, granular, áspera, cristalina porosa.

Embora importante, é difícil determinar a aderência dos agregados no concreto, pois a aderência é influenciada pelo conjunto das propriedades físicas e químicas dos agregados, em decorrência de sua composição química e mineralógica. Somado a isso, há o comportamento de outros agregados e/ou do cimento.

Outro ponto importante a ser considerado no agregado é a sua resistência, a qual também é difícil de ser reconhecida. Para obter-se a resistência é necessário realizar análises indiretas de compressão da amostra da rocha e do agregado solto, bem como análise de desempenho do concreto. Basicamente, uma boa resistência depende da composição, textura e estrutura do agregado (NEVILLE, 1982).

Tão importante quando outras características já citadas é identificar o comportamento deste nos espaços vazios do concreto, a massa unitária. Quando se pretende introduzir um agregado no concreto é necessário estabelecer a massa unitária, ou seja, massa de agregado que ocupa um recipiente com capacidade unitária, a fim de converter as quantidades representativas em massa em quantidades representativas de volume.

A massa unitária depende evidentemente, de quanto o agregado foi adensado e conclui-se que, para um material de uma dada massa específica, a massa unitária depende da distribuição de tamanhos e da forma das partículas: partículas de um tamanho único somente podem ser adensadas até um certo limite, mas partículas menores podem se juntar acomodando-se nos vazios entre as maiores, aumentando assim a massa unitária do material adensado. A forma das partículas tem grande influência sobre a compa-



cidade de arrumação das partículas que pode ser obtida (NEVILLE, 1982).

Na temática agregados é importante considerar três propriedades térmicas dos agregados: coeficiente de dilatação térmica; calor específico e; condutividade.

O coeficiente de dilatação térmica do agregado contribui para alteração do coeficiente de dilatação térmica do concreto, sendo que quanto maior o coeficiente de dilatação térmica do agregado, maior será o do concreto, Somando claro, a contribuição do teor e proporção do agregado. O calor específico e a condutividade são importante quando o agregado sofre algum aquecimento em decorrência especialmente de insolação (NEVILLE, 1982).

#### 3.4.1.2 Agregados Pozolânicos

Agregados pozolânicos são materiais que apresentam atividade pozolânica, ou seja, pozolanas. Pozolanas são materiais naturais ou artificiais que apresentam composição siliciosa ( $\text{SiO}_2$ ) ou silico-aluminosa ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), juntamente com óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e demais óxidos (COUTINHO, 2006).

As pozolanas naturais são aquelas de origem vulcânica ou sedimentar. Já as artificiais são materiais que em sua composição atendem aos requisitos de pozo-lanicidade. Geralmente as pozolanas artificiais são provenientes de processos industriais, ou de tratamento térmico (NETTO, 2006).

As pozolanas, por si só, têm pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, finamente pulverizadas e na presença de umidade, reagem com o hidróxi-do de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) à temperatura ambiente, formando produtos com capacidade cimentante (COUTINHO, 2006). A utilização de pozolanas, acontece de duas formas:

Como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação a massa ou volume do cimento, conforme (SILVEIRA, 1996 *apud* SANTOS (2006). Porém, independentemente de como a pozolana é utilizada, a reação pozolânica e os benefícios associados são os mesmos (MEHTA, 1987). Porém, deve-se considerar que cada material possui suas características próprias, o que proporciona resultados (valores) diferentes (NETT, 2006 pagina 15).

A substituição parcial de cimento por pozolanas em concretos representa não somente a redução do consumo de cimento, mas numa redução em todo um

processo de produção, destacando a redução no consumo energético, exploração mineral e custos associados à produção (SANTOS, 2006 *Apud* NETTO, 2006).

Concretos que utilizam cimento Portland, conferem com à adição de agregados pozzolânicos benefícios que vão além da parte estrutural, como menor calor de hidratação, melhor resistência e maior durabilidade. Para Netto (2006) as utilizações de pozolanas desempenham o aumento da resistência a fissuração, maior impermeabilidade e durabilidade.

Embora vantajoso, a utilização desses agregados também apresenta desvantagens, destacando a exigência do uso de aditivos redutores de água e diminuição na resistência inicial (SANTOS, 2006 *apud* NETTO, 2206).

Desta forma, para que um material seja considerado pozzolânico ele deve atender as exigências químicas e físicas estabelecidas pela NBR 12653/2012. Conforme Tabelas 01 e 02 abaixo.

Tabela 01 – Exigências Químicas

Propriedades	Classes de material pozzolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70	70	50
SO <sub>3</sub> , % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR 12653/2012.

Tabela 02 – Exigências Físicas

Propriedades	Classes de material pozzolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozzolânica:			
cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín	75	75	75
com o cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	115	110	110

Fonte: NBR 12653/2012.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a melhor utilização de agregados em concreto seco é utilizar agregados com características pozolanicas juntamente com cimento Portland de Alta Resistência.

## 4 METODOLOGIA

A classificação e/ou caracterização de um material seja este resíduo, ou não, busca elucidar os fenômenos físicos, químicos, biológicos ou mineralógicos de cada material. Para tanto, existem inúmeras maneiras de estabelecer o comportamento de um material em análise, isso depende, por sua vez, dos objetivos que se pretende alcançar.

As análises aqui, descritas e discutidas tem por objetivo estabelecer a melhor alternativa de reutilização para o resíduo de lã de rocha, material de isolamento térmico e acústico.

Segundo Dunster (2007) a lã de rocha pode ser facilmente reciclada, desde que não apresente nenhum contaminante decorrente de sua instalação e utilização.

Visando melhor elucidar os parâmetros analisados, considerou a lã de rocha comercial, também como amostra a ser analisada. Portanto, as análises realizadas em cada amostra seguem apresentada na Tabela 01, abaixo.

Tabela 03 – Análises realizadas para cada amostra.

Amostra	Análises
LÃ DE ROCHA (Resíduo)	Classificação completa – NBR 10004; Óleos e graxas; Umidade 42°C e 105°C; Perda ao fogo DRX FRX FTIR ATD/TG
LÃ DE ROCHA (Comercial)	Óleos e graxas; Umidade 42°C e 105°C; Perda ao fogo ATD/TG

### 4.1 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O resíduo analisado nesse estudo é proveniente do isolamento térmico e acústico da caldeira e do precipitador eletrostático de uma Usina Termoelétrica. Por se tratar de um resíduo homogêneo, conforme definição do item 2.2 da norma ABNT NBR 10007, o resíduo utilizado nas análises provém de uma parcela do material coletado durante um carregamento do mesmo, na empresa.

Após a coleta, esse material permaneceu armazenado em um saco plástico (Figura 07) durante aproximadamente duas semanas.

Quando definidas as análises a serem feitas e os seus respectivos laboratórios, dividiu-se a amostra em outras parcelas menores a serem encaminhadas a análises.

Com relação à amostra de lã de rocha comercial. Foi solicitada junto à empresa uma amostra proveniente de um saco fechado do material. Que também permaneceu acondicionada em sacola plástica até ser encaminhada a análise.



Figura 07 – Amostra de lã de rocha

Fonte: Autora, 2013.

Em laboratório cada amostra passou por um processo de preparo, específico para a análise em questão. Como as lãs de rocha possuem formato de manta, foi necessário inicialmente desfibrar manualmente a amostra para a realização da classificação do resíduo. Em seguida as amostras desfibradas foram moídas em um moinho de bolas (Figuras 08 e 09) durante o período de 1 hora. Depois de moídas foram caracterizados por: Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX), Espectroscopia de Infravermelho (FTIR), Análise Térmica Diferencial / Análise Termogravimétrica (TD/TG) e Microscópio eletrônico de varredura (MEV).



Figura 08 – Moinho de Bolas.

Fonte: Autora, 2013.



Figura 09 – Peneiramento

Fonte: Autora, 2013.

#### 4.1.1 Classificação do resíduo

Por se tratar de um resíduo sólido industrial é de extrema importância classificá-lo quanto aos seus potenciais riscos ao ambiente e a saúde do homem. Tem-se, portanto, a classificação conforme a ABNT NBR 10004/2004. Onde, para efeitos dessa norma os resíduos apresentam quatro classificações, a saber: Resíduos classe I - Perigosos; Resíduos classe II - Não perigosos; Resíduos classe II A - Não inertes e; Resíduos classe II B - Inertes.

Para se realizar essa classificação é necessário realizar análises de solubilização, lixiviação, óleos e graxas, perda ao fogo, umidade, pH, reatividade, cianetos, sulfetos, cor e odor. Ressaltando que os ensaios são realizados em duplicada.

##### 4.1.1.1 Testes Iniciais

Os aspectos físicos das amostras (lã de rocha resíduo e comercial) foram avaliados de modo a caracterizar: cor, odor e estado físico. Após, são realizados testes de umidade a 42° e 105 °C e pH. A determinação do pH além de determinante a corrosividade é de extrema importância para a determinação da solução extratora a ser utilizada nos ensaios de extração de óleos e graxas, densidade e lixiviação a serem realizados com somente uma amostra, esta, o resíduo de lã de rocha (NBR, 2004).

##### 4.1.1.2 Lixiviação

Definido a solução a ser utilizada no estrato de lixiviado. 50g de massa da amostra (lã de rocha resíduo) para 100ml de solução é colocada sob agitação constante em um agitador rotativo, durante dezoito horas. Depois filtrado em um filtro de fibra de vidro de 0,7 a 0,8 micra (NBR, 2004) e encaminhado para análise.

A determinação do lixiviado é obtida da seguinte maneira: Fluoretos via espectrofotômetro de UV visível e os demais metais via ICP-OES, FAAS (espectroscopia de absorção atômica por chama) e GFAAS (espectroscopia de absorção atômica por forno de grafite).

#### 4.1.1.3 Solubilização

O ensaio de solubilização inicia-se pela compensação de massa, sendo 250g de massa da amostra (lã de rocha resíduo) seca para 1000ml de água deionizada. A massa é pesada e agitada durante 5 minutos. Depois de bem agitada é medido pH da amostra. E deixada em repouso durante 7 dias.

Após os 7 dias, novamente é medido o pH da amostra, pH final. Obtém-se assim o extrato solubilizado, depois de filtrado em membrana de nitrocelulose de 0,45 micra (NBR, 2004).

O extrato é dividido em cinco frações, sendo estas, uma encaminhada a cromatógrafo iônico para determinação de cloretos, fluoretos, sulfatos e nitratos. Outra para fazer a digestão com ácido nítrico p.a. até metade do volume inicial, e posteriormente avolumar para o volume inicial. A terceira fração é encaminhada para a determinação de metais via ICP –OES, FAAS (espectroscopia de absorção atômica por chama) e GFAA (espectroscopia de absorção atômica por forno de grafite). As duas últimas frações servem para determinar a surfactantes e fenóis totais (NBR, 2004).

#### 4.1.2 Caracterização do material

Por se tratar de um resíduo que se pretende sugerir uma utilização, este passa a ser classificado também como matéria-prima, material. Para isso, faz-se necessário o estabelecimento de parâmetros físico-químicos, estes caracterizados por meio de cinco análises, a saber: Espectroscopia de Infravermelho (FTR), Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Térmica Diferencial / Análise Termogravimétrica (TD/TG) e Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

##### 4.1.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A Fluorescência de Raios X trata de uma técnica voltada ao estudo dos materiais. Através dessa análise elementar é possível identificar a composição química de um material. Feito no equipamento de análise industrial, Sorter S1 da marca Bruker. A amostra (resíduo de lã de rocha) analisada, primeiramente passou, por um



tratamento térmico, Perda ao Fogo antes de ser analisado e identificado os compostos e minerais presente na amostra.

#### 4.1.2.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Realizada no equipamento da Shimadzu, modelo: IRPrestige-21 (Figura 10) a amostra por ser um sólido, foi branqueada com Brometo de Potássio (KBr), este translúcido no FTIR. Misturada com o KBr e constituído um pó fino a amostra foi comprimida (prensada) a formar uma pastilha fina que foi levada ao equipamento.

No equipamento a amostra é submetida a uma fonte de energia infravermelha emitida de uma fonte negra. O feixe de radiação é emitido até a amostra de maneira controlada. Esse feixe é refletido para fora da superfície da amostra, ou seja a as frequências específicas da amostra são absorvidas. O feixe refletido passar por um detector que medi o sinal e envia a Fourier para geração do gráfico e de manipulações adicionais desejáveis a análise.



Figura 10 – Equipamento de FTIR.

Fonte Autora, 2013.

#### 4.1.2.3 Difração de Raios X (DRX)

As análises aqui realizadas utilizaram do equipamento difratômetro de raios-x da marca Shimadzu Corporation modelo XRD-6000, com fonte radiação  $K\alpha$  do cobre (1,5405 Å) com um intervalo angular de 5 a 80° com um passo de 0,02° e uma velocidade angular de 2°/min, conforme Figura 11 abaixo.



Figura 11 – Equipamento difratômetro de raios X

Fonte: Autora, 2013

#### 4.1.2.4 Análise Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) / Análise Termogravimétrica (TGA/TG)

A análise Calorimetria Diferencial de Varredura avalia o comportamento endotérmico e exotérmico dos minerais existentes na amostra, bem como a entalpia. Enquanto a análise termogravimétrica baseia-se na perda de massa com a variação da temperatura. O equipamento utilizado foi TA instrument, do modelo Q600 Simultaneous TGA/DSC, equipado com um programador de temperatura e uma microbalança eletrônica, que permite a realização simultânea de análise térmica diferencial e

análise termogravimétrica (Figura 12). Realizado em atmosfera de ar sintético, uma taxa de aquecimento de 10°C/min em temperatura máxima de 1200°C em cadinho de alumina.



Figura 12 – Equipamento de análise térmica.

Fonte: Autora.

#### 4.1.2.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

O Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 13) a qual foi realizado a análise, consiste num modelo digital modelo EVO MA10 da Zeiss. Tal aparelho dentre outras características permite a análise da amostra, a uma resolução em operação a vácuo de 3 nm 30 kV no modo de elétrons secundários para Filamento de Tungstênio (W) (padrão) e de 2 nm 30 kV no modo de elétrons secundários para Sistema para operação com filamento LaB<sub>6</sub> (opcional). Com uma câmara de 310 mm (diâmetro) x 220 mm (largura) para amostra e uma faixa de ampliação de 7 – 1.000.000,00x.



Figura 13 – Microscópio Eletrônico de Varredura

Fonte: Autora, 2013.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO

Na tabela 04 se apresentam os resultados constatados na análise de classificação de resíduo sólido, segundo amostragem de classificação de resíduos sólidos. NBR 10004/2004 a lâ de rocha constitui-se de um resíduo Classe II A - Não Inerte em virtude da elevada presença de ferro, surfactante e fluoretos.

Tabela 04 – Resultados pertinentes a classificação

Classificação NBR 10004/2004	
Ferro	0,6
Surfactantes	0,6
Fluoretos	8,8
Óleos e graxas	
Lã de Rocha (Resíduo)	Ausência
Lã de Rocha (Comercial)	Ausência
Perda ao fogo	
Lã de Rocha (Resíduo)	N.D
Lã de Rocha (Comercial)	N.D

Referente à análise de óleos e graxas é possível concluir que não há a contaminação por essas substâncias durante a utilização do produto. A suposição inicial é devido ao ganho de massa apresentado a amostra deve-se a oxidação do ferro e da cristalização das fibras, explicado posteriormente na análise térmica.

### 5.2 CARACTERIZAÇÃO

Seguem apresentado abaixo, os resultados a cerca da caracterização.

#### 5.2.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

Tabela 05 - Composição nominal, em óxidos, do resíduo de lâ de rocha.

COMPOSTOS	QUANTIDADE (% MASSA)
SiO <sub>2</sub>	43,27%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,77%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,87%
CaO	13,53%
K <sub>2</sub> O	0,96%
MgO	13,39%
Na <sub>2</sub> O	0,59%
MnO	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	010%
TiO <sub>2</sub>	3,49%
SrO	-
P.F.	0,02%

A tabela 05. Se apresentam os resultados da composição química apresentada é possível determinar que este apresenta segundo a Norma NBR 12356/2012 características pozolánicas. Uma vez que, aproximadamente 62% da massa da lã de rocha é constituída de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , além de uma concentração inferior a 1,5% para  $\text{Na}_2\text{O}$ . Permitindo o prévio enquadramento do resíduo à classificação E para materiais pozolánicos, conforme apresenta a tabela 01 para as exigências químicas da NBR 12653/2012.

### 5.2.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Em análise de uma molécula complexa é possível encontrar muitas vibrações, entretanto nem todas são observadas. Alguns movimentos não mudam o momento dipolo da molécula, outros são tão parecidos que eles se fundem em uma única banda. As interações encontradas na amostra de lã de rocha seguem apresentado na Figura 14.

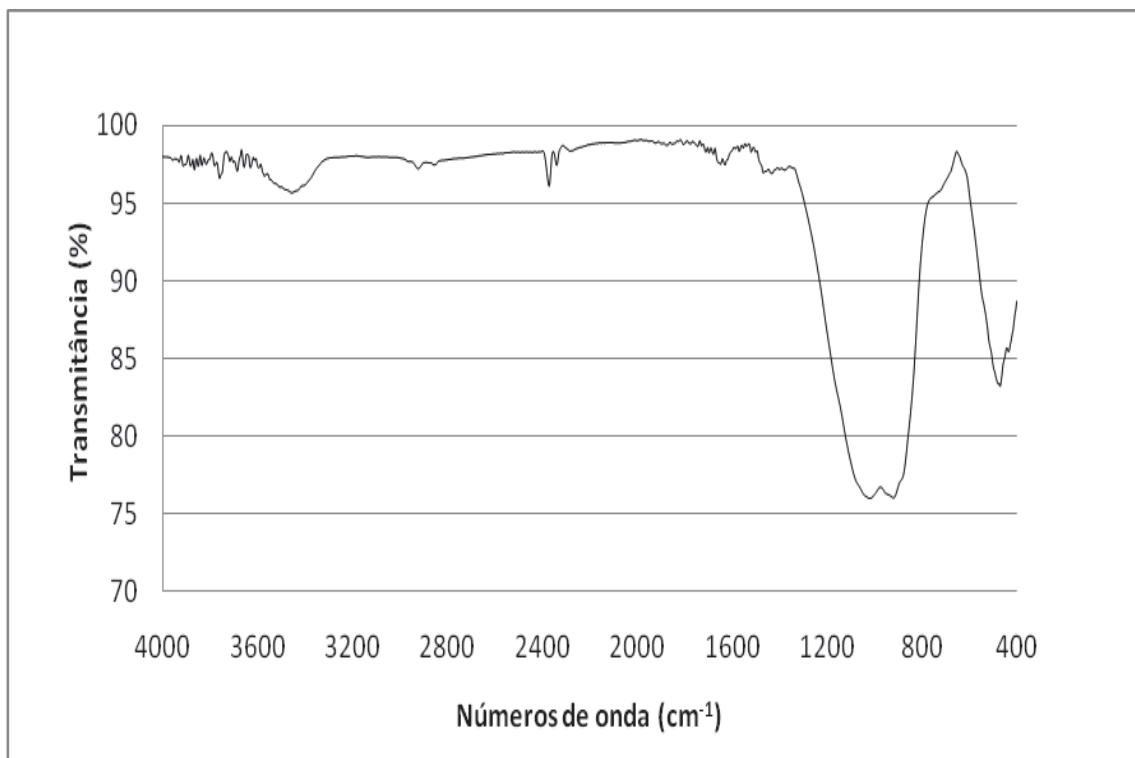


Figura 14 – Espectros de Infravermelho do Resíduo de Lã de Rocha

Mediante as bandas presentes no espectro de infravermelho foi possível identificar as ligações presentes na amostra, segundo a literatura científica.

De acordo com Madejová (2002) as bandas presentes entre  $3699\text{ cm}^{-1}$  e  $3620\text{ cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento de OH. Sendo que a região entre  $3.695$  e  $3.655\text{ cm}^{-1}$ , as absorções podem estar relacionada ao estiramento de hidroxilas externas ( $\text{Al}_2\text{O-H}$ ) já, em  $3.626\text{ cm}^{-1}$ , à hidroxilas octaédricas internas ( $\text{Al}_2\text{O-H}$ ) (De Moura, 2007 *apud* JUNIOR et al, 2011).

A região entre  $3.000$  e  $2.840\text{ cm}^{-1}$  equivale à matéria orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos), em bandas características de estiramentos de ligações C-H de alcanos (De Moura, 2006; Amorim L.V. et al, 2005 *apud* JUNIOR et al, 2011). A presença de matéria orgânica nessa banda é confirmada por Souto (2009) segundo o mesmo a matéria orgânica é caracterizada por uma banda presente em  $2929\text{ cm}^{-1}$  e em  $2871\text{ cm}^{-1}$ .

Ainda segundo Souto a presença, mesmo que pequena, de transmitância em  $1633$  e  $1680\text{ cm}^{-1}$  caracteriza água na amostra. Observada na região de  $3431\text{ cm}^{-1}$  a água é confirmada. Junior et al (2011) e por Madejová (2002) que também apontam a presença de bandas de deformação/absorção de H-O-H nessa faixa.

Na região entre  $1.652$  e  $1.635\text{ cm}^{-1}$ , as absorções são devido a uma forte interação O-H, a qual é propícia à manifestação de acidez. Em  $1.408\text{ cm}^{-1}$ , ocorrem as transições rotacionais de estiramento do tipo n Si-O- -H-OH. Na região entre  $1.150$  e  $960\text{ cm}^{-1}$ , ocorrem as vibrações de estiramento Si-O, que, entre os argilominerais estudados, são bastante similares. Na região entre  $960$  e  $550\text{ cm}^{-1}$ , as vibrações são atribuídas às deformações de R-O-H dos grupos octaédricos, onde R representa os íons alumínio, ferro ou magnésio. Especificamente, em  $918\text{ cm}^{-1}$ , evidenciam-se as bandas características de estruturas dioctaédricas, em que podem ser observadas, em todos os argilominerais, exceto na vermiculita. Na região abaixo de  $550\text{ cm}^{-1}$ , a forte absorção que ocorre se deve às vibrações em plano dos íons octaédrico e a seus oxigênios adjacentes (De Moura, 2006; Amorim L.V et al, 2005 *apud* JUNIOR et al, 2011, p 14.).

Um ponto (banda) a se destacar é entre  $3650$  a  $3200\text{ cm}^{-1}$  referente à ligação -O-H, da função alcoóis e fenóis. Como nessa faixa é possível enquadrar outras funções, pode-se dizer que essas vibrações estão associadas às moléculas de água, uma vez que banda correspondente a  $\text{H}_2\text{O}$  livre é observada em duas regiões, entre  $3431\text{ cm}^{-1}$  e confirmada em  $1633$  e  $1680\text{ cm}^{-1}$  (SOULTO, 2009).

A presença de bandas de fenol é descartada pela classificação do resíduo. De acordo com a metodologia empregada para análise de caracterização de fenóis totais realizada em laboratório, caracterização por Espectroscopia de absor-

ção atômica. Pode-se assim confirmar segundo Souto (2009) a presença de vibrações da molécula de água na faixa de 3650 a 3200  $\text{cm}^{-1}$ . É possível ainda, que ligações de outros compostos podem estar presentes nessa faixa.

Pode-se ainda dizer que a presença entre a faixa de 1030  $\text{cm}^{-1}$ , área próxima a de grande intensidade esta atribuída as vibrações de alongamento de Si-O. numa faixa entre 550 e 470  $\text{cm}^{-1}$  as vibrações estão relacionadas ao dobramento de Si-O-Al e Si-O-Si (MADEJOVÁ, 2002).

### 5.2.3 Difração de Raio X (DRX)

Os processos geológicos de crescimento lentos dos cristais caracterizam a maioria dos sólidos como cristalino. Entretanto há sólidos não cristalinos, tais como vidros e residas termorígidas, por exemplo, são totalmente amorfas. Há ainda sólidos que apresentam regiões cristalinas em uma matriz amorfa (PADILHA, 2000).

O difratograma de um sólido amorfo é caracterizado pela presença de curvas sem picos marcantes associados à presença de fases cristalinas, conforme Figura 15 abaixo.

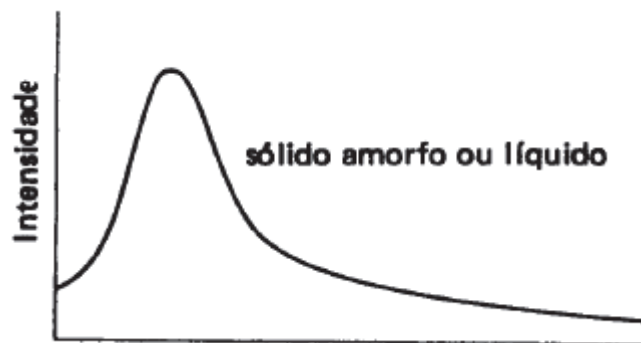


Figura 15 - Difratograma típico de um sólido ou líquido amorfo

Fonte: B.D. Cullity *apud* PADILHA, 2000.

O difratograma de raios X do resíduo de Lã de Rocha (Figura 16) caracteriza o resíduo como um sólido amorfo, em decorrência justamente da presença de curvas sem picos marcantes.



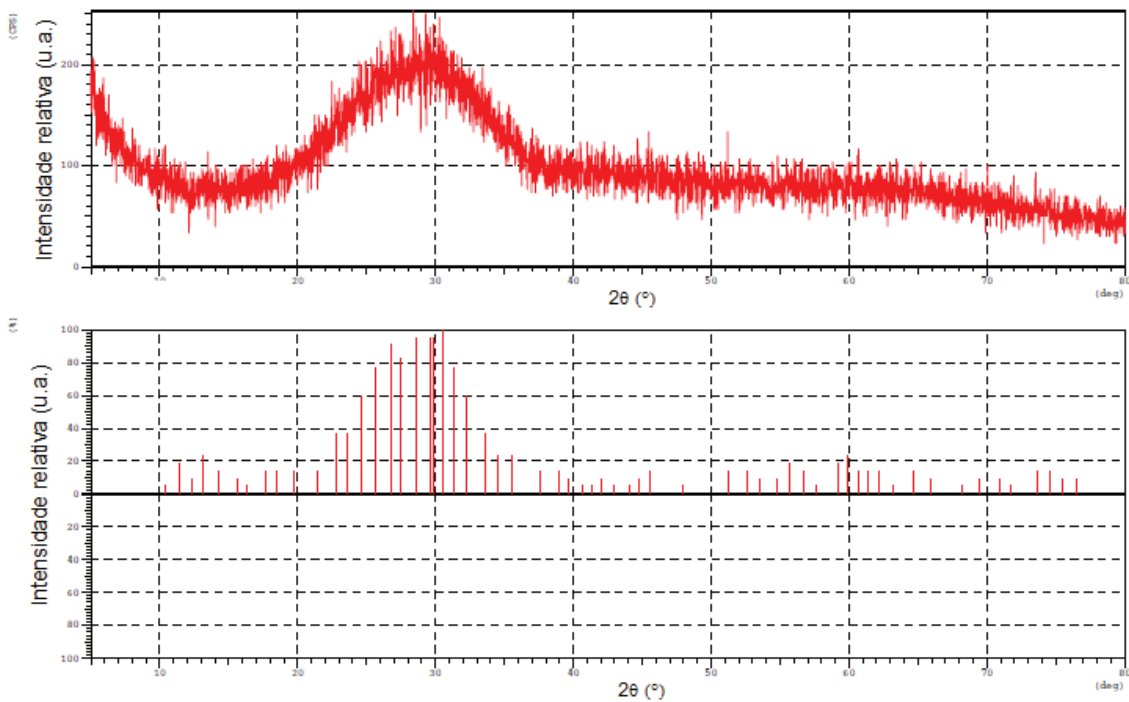


Figura 16 – Difratoograma de raios X do Resíduo de Lã de Rocha.

O pico de baixa intensidade encontrado na amostra condiz com a composição da amostra. A fase cristalina apontada no difratograma representa fases cristalinas, próximo ao pico principal da sílica, mostrando a baixa tentativa de organização dos da grade. Indicando desse modo um sólido amorfo formado somente por um pico de baixa intensidade entre 15 a 40° (2θ) (NEVES; KNISS; DELLA, 2012). Tal tendência de organização na região da sílica ocorre devido ao elevado conteúdo de dióxido de silício (43,27%), conforme apontado pela FRX.

A presença de uma fase cristalina caracteriza a presença de compostos cristalinos no resíduo, associados a outros compostos fundentes, capazes de desorganizar a grade cristalina do material. Outro ponto relevante para a característica amorfa do material, esta relacionada ao processo produtivo da lã de rocha. O seu rápido resfriamento após a formação das fibras (DUNSTER, 2007) contribui para a ausência de ordenação entre as moléculas.

Quando aquecida a 1000°C o comportamento da amostra é diferenciado, este passa de amorfo para cristalino, com picos marcantes de três minerais, a saber: Diopsídio  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ , Augite (Ca, Na) (Mg, Fe, Al, Ti)  $(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$  e Ulvospinel  $\text{Ti-Fe}_2\text{O}_4$ , conforme a Figura 17 abaixo:

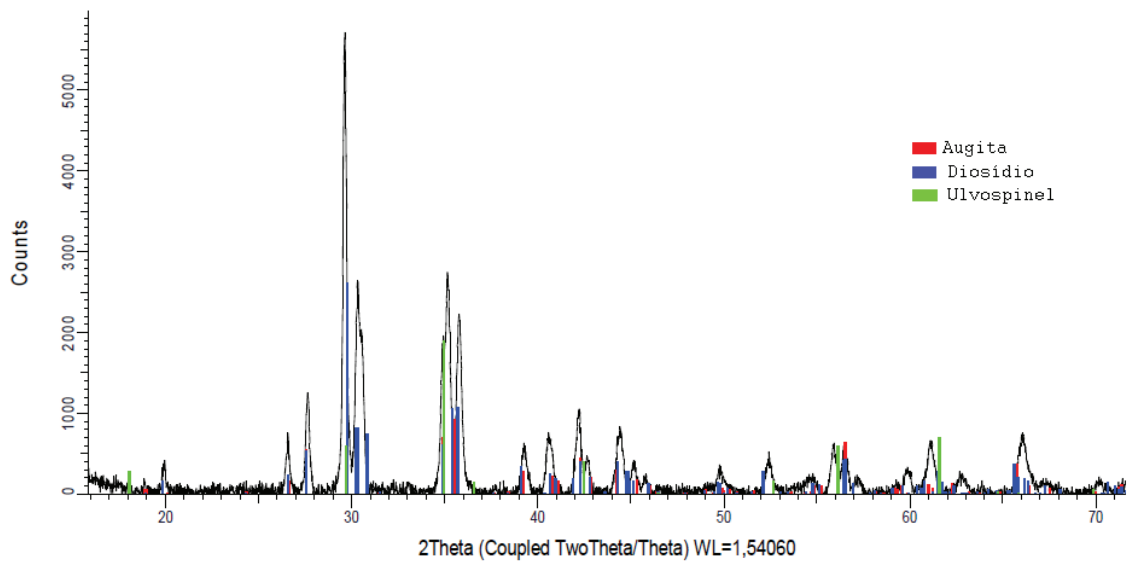


Figura 17 - Difratoograma de raios X do Resíduo de Lã de Rocha queimada a 1000°C.

De acordo com a composição química dos minerais foi possível constatar a predominância de augita e dióxido. Ambos minerais fazem parte do grupo piroxênios. Encontrados em rochas ígneas e metamórficas.

Basicamente as composições químicas dos piroxênios podem ser expressas da seguinte maneira:  $XYZ_2O_6$ . Onde X, Y e Z representam respectivamente: ( $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$  e  $Li$ ), ( $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Al^{+3}$ ,  $Cr^{+3}$  e  $Ti^{+4}$ ) e ( $Si^{+4}$  e  $Al^{+3}$ ) (KLEIN; DUTROW, 2012).

#### 5.2.4 Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) / Análise Termogravimétrica (TGA/TG)

A análise térmica foi realizada com o intuito de verificar o comportamento térmico do resíduo de lã de rocha e da lã de rocha comercial, Figuras 18 e 19.

##### 5.4.1 Lã de Rocha – Resíduo

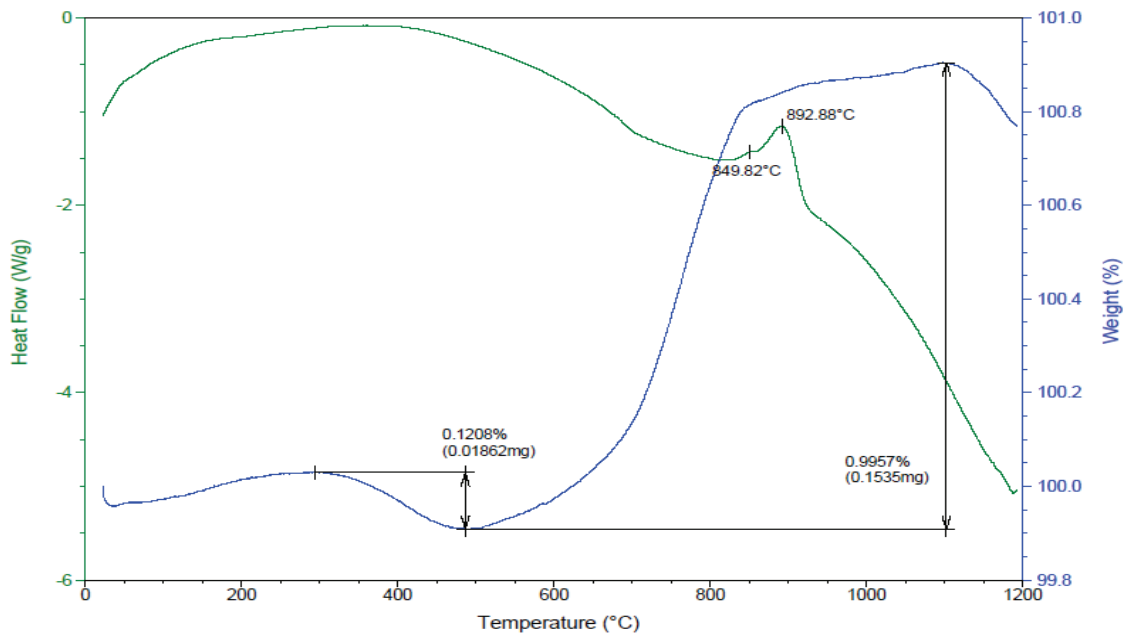


Figura 18 – DSC/TGA de Resíduo de Lã de Rocha

Através do gráfico do resíduo de lã de rocha é possível verificar a perda de 0,12% de massa, essa possivelmente matéria orgânica na faixa de 250 – 500°C (RODRIGUES et. al, 2012). A partir de 500°C nota-se o aumento de 0,9% da massa, tal aumento pode estar relacionado à oxidação de metais presentes na amostra. A oxidação é possível uma vez que a análise foi realizada sob uma atmosfera de ar sintético, que contém aproximadamente 20% Oxigênio e 80% de Nitrogênio.

O ganho de massa apresentado na amostra, assemelha-se ao pico identificado por Rodrigues et al (2012) em fibras de lãs minerais. Segundo os autores a presença de um pico próximo ao 874°C caracteriza o pico exotérmico, onde tal ponte refere-se à cristalização da fibra.

Ainda segundo os mesmos autores o pico endotérmico ocorre em torno de 1095 °C. Na amostra de lã de rocha ocorre aproximadamente em 1200°C caracteriza a fusão (TMA, 1991 *apud* RODRIGUES et al, 2012).

Ainda segundo outros autores COOPER R.F; FANSELOW J.B; POKER D,B (1996) E YUE Y.Z, et al (2009) *apud* SMEDSKJAER, M.M; SOLVANG, M; YUE Y (2010)., a maioria das fibras de lã de rocha comercial encontra-se na forma de  $\text{Fe}^{2+}$  (Óxido Ferroso). Submetido a aquecimento em ar atmosférico, o  $\text{Fe}^{2+}$  é oxidado em  $\text{Fe}^{3+}$  (Óxido Férrio) em uma temperatura superior a 0,8 Tg. Sendo essa temperatura a mesma temperatura de transição vítrea.

Essa oxidação segundo COOPER R.F; FANSELOW J.B; POKER D,B (1996) E YUE Y.Z, et al (2009) apud SMEDSKJAER, M.M; SOLVANG, M; YUE Y (2010)., não ocorre por meio da difusão de oxigênio e sim por meio da difusão bivalente entre os cátions de rede de modificação para a superfície. Nesse processo os cátions bivalentes reagem com o oxigênio do ar, criando uma camada superficial de nano-cristalino principalmente de MgO. Tal processo é possível em virtude da necessidade de equilibrar o fluxo de elétrons da oxidação do  $Fe^{2+}$  para  $Fe^{3+}$ . COOPER R.F; FANSELOW J.B; POKER D,B (1996) E YUE Y.Z, et al (2009) apud SMEDSKJAER, M.M; SOLVANG, M; YUE Y (2010).

O comportamento apresentado pelo ferro é confirmado pelo diagrama de Ellingham (Figura 19). A posição da linha para uma determinada reação no diagrama mostra a estabilidade do óxido como uma função da temperatura. Quanto mais próximo a parte superior do diagrama, mais nobres são as reações, metais nobres (por exemplo , ouro e platina ) , e os seus óxidos são instáveis e facilmente reduzido. À medida que avançamos em direção à parte inferior do diagrama, os metais tornam-se progressivamente mais reativa e seus óxidos tornam-se mais difíceis de reduzir (SKKAWATR, 2001).

### Ellingham Diagrams

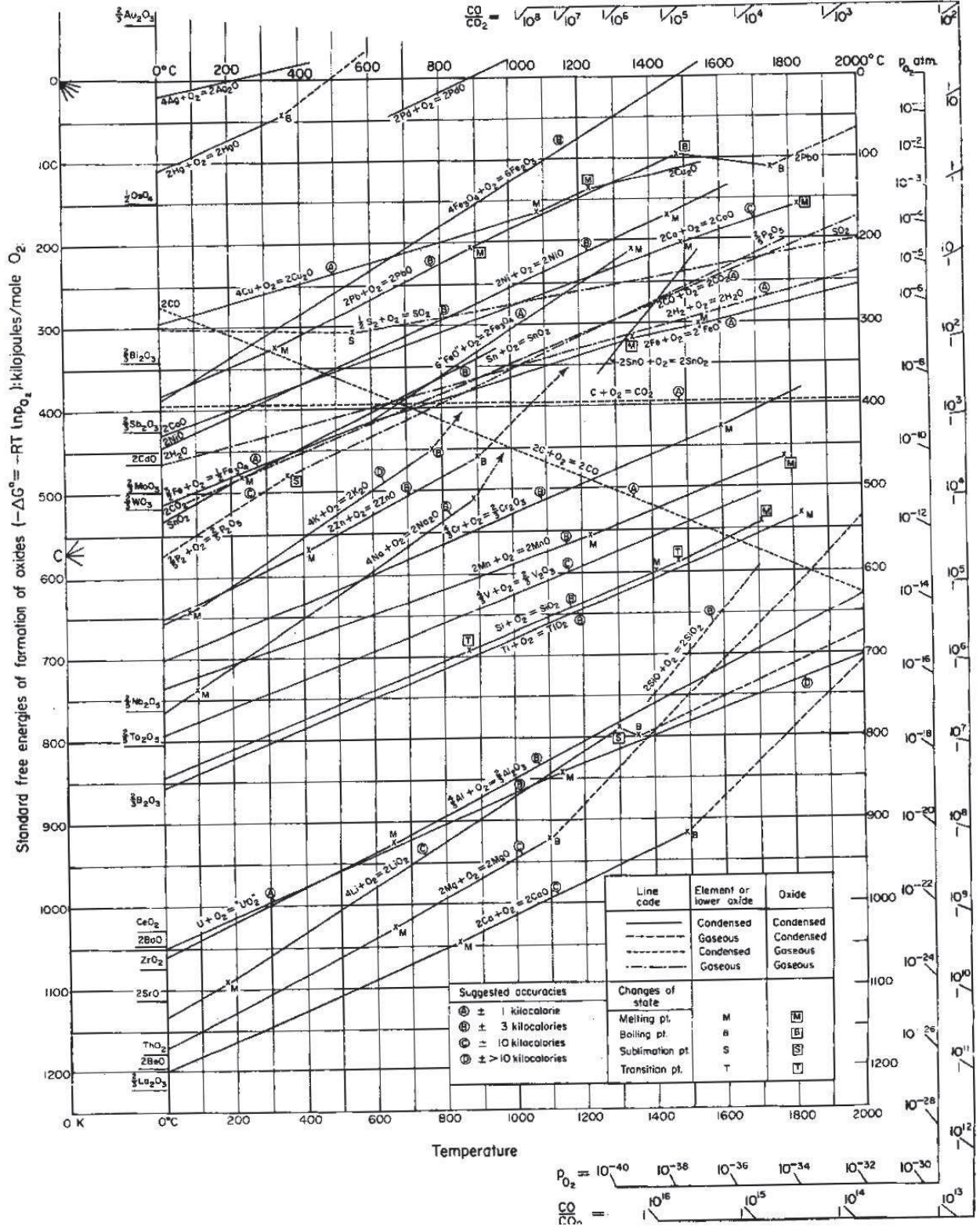


Figura 19 – Diagrama de Ellingham.

Fonte: SKKAWATR, 2001.

#### 5.4.2 Lã de Rocha – Comercial

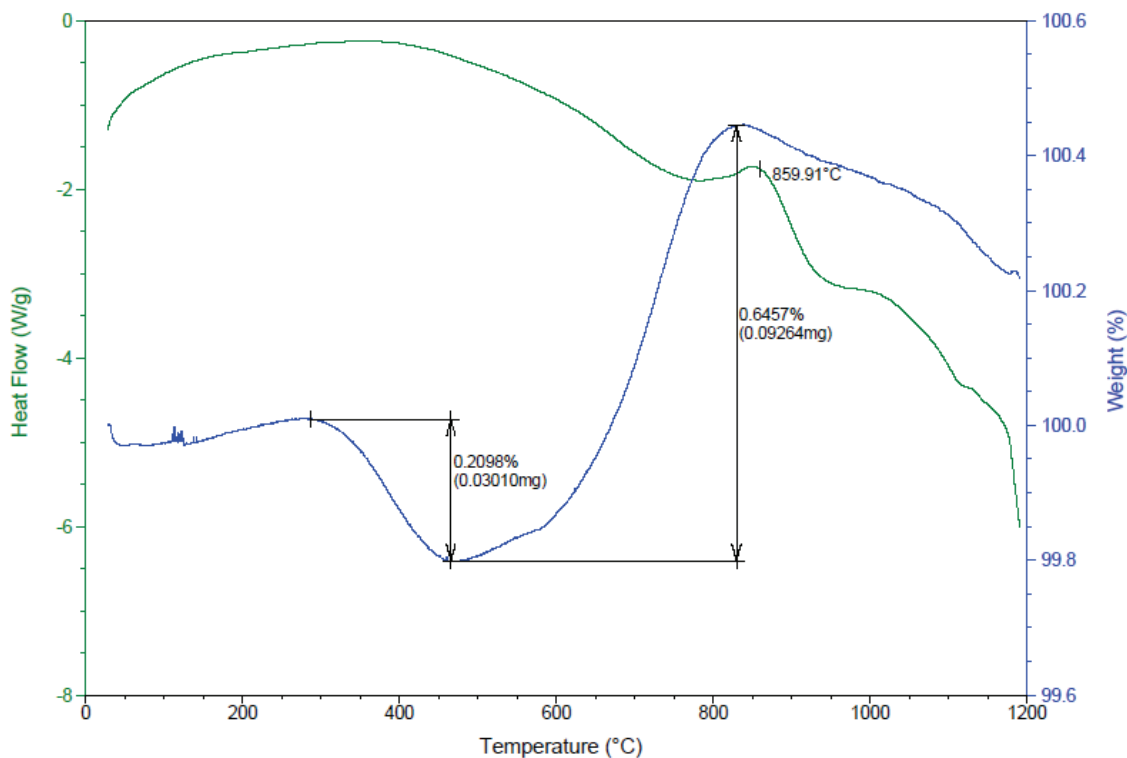


Figura 20 – DSC/TGA da Lã de Rocha Comercial

A análise da lã de rocha comercial se assemelha ao resíduo, entretanto vale destacar a menor perda orgânica, 0,03%. Seguido pelo menor aumento de massa. Como o ganho de massa esta associado à cristalização e oxidação de metais, pode-se concluir que em virtude da utilização em tubulações e seu armazenamento com caixas metálicas, podem ter contribuído para essa diferença de valores.

#### 5.2.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar tridimensionalmente a amostra. Com base nas imagens abaixo (Figuras, 20, 21 e 22) é possível constatar a estrutura fibrosa da amostra, com diversos comprimentos e espessuras. A presença de partículas menores presente na amostra, juntamente com o a diferença de comprimento entre as fibras, deve-se ao processo de moagem ao qual a mesma foi submetida. Já com relação à espessura é visível a diferença entre as fibras, tendo uma variação média de  $1\mu\text{m}$  à quase  $20\mu\text{m}$ . Maior predominância a

faixa entre 5  $\mu\text{m}$  a 7  $\mu\text{m}$ . Analisando ainda o comportamento das partículas menores é possível perceber uma característica aglomerando nas mesmas.

Segundo alguns autores a adição de agregados fibrosos ao cimento representa ganhos as propriedades mecânicas, resistência, flexão, impacto e menor ruptura (AGOPYAN & SAVASTANOJUNIOR, 2007 *apud* SILVA; MARQUES; JUNIOR, 2012).

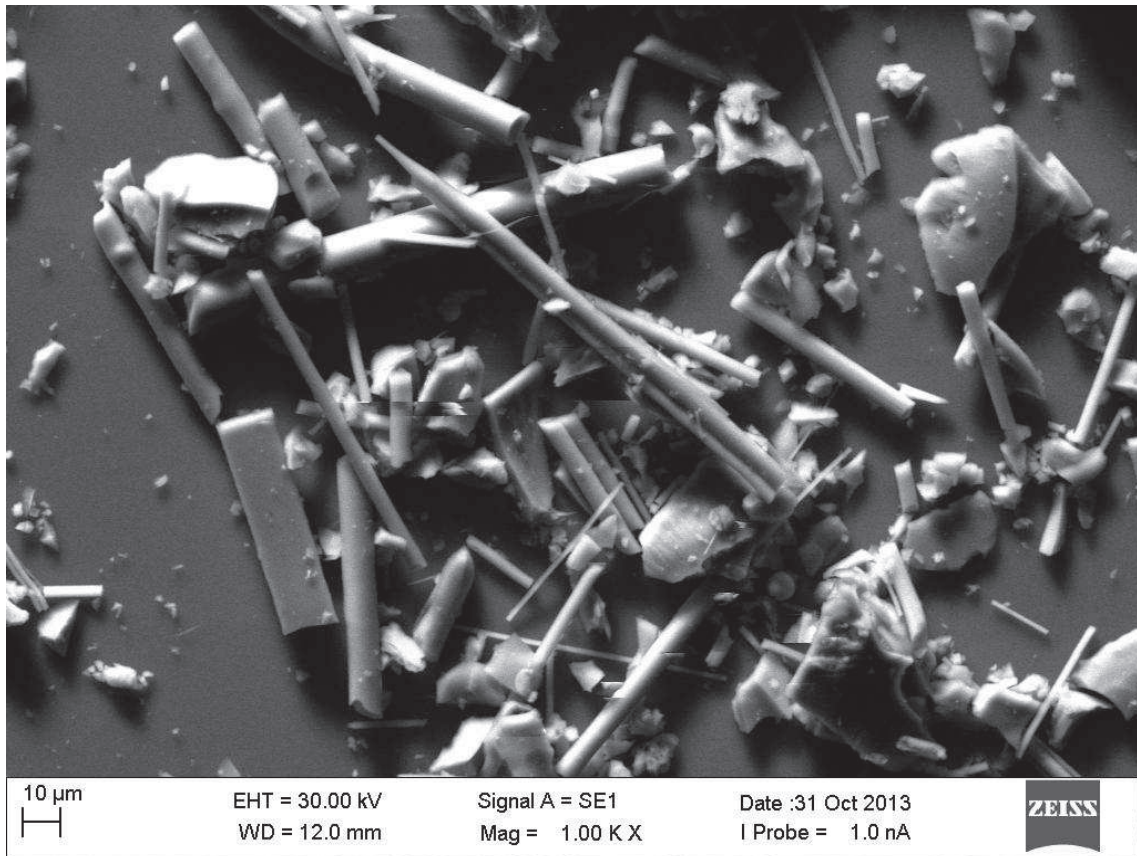


Figura 21 – Partículas da amostra aglomeradas.

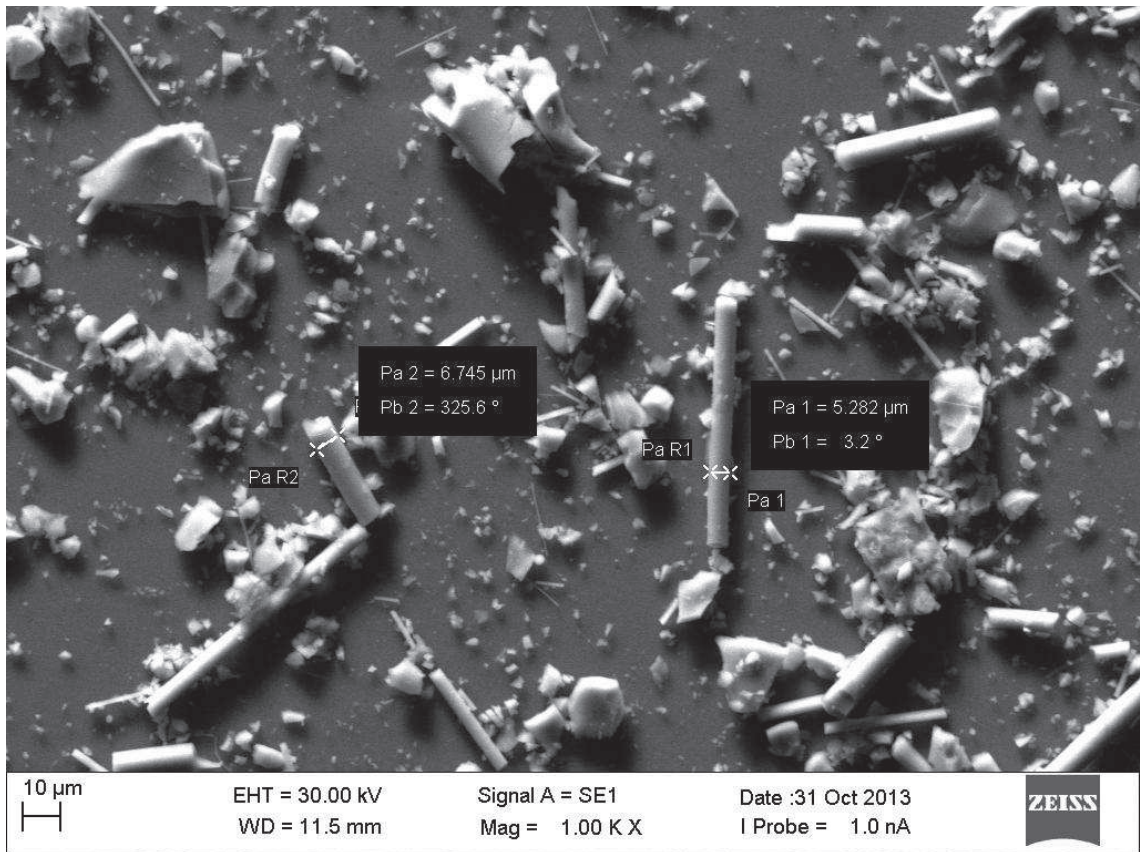


Figura 22 – Diâmetro predominante entre as fibras.

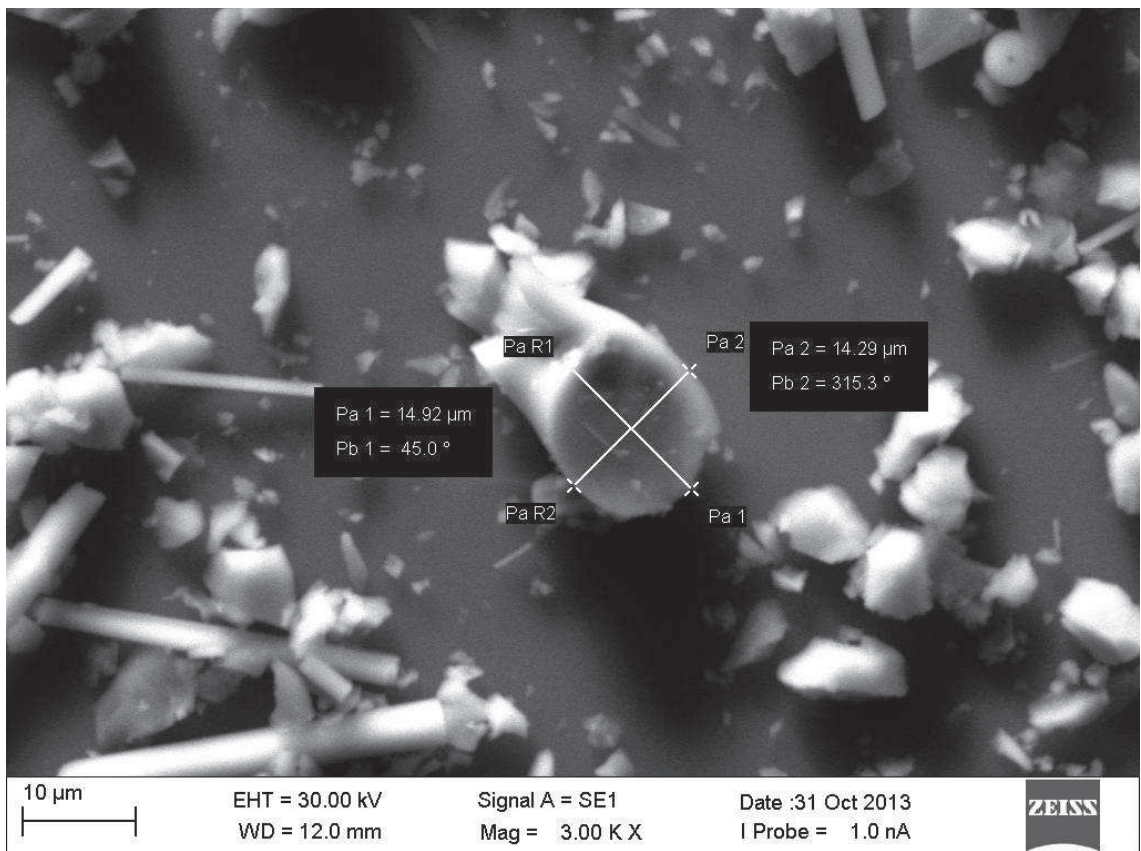


Figura 23 – fibra com diâmetro aproximado a 15  $\mu\text{m}$ .



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

O resíduo de lã de rocha segundo classificação quanto ao impacto saúde e ao ambiente está enquadrado como Resíduo Classe II - A, Não Inerte, ou seja, não apresenta nenhum indicativo de periculosidade, facilitando assim sua reutilização. Quanto ao tipo de material, este pode ser enquadrado como um material cerâmico amorfo devido a sua composição química e falta de ordem de longo alcance, respectivamente.

Mediante as análises realizadas é possível enquadrar o resíduo de lã de rocha como um possível agregado para a indústria cimenteira. Embora não realizado o ensaio de pozolanicidade, é possível sua previa determinação como tal devido a estudos realizados por Cheng *et. al.* Reforçando assim sua possível utilização na indústria cimenteira. As características de composição química apresentada nesse trabalho se enquadram com o estabelecido na norma de requisitos para materiais pozolanicos NBR 12653/2012.

Além da composição química, a lã de rocha possui características aglomerantes. A introdução de agregados com propriedades aglomerantes e ligantes ao concreto favorece a redução no consumo de água necessária a hidratação, uma vez que o cimento sozinho não é aglomerante.

Outro ponto relevante analisado é quanto ao comportamento amorfo do material, característica também apropriada ao cimento. Segundo Coutinho (1988) *apud* Coutinho (1999) para ser reativo, um agregado sólido não pode estar bem cristalizado.

Para a produção de concreto seco, o resíduo de lã de rocha apresenta características condizentes à produção de blocos. Pois, o resíduo de lã de rocha apresenta granulometria relativamente fina, fundamental a blocos de concreto seco, uma vez que possibilita o preenchimento de espaços vazios (poros) presentes na mistura de cimento com agregados grosseiros. A característica aglomerante também é um ponto importante para essa aplicação.

Embora o resíduo de lã de rocha tenha apresentado características específicas ao concreto é difícil determinar ao resíduo uma boa aplicabilidade como agregado. Segundo Neville (1982) é difícil definir um bom agregado, a menos que seja possível dizer que com a utilização desse agregado consegue-se um bom concreto.

Assim a confirmação desses resultados apresentados seria possível mediante a aplicação do resíduo ao concreto e conseqüentemente a realização de testes e análises ao concreto contendo esse material, resíduo de lã de rocha.

Assim se confirmada a eficácia do resíduo de lã de rocha ao concreto este traria benefícios não somente econômicos a empresas que geram tal resíduo, em virtude da redução de custos com o descarte desse material a aterros industrial classe II. Mas como também, benefícios associados à gestão e gerenciamento dos resíduos na atividade. A viabilidade da reutilização da lã de rocha pode-se estabelecer a atividade uma pratica de Produção mais Limpa, já que a reciclagem externa de materiais constitui nível de priorização 3 na P+L. favorecendo assim dos objetivos pretendidos com essa estratégia. Sem considerar ainda os benefícios naturais diretos, em virtude da redução no consumo de cimento, tais como: redução no consumo de matérias primas, economia de energia e água e redução das emissões CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento.

Contudo a necessidade reduzir o consumo de matérias-primas, conservar energia e preservar o ambiente. Faz com que estudos como esse, voltados à caracterização e classificação de resíduos uma ferramenta essencial e imprescindível para uma eficiente gestão de resíduos sólidos. De modo a priorizar alternativas sustentáveis, tecnologias limpas, substituição de materiais e economia de energia. Fazendo com que o resíduo seja visto com o um material de valor econômico e de utilidade.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a composição mineralógica, por sua vez química é possível mediante a realização de estudos mais detalhados propor outra reutilização para o resíduo de lã de rocha, este como um material de maior valor agregado. Desse modo sugere-se como uma alternativa para estudo futuro, a realização de diversos outros estudos e procedimentos cabíveis a reutilização desse resíduo na cerâmica avançada, uma vez que segundo alguns autores o mineral diopsídio apresenta resultados satisfatórios como um biomaterial empregado na substituição ou aumento de uma função óssea natural.

Segundo IWATA, N. Y, et al e WU, C; RAMASWAMY. H; ZREIQUAT *apud* GHORBANIANA, L, *et al* (2013) o diopsídio ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) é considerado um biomaterial viável para o osso artificial e raiz dental, pois mostra mais potencial de capacidade de formação de apatita e superior resistência mecânica de hidroxiapatita. Além disso, diopsídeo apresenta vantagens em algumas aplicações específicas em odontologia para fins de restauração óssea.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004. 77p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10006. **Solubilização de Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004. 07p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10007. **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro. 2004. 25p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12653. **Materiais Pozolânicos-Requisitos**. Rio de Janeiro. 2012. 9p.
- BERNDT, M.L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Australia; v. 23, Issue 7, p. 2606 – 2613, jul. 2009.
- BRASIL. Norma Regulamentadora (NR)-25. Portaria SIT nº 253, de 04 de agosto de 2011. **Diário Oficial União**, Brasília, DF, 08 set. 2011.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 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. **Diário Oficial da União de 3 agosto 2010**.
- BRUNAUER; COPELAND, 1964 *apud* MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 574 P. ISBN 9788598576121 (ENC.).
- CALLISTER, W. D. Jr.. **Materials Science and Engineering Na Introduction**. Inc. Nova York: John Wiley & Sons, 1991. 4008p.
- CHENG, A; LIN, W-T; HUANG, R. Application of rock wool waste in cement-based composites. Taiwan, v. 32, p.636-642. **Materials and Design**. Elsevier. 2011.
- GHORBANIAN, L, *et. al*. Fabrication and characterization of novel diopside/silk fibroin nanocomposite scaffolds for potential application in maxillofacial bone regeneration. **International Jornal of Biological Macromolecules**. v, 58, p. 275 – 280. Iran: Elsevier. 2013.
- COLOMBO, P, *et. al*. Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v.7, p. 225 – 239. Italia: Elsevier. 2003.
- COOPER R.F; FANSELOW J.B; POKER D,B (1996) E YUE Y.Z, *et al* (2009) *apud* SMEDSKJAER, M. M; SOLVANG, M; YUE, Y. Crystallisation Behaviour and high-

temperature stability of stone wool fibres. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, p 1287 – 1295. Dinamarca: Elsevier. 2010.

COSTA, W. J da. **Contabilidade Ambiental**: Evidências do comportamento pró-ativo empresarial. 2006. 106f. Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente – Universidade do Brasília – UnB. Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Ciências da Informação e Documentação – FACE. Disponível em: <[HTTP://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/6688/1/Dissertacao%20William.pdf](http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/6688/1/Dissertacao%20William.pdf)>. Acesso em 14 de set. 2013.

COUTINHO, J de S. **Materiais de Construção 2**: 1ª Parte – Ligantes e Caldas 2002. 2006. 151f.

COUTINHO, 1998 *apud* COUTINHO, J de S. **Agregados para Argamassas e Betões**. Materiais de Construção 1. 1999. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/agregparti.pdf>. Acesso em 13 de nov. 2013.

COUTINHO, J de S. **Agregados para Argamassas e Betões**. Materiais de Construção 1. 1999. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/agregparti.pdf>. Acesso em 13 de nov. 2013.

CULLITY, B.D. *apud* PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**: Microestrutura e Propriedades. Curitiba – PR: Hemus. 2000. 343 p.

CRUM, S. J. H, et AL. Behaviour of Some Pesticides in a Nutrient-Film and in a Rock-Wool System. Amsterdam – Printed in The Netherlands, v 25, p. 1-9. **Scientia Horticulturae**: Elsevier Science Publishers B.V. 1985.

DANIEL. Apostila de Tecnologia do Concreto. Centro Federal de Educação Tecnológica de Paraná. Departamento Acadêmico de construção civil. 2004. 102f.  
DE MOURA, 2007 *apud* JUNIOR, L. G. L, et al. Caracterização geoquímica, mineralógica, termogravimétrica, e por espectrometria de infravermelho de argilominerais representativas da porção central da Província Borborema. Fortaleza. **Geoquímica Geochemistry**. Ouro Preto, 25(1), p. 7 – 16, 2011.

DIAS, R. **Gestão Ambiental**: responsabilidade social e sustentabilidade. São Paulo, 2007. 196p.

DUNSTER, A. DEFRA Projeto de Código WRT\_177 / WRO115  
Characterisation of Mineral Wastes, Resources and  
Processing technologies – **Integrated waste management  
for the production of construction material**. 2007.

ENZWEILER, J. **Espectrometria de Fluorescência de Raios X**. Florianópolis: UFSC, p. 1-10, nov. 2010. Disponível em: [WWW.quimica.ufsc.br/nunesgg/CQ027\\_trabalho/Fluorenc%EAncia%20Raios%20-%20X.pdf](http://www.quimica.ufsc.br/nunesgg/CQ027_trabalho/Fluorenc%EAncia%20Raios%20-%20X.pdf). Acesso em: 01 nov. 2013.

FLORIANO, E. P. Políticas de Gestão Ambiental. 3 ed. Santa Maria. 2007. Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria – RS. 2007.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. **Cement and Concrete Research**. v.34, Issue 9. France: Elsevier, p.1489 -1498. Set 2004.

HAACK, M de S. Análise de Materiais por Espectroscopia no Infravermelho dentro do sistema de Gestão de Qualidade conforme ABNT NBR ISSO/IEC 17025. Trabalho de Conclusão de Curso-QUI do Curso de Química. Porto Alegre. 2010. 50f. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28602/000771298.pdf>. Acesso em: 10 nov. de 2013.

JUNIOR, L. G. L, et al. Caracterização geoquímica, mineralogical, termogravimétrica, e por espectrometria de infravermelho de argilominerais representativas da porção central da Província Borborema. Fortaleza. **Geoquímica Geochemistry**. Ouro Preto, 25(1), p. 7 – 16, 2011.

KAHN, H. **DIFRAÇÃO DE RAIOS X**. 18p. 2004. Disponível em: [WWW.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1\\_multipart\\_xF8FF\\_2\\_DIFRAÇÃO.pdf](http://WWW.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRAÇÃO.pdf). Acesso em: 28 out. 2013.

KLEE, H. Cement Industry Energy and CO<sub>2</sub> Performance: “Getting the Numbers Right”. **The Cement Sustainability Initiative**. June 2009 . 43p. Disponível em: <http://www.wbcscement.org/pdf/CSI%20GNR%20Report%20final%2018%206%2009.pdf>. Acesso em 20 de out. de 2013.

KLEIN, C; DUTROW, B: tradução e revisão técnica MENEGAR, R. **Manual de ciência dos minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookmam, 2012. LABRINCHA, 2006; ROCHA, 1998; TRDIC et al, 1999; UEDA et al, 1999 *apud* RODRIGUES, G. F. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lâ mineral**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMA. Ouro Preto. jun. 2009. 98f.

LA ROCHA, Indústria e Comercio de Fibras Minerais Ltda. **Apresentação Lã de Rocha**. 2013. Disponível em: <http://www.larocha.com/index.php>. Acesso em: 14 de set. de 2013.

LIMA, D de A. **Quantificação de Fases Cristalinas de Incrustações em Colunas de Produção de Petróleo pelo Método de Rietveld**. 2010. 109f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia – CT. Centro de Ciências Exatas e da Terra – CCET, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo – PPGCEP. Natal, Rio Grande do Norte, 2010.

LIMA, R. G. C; FERREIRA, O. M. **Resíduos Industriais – Método de tratamento e Análise de Custos**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia Ambienta. Goiânia, dec. 2010.

- LIN, W. T, et al. Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles. **Materials characterization**. v. 84, Taiwan: Elsevier, p. 1- 9. 2013.
- MADEJOVÁ, J. FTIR techniques in Clay mineral studies. **Vibrational Spectroscopy**, v. 31, p. 1 -10. Eslováqui: Elsevier. 2003.
- MAROUM, C. A. **Manual de Gerenciamento de Resíduos**: Guia de procedimento passo a passo, 2 ed. Rio de Janeiro: GMA, 2006.
- MARQUES, P. R. **A Reestruturação Industrial e a Questão Ambiental**: Estudo de caso em uma empresa de médio porte. A Reestruturação Industrial e a Questão Ambiental: Estudo de Caso em uma Empresa de Médio Porte. Araraquara – SP. 2005.
- MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 2008. 574 P. ISBN 9788598576121 (ENC.).
- MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**, estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573 P.
- MILENA, 2006 *apud* CHENG, A; LIN, W-T; HUANG, R. Application of rock wool waste in cement-based composites. Taiwan, v. 32, p.636-642. **Materials and Design**. Elsevier. 2011.
- NETTO, R.M. **MATERIAIS POZOLÂNICOS** Belo Horizonte. 2006. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Escola de Engenharia da UFMG 149f.
- NEVES, D. D; KNISS, C. T; DELLA, V. P. Caracterização de Lãs Industriais (Lã de Rocha e Lã de Vidro) para Obtenção de Cerâmicas Vítreas. Vitória, ES, p. 1 – 8. 2012. **CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais** 04 a 08 nov. 2012.
- NEVES, T. F. **Importância da Utilização do ciclo PDCA para Garantia da Qualidade do Produto em um Industria Automobilística**. Juiz de Fora – MG, jun de 2007. Monografia submetida à coordenação de curso de engenharia de Produção da universidade federal de juiz de fora como parte dos Requisitos necessários para a graduação em engenharia de produção.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1982. 738p. Norma C 294-69/ 1975 da ASTM *apud* MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 2008. 574 P. ISBN 9788598576121 (ENC.).
- PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**: Microestrutura e Propriedades. Curitiba – PR: Hemus. 2000. 343 p.
- PEREIRA, F.R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. Universidade de Aveiro. 2006. 267f. Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos

requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

PETTERMANN, R. **Avaliação de Desempenho de Blocos de Concreto para Pavimentação com Metacaulim e Sílica Ativa**. Porto Alegre. 2006. 71f. Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Construção Civil Porto Alegre. 2006.

PIMENTA, Handson Cláudio Dias Pimenta; GOUVINHAS, Reidson Pereira. Implementação da Produção mais Limpa na indústria de panificação de natal-RN. In: 27 Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A Energia que move a produção: um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de outubro de 2007. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: Associação Brasileira de Engenharia de Produção. 2007. 9 f. Disponível em: <<http://www.ciencialivre.pro.br/media/3b8ad45aa74a75deffff8471ffffd523.pdf>>. Acesso em: 18 de set de 2013.

RODRIGUES, G.F, *et al.* Fabricação de lãs de rocha a partir da escória da produção de ligas FeSiMn (Manufacture of mineral wool from slag of ferroallory production Fe-SiMn). **Cerâmica**. v. 58, p. 529 – 533. 2012.

SANTOS, 2006 *apud* NETTO, R.M. **MATERIAIS POZOLÂNICOS** Belo Horizonte. 2006. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Escola de Engenharia da UFMG 149f.

SANTOS, R. D. **Estudo Térmico e de materiais de um compósito a base de Gesso e EPS para Construção de casas populares**. Natal. 2008, p 11. 79f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/ReginaldoDS.pdf>. Acesso em 14 de set. de 2013.

SENAI. **Produção Mais Limpa**. 2012. Disponível em: [http://wwwapp.sistemafiergs.org.br/portal/page/portal/sfiergs\\_senai\\_uos/senairs\\_uo697](http://wwwapp.sistemafiergs.org.br/portal/page/portal/sfiergs_senai_uos/senairs_uo697). Acesso em: 14 set. de 2013.

SILVEIRA, A. J. de A. Espectroscopia na Região (FRTIR). Cap. 8-9, p. 136- 159, mar. 2009.

Silva (2006) *apud* NEVES, T. F. **Importância da Utilização do ciclo PDCA para Garantia da Qualidade do Produto em um Industria Automobilística**. Juiz de Fora – MG, jun de 2007. Monografia submetida à coordenação de curso de engenharia de Produção da universidade federal de juiz de fora como parte dos Requisitos necessários para a graduação em engenharia de produção.

SILVA, E; MARQUES, M; JUNIOR, C. F. Aplicação de Fibra de coco em matrizes cimentícias. **Rer.Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental** (e-ISSN: 2236-1170), v. 8, p. 1555 – 1561, dez. 2012.



SKKAWATR. **Ellingham Diagrams**. 2001. Disponível em: [http://web.mit.edu/2.813/www/readings/Ellingham\\_diagrams.pdf](http://web.mit.edu/2.813/www/readings/Ellingham_diagrams.pdf). Acesso em: 09 nov. de 2013.

SMEDSKJAER, M. M; SOLVANG, M; YUE, Y. Crystallisation Behaviour and high-temperature stability of stone wool fibres. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, p 1287 – 1295. Dinamarca: Elsevier. 2010.

SISINNO, C.L.S. Disposição em aterros controlados de resíduos sólidos industriais não-inertes: avaliação dos componentes tóxicos e implicações para o ambiente e para a saúde humana. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 19(2): 369-374, mar-abr, 2003.

SOUTO, F. A. F. **Avaliação das Características Físicas, Químicas e Mineralógicas da matéria-prima utilizada na indústria de cerâmica vermelha nos municípios de Macapá e Santana-AP**. Belém 2009. Dissertação como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de Geoquímica e Petrologia. 2008.

TASSARA, H; MLYNARZ, R.B. Dicionário Socioambiental: idéias, definições e conceitos. São Paulo: Brasil Sustentável. 2008p. 2008.

TERMO NICOLET. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. 2001. **Thermo Nicolet Corporation**. Disponível em: [www.thermonicolet.com](http://www.thermonicolet.com). Acesso em 14 de set de 2013.

TIWARI, B.N; PATHAK. A.N; LEHRI, L.K. Response to Differently Amended Wool-Waste Composts on Yield and Uptake of Nutrients by Crops. **Biological Wastes**, v. 28, p. 313 – 318. 1989.

TMA, 1991 *apud* RODRIGUES, G.F, et al. Fabricação de lãs de rocha a partir da escória da produção de ligas FeSiMn (Manufacture of mineral wool from slag of ferroalloy production FeSiMn). **Cerâmica**. v. 58, p. 529 – 533. 2012.

TOCCHETTO, M. R. L. Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais. 2005. Universidade Federal de Santa Maria Departamento de Química – CCNE Curso de Química Industrial.

WENDHAUSEN, P. A. P; RODRIGUES G.V; MARCHETTO O. **Análises Térmicas**. Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Engenharia Mecânica Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Caracterização de Materiais III, Florianópolis, 2004. 47p.

WERNER, E. M; BACARJI, A. G; HALL, R.J. Produção Mais Limpa: Conceitos e Definições Metodológicas. **SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, p.1-15.2009.

