



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**  
**COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

**Daniel Carlos Nunes**

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA  
PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO E  
CINZAS DO CARVÃO UTILIZADO EM USINA  
TERMELÉTRICA**

**Recife**

**2017**

**Daniel Carlos Nunes**

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA  
PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO E  
CINZAS DO CARVÃO UTILIZADO EM USINA  
TERMELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Processos.

Orientador: Prof. Dr. VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS

**Recife**

**2017**

Nunes, D. C. Estudo de viabilidade econômica da produção de pré-moldados de gesso e cinzas do carvão utilizado em usina termelétrica.

N972e Nunes, Daniel Carlos

Estudo de viabilidade econômica da produção de pré-moldados de gesso e cinzas do carvão utilizado em usina termelétrica / Daniel Carlos Nunes; orientador Valdemir Alexandre dos Santos, 2017.

81 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-graduação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2017.

1. Gesso em pré-moldado. 2. Cinzas encapsuladas. 3. Combustíveis. 4. Usinas termoelétrica. 5. Planilhas eletrônicas. I. Título.

CDU 666.913

# **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO E CINZAS DO CARVÃO UTILIZADO EM USINA TERMELÉTRICA**

**DANIEL CARLOS NUNES**

**Examinadores:**

---

Prof. Dr Valdemir Alexandre dos Santos  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

---

Prof Dr<sup>a</sup> Clarissa Daisy da Costa Albuquerque  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

---

Prof Dr Mohand Benachour  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof Dr<sup>a</sup> Clarissa Daisy da Costa Albuquerque  
Coordenadora MDPA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço:

Ao senhor Deus todo poderoso pelo dom da vida e força nos momentos mais difíceis, pois sem sua ajuda nenhuma realização seria concretizada em minha vida.

Aos meus pais, José Daniel (In memoria) e Joana Galdino, oriundos da roça que com seu inabalável esforço construíram para a minha educação.

A minha amada esposa, Laudeni Nunes, que diante das adversidades nunca deixou de me apoiar em meus sonhos e projetos.

Aos meus filhos Mahatma e Maíra, pelo apoio e compreensão pelos momentos que não pude estar presente.

Ao orientador Valdemir A. dos Santos, pelo apoio e confiança, como também, por compartilhar suas experiências e conhecimentos, fundamentais para realização do projeto.

Aos professores, que contribuíram com ensinamentos indispensáveis para realização e confecção da presente dissertação.

A CAPES, pela bolsa concedida, em parceria com A Universidade Católica de Pernambuco, que cedeu espaço para realização dos experimentos.

A todos meus amigos do mestrado, pela amizade ao longo da vida acadêmica.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>SUMÁRIO</b> .....	ii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	iv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1.1 Introdução</b> .....	14
<b>1.2 Objetivos</b> .....	17
1.2.1 Objetivo Geral .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
<b>1.3 Revisão da Literatura</b> .....	18
<b>1.4 Referências Bibliográficas</b> .....	60
<b>CAPÍTULO II – Artigo científico</b> .....	65
<b>CAPÍTULO III – Conclusões Gerais</b> .....	80
<b>ANEXOS</b> .....	82

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo do gesso e seus artefatos.....	20
Figura 1 - Frente de lavra de gipsita da Mineração Campo Belo em Araripina-PE.	21
Equação 01 Calcinação do minério de gipsita. ....	21
Equação 02 Desidratação da gipsita para formação dos semi-hidratos alfa ou beta	22
Equação 03 Transformação em semi-hidrato com a umidade do ar. ....	22
Equação 04 Produção de anidrita. ....	23
Equação 05 Transformação de Anidrita III em II. ....	23
Equação 06 Anidrita I. ....	23
Equação 07 Anidrita I em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico .....	23
Figura 03 Reservas mundiais de carvão.....	30
Figura 04 Mineração de carvão a céu aberto.....	33
Figura 05 Mina do recreio, Rio grande do Sul.....	34
Figura 06 Operação de uma mina subterrânea.....	35
Figura 07 Representação esquemática de mineração de camadas e pilares.....	36
Figura 08 Usina termelétrica junto à mina de carvão .....	37
Figura 09 Participação de fontes primárias na geração de energia elétrica .....	39
Figura 10 Principais termoelétricas no Brasil .....	40
Figura 11 Composição das reservas mundiais totais e usos por tipo de carvão ....	41
Figura 12 Diagrama esquemático de ciclo combinado.....	44
Figura 13 Esquema simplificado de usina a carvão pulverizado .....	47
Figura 14 Esquema simplificado de usina a leito fluidizado a pressão atmosférica	48
Figura 15 Esquema do sistema de gaseificação integrada com ciclo combinado ..	50
Figura 16 Relação entre eficiência de usinas térmicas e emissões de poluentes ..	51
Figura 17 Determinantes da vantagem nacional.....	58

### CAPÍTULO II

Figura 1 – Fórmulas estruturais do semi-hidrato água e di-hidrato.....	68
Equação 01 Sistema centro de massa.....	68
Equação 02 Sistema corpos distribuídos .....	69
Equação 03 Modelo de localização (x) .....	69

Equação 04 Modelo de localização (y) .....	69
Equação 05 Modelo simplificado composto (x) .....	70
Equação 06 Modelo simplificado composto (y) .....	70
Figura 2 – Tempo de pega inicial para a mistura gesso cinzas leve .....	71
Figura 3 - Tempo de pega final para a mistura gesso cinzas leve.....	72
Figura 4 - Tempo de pega inicial para a mistura gesso cinzas pesada .....	73
Figura 5 – Tempo de pega final para a mistura gesso cinzas pesada.....	74
Figura 6 – Tempos de pega inicial e final da mistura de cinzas com gesso .....	75
Figura 7 – Mapas obtidos do Google-Map com detalhes das distâncias.....	76



## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

Tabela 01 Produção mundial de carvão betuminoso (Mt) .....	30
Tabela 02 Reserva de carvão na Região Sul .....	31
Tabela 03 Jazidas do Rio Grande do Sul.....	32
Tabela 04 Jazidas Sul Catarinense.....	32
Tabela 05 Jazidas do Paraná .....	33
Tabela 06 Tecnologias de geração termelétrica a carvão .....	38
Tabela 07 Principais termoelétricas no Brasil .....	40
Tabela 08 Fatores locacionais tradicionais .....	58
Tabela 09 Fatores locacionais contemporâneos .....	59

### CAPÍTULO II

Tabela 1 – Dados sobre os fornecedores de matérias-primas utilizadas na produção	76
Tabela 1 – Planilha eletrônica Excel utilizada na simulação da localização .....	77

## RESUMO

Foi elaborado e simulado em planilha eletrônica um modelo de localização para um processo de produção de pré-moldado confeccionado por prensagem coaxial, composto por uma mistura de gesso e cinza de carvão mineral utilizada como combustível em usina termelétrica. O encapsulamento de cinzas de carvão mineral com alto teor de enxofre tem sido recomendado para atenuar passíveis ambientais e seu uso como insumo de pré-moldados a base de gesso apresenta-se como solução ambiental desse resíduo e redutor de custo de material para a construção civil. Contudo, os pontos geográficos onde esse resíduo é produzido exige dos estudiosos a elaboração de estratégias eficientes de logísticas, tais como um modelo de localização de condições otimizadas, para que os custos de transporte não venham anular a grande disponibilidade desses resíduos para as áreas localizadas em seus entornos. Preliminarmente, foram estudadas condições experimentais para definição de proporções das componentes em pré-moldados. Em seguida, foi elaborado um modelo de localização com base nas distâncias geográficas dos pontos de produção dos insumos, em custos de transportes desses materiais e no emprego da metodologia de definição de centros de massa/carga. Os percursos dos meios de transportes foram traçados com auxílio de recursos disponíveis na Internet, permitindo a confecção de modelos geográficos físicos (mapas). O modelo matemático de localização foi simulado com auxílio da ferramenta Solver da planilha eletrônica Excel da Microfoft®. O ponto de instalação escolhido para uma empresa de pré-moldados de gesso e cinzas de carvão mineral encontra-se nas coordenadas  $x = 0$  e  $y = 589$ , na cidade de Araripina (PE). A produção de pré-moldados com gesso e cinza de carvão mineral, além de preencher soluções amigáveis ambientalmente, contribui para aumentar a oferta de novos produtos à base de gesso.

**Palavras-Chave:** Gesso em pré-moldado; Cinzas encapsuladas; Combustíveis; Usinas Termelétricas; Planilhas Eletrônicas.

## ABSTRACT

A localization model was developed and simulated in a spreadsheet for a pre-cast production process made by coaxial pressing, composed of a mixture of gypsum and coal ash used as fuel in a thermoelectric plant. The encapsulation of coal ash with a high sulfur content has been recommended to attenuate environmental liabilities and its use as an input of pre-cast gypsum based presents itself as an environmental solution of this residue and reduces the cost of material for civil construction. However, the geographical points where this waste is produced requires scholars to develop efficient logistic strategies, such as a model for optimized conditions, so that transport costs do not negate the high availability of these wastes to the areas located in Their environments. Preliminarily, experimental conditions were studied for the definition of proportions of components in precast. Next, a localization model was elaborated based on the geographic distances of the production points of the inputs, on the transportation costs of these materials and on the use of the mass / load center definition methodology. The routes of the means of transport were traced with the help of resources available on the Internet, allowing the creation of physical geographic models (maps). The mathematical localization model was simulated using the Solver tool from the Excel spreadsheet of Microsofft®. The installation point chosen for a company of gypsum and coal ash precast is at coordinates  $x = 0$  and  $y = 589$ , in the city of Araripina (PE). The production of pre-cast with gypsum and charcoal gray, in addition to filling environmentally friendly solutions, contributes to increase the supply of new gypsum-based products.

**Key Words:** Plaster in preform; Encapsulated ashes; Fuels; Thermoelectric Power Plants; Spreadsheets..

Nunes, D. C. Estudo de viabilidade econômica da produção de pré-moldados de gesso e cinzas do carvão utilizado em usina termelétrica.

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUÇÃO

A combustão do carvão mineral é uma importante fonte de energia, entretanto essa combustão gera uma grande quantidade de cinzas, que podem ser classificadas em dois tipos de resíduos sólidos: cinzas volante e pesada. Atualmente no Brasil são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas por ano, sendo que 80% de resíduos são cinza volante (também chamada de leve, com diâmetro médio de partícula em torno de 50  $\mu\text{m}$ ) e 20% de cinza pesada (cinza de pátio). Desse total as usinas termelétricas são responsáveis por 90% da produção enquanto o restante é produzido por empresas de pequeno porte. A deposição destes resíduos em bacias de sedimentação causa severos danos e potenciais riscos ao meio ambiente (CASTRO, 2015).

As características físicas e químicas das cinzas de carvão variam de acordo com as características do mineral natural que as originou (carvão mineral), com o tipo de queima do carvão, projeto e operação da caldeira, grau de beneficiamento e moagem do carvão, sistema de extração e manuseio (ADRIANO et al. 1980). Portanto, é difícil ter uma previsão precisa de suas características.

As cinzas brasileiras não possuem legislação específica, sendo classificadas, em sua maioria, como "resíduo Classe II - A - não inerte", devendo, assim, ser encaminhadas para aterro sanitário quando a alternativa de reciclagem tiver sido descartada (ROHDE et al. 2006). Esses resíduos podem ser reutilizados benéficamente em duas formas: não encapsulada e encapsulada.

As cinzas de carvão 'não encapsuladas' possuem forma de partículas ou lodo. São utilizadas para preenchimento de fendas de areia e cascalhos. Foram identificadas preocupações com alguns usos desta forma de cinzas de carvão na terra, sendo necessário o cumprimento de padrões de engenharia adequados (EPA, 2013).

De acordo com a Environmental Protection Agency - EPA (2013), a utilização de cinzas de carvão encapsuladas traz diversos benefícios ambientais e econômicos como na aplicação de gesso, concreto, telhado e tijolos, onde as cinzas de carvão são transformadas em produtos. Benefícios ambientais desse tipo de uso incluem redução de gases do efeito estufa, conservação de energia e redução da necessidade de extrair matéria-prima. Não há registros de problemas para a saúde humana ou para o meio ambiente com o uso de cinzas encapsuladas. Uma das mais reconhecidas aplicações das cinzas de carvão é o uso das cinzas leves substituindo cimento Portland na fabricação de concreto. A utilização das cinzas de carvão aumenta a durabilidade do concreto e diminuem a geração de gases de efeito

estufa. Para cada tonelada de cinzas leves que substituem cimento Portland, aproximadamente uma tonelada de emissões de gases de efeito estufa são evitadas.

Diversas técnicas estão em desenvolvimento visando à aplicação desses materiais em processos de fabricação, reduzindo seu acúmulo. Porém, apenas 30% das cinzas geradas são comercializadas, sendo que o restante é disposto em bacias ou é utilizado para recompor minas de carvão desativadas. Destacam-se nesse sentido, principalmente a utilização de cinzas nos processos de fabricação de cimento (produção de clínquer, utilizado para a fabricação do cimento Portland) e de pavimentação. Sabe-se que o processo de obtenção de peças a partir de metalurgia do pó convencional, permite a utilização de uma ampla gama de tipos de pós elementares e ligados, sendo possível a obtenção de peças de materiais compósitos com boas propriedades superficiais e complexidade de forma, a um custo relativamente baixo (GERMAN; BOSE, 1997; LEANDRO; FABBRI, 2001; DEPOI, 2007; KERSTNER et al. 2011). Os fatores restritivos ou benéficos ao uso das cinzas geradas na queima de carvão mineral por usinas termelétricas têm sido amplamente divulgados nas publicações científicas devido ao fato destes apresentarem uma composição química semelhante à de alguns materiais cerâmicos (TEIXEIRA et al., 2015). Por esse motivo, algumas das principais aplicações têm sido na fabricação de diversos tipos de peças cerâmicas e, para pré-moldados a base de gesso.

Os percentuais de consumo per capita anual de gesso na Europa (75 kg/habitante) nos Estados Unidos (103 kg/habitante) e no Brasil (13 kg/habitante), aliados às diferentes quantidades de produtos derivados do gesso nesses locais, 450 e 14, respectivamente, são parâmetros através dos quais se pode afirmar que existe uma necessidade premente de desenvolvimentos científico e tecnológico na área gesseira brasileira (MACIEIRA et al., 2012). Dessa forma, a incorporação de cinzas ao gesso para produção de materiais e pré-moldados especiais apresenta-se como estratégia que poderá levar a soluções técnicas e ambientais adequadas para os setores de gesso e de produção termelétrica via carvão mineral.

As cinzas de carvão com alto teor de enxofre (sulfatadas), as quais encontram dificuldade de serem aproveitadas na fabricação de cimento Portland, encontram grande aplicação na indústria gesseira em função do gesso constituir-se de sulfato de cálcio semi-hidratado. Dessa forma, a grande demanda de gessos de revestimento projetado e de pré-moldados, responsáveis pela atual leveza das edificações, receberão um grande reforço pela incorporação dessas cinzas sulfatadas, com baixo custo. Adicionalmente, a produção de “drywall”, com grande emprego em edificações pelo seu alto poder de isolamento térmico e acústico nas edificações, ampliando a aplicabilidade das cinzas como insumo de material de construção, abrindo um grande mercado para seu aproveitamento e comercialização, restando

apenas estudos de localização para uso comum desses dois insumos (cinza e gesso), cujas localizações de geração requerem logísticas especiais para serem utilizados em um único processo produtivo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Elaborar um modelo matemático para avaliar a viabilidade econômica de produção de pré-moldado composto de gesso beta e cinzas provenientes da queima de carvão mineral, utilizado como combustível em usinas termelétricas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Obter um modelo matemático, com base na teoria das misturas, para avaliar a produção de pré-moldados compostos de gesso e cinzas;
- Analisar dados micro e macroeconômicos referentes a produção de pré-moldados gesso-cinza;
- Simular e definir condições otimizadas de produção para pré-moldados gesso-cinza, via ferramenta solver da planilha Excel;
- Definir um modelo para descrever a viabilidade econômica da rota produtiva definida.



## 1.3 REVISÃO DA LITERATURA

### 1.3.1 Gipsita

O uso do gesso como material construtivo como sua técnica de produção remonta as histórias das antigas civilizações (GOURDIN; KINGERY, 1975). Em ruínas na Turquia (Anatólia) e na Síria ano 7000 a.C., foram identificadas sua presença em amostras de materiais como argamassa para pisos, suporte de afrescos e fabricação de recipientes, assim como também as ruínas da cidade de Jericó, em Israel, cujas as amostras são datadas de 6000 a.C, evidenciam o emprego do gesso em moldagem de recipientes e modelagens de afrescos, e a utilização em argamassas de revestimento em ruínas na Síria e na cidade de Anu, no sul do Turquestão (GOURDIN; KINGERY, 1975). Ainda segundo Gourdin e Kingery (1975) nas pirâmides de Gizé, no Egito, erguida por Quéops, faraó da quarta dinastia egípcia, no ano de 2800 a.C foram encontrados assentamento de material utilizado nas juntas dos blocos das Pirâmides.

Quanto à atividade de extração do minério de gipsita e produção do gesso a documentação mais antiga que se tem relato é o “Tratado da Pedra”, do filósofo Theophraste, discípulo de Platão e Aristóteles que, por volta do ano 300 a.C., relatou a existência de gesseiras na região de Chipre, Fenícia e Síria, cujo material era utilizado como argamassa e para a confecção de elementos decorativos - afrescos e estatuetas (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS, 1982).

A invasão romana, na França, no ano 222 a.C., deu início a disseminação da utilização do gesso no Ocidente quando os processos construtivos com esse material passaram a ser desenvolvidos e difundidos pelos “*pedreiros do gesso*”, cuja técnica é a associação do gesso a madeira (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS 1982). Mas só em 1768, quando Lavoisier apresentou à Academia de Ciências Francesa o primeiro estudo científico dos fenômenos que são à base da preparação do gesso, daí então nos séculos seguintes, os trabalhos de diversos autores como os de Van t’Hoff e, em especial, o de Le Chatelier, permitiu abordar uma explicação científica para o fenômeno de desidratação da gipsita (JOHN; CINCOTTO, 2007; PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2001).

E conseqüentemente com a evolução industrial do século XX, o gesso passou agregar novas tecnologias deixando o caráter rudimentar tendo maior qualidade e desempenho

adequado a novas aplicações, tais como: revestimento de paredes na forma de argamassa e pasta, confecção de componentes pré-moldados para forros e divisórias (CINCOTTO apud; AGOPYAN; FLORINDO, 1988).

### **1.3.2 Reservas Brasileiras de Gipsita**

No Brasil as formações gipsíticas estão associadas às bacias sedimentares Amazônica (Amazonas e Pará); do Parnaíba (Maranhão e Tocantins); Potiguar (Rio Grande do Norte); do Araripe (Piauí, Ceará e Pernambuco); e do Recôncavo (Bahia). Nestes domínios geológicos, três Estados concentram 97,6% das reservas medidas: Camamu, na Bahia (53,3%), Aveiro, no Pará (21,9%) e em Pernambuco (22,4%) (SOBRINHO et al., 2009), onde a produção de gesso é concentrada no Pólo Gesseiro do Araripe, região do extremo oeste do Estado de Pernambuco, envolvendo os Municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade, e é responsável por 95% da produção brasileira (BALTAR et. al, 2005). As jazidas do Araripe são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo no, diz respeito principalmente ao alto teor de pureza da gipsita que varia de 88% a 98% (BALTAR et al., 2004; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2010).

### **1.3.3 Aspecto Econômico da gipsita: Região do Araripe**

Apresentando índices de crescimento nos últimos três anos entre 10 e 15% ao ano, o setor passa por um bom momento. De 2005 a 2012, ou seja, em sete anos, o número de empresas e a produção praticamente dobraram. O consumo interno, em cerca de 7 anos, passou de 15 kg por habitante/ano para cerca de 21,5 kg, embora esse valor ainda esteja muito aquém em relação a outros países. Na Europa o consumo é de 80 kg por habitante/ano e nos EUA de 118 kg (HENRIQUES JR, 2013).

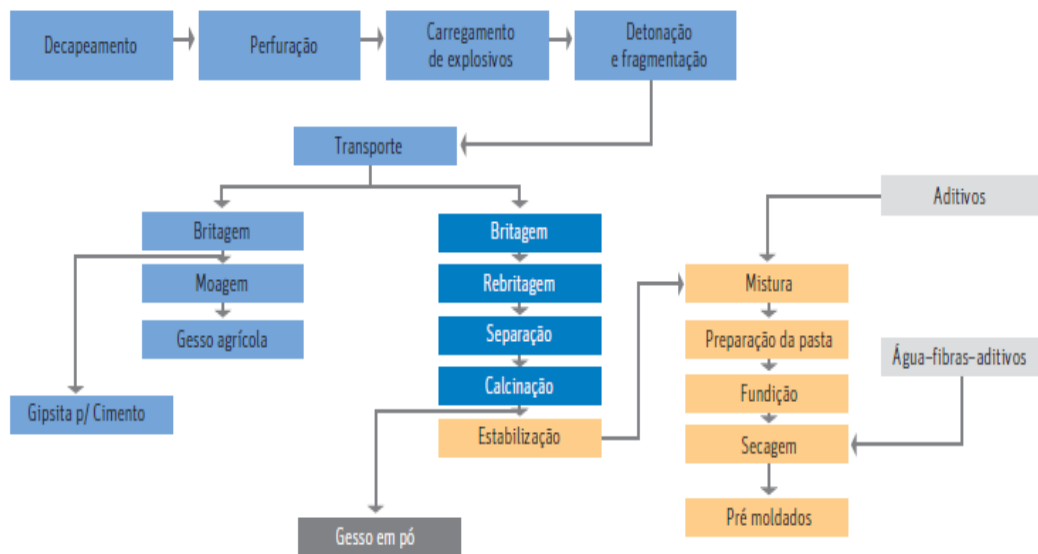
Todo o mercado do território brasileiro é atendido pelo polo gesseiro do Araripe, sendo que a região Sudeste concentra cerca de 60% do consumo total de gesso, exatamente por ser aquela onde se registra o maior poder aquisitivo da população. Em seguida, vem a região Sul, entre 15 e 20% do consumo, e a região Nordeste, em torno de 10%. O principal cliente da produção de gesso são as empresas construtoras (HENRIQUES JR, 2013).

### **1.3.4 Processos Produtivos do Gesso**

Basicamente, o processo industrial da fabricação do gesso, é constituído das seguintes etapas: mineração ou lavra da gipsita, beneficiamento inicial do minério, calcinação, britagem e

moagem do gesso, e embalagem (ver Figura 1). A linha de produtos específico sé vasta, sendo possível fabricar, a partir da calcinação, os seguintes itens: gesso de fundição para a fabricação de pré-moldados, gesso de revestimento para acabamento na construção civil, placas e blocos de gesso (pré-moldados), gesso acartonado (drywall), gesso cola e gesso projetado. Diretamente da gipsita são obtidos o gesso agrícola e o “gesso” para emprego na indústria cimenteira (HENRIQUE JR, 2013).

Figura 1- Fluxograma do processo produtivo do gesso e seus artefatos



Fonte: Henrique Jr, (2013)

### 1.3.4.1 Etapas do Processo produtivo do gesso

#### 1.3.4.1.1 A lavra da gipsita

Inicialmente faz-se a remoção da camada estéril de material argiloso com cobertura vegetal acima da bancada de gipsita, através do processo de detonação, que obedecendo a um “plano de fogo” são feitos alguns furos no corpo mineral exposto que são preenchidos com uma carga com explosivos (dinamite) e se procede à detonação, operação conhecida como desmonte de bancada. Os blocos de minério desprendidos da bancada após o desmonte, o minério pode ter tamanhos que variam de tonelada a gramas, as maiores necessitam ser reduzidas a pedaços menores com ajuda de rompedores ou com nova detonação, só depois podem ser embarcados em caminhões caçamba e enviados para a planta de calcinação de gipsita ou para as fabricas de cimento (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Figura 2 - Frente de lavra de gipsita da Mineração Campo Belo em Araripina-PE



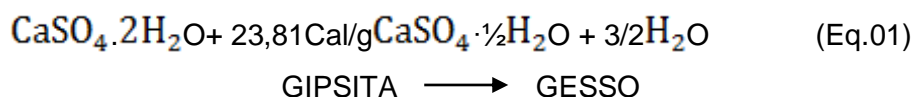
Fonte: Baltar, Bastos e Luz (2008)

#### 1.3.4.1.2 O beneficiamento da gipsita

Em geral, resume-se a uma seleção manual, seguida de britagem, moagem e peneiramento. É comum o uso de britadores de mandíbula e moinhos de martelo. Em alguns casos, a britagem é realizada em dois estágios, em circuito fechado com peneiras vibratórias a seco. O produto resultante das operações de cominuição deve apresentar uma distribuição granulométrica uniforme, a fim de evitar uma desidratação desigual para as partículas de gipsita (BALTAR; BASTOS; LUZ ,2008).

#### 1.3.4.1.3 Calcinação – Desidratação da Gipsita

A calcinação do minério de gipsita consiste, basicamente, na desidratação térmica do sulfato de cálcio di-hidratado, cujo resultado é a perda de 3/2 da água de cristalização, da gipsita, convertendo-se a um sulfato de cálcio semi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), conforme a equação abaixo (BALTAR; BASTOS; LUZ ,2008).



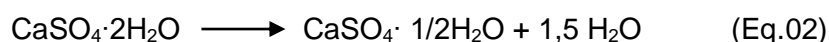
A gipsita calcinada é intensamente utilizada pela indústria de construção civil para revestimento de paredes, placas, blocos, painéis, etc, é também muito utilizado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários, e como aglomerante do giz (MUNHOZ; RENÓFIO, 2006; SANTOS, 1996). Quando re-hidratada o semi-hidrato forma uma pasta que em seguida endurece, recompondo o sulfato de cálcio di-hidratado. Para acelerar ou retardar a pega, podem ser utilizados aditivos especiais, dependendo da finalidade desejada (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

#### 1.3.4.1.4 Obtenção do gesso por desidratação térmica

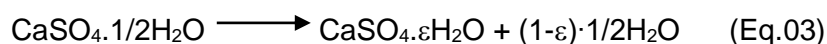
Quando o minério de gipsita é aquecido, de 20°C a 1250°C, Segundo Santos (1996) e Daligand (1985), podemos obter cinco fases do sulfato de cálcio:

a) Na temperatura ambiente o minério de gipsita é essencialmente sulfato de cálcio di-hidratado; que ao ser aquecido a temperatura de 60°C inicia-se a perda de água de cristalização presente na gipsita com formação do semi-hidrato (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008);

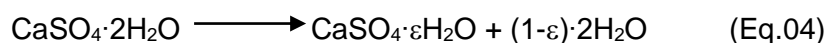
b) Em temperaturas de 100°C tem-se início a desidratação da gipsita para formação dos semi-hidratos alfa ou beta, a formação de um ou do outro irá depender das condições de operação. A esta temperatura a cinética da reação é muito lenta, sendo assim em processos industriais, a velocidade requerida de produção é conseguida trabalhando-se em uma faixa de temperatura entre 140 e 160°C (SANTOS, 1996);



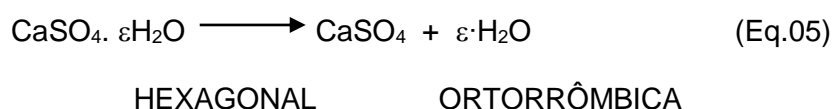
c) Quando a temperatura de 200°C é alcançada o semi-hidrato perde quase toda a sua água de cristalização e obtém-se uma anidrita solúvel (instável), denominada anidrita III. A anidrita solúvel, de fórmula  $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon \text{H}_2\text{O}$ , indica que este produto pode conter água de cristalização, embora em baixo teor (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988),  $\varepsilon$  variando entre 0,11 a 0,06. Este tipo de anidrita confere ao gesso uma redução em suas propriedades mecânicas, devido às condições adversas em que é formada no processo (excesso de temperatura). Sendo muito reativa, transforma-se em semi-hidrato com a umidade do ar (DALIGAND, 1985):



Sendo a produção de anidrita, às vezes, possível diretamente da gipsita (SANTOS, 1996):

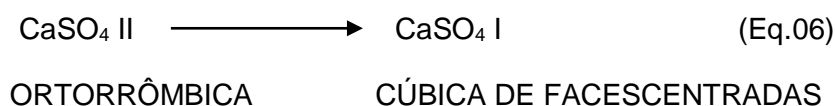


d) A transformação de Anidrita III em II ocorre para o semi-hidrato beta, quando a temperatura alcança 350°C (SANTOS, 1996), e para o semi-hidrato alfa, quando a temperatura do sólido calcinado atinge 220°C (DALIGAND, 1985);

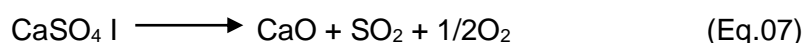


A anidrita II, ou anidrita insolúvel, pode ser obtida de 350 a 800°C. Entre 700 e 800°C, é denominada de gesso “calcinado até a morte”. Sua calcinação entre 400 e 500°C, produz uma anidrita utilizada como um dos constituintes dos gessos de construção, principalmente o gesso de revestimento de parede, por conferir resistências especiais à erosão e à compressão para a mistura final (SANTOS, 1996).

e) Quando se calcina o minério de gipsita acima de 800°C (SANTOS, 1996) ou à 1230°C, a anidrita II transforma-se em anidrita I, que é bastante similar a anidrita natural encontrada no minério de gipsita, com hidratação extremamente difícil (DALIGAND, 1985);



f) Quando se atinge temperaturas de calcinação acima de 1250°C, tem-se a decomposição da anidrita I em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico (DALIGAND, 1985);



### 1.3.5 Reciclagem de gesso no Brasil

O aproveitamento (ou utilização) dos resíduos de gesso no Brasil ganhou uma nova conotação, a partir da resolução CONAMA nº307/02 de julho de 2002 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no Brasil. De acordo com a disposição, os resíduos podem ser divididos em quatro classes:

- Classe A são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados;
- Classe B são os resíduos recicláveis para outras destinações;
- Classe C são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis;
- Classe D são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (BRASIL, 2002).

Pela Resolução nº 307/2002, o gesso estava enquadrado na Classe C. Entretanto, em 24 de maio de 2011 através da resolução nº431, o CONAMA altera o artigo 3º da Resolução nº307 de 5 de julho de 2002 do CONAMA, e estabelece nova classificação para os resíduos de gesso, sendo enquadrado agora como resíduo da construção civil Classe B reciclável para outra destinação (BRASIL, 2011).

#### 1.3.5.1 Gesso Reciclado

A heterogeneidade do entulho reciclado talvez seja a maior dificuldade do ponto de vista produtivo. Isso acontece, pois, a composição do entulho pode variar nas obras novas de acordo com a etapa em que se encontra a obra. Por exemplo, o entulho conterá maior teor de material cerâmico durante a execução da alvenaria (com bloco cerâmico) ou de argamassa na fase de revestimentos (SOUZA 1999; JOHN, 2000).

No Brasil, a principal ênfase comercial na reciclagem desse entulho, até agora, foi à instalação de máquinas argamassadeiras, em canteiros de obras, para triturar os seus próprios resíduos minerais das obras. Esse método de produção de argamassas, apesar de aparentemente poder trazer benefícios econômicos às construtoras, apresenta problemas por falta de planejamento e de conhecimento do assunto por parte dos engenheiros. Em muitos casos, os canteiros de obras não dispõem de espaço suficiente para instalação da máquina e armazenamento do entulho, que varia com o tamanho da obra. Não existe uma gestão racional do resíduo gerado que reduza, ao mínimo, os gastos com reciclagem e evite a contaminação do entulho a ser reciclado por materiais indesejáveis (aço, gesso, plástico, madeira e outros que possam inviabilizar a reciclagem). Para agravar, são poucos os engenheiros que têm

domínio do processo de moagem, do comportamento dos materiais reciclados e da sua influência nas propriedades dos produtos resultantes da reciclagem (PINTO, 1999).

A incorporação de resíduos na produção de materiais também pode reduzir o consumo de energia, tanto porque estes produtos frequentemente incorporam grande quantidade de energia quanto porque podem reduzir as distâncias de transporte de matérias primas. No caso das escórias e pozolanas, é este nível de energia que permite produção de cimentos sem a calcinação da matéria prima, permitindo uma redução do consumo energético de até 80% (JOHN, 1999). Finalmente, a incorporação de resíduos no processo produtivo muitas vezes permite a redução da poluição gerada. Por exemplo, a incorporação de escórias e pozolanas reduz substancialmente a produção de CO<sub>2</sub> no processo de produção do cimento.

A incorporação de resíduos permite muitas vezes a produção de materiais com melhores características técnicas. Este é o caso da adição de microssílica, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica e da escória de alto forno, que melhora o desempenho do concreto frente à corrosão por cloretos. Dessa forma, a reutilização de resíduos de gesso, tanto da própria fabricação de pré-moldados (placas, blocos e acartonados) como das construções e demolição de obras em pré-moldados é uma ação imperativa para elevar os níveis de utilização do gesso na indústria da Construção Civil. Além disso, o incentivo à reciclagem deve ser encorajado como uma importante etapa de qualquer política ambiental (JOHN, 1999).

A reciclagem, por outro lado, é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesas em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de deposição. Uma grande siderúrgica, por exemplo, produz mais de um milhão de toneladas de escória de alto forno por ano que valem no mercado cerca de 10 milhões de reais, sem contar a eliminação das despesas com o gerenciamento do resíduo. Contrariamente à disposição controlada dos resíduos, a reciclagem é atrativa às empresas. Para qualquer forma de reutilização dos resíduos da construção civil é necessário projetar em cima de indicadores, menor consumo de energia, menos geração de resíduos, poluição e analisar o ciclo de vida (ALVES, 2004).

Existem publicações com ensaios de resultados sobre formas de reutilização para diversos segmentos, tais como: corretivo para solo, aditivo para compostagem, forração para animais, absorvente de óleo, controle de odores em estábulos, secagem de lodo de esgoto e papel (MAVIN, 2000; CIWMB, 2007).

Uma forma já consolidada de reutilização em países desenvolvidos é a matéria-prima para gesso acartonado, onde as perdas na construção são significativas, devido às atividades



de corte. Elas dependem muito da modulação da obra. Nos Estados-Unidos da América, estima-se que entre 10 a 12 % do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção (CAMPBELL, 2007).

Um caso de sucesso é o da empresa canadense *New West Gypsum Recycling* que desde 1986 recicla placas de gesso acartonado. A empresa dispõe de um equipamento móvel que pode ser transportado para diferentes localizações. A tecnologia, no entanto, requer limpeza manual do resíduo e proteção da chuva, para que o material seja reutilizado como aglomerante na produção de gesso acartonado.

As argamassas de gesso reutilizadas foram obtidas dos resíduos de revestimentos secando e triturando o material (CAVALHO, 2003). Com base da observação experimental dos gesseiros, sabe-se que no entulho encontra-se muitas vezes certa quantidade de água, tornando o resíduo saturado e impedindo novas reações de hidratação.

O resíduo de gesso é submetido à secagem em estufa até a constância de massa. Posteriormente, ele é triturado com um soquete até serem destruídos todos os torrões. A avaliação da trabalhabilidade é obtida empiricamente pelo gesseiro. O resíduo triturado é submetido ao teste de comparação com pó de gesso *in natura*, sendo produzida uma pasta com gesso reciclado e outra com o gesso *in natura*.

O interessante deste produto reutilizado é que com uma quantidade menor de água torna-se possível arrematar uma placa. No entanto, com a mesma quantidade de água o gesso reciclado não endurece e quando comprimido libera água. A granulometria do gesso reciclado é bem maior que a do gesso *in natura*. Esta é a causa da possível dificuldade de trabalhar com o resíduo, devido ao aspecto grosseiro e da pega lenta; sendo possível a sua utilização apenas em arremates de placas.

CARVALHO (2003) produziu tijolos de gesso com os resíduos de uma produção de 5 dias em uma indústria de forros e molduras. Foi armazenado o resíduo produzido por um único fundidor. Durante a moldagem das sancas, placas e molduras sobram uma quantidade de gesso preparado, que antes do final da pega pode ser reaproveitado. Este resíduo é depositado em uma forma para a fabricação de tijolos, o gesso em estado fresco é nivelado e depois de aproximadamente dois minutos é retirado da forma e armazenado ao ar livre.

Os tijolos de gesso não deformam com o passar do tempo. São mais leves, podendo ser uma carga menor para estrutura de uma edificação e o ensaio a compressão deu acima do normalizado para tijolos maciços segundo a norma NBR 7170/83, sendo a idade fator determinante para o teste, a resistência foi obtida após 60 dias (FOLLNER et al., 2002).

Empresas de países do primeiro mundo afirmam utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho, sendo uma tecnologia já comprovada no mercado

externo. Todavia, há necessidade de uma limpeza dos resíduos, inclusive o próprio papel do gesso acartonado, depois uma moagem e uma calcinação à baixa temperatura. Além de ser uma tecnologia onerosa, precisa-se também de uma mão-de-obra para limpeza do produto (ALVES, 2004).

Estes modelos de reutilização são válidos para os entulhos homogêneos das indústrias gesseiras, já que o resíduo é oriundo da sobra da moldagem, correm poucos riscos de serem contaminados por agentes físicos. No caso de entulho contaminado por agentes físicos existe a necessidade de usinas de reciclagem (JOHN, 1999). Em alguns países do primeiro mundo afirmam utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho, sendo uma tecnologia já comprovada no mercado externo. Todavia, há necessidade de uma limpeza dos resíduos, inclusive o próprio papel do gesso acartonado, depois uma moagem e uma calcinação à baixa temperatura. Além de ser uma tecnologia onerosa, precisa-se também de uma mão-de-obra para limpeza do produto (ALVES, 2004).

Estes modelos de reutilização são válidos para os entulhos homogêneos das indústrias gesseiras, já que o resíduo é oriundo da sobra da moldagem, correm poucos riscos de serem contaminados por agentes físicos. No caso de entulho contaminado por agentes físicos existe a necessidade de usinas de reciclagem (JOHN, 1999).

### **1.3.6 Carvão Mineral no Brasil**

O carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, de acordo a sua qualidade, em: turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%; carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, que contém entre 75% e 85% de carbono; e antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

Apesar de ser um combustível potencialmente poluente, o carvão deve continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial, devido à disponibilidade de enormes reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão (clean coal technologies). Tal característica livra o abastecimento energético das limitações geopolíticas ou de questões de segurança. Dessa maneira, o carvão apresenta um grande potencial de contribuir, por exemplo, para aumento das taxas de eletrificação nos países em desenvolvimento contribuindo para redução dos níveis de pobreza, para industrialização e para melhoria da qualidade de vida.

Além disso, o carvão está disponível em uma grande variedade de formas e pode ser facilmente estocado nas proximidades dos centros consumidores. Mais do que isso, não depende de condições climáticas, podendo ser utilizado como “backup” para geração eólica e hidrelétrica.

Cabe acrescentar que o investimento para a extração do carvão é cerca de 5 vezes inferior ao investimento necessário à extração do gás natural e cerca de 4 vezes inferior ao investimento para extração do petróleo.

A quantificação das reservas de carvão é baseada em critérios geológicos, de mineração e econômicos. Entretanto, a forma como essas estimativas são feitas varia de país para país, pois não há até o momento nenhuma padronização internacional. O que existe, segundo a IEA (2005), são algumas definições que são comumente aplicadas, como a de recursos e reservas. O primeiro termo se refere à quantidade do combustível que pode ser encontrada na mina, sem considerar se a extração do carvão é economicamente viável. Assim, pode se dizer que nem todos os recursos são recuperáveis usando a tecnologia disponível. A quantidade que é recuperável constitui as reservas. Estas podem ser ainda classificadas como provadas (ou medidas) e prováveis (ou indicadas), baseado nos resultados da exploração e no grau de confiança nesses resultados. Neste sentido, as reservas prováveis são estimadas com um grau de confiança menor que as provadas.

No Brasil, os critérios de quantificação das reservas minerais são definidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Nos anuários estatísticos da DNPM, são divulgados dados de reservas medidas, indicadas e inferidas. Esta classificação é feita de acordo com o grau de conhecimento da jazida. No anuário mineral de 2005 da DNPM (DNPM, 2005), as reservas são definidas da seguinte maneira:

- Reserva Medida - Volume ou tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e sondagens. O teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estarem tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos. A reserva computada deve ser rigorosamente determinada nos limites estabelecidos, os quais não devem apresentar variação superior a 20% (vinte por cento) da quantidade verdadeira;

- Reserva Indicada - Volume ou tonelagem de minério computado a partir de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção, e parcialmente por extrapolação até distância

razoável, com base em evidências geológicas. As reservas computadas são as aprovadas pelo DNPM nos Relatórios de Pesquisa e/ou reavaliação de reservas;

- Reserva Inferida - Estimativa do volume ou tonelagem de minério calculada com base no conhecimento da geologia do depósito mineral, havendo pouco trabalho de pesquisa.

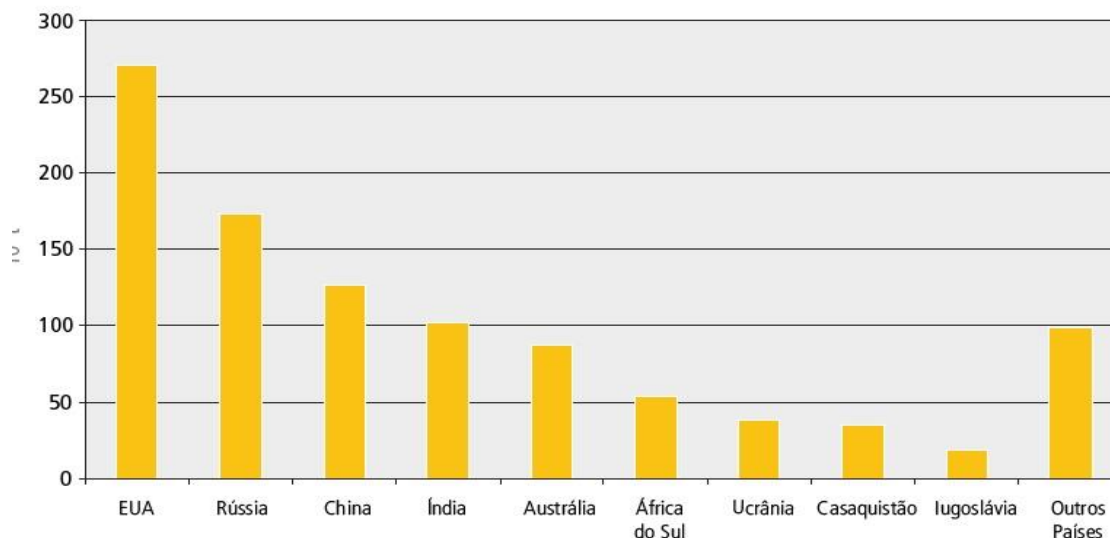
De acordo com Borges (2004), para se avaliar se uma mina é economicamente viável, observa-se a relação estéril-minério, a quantidade de camadas e a profundidade das camadas de carvão para se determinar o tipo de lavra: a céu aberto ou por métodos subterrâneos. Verifica-se também o tipo do carvão para decidir o método de beneficiamento que deverá ser utilizado para separar os materiais desejáveis daqueles que não serão aproveitados. As características do carvão bruto (ou seja, sem beneficiamento) necessárias para o estabelecimento de um esquema de beneficiamento são, essencialmente, o tamanho ideal de britagem, as curvas granulométricas do carvão britado, as curvas de lavabilidade de cada fração granulométrica acima de 0,5mm e os estudos de degradação do carvão, entre outras.

Segundo o International Energy Outlook 2005 (EIA/DOE, 2005), o carvão é o combustível fóssil com a maior disponibilidade no mundo. Suas reservas totalizam 1 trilhão de toneladas, quantidade suficiente para suprir o consumo nos níveis atuais por 190 anos. Além disso, ao contrário do que ocorre com o petróleo e com o gás natural, as reservas de carvão apresentam uma distribuição geográfica no mundo muito mais equitativa, sendo que 75 países possuem reservas expressivas. Ainda assim, 57% dessas reservas encontram-se em três países: Estados Unidos (27%), Rússia (17%) e China (13%). Outros seis países respondem por 33%: Índia, Austrália, África do Sul, Ucrânia, Cazaquistão e Iugoslávia. Em 2002, esses nove países juntos representavam 90% das reservas recuperáveis mundiais e eram responsáveis por 78% da produção.

A Figura 3 apresenta as nove maiores reservas do mundo.

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2005) mostram que a produção e o consumo mundial de carvão concentram-se em dois tipos do mineral, o betuminoso/subbetuminoso e o linhito. O primeiro, de maior valor térmico, é o mais comercializado internacionalmente. O valor térmico do linhito é bem menor e, por isso, é mais utilizado para geração termelétrica local.

Figura 03 – Reservas mundiais de carvão



Fonte: EIA/DOE, 2005

Conforme pode ser observado na Tabela 1, a produção de carvão betuminoso alcançou a marca de 4.648 milhões de toneladas em 2004, representando um crescimento de 8,7% em relação a 2003, que já tinha sido significativo em relação a 2002, 8,8%. O principal responsável por este crescimento é a China (ou o “Efeito China”), país que tem apresentado taxas de crescimento econômico surpreendentes nos últimos anos.

Tabela 1 - Produção mundial de carvão betuminoso (Mt)

	2002	2003	2004
China	1.140	1.428	1.676
EUA	1.010	984	1.026
Índia	376	398	411
Austrália	301	303	314
África do Sul	244	263	266
Rússia	169	183	217
Indonésia	114	127	142
Polônia	114	113	110
Cazaquistão	86	93	91
Ucrânia	53	55	54
Outros	325	330	341
<b>Total</b>	<b>3.932</b>	<b>4.277</b>	<b>4.629</b>

Fonte: IFA, 2005.

Em comparação à produção mundial, o comércio internacional de carvão é relativamente pequeno. Cinco países exportadores dominam o mercado: Austrália, China, Indonésia, África do Sul e Colômbia.

O Balanço Mineral Brasileiro (Borba, 2001) mostra que linhito e carvão sub-betuminoso podem ser encontrados em vários estados brasileiros, tais como Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Pernambuco, Piauí, Maranhão, Pará, Amazonas e Acre. As principais reservas estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A Tabela 2 abaixo mostra os dados relevantes de reservas de carvão no Brasil.

Tabela 2 – Reserva de carvão na Região Sul

Unidade da federação	Quantidade (t)		
	Medida	Indicada	Inferida
Paraná	4.600.006	-	-
Rio Grande do Sul	5.280.804.946	10.100.265.668	6.317.050.409
Santa Catarina	1.424.834.833	601.476.077	217.248.427

Fonte: DNPM, 2005.

De acordo com Borba (2001), a principal jazida brasileira é Candiota. Localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, ela possui as maiores reservas e também as camadas de carvão de maior espessura, com grande continuidade e pequena cobertura. Essas características proporcionam a tal mina uma lavra em larga escala com grande rentabilidade. O mineral pode ser usado na forma run-of-mine (ROM), ou seja, na forma bruta, ou ser beneficiado para redução de cinza e enxofre. O consumo tende a ser feito na boca da mina, pois se justifica economicamente seu transporte.

No mesmo estado, na região central, existem jazidas cujo carvão admite beneficiamento para produção de produtos de maior valor agregado e viabilidade econômica de transporte a curta distância. São várias jazidas, dentre elas destacam-se Charqueadas, Leão, Iruí e Capané.

Ainda no Rio Grande do Sul, entre a cidade de Porto Alegre e litoral, encontram-se as jazidas de Morungava/Chico Lomã e Santa Terezinha, com aproximadamente 16% das reservas medidas do país. Trata-se de um carvão de melhor qualidade. Nessas jazidas, existe uma fração coqueificável para uso na siderurgia e em fundições que, teoricamente, permitiria transporte a médias e longas distâncias. Contudo, tratam-se de jazidas profundas (até 800m de profundidade), a serem mineradas predominantemente em subsolo. Para o seu aproveitamento, seriam necessários altos investimentos em novas minas, pois atualmente não há nenhuma infra-estrutura mineira na região. A Tabela 3 apresenta algumas características do carvão encontrado nas jazidas localizadas no Rio Grande do Sul.

Tabela 3 – Jazidas do Rio Grande do Sul

Jazida	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Candiota	3.200	23,3	52,5	1,6
S.Terezinha	3.800 - 4.300	28,0 - 30,0	41,0 - 49,5	0,5 - 1,9
Morungava/ Chico Lomã	3.700 - 4.500	27,5 - 30,5	40,0 - 49,0	0,6 - 2,0
Charqueadas	2.950	24,3	54	1,3
Leão	2.950	24,1	55,6	1,3
Iruí	3.200	23,1	52	2,5
Capané	3.100	29,5	52	0,8

Fonte: Carvalho, 2005.

No estado de Santa Catarina, segundo Borba (2001), as jazidas Barro Branco e Bonito estão localizadas na bacia sul-catarinense e representam cerca de 21% das reservas medidas oficiais brasileiras. A camada Barro Branco apresenta propriedades coqueificantes, com características plásticas importantes para uso em blindagem com o carvão importado para a siderurgia. Quanto ao poder energético, pode ser classificado como de pobre a médio, admitindo beneficiamento. As jazidas a céu aberto já foram quase todas mineradas. Nas minas subterrâneas, há uma crescente dificuldade de mineração em função da profundidade e da complexidade estrutural. A Tabela 4 abaixo apresenta as características do carvão da jazida Sul Catarinense.

Tabela 4 – Jazida Sul Catarinense

Camada	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Barro Branco	2.700	21,4	62,1	4,3
Bonito	2.800	26,5	58,3	4,7

Fonte: Carvalho, 2005.

Finalmente, têm-se na região central do Paraná as jazidas de Cambuí e Sapopema, com um carvão de poder energético médio, representando menos de 1% das reservas medidas oficiais do país. A Tabela 5 abaixo apresenta as características do carvão de tais jazidas.

Tabela 5 – Jazidas do Paraná

Jazida	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Cambuí	4.850	30	45	6
Sapopema	4.900	30,5	43,5	7,8

Fonte: Carvalho, 2005.

### 1.3.7 Métodos de mineração

Existem dois métodos de mineração do carvão: a lavra a céu aberto e a subterrânea. Segundo o World Coal Institute (WCI, 2005), a escolha entre um deles é determinada pela geologia do depósito do mineral, ou seja, pela altura da cobertura da mina.

No caso de depósitos rasos, o carvão poderá ser lavrado a céu aberto, dependendo do terreno onde a mina está localizada. Naturalmente, carvões minerados a céu aberto tendem a apresentar um custo de extração mais competitivo, de modo que apenas nas reservas onde tal método não é economicamente viável, o combustível é lavrado por mineração subterrânea. A Figura 4 ilustra uma mina a céu aberto.

Figura 04 – Mineração de carvão a céu aberto



Fonte: WCI, 2006.

Ainda conforme nota técnica anterior, a maior parte da oferta mundial de carvão mineral (60%, de acordo com o WCI, 2005) é extraída através da mineração subterrânea, embora em alguns importantes países produtores predominem minas a céu aberto. Na Austrália, por



exemplo, aproximadamente 80% da produção vêm de tais minas e, nos EUA, 67%. Não por acaso, a Austrália é hoje, de longe, o maior exportador do minério, tanto de carvão vapor, quanto de carvão metalúrgico.

### 1.3.7.1 Mineração a céu aberto

Mineração a céu aberto refere-se ao método de extração de rocha ou de minerais da terra por sua remoção de um poço aberto ou de uma área de empréstimo. O termo é usado para diferenciar esta forma de mineração dos métodos extrativos que requerem perfuração de túneis na terra. Incluem-se entre os materiais normalmente extraídos de minas a céu aberto a argila, a coquina, o granito, a gravilha, o gesso, o calcário, o mármore, a areia e o cascalho, o arenito e, ainda, o carvão e mesmo alguns metais, como cobre e ferro. A Figura 5 ilustra a mineração de carvão a céu aberto no Brasil.

Figura 05 – Mineração de carvão a céu aberto no Brasil  
Mina do Recreio, Rio Grande do Sul



Fonte: COPELMI Mineração Ltda, 2006.

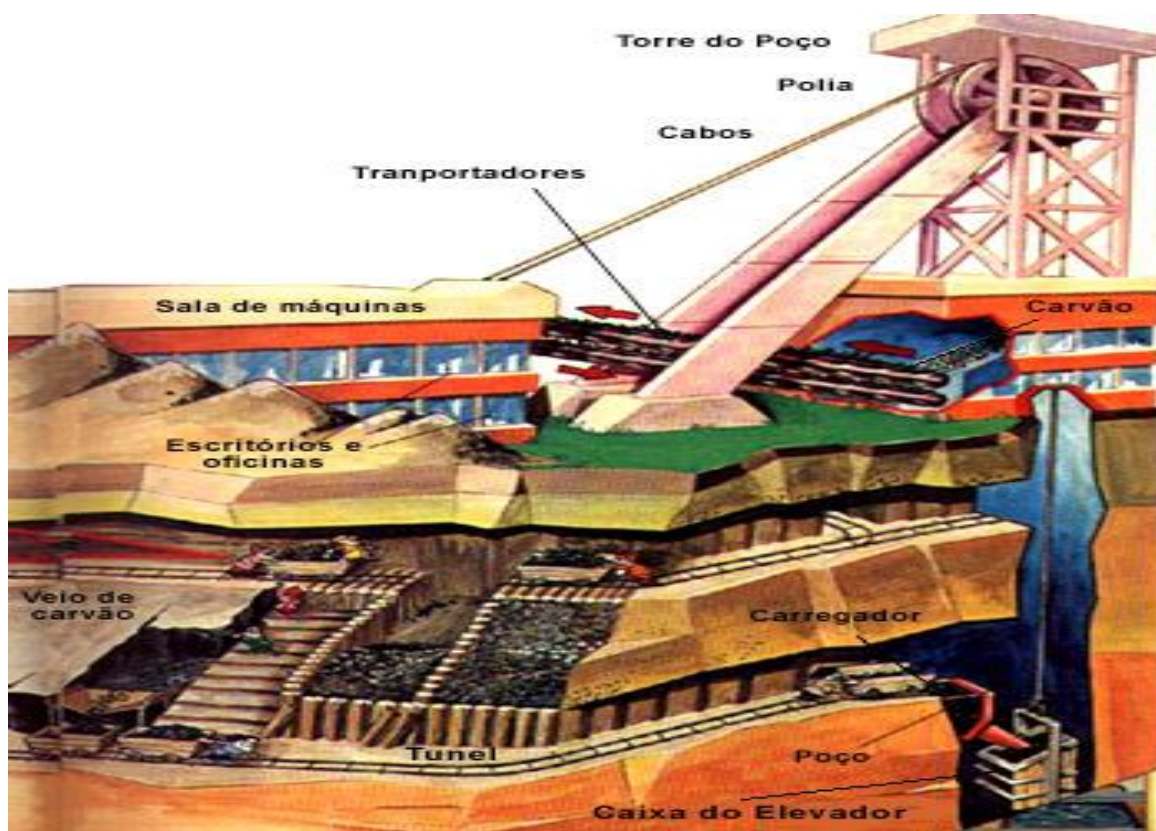
A mineração a céu aberto é usada quando depósitos de mineral ou rocha comercialmente úteis são encontrados perto da superfície, isto é, quando a camada de recobrimento é relativamente estreita, ou quando é estruturalmente inapropriada a perfuração de túneis (por exemplo, no caso de mineração de areia ou cascalho). Quando o mineral ocorre em camadas profundas ou como veios de rocha, túneis em rocha podem ser necessários para extrair o material.

Conforme abordado anteriormente, a mineração a céu aberto consiste na retirada da cobertura do solo e da extração do carvão propriamente dito. A taxa de recuperação pode atingir 90% se toda a camada puder ser explorada. Este valor é bem superior ao dos métodos empregados na mineração subterrânea. Entretanto, a taxa de recuperação de uma mina a céu aberto e, portanto, a viabilidade econômica, depende da espessura da cobertura da mina (MONTEIRO, 2004). Essas minas podem ocupar extensas áreas e, por isso, exigem grandes equipamentos, tais como escavadeiras de arrasto (*draglines*), pás mecânicas (*power shovels*), caminhões e esteiras. O trabalho de desmonte do solo e das rochas é feito por explosivos. Em seguida, o capeamento é retirado pelas escavadeiras ou pelas pás mecânicas. Uma vez que a camada de carvão é recuperada, o mineral é fracionado e empilhado para ser transportado por caminhões ou por esteiras para o local onde ele será beneficiado.

### 1.3.7.2 Mineração subterrânea

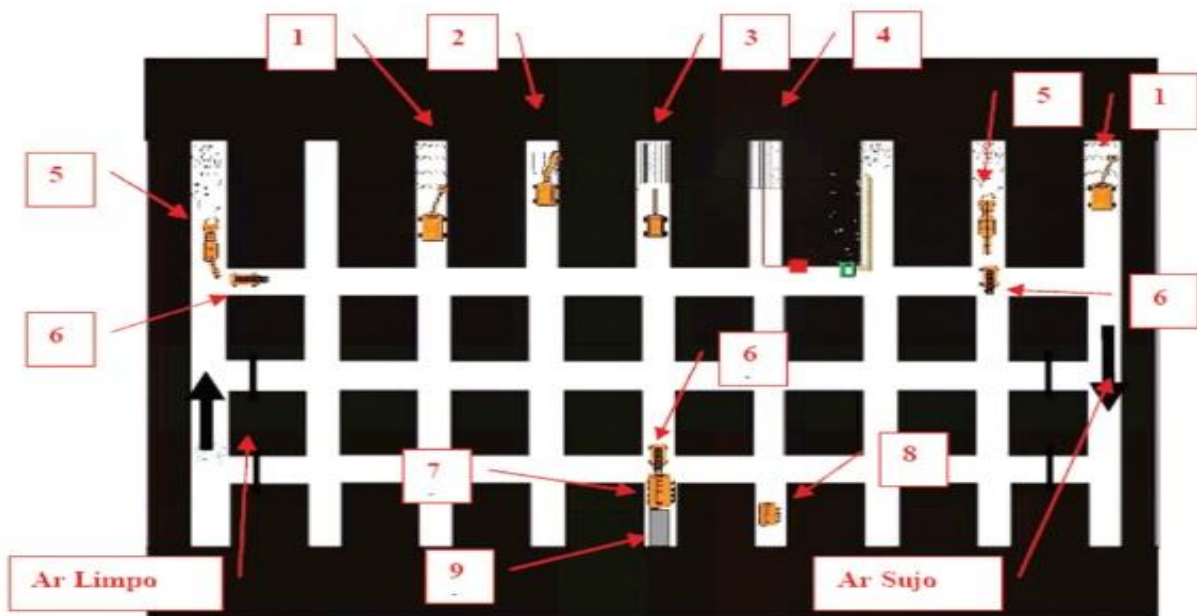
Conforme abordado anteriormente, existem dois métodos de lavra subterrânea: câmara e pilares (*roomand-pillar*); e frente larga (*longwall mining*). A Figura 6 ilustra a operação em uma mina subterrânea.

Figura 06 – Operação de uma mina subterrânea



No primeiro método, os depósitos de carvão são recuperados de maneira a formar galerias, onde os pilares são formados pelo próprio mineral que sustentam a cobertura da mina e controlam o fluxo de ar. As câmaras normalmente têm de 5 a 10 metros de largura, e os pilares, 30 metros de extensão. O mineral extraído é carregado através de esteiras para a superfície. Na medida em que a mineração avança em direção ao limite do depósito, inicia-se a retirada da mina (*retreat mining*). Esse processo consiste na mineração do carvão que forma os pilares, de forma a permitir que a cobertura tombe. Ao final deste processo, a mina é abandonada. Uma representação esquemática do processo de lavra de câmaras e pilares é apresentada na Figura 7.

Figura 07 – Representação esquemática de mineração de câmaras e pilares



Legenda: 1- perfuratriz de teto; 2- cortadeira; 3- perfuratriz de frente; 4- explosivo; 5- loader; 6- shuttle car; 7- alimentador; 8- centro força; 9- correia transportadora.

Fonte: Borges (2004).

### 1.3.8 Transporte e logística

O modal mais indicado para o transporte do carvão depende de vários fatores, mas principalmente da distância a ser coberta.

No mundo inteiro, grande parte do carvão produzido é usada para a geração de energia elétrica. Não raro, as termelétricas localizam-se próximas às minas, de modo a reduzir os

custos de transporte. Com efeito, o transporte da energia elétrica, via redes de transmissão, apresenta-se, em geral, uma solução mais econômica do que o transporte do carvão.

Quando a mina de carvão e a planta de geração termelétrica estão próximas, o combustível pode ser transportado da mina para a planta por meio de esteiras (Figura 08). Para curtíssimas distâncias, as esteiras são, de fato, o meio de transporte mais eficiente para o carvão.

Figura 08 – Usina termelétrica junto à mina de carvão



Fonte: World Coal (2006).

Para distâncias maiores, entretanto, caminhões, trens e barcaças são mais eficientes. Alternativamente, o carvão pode ser misturado com água formando uma lama (*slurry*), de forma a ser transportado através de dutos. Normalmente, essas regras valem para mercados domésticos.

No âmbito náutico, o porte (DWT ou dwt) é soma de todos os pesos variáveis que um navio é capaz de embarcar em segurança. É constituído pelo somatório dos pesos do combustível, água, mantimentos, consumíveis, tripulantes, passageiros, bagagens e carga embarcados. O porte é normalmente expresso em toneladas, "toneladas de peso morto", "deadweight tonnage" (DWT) em inglês. Os navios são mais comumente utilizados:

- Handysize - 40-45.000 DWT
- Panamax - 60-80.000 DWT
- Capesize vessels – superior a 80.000 DWT.

### 1.3.9 Termoelétrica

Com a crescente pressão ambiental, especialmente a preocupação com o aquecimento global e as mudanças climáticas, o fator tecnológico se coloca, dentro de uma perspectiva de longo prazo, como um dos condicionantes do potencial de geração termelétrica a partir do carvão mineral.

O panorama atual do estágio de desenvolvimento de alternativas tecnológicas para geração de energia elétrica a partir do carvão é resumido na Tabela 06.

Tabela 06 Tecnologias de geração termelétrica a carvão

Tecnologia	Situação	Eficiência na conversão	Investimento (US\$/kW) <sup>(1)</sup>
Combustão pulverizada	C	38-46%	1.300-1.500
Combustão em Leito Fluidizado			
Pressão atmosférica	C/D	34-37%	1.450-1.700
Circulação <sup>(2)</sup>	C/D	37-39%	1.459-1.700
Pressurização <sup>(2)</sup>	D	42-45%	1.450-1.700
Gaseificação integrada			
Com ciclo combinado	D	45-48%	1.450-1.700
Com célula combustível	P&D	40-60%	1.700-1.900
Combustão direta			
Turbina	P&D	35-45%	1.200
Diesel	P&D	35-40%	500-1.000

Situação: C = comercial; D = demonstrado; P&D = pesquisa e desenvolvimento

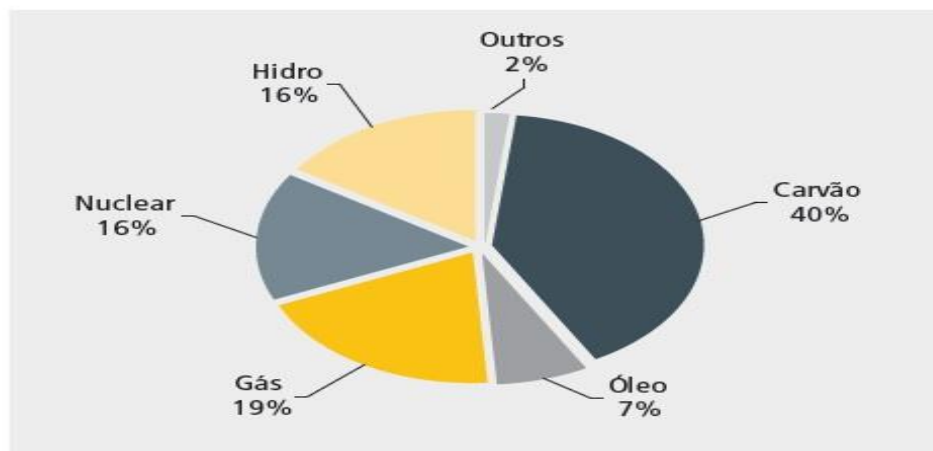
(1) preços internacionais; (2) vapores sub e supercríticos

Fonte: International Energy Agency (1997).

### 1.3.10 Panorama mundial

De acordo com o World Coal Institute – WCI (2003), o carvão mineral é a principal fonte primária de geração de energia elétrica, sendo responsável por cerca de 40% de toda a eletricidade gerada no planeta em 2003 (Figura 09).

Figura 09 – Participação de fontes primárias na geração de energia elétrica



Fonte: WCI (2005).

Por outro lado, os efeitos ambientais danosos resultantes das emissões provocadas pela queima do carvão vêm provocando questionamentos crescentes. De acordo com dados da EIA (2005), o carvão tem sido responsável, há 30 anos, por 35 a 38% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no mundo. Tais emissões incluem óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>), além de particulados, que têm impactos tanto no aquecimento global quanto na ocorrência de chuva ácida. A mitigação desses efeitos tem exigido o desenvolvimento de novas tecnologias, conhecidas como *clean coal technologies*.

Outro aspecto a ser considerado, que pode ser importante fator de estímulo ao desenvolvimento tecnológico, é a necessidade de substituição das usinas a carvão existentes. Na Comunidade Européia, 50% da capacidade total de 600 GW têm idade superior a 25 anos, enquanto nos Estados Unidos 80% das usinas têm mais de 20 anos (CARVALHO, 2005).

### 1.3.11 Parque termelétrico a carvão mineral brasileiro

As usinas termoelétricas são unidades de geração de energia elétrica, que utilizam combustíveis fósseis (gás natural, carvão mineral, óleo diesel, óleo combustível) para operação. O Brasil possui várias termoelétricas em operação.

O custo da energia elétrica gerada nas usinas termoelétricas é, geralmente, mais baixo do que a gerada nas hidrelétricas ou nas usinas nucleares. Porém, com queimam combustíveis fósseis para funcionar, possuem a desvantagem de poluir mais o ar do que os outros sistemas de geração de energia.

Principais termoelétricas no Brasil (Tabela 07)

Tabela 07

<b>TERMOELÉTRICA</b>	<b>POTÊNCIA INSTALADA</b>
Termoelétrica Cuiabá I (Cuiabá-MT)	470 MW
Termoelétrica de Uruguaiana (Uruguaiana-RS)	480 MW
Termoelétrica de Araucária (Araucária-PR)	410 MW
Termoelétrica Norte Fluminense (Macaé-RJ)	740 MW
Termoelétrica Muricy (Camaçari-BA)	147 MW
Termoelétrica Euzébio Rocha (Cubatão-SP)	220 MW
Termoelétrica Termo Ceará (Caucaia-CE)	220 MW
Termoelétrica Bahia I (Camaçari-BA)	32 MW
Termoelétrica Aureliano Chaves (Ibirité-MG)	226 MW
Termoelétrica Juiz de Fora (Juiz de Fora-MG)	87 MW
Termoelétrica Luís Carlos Prestes (Três Lagoas-MS)	386 MW

Fonte: ANEEL (2016)

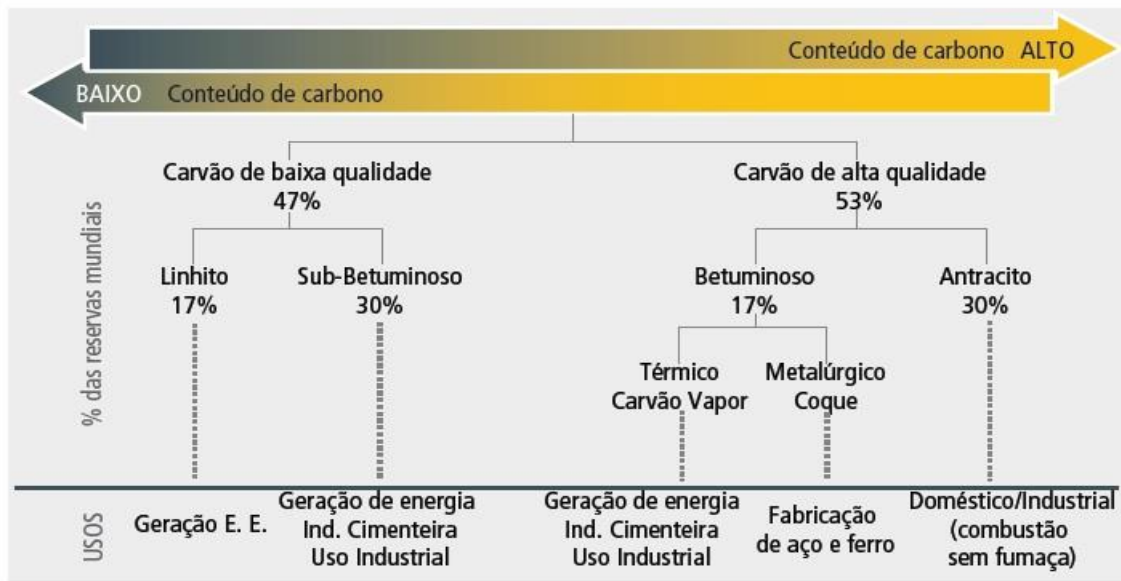
### 1.3.12 Caracterização do combustível

Conforme visto anteriormente, o carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, conforme sua qualidade, em:

- turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%;
- linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%;
- carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, que contém entre 75% e 85% de carbono;
- antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

A Figura 11 mostra a composição das reservas mundiais totais (provadas e inferidas) e usos por tipo de carvão.

Figura 11 – Composição das reservas mundiais totais e usos por tipo de carvão



### 1.3.13 Componentes básicos de uma usina termelétrica a carvão

O procedimento geral para a queima do carvão em térmicas consiste nas seguintes etapas:

- o carvão é levado às usinas e acumulado em pilhas;
- por meio de correias transportadoras, o carvão segue ao setor de preparação de combustível, o que inclui uma trituração preliminar e uma etapa de pulverização nos moinhos;
- o carvão, na granulometria requerida, é armazenado em silos;
- dos silos, o carvão é enviado para a sua queima na fornalha da caldeira, sendo ali injetado por meio de queimadores.

Nas superfícies de aquecimento, é gerado o vapor superaquecido que é fornecido à turbina. O vapor condensa nas superfícies do tubo do condensador, sendo o calor latente removido utilizando a água de resfriamento de uma fonte fria que é levada ao condensador pelas bombas de circulação. O condensado, logo após as bombas, passa pelo aquecedor de baixa pressão, o desaerador, a bomba de alimentação e os aquecedores de alta pressão, retornando de novo para a caldeira, a fim de fechar o ciclo. A eletricidade produzida no gerador é convertida para a tensão requerida e fornecida aos consumidores por meio das linhas de transmissão.



## **Caldeira**

A caldeira pode ser definida como o equipamento que, utilizando a energia térmica liberada durante a combustão de um combustível, promove a mudança de fase da água do estado líquido para o de vapor, a uma pressão muito maior que a atmosférica. O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, assim como para fins de aquecimento em processos industriais.

O tipo e a qualidade do combustível influenciam na construção da fornalha, do queimador e da caldeira. O carvão é geralmente empregado em fornalha de queima em suspensão para combustíveis sólidos.

Fornalhas de leito fluidizado apresentam vantagens importantes, sendo a principal a flexibilidade de operação. Fornalhas dessa natureza admitem diferentes tipos de combustíveis, mesmo os que apresentam baixo teor de carbono, alto teor de enxofre e/ou cinzas, e, ainda, a possibilidade de utilização de combustíveis com uma granulometria relativamente grossa, reduzindo o custo de preparação.

Os tipos de leito fluidizado mais utilizados são: o convencional ou borbulhante e o circulante. Vale ressaltar, contudo, que os sistemas de combustão em leito fluidizado têm limites de dimensionamento, pois para leitos com áreas acima de 100m<sup>2</sup>, o ar de sustentação não se distribui uniformemente, influenciando negativamente a eficiência de combustão (LORA, 2004).

## **Grupo turbina-gerador**

Uma central termelétrica de geração com ciclo vapor tem como máquina térmica uma turbina a vapor, com o único objetivo de produzir eletricidade. A introdução de alternativas térmicas de recuperação de calor, como o aquecimento regenerativo e o reaquecimento, permite alcançar uma maior eficiência da central.

A temperatura na qual a turbina opera é muito importante. Quanto mais elevada a temperatura, maior sua eficiência. O gás que flui pela turbina pode chegar a 1.260°C, mas alguns metais que a constituem não suportam temperaturas superiores a 900°C. Por isso, emprega-se ar para resfriamento dos componentes da turbina, o que acaba limitando a sua eficiência térmica.

A turbina a vapor é um equipamento mecânico que extrai a energia térmica do vapor pressurizado e o converte para trabalho mecânico rotacional. Uma turbina ideal é considerada um processo isentrópico (ou de entropia constante), onde a entropia do vapor entrante na

turbina é igual à entropia do vapor que sai dela. Nenhuma turbina é verdadeiramente isentrópica, porém as eficiências isentrópicas típicas se situam entre 20% e 90%.

Para maximizar a eficiência da turbina, o vapor é expandido em vários estágios para gerar trabalho. Tais estágios são caracterizados pela forma como a energia é extraída deles e são conhecidos como turbinas de impulso ou de reação. Várias turbinas modernas são uma combinação dos dois tipos, de modo que as seções de maior pressão são do tipo impulso e as seções de menor pressão são do tipo reação.

Atualmente, as plantas geradoras de energia empregam diferentes tipos de turbina em série, o que proporciona uma maior eficiência, sendo superior à eficiência de grandes motores diesel.

### **Condensador**

O condensador é um trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina ao estado líquido, utilizando água como fluido de resfriamento. O vapor de exaustão vai para o condensador através da seção de exaustão da turbina e condensa ao entrar em contato com a superfície dos tubos resfriados internamente pela água que circula por meio de bombas. O ejetor a vapor remove os gases incondensáveis do condensador e mantém um nível de vácuo ótimo para a operação da turbina. A temperatura e a pressão de vapor e a sua pressão no condensador dependem da temperatura e da vazão de água de resfriamento. O condensado acumulado na parte inferior do condensador é bombeado através do sistema de aquecimento regenerativo para a caldeira de vapor, fechando o ciclo (LORA, 2004).

#### **1.3.14 Caracterização quanto aos ciclos termodinâmicos**

As usinas térmicas em geral podem ser classificadas de acordo com seu ciclo termodinâmico. Boa parte das termelétricas a carvão mineral atualmente em operação usa um único ciclo termodinâmico, o de Rankine, tecnologia surgida na virada do século 19 para o século 20. São as usinas de ciclo simples, onde o calor da queima do combustível é usado para a produção de vapor.

Entre 1902 e 1932, a eficiência da transformação térmica dessas usinas saltou de 3,7% para 16,5%. Por volta de 1965, essa tecnologia atingiu seu apogeu, com eficiência aproximada de 33% (Center for Energy Efficiency and Renewable Energy, University of Massachusetts).

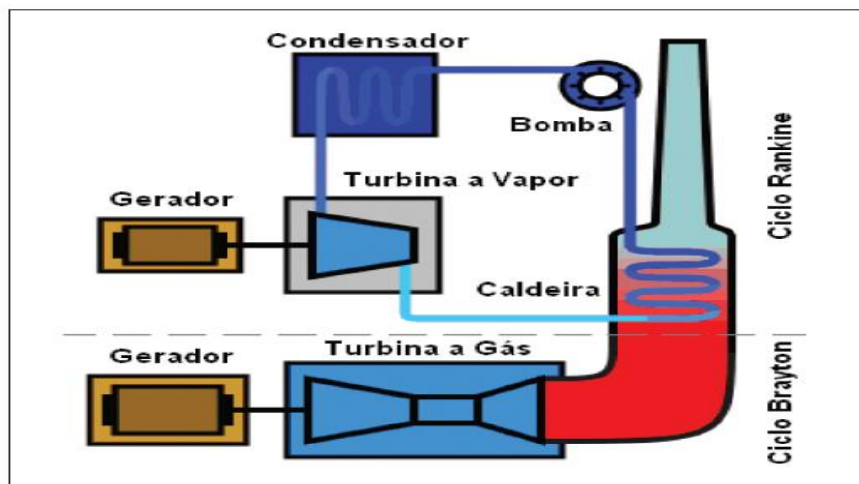
Basicamente, o processo envolve a queima do combustível térmico numa câmara de combustão (caldeira) onde o calor gerado aquece, por radiação e convecção, água em tubos de alta pressão para a produção de vapor. O vapor superaquecido é enviado à turbina, onde se

expande e gera o movimento circular que aciona o gerador elétrico. O vapor saído da turbina, em baixa pressão, é resfriado no condensador e bombeado de volta à caldeira, reiniciando o ciclo térmico, como ilustra a parte superior da Figura 6. Os gases da combustão, já refrigerados, são lançados à atmosfera em temperatura próxima a 130°C.

A eficiência do ciclo de geração depende apenas da diferença de temperatura da fonte de calor no início e no final do processo. Atualmente, as usinas que operam em ciclo subcrítico alcançam eficiência de até 39%, com temperatura de vapor de 500°C e pressão de 180 bar. Acredita-se que o ciclo subcrítico esteja no limite de desenvolvimento tecnológico e que apenas pequenas melhorias na eficiência, da ordem de 1 a 2%, ainda possam ocorrer.

As usinas térmicas mais modernas e eficientes trabalham com dois ciclos termodinâmicos: são as usinas a ciclo combinado, onde a queima direta do combustível produz energia numa turbina a gás (ciclo termodinâmico de Brayton ou Joule) e o calor residual dos gases de exaustão dessa turbina é usado para produzir energia adicional numa turbina a vapor, elevando a eficiência do processo de geração de energia elétrica (Figura 12).

Figura 12 – Diagrama esquemático do ciclo combinado



Em contraste às turbinas a vapor, as turbinas a gás trabalham a temperaturas por vezes superiores a 1200°C.

O conjunto de turbina a gás é constituído de compressor, queimador e a turbina a gás propriamente dita, sendo a temperatura de entrada do gás na turbina relativamente elevada (entre 900°C e 13500°C) e a temperatura de saída entre 450°C e 6500°C. Tal temperatura é suficiente para a geração de vapor no segundo ciclo (ciclo Rankine), sendo a temperatura final do vapor entre 4200°C e 5800°C.

A eficiência de uma planta de ciclo combinado chega a atingir 58%. Uma medida sintética dessa eficiência é dada pelo *heat rate*, parâmetro expresso em BTU/kWh ou kcal/kWh, que indica a quantidade de energia térmica necessária para produzir uma unidade de energia elétrica.

### 1.3.15 Tecnologia utilizada

O carvão mineral, combustível tipicamente utilizado em centrais termelétricas com ciclo vapor, requer um tratamento caro e complexo e é caracterizado por emissões pesadas de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), CO<sub>2</sub> e particulados.

Com as crescentes pressões ambientalistas, diversas iniciativas têm sido empreendidas no sentido de reduzir as emissões de gases ou de mitigar seus efeitos.

A Comissão Européia criou, em 1998, a diretiva “Large Combustion Plants Directive” (LCPD), restringindo as emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e material particulado a partir de plantas de geração de eletricidade. Legislação similar foi criada em outros países desenvolvidos, o que motivou o aperfeiçoamento de tecnologias para mitigar a quantidade de emissões de poluentes de plantas a carvão, com apoio de várias agências governamentais. Mais recentemente, as atenções se voltaram para a melhoria da eficiência do uso do carvão com o objetivo de redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

O desenvolvimento de técnicas de sequestro de carbono permitirá a instalação de térmicas com emissões zero de CO<sub>2</sub> a longo prazo. Acredita-se que testes em plantas de escala comercial sejam possíveis até 2015. E até 2020, uma primeira planta em escala comercial deverá estar operando.

Assim, diversas tecnologias de redução de emissões e associadas aos sistemas de limpeza de gases estão sendo desenvolvidas e aplicadas em termelétricas. Isto, contudo, tem se traduzido em aumento de custos de investimentos.

Em resumo, as principais tecnologias usadas para geração de eletricidade e descritas nos itens a seguir, são (CARVALHO, 2005):

- Carvão Pulverizado (PF);
- Usinas Supercríticas e Ultra Supercríticas (Supercritical & Ultra supercritical Power Plant Technologies);
- Combustão em Leito Fluidizado, a Pressão Atmosférica (AFBC) e com Pressurização (PFBC);

- Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC).

Vale ressaltar que a escolha de uma tecnologia não se baseia apenas na eficiência, mas depende de muitos critérios específicos, associados ao tamanho da unidade, ao regime de operação e à legislação ambiental.

Adicionalmente, turbinas a gás somente podem ser operadas com combustíveis livres de cinzas. De modo que, para empregar o carvão como combustível em ciclo combinado, é exigida alguma combinação tecnológica. Dentre as possibilidades, destacam-se a unidade combinada ao processo de gaseificação e ao processo de combustão pulverizada pressurizada.

### **1.3.15.1 Carvão Pulverizado (PF)**

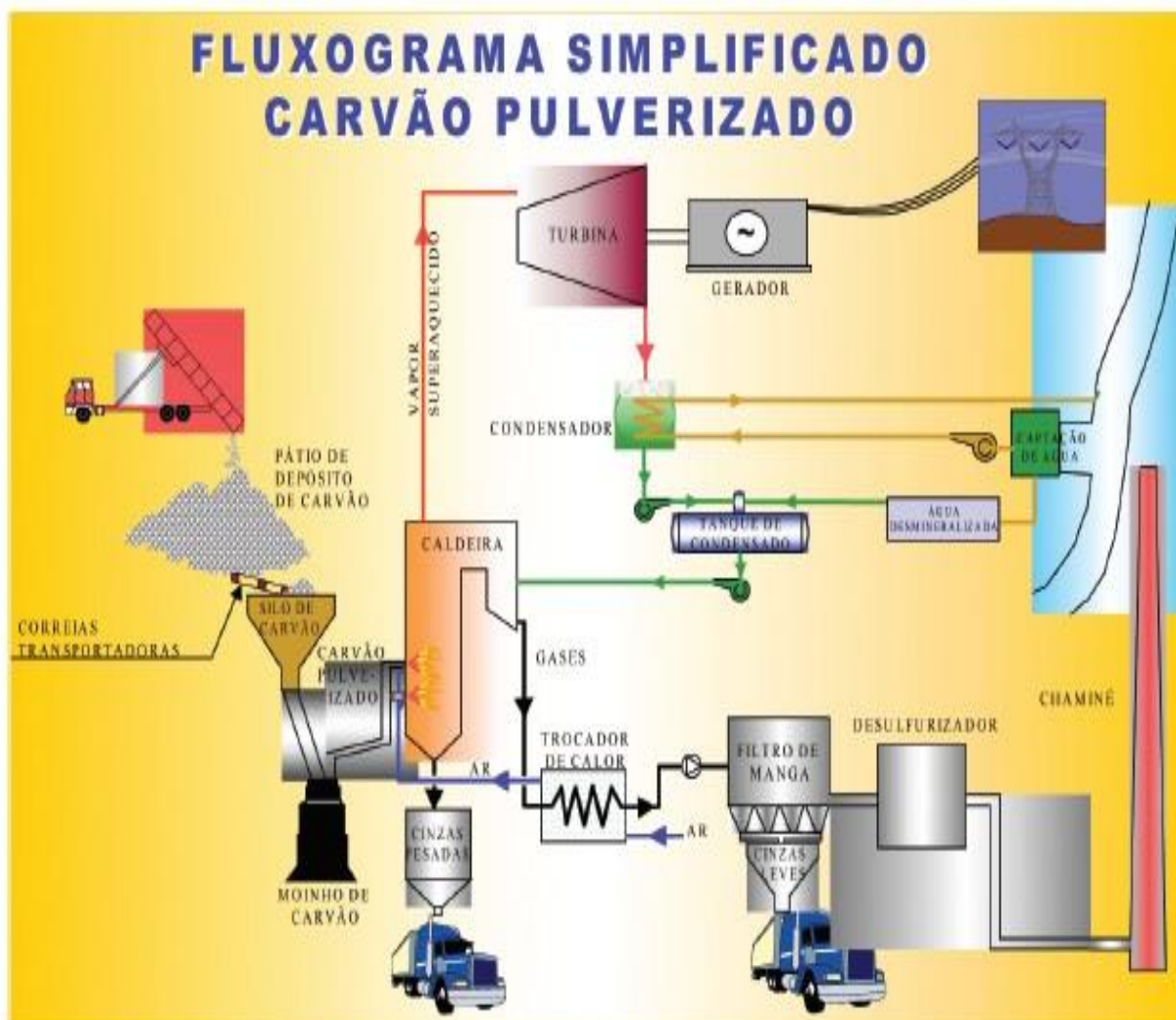
A tecnologia de carvão pulverizado, desenvolvida nos anos 20, é a mais difundida e utilizada nas usinas termelétricas em operação, permitindo a queima de carvões de baixa qualidade.

O carvão é moído em partículas finas (entre 75 e 300 microns) e injetado, juntamente com ar, numa câmara de combustão onde é queimado, alcançando-se temperaturas da ordem de 1.400°C (Figura 13). A eficiência desse processo de combustão é similar àquela alcançada na queima de óleo ou gás natural.

Essa tecnologia é utilizada nas usinas de ciclo simples, tanto nas de ciclo subcrítico quanto nas de ciclo supercrítico e ultra supercrítico. Todas as usinas brasileiras em operação e em construção usam essa tecnologia em ciclo subcrítico.

O carvão pulverizado é considerado uma tecnologia de queima limpa quando complementada por sistemas modernos de controle de NOx, de dessulfurização de gases (FGD) e de remoção de material particulado. Os sistemas de FGD podem ser projetados para utilizar calcário ou amônia como absorventes, possibilitando a remoção de até 96% do enxofre e de até 99,99% do material particulado.

Figura 13 – Esquema simplificado de usina a carvão pulverizado

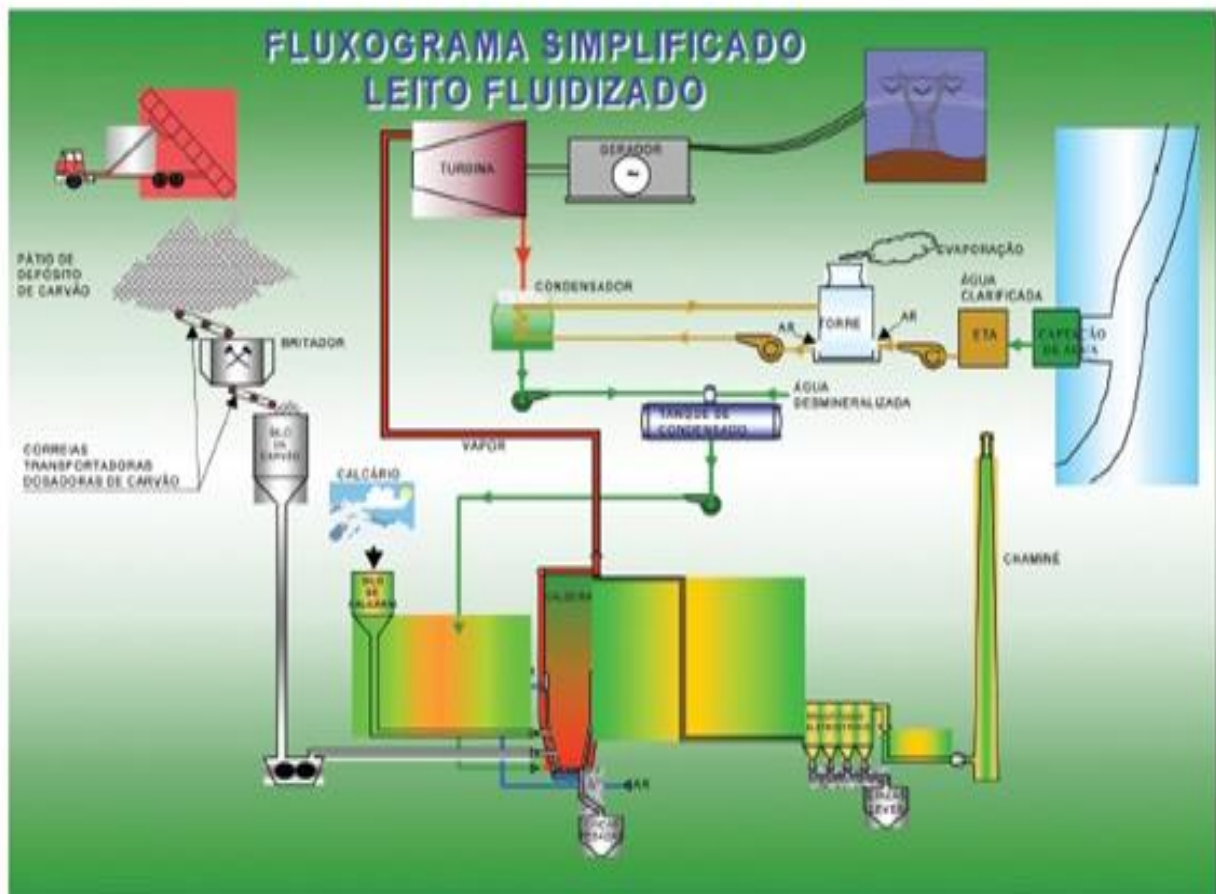


Fonte: CARVALHO (2005).

### 1.3.15.2 Combustão em Leito Fluidizado a pressão atmosférica (AFBC)

Conforme dito anteriormente, a combustão em leito fluidizado pode ser à pressão atmosférica (AFBC) ou com pressurização (PFBC). A AFBC é uma tecnologia comercial que pode ser utilizada com uma grande variedade de combustíveis, incluindo combustíveis sólidos de baixa qualidade (Figura 14).

Figura 14 – Esquema simplificado de usina a leito fluidizado a pressão atmosférica



Fonte: CARVALHO (2005).

Por meio de um fluxo contínuo de ar, cria-se turbulência numa mistura de material inerte e partículas de carvão (leito). A velocidade do fluxo assegura que as partículas permaneçam em suspensão e em movimento livre, se comportando como um fluido – em outras palavras, o leito se torna “fluidizado”.

Quando o combustível é adicionado ao leito fluidizado quente, a mistura constante promove a rápida transferência de calor e a combustão completa. O calor gerado é recuperado por meio de trocadores de calor e utilizado para gerar vapor tanto para a geração de energia elétrica quanto para o uso industrial.

A eficiência térmica obtida com a aplicação deste tipo de tecnologia é de 40%, podendo chegar a 44%.

A grande vantagem no emprego da AFBC é a redução na quantidade de emissões de poluentes, sem necessidade de sistemas de equipamentos de dessulfuração e de redução de emissões de NOx. O leito fluidizado permite a queima do combustível em temperaturas relativamente mais baixas, o que reduz a produção de NOx no gás de saída em torno de 90%.

As caldeiras AFCB se tornaram a escolha tecnológica para queima de combustíveis de baixa qualidade. Atualmente, a capacidade máxima de módulo unitário de caldeira CFB está limitada à faixa de 250 a 350 MW, sendo que o número de unidades acima de 250 MW é reduzido (CARVALHO, 2005). A primeira planta AFBC com maior capacidade (460 MW) operando em condições de vapor supercrítico tem o início de sua operação programado para 2006 na Polônia.

Já a combustão em leito fluidizado com pressurização (PFBC) é uma tecnologia que começou a ser comercializada recentemente, com base em uma configuração AFBC em ciclo combinado. É também capaz de queimar combustíveis de baixa qualidade.

O funcionamento do leito fluidizado é bastante semelhante ao da tecnologia AFBC.

O carvão é adicionado ao leito fluidizado, juntamente com o absorvente de enxofre, e queimado. O sistema opera com pressões de 12 a 16 bar e temperaturas de aproximadamente 12500°C. Nas aplicações com ciclo combinado, cerca de 80% da eletricidade é gerado num conjunto convencional de turbina a vapor-gerador. Os gases de exaustão que deixam o combustor sob pressão são filtrados e expandidos numa turbina a gás para a geração adicional de eletricidade. A elevada temperatura de combustão provoca a formação de cinzas que devem ser removidas do gás antes que este entre na turbina. Existe a necessidade de melhorias tecnológicas associadas ao aumento da pureza do gás.

A eficiência térmica do processo é de aproximadamente 44% e o impacto ambiental dessa tecnologia é considerado baixo.

#### Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado

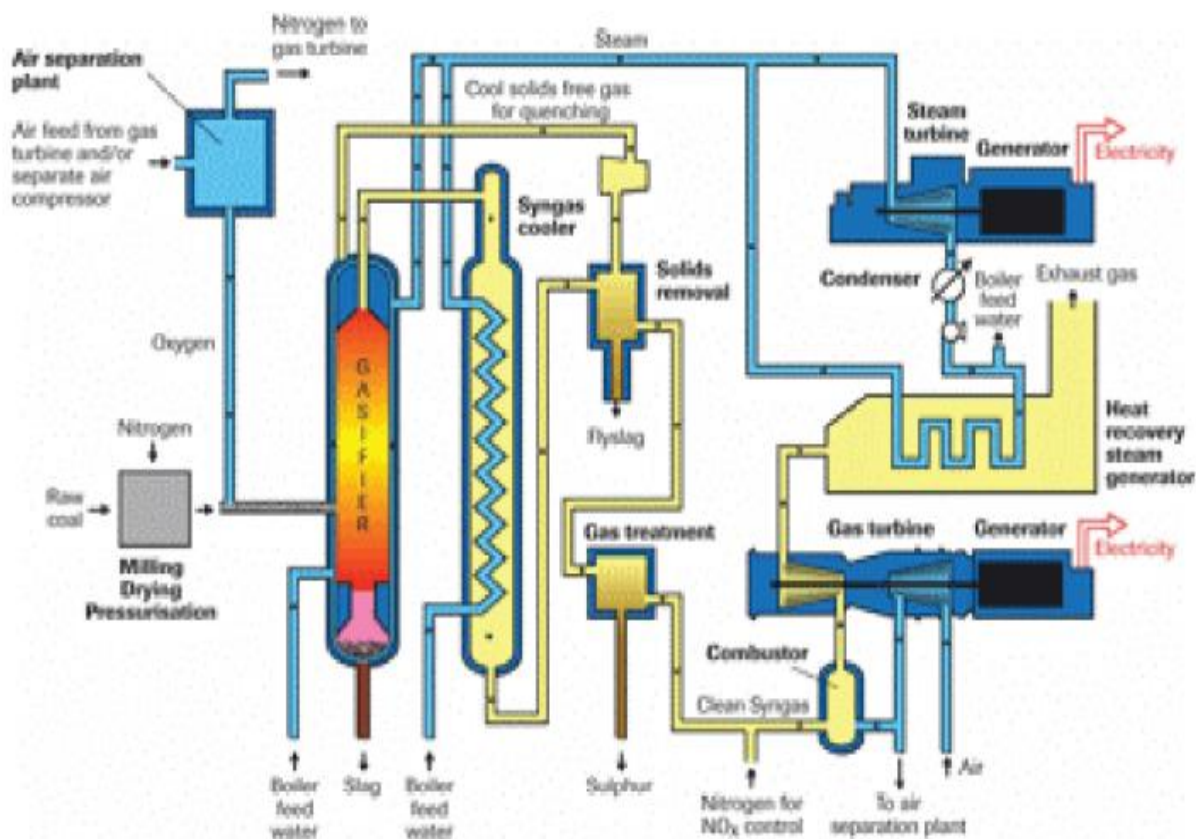
A gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC) é uma combinação de duas tecnologias já estabelecidas: a gaseificação do carvão, para a produção do combustível syngas (gás de síntese), e a tecnologia da turbina a gás em ciclo combinado (GTCC) para geração de eletricidade.

Nos sistemas IGCC, o carvão não é queimado diretamente, mas aquecido num vaso pressurizado (gaseificador) contendo quantidade controlada de oxigênio (ou ar) e vapor de água. O gás produzido é uma mistura de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, que é purificada e queimada



numa turbina a gás para gerar energia elétrica. O gás de combustão que sai da turbina, ainda em alta temperatura, é usado num gerador de vapor ligado a um turbogerador convencional. Esta tecnologia, assim como a PFBC, combina turbinas a gás e a vapor (ciclo combinado). O esquema dos sistemas IGCC é mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema do sistema de gaseificação integrada com ciclo combinado

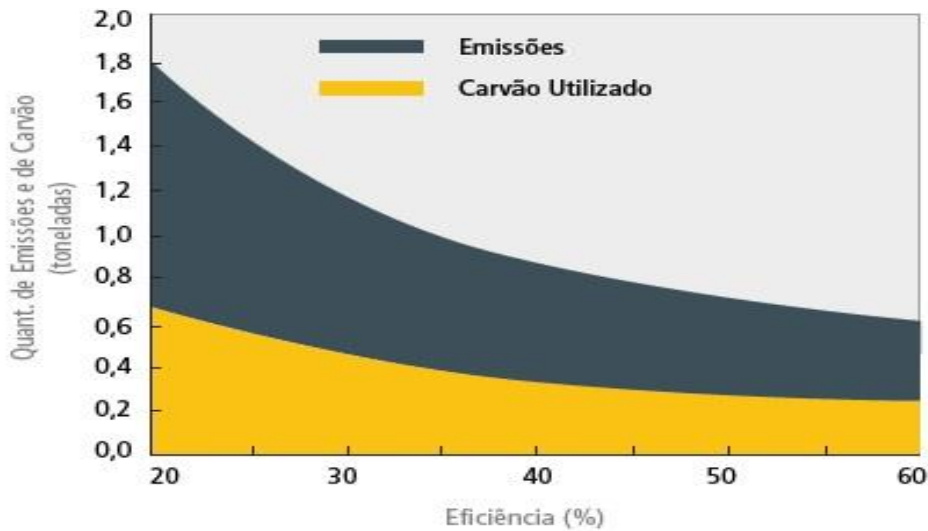


Dentre os gaseificadores atualmente em desenvolvimento, o tipo mais adequado para o carvão de alto teor de cinzas é o de leito fluidizado pressurizado sem formação de escória (non-slugging, pressurized fluidized bed). Esta tecnologia de gaseificação de segunda geração está em demonstração no âmbito do Programa Tecnologia do Carvão Limpo do Departamento de Energia dos Estados Unidos (Clean Coal Technology Program – US DOE).

Enquanto a eficiência de uma termelétrica convencional a carvão é de 34%, em uma planta IGCC é de 45%, podendo chegar a 52% nas plantas mais modernas. Além disso, as emissões de CO<sub>2</sub> são 35% menores que em plantas convencionais, e as de NO<sub>x</sub> se reduzem em cerca de 90%. O custo de investimento é de aproximadamente US\$ 1.500/kW, para uma

usina de 100 a 450 MW (CTA, 2006). Conforme se observa na Figura 16, o aumento de eficiência das plantas termelétricas significa redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Figura 16 – Relação entre eficiência de usinas térmicas e emissões de poluentes



Fonte: World Coal Institute, 2005.

### 1.3.16 Cinzas oriundas da combustão do carvão

O carvão é uma complexa e variada mistura heterogênea de componentes orgânicos e inorgânicos, fossilizados ao longo de milhões de anos. A matéria inorgânica do carvão é constituída basicamente de três grandes grupos: a) minerais amorfos ou cristalinos; b) elementos químicos ligados à parte orgânica do carvão e c) compostos inorgânicos dissolvidos em soluções nos poros do carvão (Ward, 2002).

Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos. Existem dois tipos básicos de carvão na natureza: vegetal e fóssil. O vegetal é obtido a partir da carbonização da lenha. O fóssil é formado pela decomposição da matéria orgânica (como restos de árvores e plantas) durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. É composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, associados a outros elementos rochosos (como arenito, silito, folhelhos e diamictitos) e minerais, como a pirita (FeS<sub>2</sub>) (Aneel, 2008).

O grau de diagênese e metamorfismo que o carvão foi submetido pelo soterramento e efeitos tectônicos determinam o grau de carbonificação (*rank*). Após soterramento, processos geoquímicos convertem turfa em linhito, e mais tarde a carvão e antracito. Os parâmetros principais para se medir o *rank* do carvão são: umidade, poder calorífico, matéria volátil,

carbono fixo total, teor de hidrogênio. Esses parâmetros são referidos como estágios de carbonificação, e indicam o nível do *rank* do carvão de cada região (Lunkes, 2010).

As maiores jazidas de carvão brasileiro situam-se nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. As menores jazidas, no Paraná e São Paulo. Do volume de reservas, o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional, sendo este caracterizado pelo *rank* como sub-betuminoso (Lunkes, 2010).

A combustão do carvão, geralmente para a produção de energia elétrica, se dá em altas temperaturas, entre 1200 e 1600°C, onde as cinzas leves e pesadas são geradas. Cinzas volantes são as cinzas de textura mais fina, arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e abatidas por precipitadores eletrostáticos (PE) ou filtros de mangas. Cinzas pesadas são as cinzas de textura mais grosseira que caem no fundo da fornalha em tanques de resfriamento e removidas mecanicamente ou hidraulicamente, por fluxos de água (Silva et al. 1999)

Aproximadamente 3,0 x 10<sup>6</sup> toneladas de cinzas são geradas a cada ano no país no processo de geração de eletricidade, somente nas sete termelétricas dos estados do sul do Brasil, as quais são compostas de 65 a 85% de cinza leve e 15 a 35% de cinza pesada (Kalkreuth e Levandowski, 2009). Deste total se sabe que apenas uma pequena parcela de cinzas é aproveitada, para a fabricação de cimento Portland (indústria da construção civil), e o restante é disposto em bacias de cinzas, aterros ou utilizado para tapar poços de minas esgotados (Kalkreuth, 2006).

Devido à disposição inadequada das cinzas em aterros, e à inevitável exposição prolongada ao intemperismo, pode ocorrer à lixiviação das substâncias tóxicas presentes nas partículas das cinzas contaminando as águas superficiais, as águas subterrâneas e o solo, oferecendo assim um grande perigo aos recursos hídricos (Fungaro e Bruno, 2009).

As cinzas remanescentes da combustão do carvão consistem de uma mistura complexa de fases cristalinas e amorfas. A parcela inorgânica do carvão se caracteriza por agregar em sua composição uma grande diversidade de óxidos: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, TiO<sub>2</sub>, entre outros. Cabe salientar que estes elementos serão em sua grande maioria constituintes das cinzas (Bagatini et al. 2007). As principais fases minerais encontradas nas cinzas de carvão são: quartzo (SiO<sub>2</sub>), mullita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), entre outras. Em adição a estes minerais, podem ainda conter gesso (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>) (Umanã, 2002).

Devido a sua composição química e mineralógica, descrita anteriormente, pode-se citar algumas aplicações para que este resíduo possa ser utilizado, tais como: compostos cerâmicos

(tijolos e blocos) para aproveitamento na construção civil (Silva et al., 1999), pavimentação e preenchimento de cava de minas de carvão (Vassilev et al., 2001; Hall e Livingston, 2002), condicionamento de solos (Martins, 2001) e síntese de zeólitas com alta capacidade de troca catiônica (Umanã, 2002; Ryu et al., 2006; Wang et al., 2003; Paprocki, 2009), entre outras.

### **1.3.17 Teoria da localização**

A Localização Industrial é o local onde uma empresa deve instalar suas atividades industriais. A escolha onde alocar a indústria é de suma importância, pois dependendo de sua localização poderá acarretar uma série de transtornos e prejuízos ou melhorar seu posicionamento em relação aos seus rivais.

As indústrias atualmente possuem um grande desafio ao escolher um sítio para alocar suas unidades produtoras, de bem de consumo duráveis e não-duráveis, uma vez que uma série de variáveis são importantes para avaliar o local mais adequado. Para Buarque (2004), esta escolha deverá incorrer em um aumento de produção acompanhada de redução dos custos operacionais, no entanto, este problema não possui uma solução simples ou um modelo matemático único e imutável, o que acaba por inspirar a elaboração de modelos que propõem teorias para explicar o porquê de alguns pontos do globo possuírem uma atividade industrial mais desenvolvida e outros menos desenvolvidas.

Segundo Montgomery & Porter (1998), as indústrias vêm concentrando-se em localidades que apresentam vantagens competitivas por (terem) como característica a qualidade do ambiente para execução de elevados níveis de produtividade para uma área específica de atuação. É ainda notória a importância da proximidade geográfica entre clientes, fornecedores e rivais por promover a especialização da atividade e conseqüentemente a eficiência.

Pode-se notar que atualmente a concorrência imposta pelo acirrado cenário mundial faz com que as empresas busquem incessantemente a liderança do mercado através do pioneirismo do lançamento de produtos e serviços. Para que as indústrias cheguem ao topo da competitividade, as empresas devem investir altos valores em Pesquisa & Desenvolvimento, impulsionar a contratação de mão de obra qualificada, e desenvolver uma estratégia eficaz e condizente com a realidade (CASTELLS, 1999).

Atualmente, o estudo da Localização Industrial incorpora vantagens tanto para as empresas, por buscarem maiores competitividade em relação a custo e receita, quanto para os Estados, que buscam melhores condições e desenvolvimento para as regiões e menores desequilíbrios regionais (CLEMENTE & COSENZA, 2002).

As Teorias da Localização Industrial estão agrupadas em duas vertentes, uma clássica e outra contemporânea. A Teoria Clássica procura explicar as atividades sociais, econômicas e suas localizações em pontos discretos do espaço geográfico, destacando os fatores de repulsão e atração das atividades. A Teoria Contemporânea agrega, além dos elementos citados pela Teoria Clássica, os elementos de tempo e espaço e admitem imperfeição na concorrência. Esta nova visão contribui para explicar, por exemplo, o impacto das inovações tecnológicas, dos elementos de gestão empresarial, dos gastos e dos níveis de renda sobre o padrão locacional da produção (BARQUETE, 2002).

A Teoria da Localização busca propor a escolha racional de um local ótimo para se alocar uma unidade produtiva. Este problema levou vários teóricos a discorrer sobre suas formas de responder a este questionamento como, por exemplo, Alfred WWeber, Von Thunen, Launhardt, Harold Hotelling e Losch, cujas teorias formam uma vertente denominada como “Teoria Clássica da Localização”. Outro grupo de teóricos, como Castelles, Aydalot, Keeble, Perrin e Porter, constitui os chamados teóricos contemporâneos da localização industrial.

A escolha por um local ótimo para este tipo de unidade produtiva está atrelada a um processo de decisão, marcado por restrições relacionadas à demanda reprimida do produto e ao excesso de oferta de matéria prima, além de restrições associadas ao custo operacional.

Separada em duas fases distintas a “Teoria Clássica da Localização” que apresenta como principal característica a busca pela minimização dos custos e maximização das receitas e a “Teoria Contemporânea da Localização” que valoriza as inovações, a flexibilidade, a competitividade do setor, o investimento em Pesquisa & Desenvolvimento e a busca pela mão de obra qualificada.

A “Teoria Clássica da Localização” possui como principais precursores Alfred Weber, Von Thünen, Launhardt, Harold Hotelling e Losch e na “Teoria Contemporânea da Localização” destacam-se para Castelles, Aydalot, Keeble e Perrin.

### **1.3.17.1 Teoria Clássica da Localização**

Segundo Clemente & Higachi (2000), o modelo de localização de Alfred Weber foi o mais representativo dentre outros autores que propõem a minimização dos custos. Weber, ao explicar sua teoria, começa a estabelecer parâmetros de economia de custo para determinar a escolha de um local.

Alfred Weber assume que as diferenças dos custos associados às diversas regiões influenciam na escolha do local, sendo explicado pela ponderação de três fatores básicos: custo de transporte, custo de mão de obra e a força de aglomeração e desaglomeração (WEBER, 1909 apud CAVALCANTE, 2008).

Ainda segundo Cavalcante (2008), o modelo clássico de Johann Heinrich Von Thünen tem por objetivo encontrar um local de maximização da renda da terra, levando em consideração o custo de transporte. O autor propôs que o entorno da cidade onde estiver concentrado o mercado, a terra seria utilizada para o plantio onde o custo do deslocamento deste produto fosse o mais alto. Para isso, seria levado em conta o congelamento da produtividade, ou seja, a produtividade e os demais fatores seriam fixos.

Para Johann Heinrich (1820 apud CLEMENTE, 2000), os agricultores que ocuparem os anéis mais próximos dos mercados obterão um lucro bruto por unidade vendida mais elevada. Nas culturas que se localizam mais afastadas dos centros consumidores, o lucro bruto por unidade de terra é menor, porém o custo do transporte é inferior, possibilitando assim atingirem o mercado.

Segundo Pinto (1977), a contribuição de Launhardt cita em seu modelo que um sistema de transporte desenvolvido traz vantagens para um determinado local através de uma maior acessibilidade, segurança e rapidez na viagem.

Através de seus estudos, Launhardt (1882 apud PINTO, 1977) desenvolveu a teoria de áreas de mercado. Para o autor, a simples troca de mercadoria entre a cidade e o país forma o tráfego local ou de mercado, ao contrário do que acontece na venda por atacado entre as cidades. No interior de cada cidade, se desenvolveu o centro-mercado ou centro de venda e, ao redor, é a área de mercado ou de venda.

Harold Hotelling (1929 apud ALBERT; VIEIRA; BAGOLIN, 2007) baseou sua teoria locacional considerando a localização das empresas em concorrência. Para as firmas definirem sua localização ótima, as indústrias deveriam levar em consideração o local em que seus concorrentes estão localizados, melhorando as vantagens competitivas. Para que as empresas em concorrência alavancassem um posicionamento mais confortável, o mercado deveria ser estratificado.

Uma aglomeração de indústrias que produzem produtos concorrentes tem como característica principal a competição, caso esta ocorra não-preço, isto é, quando a competição for para adquirir uma maior fatia de mercado e os preços usados para indicar qualidade do produto (MCCANN, 2002 apud ALBERT; VIEIRA; BAGOLIN, 2007).

August Losch (1939 apud BREITBACH, 1992) criou um modelo de equilíbrio geral, de modo que todas as áreas de possível localização de um sistema industrial possam se relacionar. A teoria parte do pressuposto do problema individual de localização, tanto do produtor como do consumidor, assumindo uma superfície homogênea, na qual as condições de transporte, custo de produção, distribuição populacional, matéria prima são similares e deve ser ocupada na totalidade em qualquer ponto.

O ponto geográfico descrito pelo modelo de Losch se constituiu numa área de mercado, na qual os consumidores possuíam gastos e preferências idênticas, porém os que se instalaram nas zonas limítrofes serão considerados indiferentes em relação aos vizinhos produtores na questão de aquisição de bens de consumo (BREITBACH, 1992).

August Losch demonstrou, também, em seus estudos que as áreas produtoras devem assumir formas geométricas hexagonais, permitindo o melhor acesso dos consumidores e satisfazendo com menor distância. De forma tal que a localização possa maximizar os lucros dos produtores e permitir aos consumidores obter seus produtos ao menor preço (BREITBACH, 1992).

Segundo Richardson (1975), uma teoria para ser considerada inteiramente válida deveria apresentar um modelo padrão que explique a localização da produção, a interdependência entre os insumos e os produtores, e os padrões de comércio resultantes. Para o autor “mesmo que admitisse a existência de um certo tipo de equilíbrio, seria difícil prever as consequências da perturbação desse equilíbrio” (RICHARDSON, 1975, p.110).

Segundo Buarque (2004), a melhor localização para uma indústria seria aquela que proporcionaria um aumento de produtividade e reduziria os custos envolvidos nesta produção.

Ainda segundo o mesmo autor, uma linha produtiva ao se localizar em um ponto geográfico qualquer se nota que as quantidades de insumos se direcionam para ela, onde serão processados e encaminhados para os centros consumidores.

### **1.3.17.2 Teoria contemporânea da localização**

No final dos anos 60, surgiu a chamada Teoria Contemporânea da Localização Industrial, tendo como defensor, que mais se destacava, Manuel Castells.

Segundo Castells (1999), a facilidade de comunicação entre as empresas de todo o globo vem proporcionando um modelo de localização cuja característica concentra-se na divisão espacial internacional do trabalho.

Para entender um pouco sobre a visão de Manuel Castells em relação à localização das indústrias, segundo Castells (1983, p.31 apud TOLEDO; GUIMARÃES, 2008, p.194)

Na década de 80, Philippe Aydalot começou a despertar interesse nos grupos europeus com suas idéias inovadoras, foi através delas que eles passaram a desenvolver seus estudos teóricos e empíricos sob o desenvolvimento da escolha certa da localidade associada à criação de novas tecnologias e da construção de novos territórios. A teoria é de que haja algo localizado em nível regional, o qual permite que a região em questão se sobressaia sobre as outras, sendo mais dinâmica (ANDRADE, 2007).

Segundo Aydalot (1984 apud BREITBACH, 1992, p. 695), chama-se de foot-losse as atividades industriais inovadoras, porque além do custo de transporte ser menor, se trata de empresas multinacionais que não têm vínculo com nenhum território específico, embora isso não queira dizer que ela possa ser instalada em qualquer lugar, e sim, que os fatores abordados na tomada de decisão de sua localidade devem ser diferentes.

A partir do momento que novos "savoir-faire" (paradigma tecnológico) são ajudados ou contribuídos pela cooperação (paradigma organizacional) por intermédio dos agentes localizados na mesma região (paradigma territorial), se potencializa o processo de inovação (ANDRADE, 2007).

Keeble (1981 apud MATOS, 2000) usou como medida de centralidade os modelos gravitacionais e diz que quanto mais próxima dos grandes centros de produção a região estiver, mais central ela será. O modelo em questão permite calcular a influência de uma região sobre outra, e através desse cálculo, avaliar a influência dessas regiões em escalas para um melhor efeito comparativo. A conclusão a que se chegou é de que sempre que uma empresa tiver um rendimento superior exercerá uma influência maior sobre as outras com baixo rendimento.

Segundo Montgomery & Porter (1998), as indústrias vêm concentrando-se em localidades que apresentam vantagens competitivas por possuírem como característica a qualidade do ambiente para execução de elevados níveis de produtividade para uma área específica de atuação.

De acordo com Perrin (1986 apud AMARAL FILHO, 2001), hoje em dia, do ponto de vista estratégico, a competitividade é muito importante para a sustentabilidade do desenvolvimento endógeno. A realidade atual mudou, e a competitividade que antes pertencia somente ao mundo das empresas, passa agora a pertencer ao mundo das regiões também.

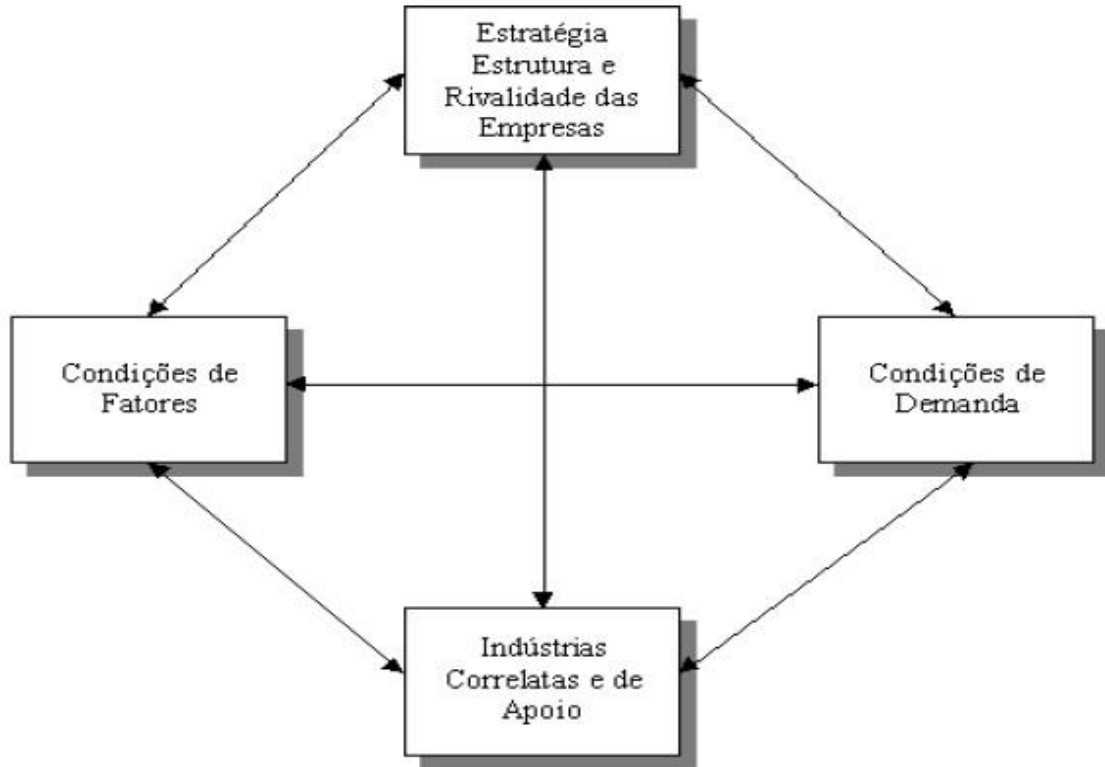
Ao demonstrar que o fator polarizante não é o tipo de atividade industrial, e sim a sua capacidade de evoluir, a sua complexidade e a natureza das tecnologias que incorpora, Perrin (1983 apud MATOS, 2000) acabou contribuindo para a teoria da polarização, afirmando que as atividades quaternárias (serviços especializados, investigação, gestão de empresas) podem gerar polarizações duráveis, enquanto as atividades de fabricação são o oposto das de transformação (indústria do aço) capazes de criar uma polarização real.

Existem quatro aspectos que em conjunto definem o crescimento, inovação e produtividade de uma determinada localidade: i) condições de fatores (insumo); ii) contexto para estratégia e rivalidade; iii) as condições de demanda; e iv) os setores correlativos e de apoio. Esses fatores, que no conjunto, Montgomery & Porter (1998) denominam de diamante,



buscam explicar porque as empresas situadas em um local são capazes de inovar e aprimorar de forma constante suas estratégias competitivas.

Figura 17 – Determinantes da vantagem nacional



Fonte: Extraído de Montgomery & Porter (1998, p. 88)

A Teoria Contemporânea agrega, além dos elementos citados pela Teoria Clássica, os elementos de tempo e espaço e admitem imperfeição na concorrência. Esta nova visão contribui para explicar, por exemplo, o impacto das inovações tecnológicas, dos elementos de gestão empresarial, dos gastos e dos níveis de renda sobre o padrão locacional da produção (BARQUETE 2002).

Os principais fatores de localização industrial que compõem a Teoria Clássica podem ser resumidos em custo de transporte de matéria prima e produtos acabados, custo de mão de obra e fatores aglomerativos e desaglomerativos, além desses, outros fatores são apresentados no Tabela 08.

Tabela 08 - Fatores Locacionais Tradicionais

Disponibilidade e custo dos transportes	Proximidade e dimensão dos mercados consumidores
Disponibilidade e custo da mão-de-obra	Clima da região e qualidade de vida
Disponibilidade e custo de água e energia	Disponibilidade e custo de terrenos
Proximidade e suprimento de insumos materiais	Topografia
Remoção de esgotos ou resíduos	Custo de construção, montagem e manutenção

Fonte: Extraído de Barbieri (1995 apud BARQUETTE, 2002, p. 104)

Apesar de a teoria Clássica ser amplamente utilizada, há restrições no uso de sua abordagem.

As análises dos autores contemporâneos procuram entender como algumas regiões têm a capacidade maior de inovar ou os motivos de algumas tecnologias implantarem e desenvolverem em determinados locais.

A Teoria Contemporânea ao descrever o comportamento locacional das indústrias busca atender ao novo modelo de mercado. Dentre estes atributos estão: incentivos fiscais governamentais, mercados globais, criação de distritos indústrias, proximidade de centros de ensino e pesquisa, disponibilidade de capital, cultura empreendedora, entre outros, conforme mostra o Tabela 09.

Tabela 09 - Fatores Locacionais Contemporâneos

Força de trabalho (aspectos qualitativos)	Qualidade de vida
Capital	Possibilidade de integração vertical
Base científica local	Condições de acesso à informação
Vizinhança a metrópoles e universidades orientadas para pesquisa (conexão ciência-indústria)	Perfil empresarial da comunidade local
Telecomunicações e transportes	Atuação de parceiros como setor público,
	associações de classe, instituições ou pessoas etc.

Fonte: Extraído de Baquete (2000 apud BARQUETTE, 2002, p. 105)

## 1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). “Atlas da Energia Elétrica do Brasil”. 2ª Ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ALVES, Carlos Eduardo T., QUELHAS, Osvaldo L.G., **A ecoeficiência e o ecodesign na indústria da construção civil. Uma abordagem a prática do desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos com uma visão de negócios.** Latec/UFF, 2004.

ANDRADE, Letícia Braga. O programa redes de cooperação como modelo para o desenvolvimento regional: da teoria à prática no Rio Grande do Sul. 2007. 111p. Monografia (Pós-graduação) – Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

ANGELERI, F. B.; CARDOSO, S. R. F.; SANTOS, P. S. As gipsitas brasileiras e sua aplicação como gesso na indústria cerâmica. Descrição dos métodos utilizados para seu estudo e caracterização. Parte I: Ensaio químicos. **Cerâmica**, São Paulo, v. 28, n. 156, p.471-479, dez. 1982.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL – Carvão Mineral – ANEEL. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20/04/2016

BAGATINI et all. Estudo da fusibilidade das cinzas de carvões em função da composição química e mineralógica. **Tecnologia em Metalúrgica e Materiais**. v. 3, n. 4, p. 52-58. 2007.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Gipsita**. CT2005-122-00. Rio de Janeiro: CETEM-Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008. 23 p. Comunicação Técnica.

BALTAR, C. A. M; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. **Variedades Mineralógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso**. In.: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Anais: Florianópolis, 2004,329 p.

BARQUETTE, Stael. Fatores de Localização de Incubadoras e Empreendimentos de Alta Tecnologia. *Ciência e Tecnologia*, v. 42, n. 3, p. 101-113, set. 2002.

BORBA, R. F. “Balanço Mineral Brasileiro”. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, 2001.

BORGES, Ítalo Lopes. “Processo de Adequação Ambiental na Indústria Carbonífera: Estudo de Caso sobre a Implantação de um Sistema de Gestão Ambiental”. Tese de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ, 2004.

BP, BP Statistical Review. Disponível em <http://www.bp.com>. Acesso 05/12/2016 as 20:03h Brasil. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . \_ Brasília : MME : EPE, 2015 12 v. : il.

BREITBACH, A. C. M.. Novas tecnologias e organização do espaço: Considerações preliminares. Os efeitos das novas tecnologias sobre o território. Porto Alegre, v. 13, n. 2, p.693-698, 1992

CAMPBELL, Steve **Lead by Example** Walls and Cieling. [www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features\\_BNP\\_featuresItem/03299,93761,00.html](http://www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features_BNP_featuresItem/03299,93761,00.html). Acessado em 14/03/2016.

CARVALHO, C.H.B. "Oportunidades de Negócios no Setor Elétrico com Uso do Carvão Mineral Nacional". Apresentação EPE, 2005.

CARVALHO, C.H.B., Oportunidades de negócios no setor elétrico com o uso do carvão mineral nacional. Apresentação. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2005.

CARVALHO, Michele T. M., TUBINO Rejane M., **Estudo do reaproveitamento dos resíduos do gesso na confecção de tijolos e suas aplicações na construção civil do Estado de Goiás**, IBRACON, São Paulo, 2003.

CASTELLS, Manuel. A sociedade em rede. 10ª edição. São Paulo: Paz e Terra, 1999.

CASTRO, N.J., Visão 2030: Cenários, tendências e novos paradigmas do setor elétrico, Rio de Janeiro: Babilônia Cultura Editorial, 2015. 440 p.

CAVALCANTE, Luiz Ricardo Mattos Teixeira. Produção teórica em economia regional: Uma proposta de sistematização. Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos, Vol. 2, No 1, p. 14-15, 2008.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção: composição química. In: EDIFICAÇÕES IPT. **Tecnologia de edificações**. São Paulo: EDIFICAÇÕES IPT, 1988. p. 53-56.

CIWMB (California Integrated Waste Management Board) **Drywall Recycling**. <http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/factsheets/Drywall.htm#Economics> – Acessado em: 21/02/2016.

CLEMENTE, A., COSENZA, C. A. N. Análise de Localizações de Projetos. In: Projetos Empresarial e Públicos. São Paulo: Editora Atlas S. A., 2002.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS - CPRM, Pesquisa de carvão no Brasil, 1972.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). "Excursão Virtual Pela Serra do Rio do Rastro". Superintendência Regional de Porto Alegre, 2002.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução 307, 5 de Julho de 2002 Diretrizes, critérios e procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil**.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução 431, 24 de maio de 2011. **Altera o art. 3o da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso, de Resíduo tipo C para Resíduo tipo B**. Maio, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). Oportunidades de eficiência energética para a indústria. Relatório setorial: **CAL E GESSO**. Brasília, 2010. 42p. Disponível em: <<http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/FF8080812C8533A0012C988992E84D6B/relatorio%2024%20%20Sumario%20%20Vis%C3%A3o%20institucional.pdf>>. Acesso em: 03/05/2016.

DALIGAND, D, Le plâtre et ses techniques de production, Ciments, Bétons, Plâtres , Chaux, 2 (753), p.83-88,1985.

Departamento Nacional de produção mineral - dnpm, Informativo anual da indústria carbonífera, 2000.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Anuário Mineral de 2005. Brasília, 2005. EIA/DOE."Internatinal Energy Outlook". Energy Information Administration – Department of Enegy, 2005.

FOLLNER, S. et al., **The Settings Behavior of Beta- and Alpha-CaSO<sub>4</sub> x 0,5 H<sub>2</sub>O as Function of Crystal Structure and Morphology**. Cryst. Res. Technol, Vol. 37, Nº 10, 10075-1087, 2002.

FUNGARO, D. A.; Bruno, M. Remoção de azul de metileno de solução aquosa usando zeólitas sintetizadas com amostras de cinza de carvão diferentes. **Química Nova**, v. 32, n. 4, p. 955-959, 2009.

GOURDIN, W. H.; KINGERY, W. D. The beginnings of pyrotechnology: neolithic and egyptian lime plaster. **Journal of Field Archaeology**, Boston, v. 2, n. 1, p.133-150, 1975. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/529624>>. Acesso em: 19/05/2016.

GRIFFIN COAL <<http://www.griffincoal.com.au/processing.html>>, <http://www.griffincoal.com.au/mining.html> Acesso em 10/12/2016 as 21:00h

HALL, M.; Livingston, W. R. Fly ash quality, past, present and future, and effect of ash on the development of novel products. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 77, p. 234-239, 2002.

HENRIQUES JR. M. F.; **Potencial de financiamento de eficiência energética: nos setores de cerâmica e gesso no nordeste**. Instituto Nacional de Tecnologia – INT / MCTI, 2013.

IEA. "Coal Information". International Energy Agency, 2005

JOHN, V. M. J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: USP, Escola Politécnica, 2000. 102p

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 727-760.

KALKREUTH, W.; Holtz, M.; Kern, M.; Machado, G.; Mexias, A.; Silva, M. B.; Willett, J.; Finkelman, R.; Burger, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota coal fields, Rio Grande do Sul, Brasil. **International Journal of Coal Geology**, v. 68, p. 79-119, 2006.

KALKREUTH, W; Levandowski, J. Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paraná, Brazil. **International Journal of Coal Geology** v. 77, p. 269-281, 2009.

LORA, E.E.S, DO NASCIMENTO, M.A.R., Geração Termelétrica –Planejamento, Projeto, Operação. Volumes 1 e 2. Editora Interciência. 2004.

LUNKES, M. K. **O carvão das camadas superiores e inferiores da jazida de candiota – RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica.** Porto Alegre. 2010. 81p. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso – Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.

MACIEIRA, R.P.; AVELAR, T. DE C.; NASCIMENTO, A.E.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V.A., Analysis of Recyclable Beta Hemihydrate. **International Review of Chemical Engineering**, Vol. 4, N. 4, pp. 399-404, July, 2012. ISSN 2035-1775.

MARTINS, J. L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura.** Porto Alegre. 2001. 98p. Tese (Doutorado em Engenharia – Área de concentração: Metalurgia Extrativa). PPGEM/UFRGS, Brasil

MARVIN, Emma. **Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in State of Vermont.** Vermont Agency of Natural Resources. 2000.

MME/EPE, Balanço Energético Nacional - BEN 2005 - Ano base 2004. Brasília, 2005.  
MME/EPE, Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015. Disponível em <http://www.epe.gov.br>. Acesso em 10/12/2016 as 21:20h

MONTGOMERY, Cynthia; PORTER, Michael E (Org.). **ESTRATÉGIA: A BUSCA DA VANTAGEM COMPETITIVA.** 11. ed. Rio De Janeiro: Elsevier, 1998.

MUNHOZ, F.C., RENOFIO, A. **Uso da gipsita na construção civil e adequação para a P+L.** XXVII encontro nacional de engenharia de produção, ENEGEP. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006

PAPROCKI, A. **Síntese de Zeólitas a partir de cinzas de carvão visando sua utilização na descontaminação de drenagem ácida de mina.** Porto Alegre. 2009. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Física e Química, PUCRS, Brasil.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O gesso – produção e utilização na construção civil.** Recife: Bagaço, 2001. 94 p.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O gesso – produção e utilização na construção civil.** Recife: Sebrae, 2008. 120 p.

PINTO, James V. Launhardt and Location Theory: Rediscovery of a neglected book. *Journal of Regional Science*, Vol. 17, No 1, p. 19-22, 1977.

PINTO, T.P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

RICHARDSON, H. W. *Economia Regional- Teoria da Localização, Estrutura Urbana e Crescimento Regional.* Zahar Editores, Rio de Janeiro, p.27-118, 1975

SANTOS, V. A., Análise cinética da reação de desidratação térmica da gipsita na obtenção do gesso beta. **Tese de Doutorado**. Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos e Informática. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: 1996. 170 p.

SILVA, N. I. W; Calarge, L. M; Chies, F; Mallmann, J. E; Zwonok, O. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, v. 45, n. 296, São Paulo, 1999.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A.C.; AGOPYAN, V. **Perdas de materiais nos canteiros de obras. A queda do mito**. *Qualidade na Construção*, SindusCon/SP, ano II, nº 13, p.10-15, 1998.

UMAÑA, J. C. **Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termeléctricas de carbon**. Barcelona. 2002. 254 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universid UPC, Espanha.

VASSILEV, S. V. et al. Multicomponent utilization of fly ash: dream or reality. In: **International Ash Utilization Symposium**. Proceeding of International Ash Utilization Symposium, p. 216-234, 2001.

WANG, Y.; Guo, Y.; Yang, Z.; Cai, H; Querol, X. Synthesis of zeolites using fly ash and their application in removing heavy metals from waters. **Science in China**, v. 46, p. 967-976, 2003.

WARD, C. R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams. *Int. J. Coal Geol*, v. 50, p. 135-168, 2002.

Word Coal Institute (WCI). Clean Coal-Building a future through technology. Website:www.wci-coal.com. Publicação disponível on-line desde 2005.

WORLD COAL <http://www.worldcoal.org> Acesso em 10/12/2017 as 21:05h

# **CAPÍTULO II**

**ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA  
POWDER TECHNOLOGY**

**ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF PRE-MOLDED PLASTER  
PRODUCTION AND COAL ASHES USED IN THERMELECTRIC  
PLANTS**



## **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO E CINZAS DO CARVÃO UTILIZADO EM USINA TERMELÉTRICA**

Nunes, D. C<sup>1</sup>; Santos, V. A<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n, 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife Pernambuco, Brasil

<sup>2</sup> Profº Drº na Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n, 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife Pernambuco, Brasil

### **Resumo**

Foi elaborado e aplicado um modelo simplificado de localização para, com base em analogia com a distribuição de contribuições de partículas em um centro de massa, identificar o local de instalação de uma empresa produtora de pré-moldados de gesso e cinzas de carvão mineral. O modelo levou em consideração apenas parâmetros de custos e as distâncias entre as localidades onde se encontram os fornecedores de matérias-primas. Experimentos indicaram um teor ponderal ideal de cinzas da ordem de 15 %. O aproveitamento de resíduos de cinzas de carvão mineral dá um caráter ambientalmente amigável ao presente trabalho. Apesar da seleção do local ser influenciada por tais fatores qualitativos, um estudo baseado em métodos quantitativos, tais como custos e distância, pode dar uma direção mais assertiva e útil para que diminua a probabilidade de erros.

**Palavras-chave:** Modelo de localização; Centro de massa; Cinzas de carvão mineral; Logística; Análise econômica; Tempo de pega.

## 1. Introdução

A localização de uma empresa é de grande importância, em termos estratégicos, tanto que o sucesso ou o fracasso de um empreendimento privado, ou público, depende diretamente deste item (Klose and Drexler, 2003). Dessa forma, deve-se levar em conta o posicionamento de seus mercados, de seus fornecedores, disponibilidade de infraestrutura e vários outros fatores que podem afetar sua produtividade.

De acordo com a *Environmental Protection Agency - EPA* (2013), a utilização de cinzas de carvão encapsuladas traz diversos benefícios ambientais e econômicos como na aplicação de gesso, concreto, telhado e tijolos, onde as cinzas de carvão são transformadas em produtos. Benefícios ambientais desse tipo de uso incluem redução de gases do efeito estufa, conservação de energia e redução da necessidade de extrair matéria-prima. Não há registros de problemas para a saúde humana ou para o meio ambiente com o uso de cinzas encapsuladas. Uma das mais reconhecidas aplicações das cinzas de carvão é o uso das cinzas leves substituindo cimento Portland na fabricação de concreto. A utilização das cinzas de carvão aumenta a durabilidade do concreto e diminuem a geração de gases de efeito estufa. Para cada tonelada de cinzas leves que substituem cimento Portland, aproximadamente uma tonelada de emissões de gases de efeito estufa são evitadas.

Os percentuais de consumo per capita anual de gesso na Europa (75 kg/habitante), nos Estados Unidos (103 kg/habitante) e no Brasil (13 kg/habitante), aliados às diferentes quantidades de produtos derivados do gesso nesses locais, 450 e 14, respectivamente, são parâmetros através dos quais se pode afirmar que existe uma necessidade premente de desenvolvimentos científico e tecnológico na área gessífera brasileira (MACIEIRA et al., 2012). Dessa forma, a incorporação de cinzas ao gesso para produção de materiais e pré-moldados especiais apresenta-se como estratégia que poderá levar à soluções técnicas e ambientais adequadas para os setores de gesso e de produção termelétrica via carvão mineral.

## 2. Material e Método

### 2.1 Modelo simplificado de localização

Sob o ponto de vista de um planejamento logístico a localização de uma empresa é o parâmetro mais importante, pois formata todo o sistema logístico. Uma localização correta pode gerar significativas melhorias na produtividade, enquanto que localizações deficientes podem gerar gastos adicionais de capital, investido em instalações e operação (*Arsanjani et al., 2013*). Em atividades industriais a localização assume um papel de fundamental importância, pois encontra-se associada às atividades de abastecimento e distribuição dos produtos acabados.

## 2.2 Definição do teor de cinzas

Após mistura com água o gesso se combina com a mesma para voltar ao di-hidrato original através de uma reação de hidratação rápida, acompanhada de forte elevação de temperatura e de ligeiro aumento de volume (gonflement) acompanhando um fenômeno conhecido como “pega” (Sirokman, 2014).

Após seu contato com a água, uma parte do semi-hidrato contido no gesso dissolve-se rapidamente. Sua combinação com uma e meia molécula de água, para formar novamente di-hidrato, ou gesso hidratado, o qual é cerca de cinco vezes menos solúvel que o semi-hidrato (2,3 a 2,65 g/L), e resulta na formação de uma solução supersaturada. A cristalização do di-hidrato é muito rápida. A mistura adquire uma consistência pastosa que permite sua trabalhabilidade por alguns minutos. Dessa forma, parte do semi-hidrato cristalizado libera uma certa quantidade de água que age sobre a outra parte ainda não cristalizada, e assim por diante. A consistência da pasta aumenta pouco a pouco e quando a cristalização finaliza o gesso é “preso”. A Figura a seguir ilustra a distribuição dos átomos nas moléculas de semi-hidrato e di-hidrato resultantes da reação de hidratação do gesso ou pega.

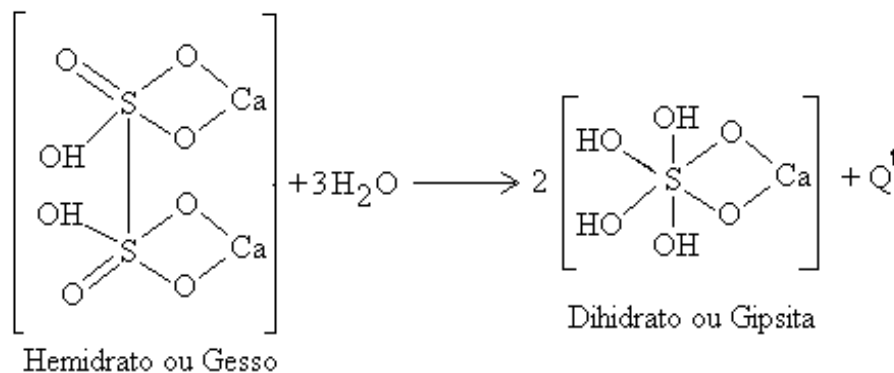


Figura 1 – Fórmulas estruturais do semi-hidrato água e di-hidrato que participam da pega do gesso

Pela estequiometria da reação de re-hidratação do semi-hidrato de sulfato de cálcio, em gipsita, são necessários 18,8 gramas de água por 100 g de gesso para essa reação. Entretanto, essa mistura é muito pouco para ser usada experimentalmente, sendo substituída por uma quantidade de água de aproximadamente 2,5 vezes maior, para se ter uma pasta homogênea e trabalhável. Após a pega a água em excesso permanece nos capilares formados pelo arcabouço tridimensional de cristais de gipsita, unidos entre si (Joiret et al., 2014).

Qualquer substância química adicionada ao gesso pode interferir nas suas propriedades de pega, sendo por isso classificadas como redutores ou retardadores da pega (Singh and Garg, 1997). Dessa forma, o tempo de pega pode ser um critério para indicar qual a influência

exercida pela adição de uma dada substância a uma quantidade definida de gesso. No caso das cinzas de carvão mineral, pelas presenças de sais inorgânicos em suas constituições (Bielowicz, 2016), sua adição ao gesso deve provocar efeitos que devem ser identificados. Essa identificação serve para evitar ações indesejadas no emprego da referida mistura, tanto na produção de pré-moldados por moldagem, quanto de pré-moldados por prensagem.

### 2.3 Modelo de Centro de Carga

Quando um corpo gira ou vibra, existe um ponto nesse corpo, chamado centro de massa, que se desloca da mesma maneira que se deslocaria uma única partícula, com a massa desse corpo e sujeita ao mesmo sistema de forças que ele. Para duas partículas de massas  $m_1$  e  $m_2$  e que ocupam as posições  $x_1$  e  $x_2$ , define-se a posição  $x_{cm}$  do centro de massa para esse sistema como:

$$x_{cm} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

Para um sistema de N corpos dispostos ao longo de uma linha reta, podemos fazer uma extensão da Equação (1):

$$x_{cm} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + m_N \cdot x_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (2)$$

Para a definição do centro de massa de um sistema de N corpos distribuídos em um plano (bidimensional) pode-se, por analogia com as definições anteriores, considerar que (Bingjue, 2014):

$$x_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (3)$$

$$y_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (4)$$

Para representar um modelo de localização de uma empresa de produtos gesseiros, localizada entre o Alto sertão de Pernambuco e Fortaleza, capital do Estado do Ceará, algumas simplificações podem ser levadas em consideração (Chiu et al., 2013):

- A distância entre a empresa e o mercado consumidor é muito maior que que a distância entre a empresa e o mercado fornecedor;
- Maquinas e equipamentos envolvidos requer baixo investimento e pouca manutenção;
- Dá-se preferência à mão-de-obra no entorno da empresa e;
- Os custos com área para estoques são baixos.

Dessa forma, na elaboração de um modelo simplificado de localização para uma indústria produtora de pré-moldados do tipo gesso-cinzas de carvão mineral, utilizou-se a analogia de determinação de um centro de massa. Nesse caso, cada partícula representa um *cluster* de parâmetros responsáveis pelas características técnicas e econômicas do produto acabado. As Equações (5) e (6) expressam o modelo simplificado proposto:

$$x_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \cdot x_i \cdot c_i)}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot c_i} \quad (5)$$

e

$$y_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i \cdot y_i \cdot c_i)}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot c_i} \quad (6)$$

Em que:

**m** - fração mássica do material de maior custo por tonelada, -

**x** - coordenada horizontal de posição da localidade produtora do material de composição do produto acabado no sistema de eixos cartesianos adotado, km

**y** – coordenada vertical de posição da localidade produtora do material de composição do produto acabado no sistema no sistema de eixos cartesianos adotado, km

**c** - custo por tonelada do material de maior valor significativo na composição do produto acabado, US\$/t

### 3. Resultados

#### 3.1 Teores dos componentes da mistura no produto acabado

Para determinação dos teores de cinzas leve e de pesadas através das influências de tais dosagens no tempo de pega foram realizados experimentos de medidas desses tempos. Dessa forma, realizou-se experimentos com misturas de gesso e cinzas de carvão mineral leve, gesso e cinzas de carvão mineral pesado e misturas contendo os três componentes.

Inicialmente foram realizadas determinações dos tempos de pega para o gesso comercial utilizado, tendo-se obtido valores médios da ordem de  $20,4 \pm 0,8$  min e  $27,5 \pm 0,7$  min para os tempos de pega inicial e final, respectivamente. Posteriormente variou-se o teor de cinzas leve de carvão mineral, com gesso beta comercial, tendo o teor de cinza leve variado de 0 a 40%.

As Figuras 2 e 3 apresentam gráficos do tipo *box plot* para os tempo inicial e final de pega, respectivamente, em misturas de diferentes teores percentuais de cinzas leve de carvão mineral em gesso. Observa-se nos gráficos obtidos que, por volta de 15 % de cinzas para um tempo inicial de pega de 8,3 min e de 20% de cinzas para um tempo final de pega de 11,4 min, não é necessário nenhum acréscimo aos referidos teores dessas cinzas para se obter uma variação significativa nos referidos tempos de pega.

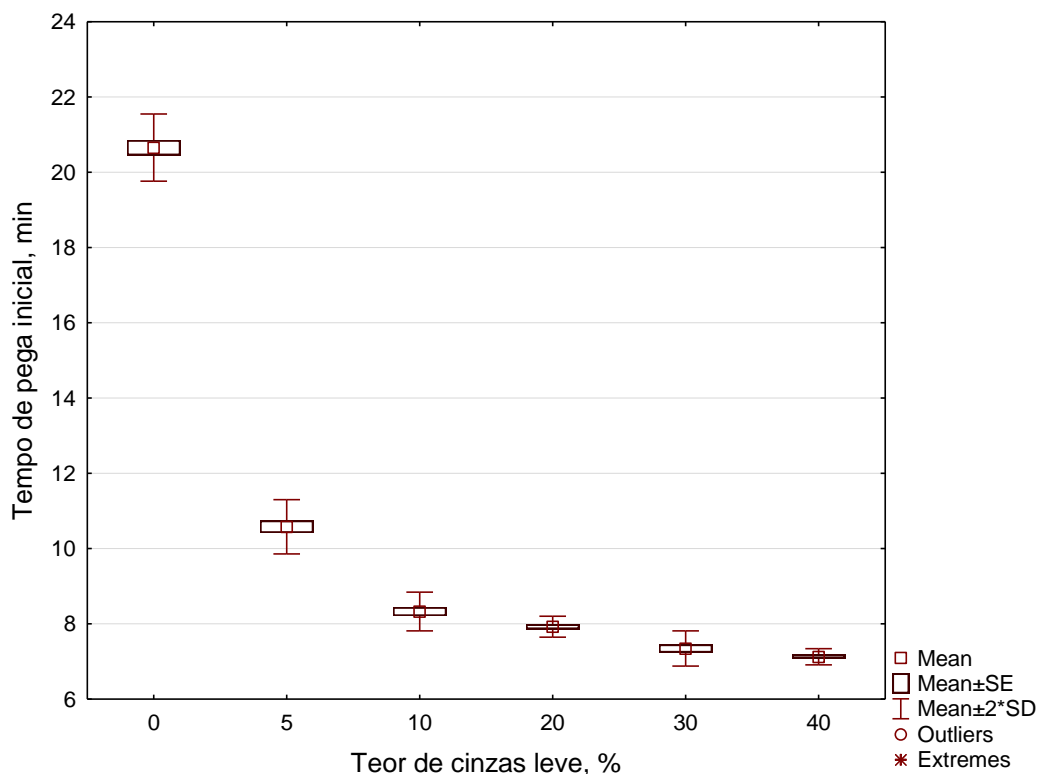


Figura 2 – Tempo de pega inicial para a mistura gesso cinzas leve em função do teor percentual (m/m) destas cinzas na mistura com gesso comercial

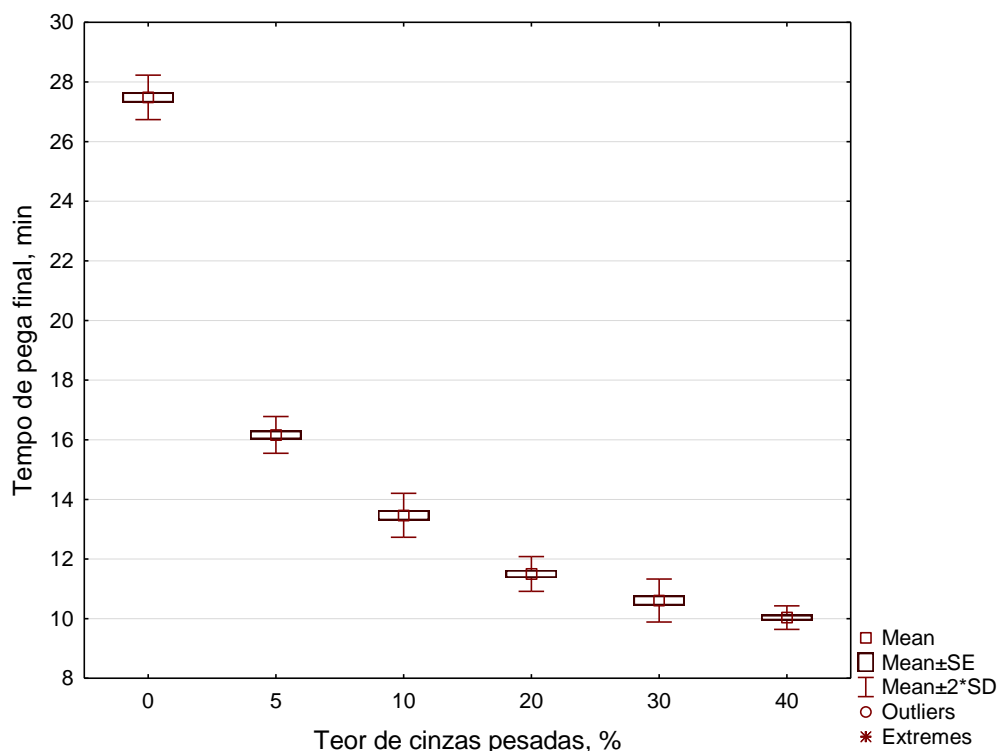


Figura 3 - Tempo de pega final para a mistura gesso cinzas leve em função do teor percentual (m/m) destas cinzas na mistura com gesso comercial

As Figuras 4 e 5 apresentam gráficos do tipo *box plot* para o do tempo de pega das misturas resultantes de gesso beta comercial e cinzas pesadas de carvão mineral. Novamente o gráfico ilustra o comportamento dos tempos de pega inicial e final em função dos teores desse tipo de cinzas. Neste caso observa-se que, por volta de 15 % de cinzas, para ambos os casos, os tempos inicial e final de pega ficam em torno de 13 min e 15 min, respectivamente, e não se faz mais necessárias adições de cinzas para variações consideráveis dos referidos tempos de pega.

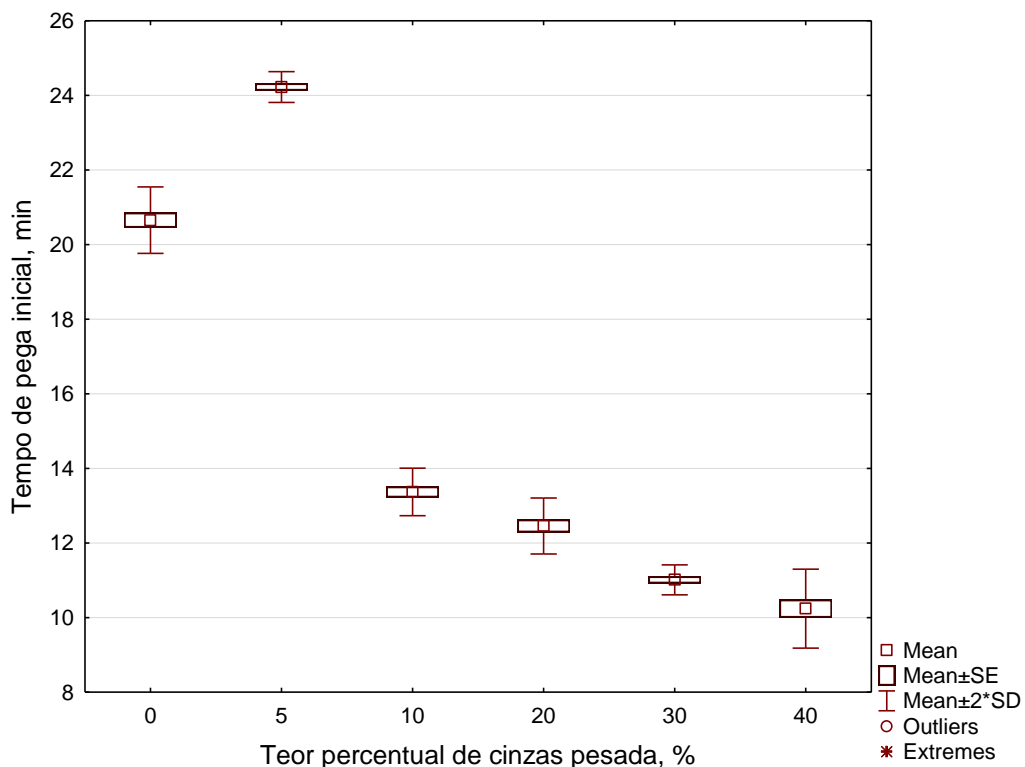


Figura 4 - Tempo de pega inicial para a mistura gesso cinzas pesada em função do teor percentual (m/m) destas cinzas na mistura com gesso comercial



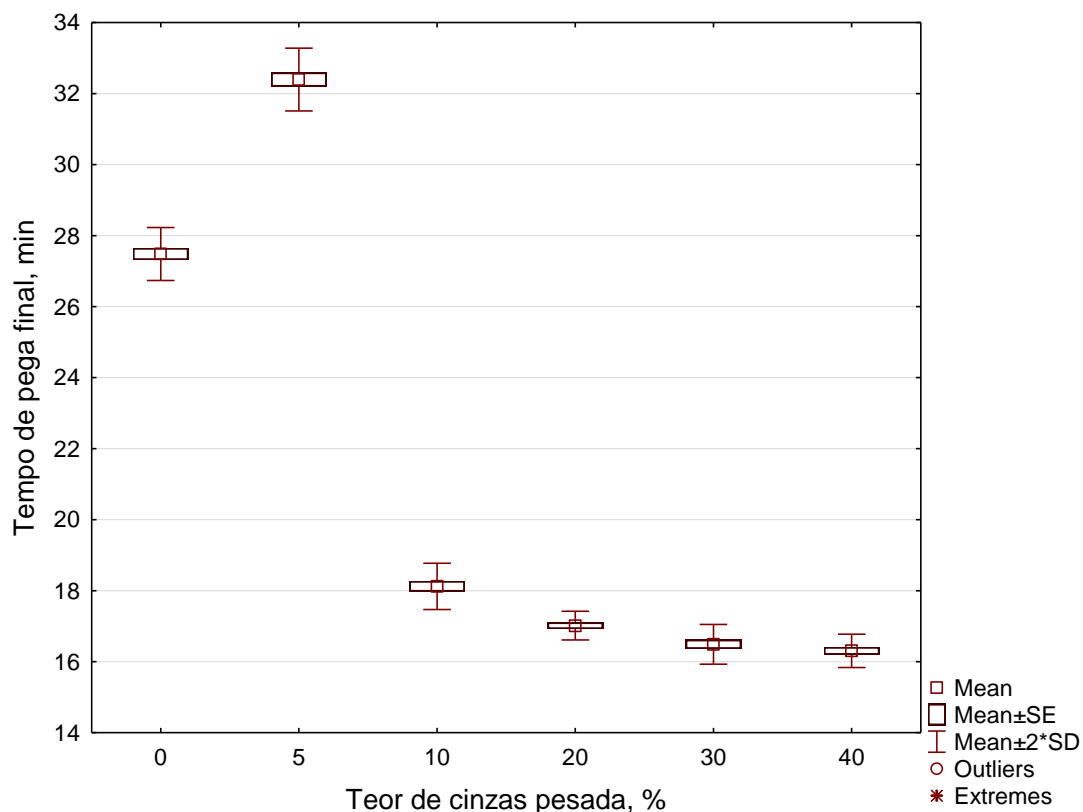


Figura 5 – Tempo de pega final para a mistura gesso cinzas pesada em função do teor percentual (m/m) destas cinzas na mistura com gesso comercial

Alguns testes adicionais mostraram que as adições de 15 % do teor total de cinzas, leve e pesada, ao gesso, são suficientes para se obter tempos de pega com poucas variações, sem necessidade de adição de maiores quantidades de cinzas (Figura 6).

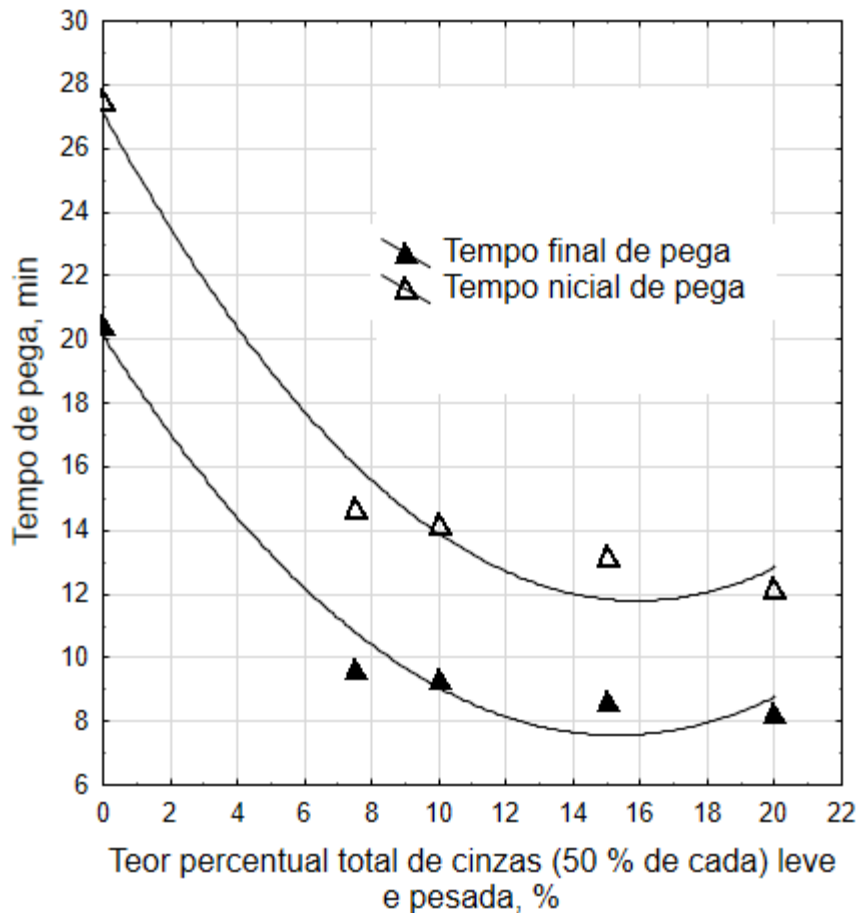


Figura 6 – Tempos de pega inicial e final da mistura de cinzas leve (50 %) e pesada (50%) com gesso comercial

### 3.2 Modelo de localização para a empresa de pré-moldados

Os cálculos para a simulação do modelo de localização foram realizados com auxílio de uma planilha eletrônica Excel da Microsoft®. O mapa mostrado pela Figura 11, fornece as distâncias via transporte rodoviário, entre as cidades fornecedoras das matérias-primas. Pode-se identificar na referida figura, que as localidades responsáveis pelo fornecimento de gesso encontram-se formando uma espécie de *grupo*, localizado no Polo Gesseiro do Araripe (PGA). São as localidades de: Trindade (PE), Ouricuri (PE) e Araripina (PE), localizadas no Alto Sertão do Estado de Pernambuco. As distâncias entre as referidas localidades e a usina termelétrica de PECEM no Estado do Ceará, fornecedora das cinzas de carvão mineral, encontram-se em destaque nesta figura. Observa-se ainda que a cidade de Araripina representa bem o referido aglomerado de fornecedores de gesso. A Tabela 1 apresenta os dados de entrada da planilha de simulação, como distâncias e índices de custos para o gesso.

Conforme comentado anteriormente, a escolha por uma localização para as instalações de uma empresa pode envolver variados fatores, como custos de transporte; impostos,

incentivos, potencial de mercado, acesso à infraestrutura de transporte, infraestrutura local de serviços e custo de espaço e disponibilidade para expansão. Contudo, ao se buscar itens de grande peso como minimização das taxas de transporte, uma instalação localizada entre fontes de matérias-primas predominante e na composição do produto acabado, pode levar a um custo mínimo de transporte e favorecimento de localização definida.

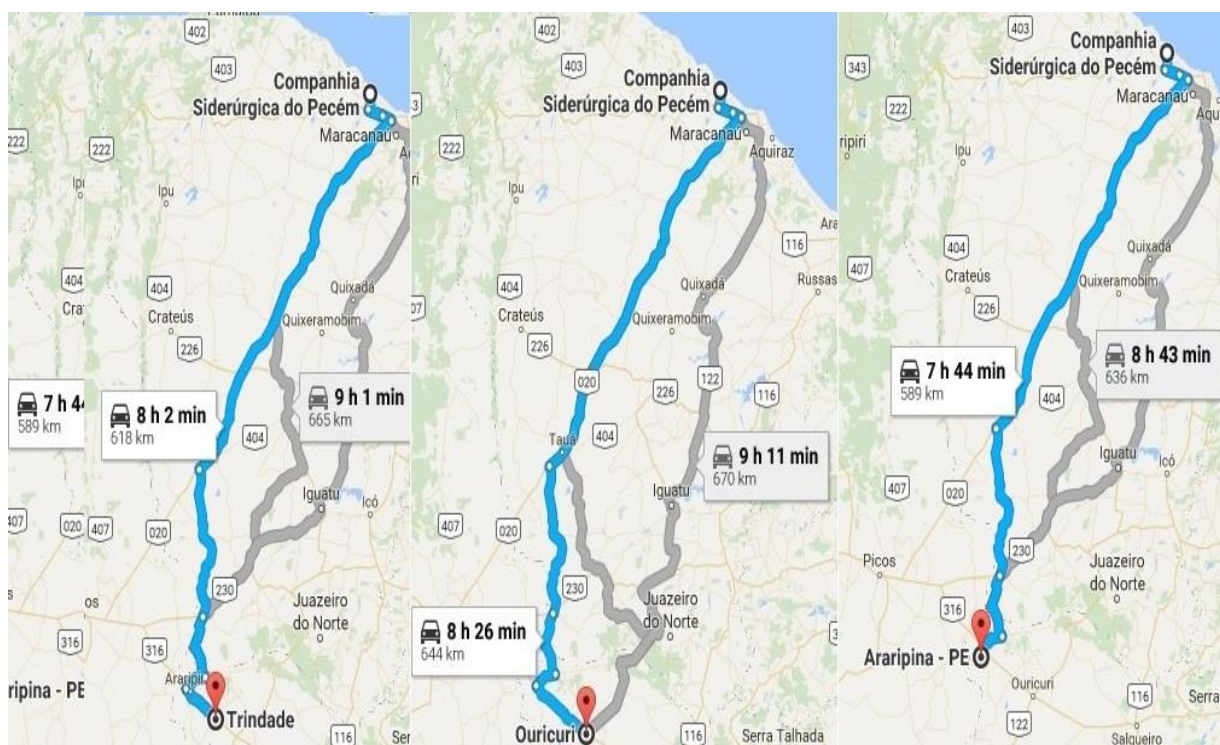


Figura 7 – Mapas obtidos do Google-Map com detalhes das distâncias entre os fornecedores de gesso e cinzas de carvão mineral

Tabela 1 – Dados sobre os fornecedores de matérias-primas utilizadas na produção de pré-moldados gesso-cinzas de carvão mineral

Fornecedor		Matéria-prima	Coordenadas (km)		Custo do frete (R\$/ton)
I	Localidade		x	y	
1	Pecem	Cinzas	161	0	0
2	Araripina	Gesso	0	589	90,00
3	Trindade	Gesso	18	618	94,43
4	Ouricuri	Gesso	40	644	98,40

Com auxílio dos dados da Tabela 1 observa-se que houve transformações de dados relativos aos custos em valores normatizados (adimensionais), dividindo-se os demais valores por aquele considerado padrão, para a realização de cálculos em planilha eletrônica (Tabela 2).

Dessa forma, para um percentual de cinzas, considerado máximo de 15 %, o percentual de gesso para produção de pré-moldados em todos os fornecedores desta matéria-prima foi de 85 %.

Quanto às distâncias, utilizaram-se imagens do *Google-Maps* e adotou-se a seguinte estratégia:

- A origem das coordenadas foi a cidade de Araripina-PE;
- Para coordenada vertical (y) adotou-se a distância por via rodoviária informada pelo *Google-Maps*;
- Para coordenada horizontal, utilizou-se o número de quilômetros entre as localidades no PGA.

Nos custos de transporte, consideraram-se os valores relativos adotados para distâncias entre a Usina de Pecem e as localidades no PGA. Dessa forma, o custo do transporte de cinzas foi de zero para uma instalação na própria Usina. A Figura 8 resume os dados e os resultados dos cálculos para as coordenadas obtidas pelo modelo de localização.

Tabela 2 – Planilha eletrônica Excel utilizada na simulação da localização da empresa de produção de pré-moldados gesso-cinzas de carvão mineral

Localidade	Coordenadas		Participação Relativa	Custo Relativo
	x	y		
Pecem (1)	161	0	0,15	0
Araripina (2)	0	589	0,85	0,915
Trindade (3)	18	618	0,85	0,96
Ouricuri (4)	40	644	0,85	1
Xcm	18,03			
Ycm	558,18			

#### 4. Conclusões e Sugestões

Conforme as coordenadas do modelo proposto uma indústria produtora de pré-moldados de gesso-cinzas de carvão mineral, oriundas da Usina de Pecem-CE, deverá ser instalada em Araripina-PE.

Apesar de a seleção do local ser influenciada por tais fatores qualitativos, um estudo baseado em métodos quantitativos, tais como custos e distância, pode dar uma direção mais assertiva e útil para que diminua a probabilidade de erros.

Devido à eficácia do método, foi possível calcular o melhor ponto de localização. Este trabalho é relevante, uma vez que direciona quantitativamente a decisão de localização de uma

empresa, onde a sua posição é preponderante para o seu faturamento. Os pontos geográficos encontrados, utilizando-se analogia com centro de massa, ou gravidade, para definições de custo e logística, mostraram que a posição atual da empresa está próxima ao ponto ideal.

Apesar de ser uma análise eficiente monetariamente, o método é deficiente por não tratar de aspectos sociais, ambientais, fiscais e outros. Deste modo, para a complementação do estudo, sugere-se, como próxima etapa, a análise dos locais encontrados por aspectos qualitativos, onde as características associadas ao local, como acesso a vias e segurança, sejam levadas em consideração.

### **Agradecimentos**

Os autores são gratos à CAPES pelo suporte financeiros e ao Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, pelos Laboratórios disponibilizados.

### **Referências**

Bielowicz, B. Qualitative and chemical characteristics of mineral matter in the selected lignite deposits in light of their suitability for clean coal technologies. E3S WEB Conference 10, 00002 (2016). DOI: 10.1051/e3fconf/2016000002.

Bingjue, L., Andrew, P.M., Myszka, H.D., Improving Techniques in Statically Equivalent Serial Chain Modeling for Center of Mass Estimation. ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 5B: 38th Mechanisms and Robotics Conference Buffalo, New York, USA, August 17–20, 2014. 978-0-7918-4637-7.

Chiu, Y.S.P., Wu, M.F., Chiu, S.W., Chang, H.H., A simplified approach to the multi-item economic production quantity model with scrap, rework, and multi-delivery. **Journal of Applied Research and Technology**, Volume 13, Issue 4, Pages 472-476. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jart.2015.09.004>.

Cotton S, Murray AP, Fraise P. 2009. Estimation of the center of mass using statically equivalent serial chain modeling. In: ASME International Design Engineering Technical Conferences. San Diego, California, USA.

Joiret, S., Pillier, F., Lemarchand, A., Submicrometric Picture of Plaster Hydration: Dynamic and Space-Resolved Raman Spectroscopy versus Kinetic Monte Carlo Simulations. **The Journal of Physical Chemistry C** 2014 118 (49), 28730-28738.

Singh, M., Garg, M., Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different pH. **Cement and Concrete Research**, 27(6): 947-950 · June 1997. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00045-8.

Sirokman, G., Synthesis, Dehydration, and Rehydration of Calcium Sulfate (Gypsum, Plaster of Paris). *J. Chem. Educ.*, 2014, 91 (4), pp 557–559 DOI: 10.1021/ed400004b.  
Walkenbach, J., **Excel 2016 Bible.**, New York: Wiley, 2015, 1152 p. ISBN: 978-1-119-06751-1.

# CAPÍTULO III

## CONCLUSÕES GERAIS

Entre as técnicas utilizadas para solução de problemas de localização encontram-se métodos matemáticos complexos, como simulação por lógica fuzzy e programação linear inteira mista (mixed-Integer linear programming), ou MILP (Vielma, 2015). Contudo, modelos de localização simplificados podem ser adotados para demarcação inicial da empresa, e são possíveis de serem elaborados quando alguns parâmetros de avaliações técnica e econômica podem ser desprezados. Um exemplo disso acontece com as empresas gesseiras. Seu mercado maior é a Região Sudeste do País, inviabilizando preocupações com relação à localização desses consumidores. Para esses modelos, de expressões matemáticas menos complexas, métodos matemáticos mais simples e de fácil interatividade, como a ferramenta Solver da Planilha eletrônica Excel (Walkenbach, 2016), podem ser utilizados.

A localização da empresa produtora de pré-moldados de gesso em Araripina (PE) coincidiu com o resultado esperado, pela maior capacidade produtiva e melhores condições físicas em relação às demais localizações. Isto é apesar da simplicidade do modelo, os critérios de sua elaboração garantem eficiência para sua aplicação.

Apesar de sua simplicidade a ferramenta – planilha eletrônica permite a estudiosos de diferentes áreas o acesso a análises numéricas de forma rápida e fácil.

O Google-Maps também se apresentou como uma excelente ferramenta por permitir observações físicas e espaciais. Dessa forma, o desenvolvimento de processos ambientais tem nesta ferramenta um excelente reforço para sua aplicação.

O presente trabalho teve como objetivo elaborar um modelo simplificado de localização para implantação de uma empresa produtora de pré-moldados de gesso misturado a cinzas de carvão mineral. Este tipo de produto deve beneficiar ambientalmente a grande produção de cinzas, reduzindo custos para o PGA, para a Indústria de Energia no País e contribuindo para o progresso da região do Alto sertão do Araripe.



## **ANEXOS**