



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

# CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE COQUES VISANDO PREVISÃO DA DEGRADAÇÃO DURANTE MANUSEIO

Leonardo Ciano Pires

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2016

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE COQUES VISANDO PREVISÃO DA DEGRADAÇÃO  
DURANTE MANUSEIO

Leonardo Ciano Pires

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinado por:



---

Prof. Rodrigo Magalhães, de Carvalho, DSc.



---

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, PhD.



---

Engenheira Cristiane Rocha Galiazzi, MSc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Fevereiro de 2016

Pires, Leonardo Ciano

Caracterização de coques visando previsão da degradação durante manuseio/ Leonardo Ciano Pires. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

XIV, 72, p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Metalúrgica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 71-72.

1. Coque. 2. Degradação. 3. Caracterização. I. Carvalho, Rodrigo Magalhães de. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Caracterização de coques visando previsão de degradação durante manuseio.

*“Kein Weg ist zu weit, wenn du dein Ziel kennst.”*

Aos meus pais, amigos e família.

## Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus por ter iluminado o meu caminho, fazendo com que eu superasse todas as dificuldades e de ter me cercado de tantas pessoas boas, às quais eu também gostaria de agradecer:

- Meus pais e maiores exemplos, Maria Teresa e Luciano, e minha irmã, Lorena, por todo o amor, carinho, apoio e incentivo que me deram em todos os momentos da minha vida. Se eu estou concluindo este ciclo de forma vitoriosa boa parte se deve a eles.
- Minha tia e madrinha Patrícia por todas as vezes que me incentivou a dar passos cada vez maiores e por todos os conselhos de vida e acadêmicos
- Aos meus avós Teresa, Vincenzo, José Carlos e Sônia e ao meu tio Salvador, por todo amor e incentivo
- Aos meus amigos da faculdade, ao grupo 'Rapaziada' e 'Metalmanos', em especial à Amanda, Anderson, Breno, Bruno, Camilla, Cecília, Daniel (Stifler), Ian (Tota), Marcus (B2) e Raphael (Vava), pelos incontáveis momentos divertidos e pelas vezes que sofremos para passar nas matérias
- A empresa ThyssenKrupp pelo suporte financeiro oferecido durante toda a minha graduação
- Meu orientador Rodrigo Carvalho, pelos ensinamentos, sugestões, paciência e apoio durante o período de execução deste trabalho.
- A professora Giselle Mattos por ter me indicado para realizar este trabalho
- A todos os membros do LTM que me ajudaram na execução dos ensaios.
- A todos que de alguma forma contribuíram para que a execução deste projeto fosse possível.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

## CARACTERIZAÇÃO DE COQUES VISANDO PREVISÃO DA DEGRADAÇÃO DURANTE MANUSEIO

Leonardo Ciancio Pires

Fevereiro/ 2016

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Curso: Engenharia Metalúrgica

O coque é um sólido poroso formado basicamente de carbono, obtido com a retirada de matéria volátil do carvão mineral quando submetido a altas temperaturas na ausência de oxigênio. No percurso até o alto forno, este material sofre diversos tipos de impactos, por exemplo, durante carregamento nos navios de transporte, durante estocagem em silos, transferência de correia transportadoras, durante o carregamento no alto forno etc. Sendo assim, há perda de massa, gerando materiais de baixa granulometria, conhecido como “finos”. Estes finos de material quando carregados no alto forno prejudicam o bom funcionamento deste aparato. Para mitigar este problema a solução é fazer a caracterização física do coque para gerar parâmetros que possam ser aplicados a modelos matemáticos com o intuito de prever a degradação do coque durante os processos de transporte, manuseio e carregamento no alto forno.

No presente trabalho foram testados dois tipos de coque fabricados com processos de produção diferentes em três faixas granulométricas (63x50, 45x37,5 e 31,5x26,5 milímetros). O Coque A foi produzido via coqueria convencional enquanto que o Coque B foi produzido via coqueria *Heat Recovery*. Para investigar as características de quebra foram realizadas análises de fator de forma das partículas, análise granulométrica, ensaios de autofratura e ensaio de queda de peso. As técnicas de caracterização utilizadas tornaram possível a identificação de diferenças nas características dos coques quanto a quebra por impacto, enfraquecimento, perda mássica em impactos de baixa energia e granulometria dos finos gerados. Por fim, foi possível calibrar um modelo matemático que permite prever a distribuição granulométrica do coque quando este é submetido a impacto de energias conhecidas.

*Palavras-chave:* coque, degradação



Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Metallurgical Engineer.

## CHARACTERIZATION OF COKE AIMING FORECAST OF DEGRADTION DURING HANDLING

Leonardo Ciano Pires

February/ 2016

Advisor: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Course: Metallurgical Engineering (BEng)

Coke is a carbon porous residue obtained by removing the volatile matter of the coal when subjected to high temperatures in the absence of oxygen. During the processes of handling until it reaches the furnace, for example, during loading in ships, storage in silos, charging the furnace, conveyor belt exchange etc. these materials suffer various kinds of impacts. Therefore, the particles lose mass, generating low granular materials known as "fines". These fine materials in turn, when loaded into the furnace, interfere with the smooth operation of the apparatus as they hinder the permeability of gases causing problems with reduction of iron ore to pig iron. In order to reduce this problem, a physical characterization of coke is necessary to generate parameters that can be applied to mathematical models in order to predict the degradation of coke during the transport processes, handling and loading into the blast furnace.

This study tested two types of coke manufactured with different production processes in three different particle sizes (63x50, 45x37,5 and 31,5x26,5 mm). Coke A was produced via conventional coke oven while Coke B was produced via Heat Recovery coke oven. To investigate the breakage characteristics, sieve analysis, particle shape factor, self-breakage and drop weight testing were performed. By analyzing the results, differences in the characteristics of cokes as catastrophic breakage, weakening, mass loss for low energy impacts and size of the generated fine particles. It was, thus, possible to build a model that predicts what will be the size distribution of the coke when it is subjected to known impact energies

Keywords: coke, degradation.

# Sumário

Agradecimentos .....	v
Lista de Figuras.....	xi
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1. Alto Forno .....</b>	<b>4</b>
3.1.1. Cenário Mundial de produção de aço em altos fornos .....	4
<b>3.2. Estrutura .....</b>	<b>6</b>
3.2.1. Zonas do alto forno .....	8
3.2.2. Funcionamento do alto forno .....	9
<b>3.3. Coqueria.....</b>	<b>13</b>
3.3.1. Matéria Prima: Carvão Mineral.....	13
<b>3.3.2. Produto: Coque .....</b>	<b>15</b>
3.3.3. Tipos de Coqueria.....	16
3.3.4. Coqueificação .....	21
<b>3.4. Fratura de partículas .....</b>	<b>23</b>
3.4.1. Mecânica da Fratura.....	23
3.4.2. Processo de fragmentação das partículas.....	24
3.4.3. Modelagem matemática da quebra de partículas .....	28
3.4.3.1. Energia de Fratura .....	29
3.4.3.2. Mecânica do Dano.....	36
3.4.3.3. Função Quebra .....	38
<b>4. Metodologia.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. Análise Granulométrica.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. Análise deforma .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. Autofratura .....</b>	<b>48</b>
<b>5. Resultados e Discussão .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1. Análise Granulométrica.....</b>	<b>54</b>
<b>5.2. Análise do Fator de Forma.....</b>	<b>55</b>
<b>5.3. Autofratura e Ensaio de queda de peso.....</b>	<b>56</b>

5.3.1.	Energia necessária para quebra (energia de fratura).....	56
5.3.2.	Acúmulo de dano nas pelotas .....	59
5.3.3.	Função Quebra .....	61
<b>6.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>70</b>
<b>7.</b>	<b>Referências.....</b>	<b>71</b>

## Lista de Figuras

Figura 3.1 - Esquema representativo da produção de aço pela roda de alto forno (Osório,2008).....	5
Figura 3.2 - Eficiência energética na siderurgia – adaptado de Bajay (2009).....	6
Figura 3.3 - Corte transversal representando o alto-forno (adaptado de Araújo,1997) ..	7
Figura 3.4 - Corte do alto forno apresentnado as regiões internas conforme (adaptado de Araújo, 1997) .....	8
Figura 3.5 - Reações de redução por zona do alto-forno (adaptado de Araújo,1997) .	11
Figura 3.6 - Diagrama esquemático do escoamento gasoso em um leito de partículas (Bradaschia, 1986) .....	12
Figura 3.7 - Partículas de carvão mineral.....	14
Figura 3.8 - Partículas de coque .....	16
Figura 3.9 - Esquema de uma bateria convencional (Costa <i>et al.</i> 2003) .....	18
Figura 3.10 - Vista lateral de fornos tipo <i>Heat Recovery</i> (Geerds, 2008).....	19
Figura 3.11 - Esquema de fornos da bateria <i>Heat Recovery</i> (Casagrande, 2010) .....	19
Figura 3.12 - Fluxograma do processo de uma bateria <i>Heat Recovery</i> .....	20
Figura 3.13 - Concentração de esforços na extremidade de uma trinca (Silveira,2012) .....	24
Figura 3.14 - Carregamento de partículas individuais: 1) compressão lenta; 2) impacto duplo; 3) impacto simples. ....	26
Figura 3.15 - Mecanismos de fragmentação de partículas – fratura por estilhaçamento (modificado de King,2001) .....	27
Figura 3.16 - Mecanismos de fragmentação de partículas – Fratura por Clivagem (modificado de King,2001) .....	27
Figura 3.17 - Mecanismos de fragmentação de partículas – Fratura por Abrasão (modificado de King, 2001) .....	28
Figura 3.18 - Exemplo de quebra de partícula mãe e geração de partículas filhas (Carvalho, 2014).....	29
Figura 3.19 - Esquema da Célula de Carga de Impacto (Tavares, 2007).....	30
Figura 3.20 - Curvas força-tempo obtidas com o ensaio no CCI em partículas de quartzo (Tavares e King, 1998).....	31
Figura 3.21- Distribuição de energia de fratura para minérios de cobre. Cada ponto representa um teste de impacto feito em uma partícula individual. (Carvalho, 2014) .....	33

Figura 3.22 - Distribuição da energia de fratura de partículas de 4,75x4,00 mm de calcário (Tavares, 2007) .....	33
Figura 3.23 - Medianas das energias específicas de Fratura como funções dos tamanhos de partículas de minério de cobre. A linha é obtida através do modelo enquanto que os quadrados pretos são dados calculados a partir dos testes de energia de fratura .....	35
Figura 3.24 - Efeito do enfraquecimento ocasionado pelo acúmulo de dano causado por impactos repetidos de mesma energia (Tavares, 2009) .....	36
Figura 3.25 - Distribuição de tamanhos de partículas do produto de quebra no ensaio de queda de peso (DWT) de um minério de cobre na faixa de tamanho (22,4x19,2 mm) para três energias de impacto (Carvalho, 2009) .....	39
Figura 3.26 - Conjunto de $t_{10}$ x $t_n$ s obtidos pelo ensaio de queda de peso (três energias de impacto) para uma única amostra de minério de cobre (Carvalho, 2009) .....	40
Figura 3.27 - Conjunto de dados $t_{10}$ e $t_n$ s e o ajuste pela função beta incompleta (Carvalho, 2009).....	41
Figura 3.28 - Relação entre o $t_{10}$ e a energia aplicada construída através da Equação 3.13 (Tavares, 2007). .....	42
Figura 3.29 - $t_{10}$ como função da razão entre as energias de impacto e de fratura do material (Tavares, 2007).....	43
Figura 4.1 - Série de peneiras padrão Produtest® utilizadas na análise granulométrica dos coques utilizados nesse trabalho .....	45
Figura 4.2 - Medição da menor dimensão (esquerda) e maior dimensão (direita) da partícula com paquímetro .....	46
Figura 4.3 - Diagrama apresentando as diferentes formas encontradas na população de partículas de uma das amostras de coque.....	48
Figura 4.4 - Foto do aparato de autofratura montado no LTM. À direita o tubo de confinamento, chapa de impacto e tubo guia.....	49
Figura 4.5 - Esquema do aparato de autofratura montado no LTM/COPPE/UFRJ. À direita o tubo de confinamento, chapa de impacto e tubo guia (Silveira, 2012)....	49
Figura 4.6 – Fluxograma do ensaio de Autofratura .....	51
Figura 4.7 - Amostras individuais de partículas de tamanho 63x50 mm separadas para ensaio de autofratura.....	51
Figura 4.8 - Tambor de abrasão utilizado para simular 20 quedas sucessivas de equivalentes a 1 metro de altura.....	52

Figura 4.9 - Partícula de 63x50mm posicionada para o Teste de Queda de Peso (LTM COPPE UFRJ).....	53
Figura 4.10 - Célula de carga de impacto para ensaio de DWT .....	54
Figura 5.1 - Classificação das partículas em relação aos seus índices de lamelaridade e alongamento.....	56
Figura 5.2- Proporção de partículas quebradas no primeiro impacto do Coque A.....	57
Figura 5.3- Proporção de partículas quebradas no primeiro impacto do Coque B.....	58
Figura 5.4– Comparação das energias específicas de fratura dos Coques A e B em relação aos seus tamanhos representativos .....	58
Figura 5.5– Comparação da porcentagem quebrada de partículas de impactos repetidos para diferentes energias, granulometrias e valores de gama do Coque A. Os pontos são os dados obtidos experimentalmente e as linhas são ajustes do modelo.....	59
Figura 5.6– Comparação da porcentagem quebrada de partículas de impactos repetidos para diferentes energias, granulometrias e valores de gama do Coque B. Os pontos são os dados obtidos experimentalmente e as linhas são ajustes do modelo.....	60
Figura 5.7– Distribuição granulométrica da quebra de partículas do Coque A do lote de 45x37,5mm em diferentes energias aplicadas .....	61
Figura 5.8– Distribuição granulométrica da quebra de partículas do Coque B do lote de 63x50mm em diferentes energias aplicadas .....	62
Figura 5.9– Gráfico do $t_{10}$ s pelas energias aplicadas no lote de 45x37,5 mm dos Coques A e B .....	62
Figura 5.10 - <i>Appearance function</i> para o Coque A. Pontos são os dados experimentais e as linhas os dados modelados pela função beta incompleta (Eq. 3.12) e parâmetros da Tabela 5.4.....	63
Figura 5.11- <i>Appearance function</i> para o Coque B. Pontos são os dados experimentais e as linhas os dados modelados pela função beta incompleta(Eq. 3.12) e parâmetros da Tabela 5.4.....	64
Figura 5.12– $t_{10}$ como função da razão entre as energias de impacto e de fratura para os Coques A e B. Os pontos são dados experimentais e as linhas contínuas são os ajustes obtidos para o modelo da Equação 3.12 cujos parâmetros estão listados na Tabela 5.5.....	65
Figura 5.13 - Reconstrução da distribuição granulométrica da quebra das partículas de 45x37,5mm do Coque A .....	65

Figura 5.14– Reconstrução da distribuição granulométrica da quebra das partículas de 45x37,5mm do Coque B fragmentação superficial.....	66
Figura 5.15 - Abrasão por impacto para partículas de 31,5x26,5mm em diferentes alturas.....	67
Figura 5.16 - Abrasão por impacto para partículas de 45x37,5 mm em diferentes alturas.....	67
Figura 5.17- Abrasão por impacto para partículas de 63x50 mm em diferentes alturas .....	68
Figura 5.18 - Perda mássica por impacto por partícula em função da energia aplicada por impacto ao Coque A .....	68
Figura 5.19- Perda mássica por impacto por partícula em função da energia aplicada por impacto ao Coque B .....	69

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Produção mundial de aço com alto forno – adaptado de WORLD STEEL ASSOCIATION (2015).....	4
Tabela 3.2 - Evolução da quantidade de coque exportado e preço médio FOB do coque - adaptado de WORLD STEEL ASSOCIATION (2015) .....	6
Tabela 3.3 – $t_{10}$ x $t_n$ s experimentais para o minério de cobre (Carvalho, 2009) .....	40
Tabela 5.1 - Distribuição granulométria dos coques A e B.....	55
Tabela 5.2 - Parâmetros da equação do $E_{50}$ para os coques A e B .....	58
Tabela 5.3 - Valores de gama para cada lote de partículas dos coques A e B.....	59
Tabela 5.4 -Parâmetros da função beta incompleta utilizada para construir a <i>appearance function</i> dos coques A e B.....	63
Tabela 5.5 – Parâmetros do modelo da função quebra para os coques A e B.....	64

# 1. Introdução

A motivação para investigar a degradação física de coques vem da excessiva geração de finos de matérias primas de alto forno durante o processo de manuseio que, quando carregados no alto forno, prejudicam seu funcionamento. A inserção de finos causa problemas como a redução da permeabilidade dos gases e prejudica a redução do minério de ferro a ferro gusa, o que resulta em perda de produtividade e financeira.

Atualmente na indústria siderúrgica, a caracterização de resistência a frio do coque é realizada por meio de ensaios normatizados de tamboramento obtendo uma previsão do valor de um índice de resistência simulando parcialmente o efeito das cargas suportadas pelo coque na zona de preparação do alto forno (Silva, 2008).

Fundamentado no sucesso da caracterização das demais matérias primas da indústria siderúrgica como minério de ferro granulado e pelotas queimadas através do modelo matemático de degradação física desenvolvido por Tavares e Carvalho (2008). Este estudo é resultado de testes realizados em dois tipos de coques, oriundos de processos produtivos diferentes por meio de técnicas tradicionais desenvolvidas originalmente para caracterização de partículas minerais em conjunto com ensaios desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/COPPE/UFRJ).

O presente trabalho aborda a caracterização da suscetibilidade das partículas de coque à degradação por meio do enfraquecimento contínuo devido à aplicação repetida de esforços mecânicos simulando situações reais de impactos que ocorrem no processo de manuseio antes de ser carregado no alto forno.

O estudo proposto traz uma estrutura linear de capítulos distribuídos em sete partes: o capítulo 1 (introdução) oferece uma visão geral, o capítulo 2 o objetivo do trabalho, o capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica pertinente ao processo em altos fornos, produção de coque e modelos de quebra de partícula e modelos utilizados, o capítulo 4 traz a metodologia empregada, o capítulo 5 apresenta discussões sobre os resultados gerados pelos ensaios, o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros e, por fim, no capítulo 7 encontram-se as referências bibliográficas.

## **2. Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar se a metodologia de caracterização do LTM inicialmente desenvolvida para partículas minerais e pelotas de minério de ferro permite discriminar os coques quanto às suas propriedades de quebra, bem como encontrar o melhor conjunto de parâmetros que, quando aplicado à modelagem matemática desenvolvida por Tavares e Carvalho (2008), permitam simular e prever o nível de degradação sofrida no manuseio do coque nas etapas que antecedem o carregamento no alto forno.

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1. Alto Forno

##### 3.1.1. Cenário Mundial de produção de aço em altos fornos

A aquecida demanda por aço ao redor do mundo, advinda de países da América do Norte, União Europeia, etc., tem aumentado progressivamente a produção deste recurso ao longo dos anos. Segundo o ranking publicado em 2015 pela *World Steel Association*, a produção mundial de aço em alto forno (em milhões de toneladas) apresentou um salto de 949.079 em 2009 para 1.183.451 em 2014 (Tabela 3.1)

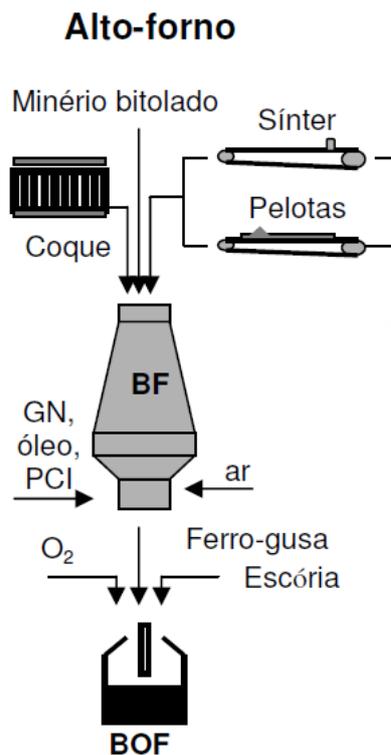
**Tabela 3. 1 - Produção mundial de aço com alto forno – adaptado de WORLD STEEL ASSOCIATION (2015)**

Produção Mundial de aço em Alto Forno em milhões de toneladas	2009	2010	2011	2012	2013	2014
União Europeia	72.263	94.054	93.855	90.493	92.328	95.176
América do Norte	28.209	39.216	42.159	44.328	41.319	41.219
América do Sul	28.513	34.531	37.535	30.454	29.992	30.671
Brasil	25.135	30.955	33.319	26.900	26.200	27.016
Ásia e Oceania	715.165	769.705	83.2145	85.8492	94.2881	917.734
China	568.634	595.601	645.429	670.102	748.084	711.600
Japão	66.943	82.283	81.028	81.405	83.849	83.872
África	5.924	6.725	5.564	5.499	5.778	5.540
Mundo	949.079	933.115	103.4337	112.3042	120.6676	1.183.451

A principal rota para produção do aço é a via alto forno (Figura 3.1), tendo sido responsável por 65,5% da produção de aço no mundo em 2006 (Osório, 2008). A obtenção de ferro gusa no alto forno é um processo competitivo para a produção de ferro primário e tem mostrado flexibilidade para adaptação às novas exigências da siderurgia. Ainda hoje, 95% do ferro primário produzido no mundo empregam o alto forno a coque (Osório, 2008). No Brasil, cerca de 75% do aço bruto têm produção em usinas siderúrgicas integradas que utilizam altos fornos a coque (Osório, 2008)

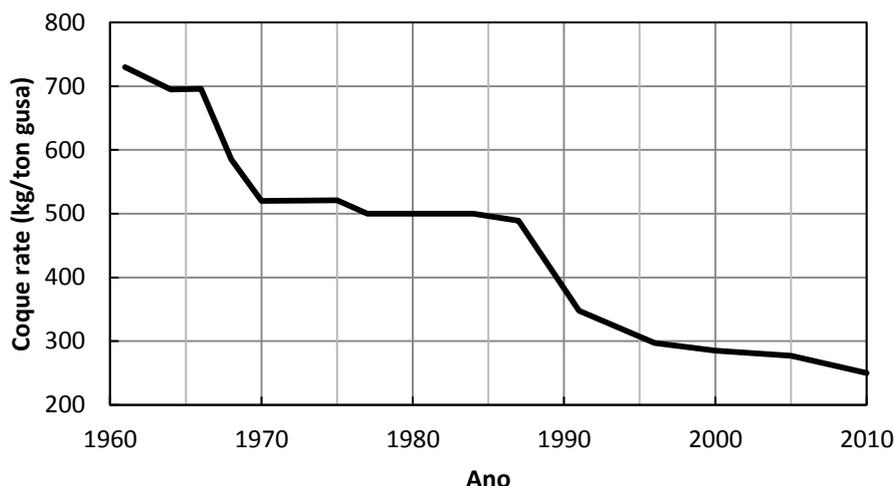
Ao longo do século XX, a evolução dos altos fornos foi significativa. No início deste século, esses aparatos possuíam, por exemplo, cadinhos com diâmetros de cinco

metros e produziam em torno de 100 mil toneladas de gusa por ano. Ao fim do século, o diâmetro médio dos cadinhos aumentou para 15 metros e produziam entre três e quatro megatoneladas por ano (Osório, 2008). Este aumento de dimensões e produtividade reduziu o número de altos fornos no mundo. Na Europa, por exemplo, na década de 1960 havia 60 altos fornos em operação na Bélgica e Luxemburgo. Em 2007, o número foi reduzido para dois (Geerdes, 2008).



**Figura 3. 1 - Esquema representativo da produção de aço pela rota de alto forno (Osório,2008)**

Nas últimas décadas, além do aumento do tamanho dos altos fornos, houve maior diversificação de matérias primas, maior produtividade por meio de altas pressões, maiores temperaturas no preparo das matérias primas e introdução de novas tecnologias. Estas otimizações possibilitaram a redução do *coke rate*, definida como a quantidade, em kg, de coque utilizada para produzir uma tonelada de ferro gusa, conforme representado na Figura 3.2.



**Figura 3.2 - Eficiência energética na siderurgia – adaptado de Bajay (2009)**

O coque atua como combustível das operações de alto forno. Os gastos com este material impactam diretamente no custo final do ferro gusa e as suas propriedades estão diretamente ligadas ao desempenho dos altos fornos, o que resulta em um alto preço no mercado (Tabela 3.2). Desta forma, faz-se necessário um estudo sobre a degradação e segregação, em relação a geração de finos, durante todo o processo de manuseio, transporte e carregamento do alto forno.

**Tabela 3.2 - Evolução da quantidade de coque exportado e preço médio FOB do coque - adaptado de WORLD STEEL ASSOCIATION (2015)**

Ano	2010	2011	2012	2013	2014
Quantidade coque exportado em toneladas	609760,7	729685	521627,6	589184,7	555204,3
Preço médio (FOB) por tonelada (euro)	€ 259	€ 318	€ 253	€ 203	€ 181

### 3.2. Estrutura

O alto forno é o principal aparelho utilizado na metalurgia para a fabricação de aço. A partir de fornos mais primitivos, em que os gases eram dispersos na atmosfera, novas tecnologias foram desenvolvidas e aplicadas a estes aparelhos fazendo com que a capacidade diária de produção seja elevada. Atualmente, alguns fornos produzem 10 mil toneladas de ferro gusa em 24 horas. A estabilidade é um aspecto fundamental na

operação do alto forno. Uma vez iniciada a operação, ela não deve ser interrompida por vários anos.

O alto forno é um reator em contracorrente que promove troca de calor, entre a carga sólida e os gases, sendo que o fluxo de ar quente que queima o coque em frente às ventaneiras é denominado de força impulsora (Geerdes *et al.*, 2007).

Sua estrutura pode ser dividida em seis regiões, como representado na Figura 3.3, onde a parte mais alta é conhecida como Topo e por onde os gases são coletados e enviados para o sistema de limpeza e onde a carga é inserida. Mais abaixo encontra-se a Goela, onde ocorre o pré-aquecimento da carga. As principais reações de redução ocorrem na maior porção do forno, conhecida como Cuba. O Ventre é a região que os gases se expandem e se distribuem através da zona de coesão. As partes mais inferiores do forno são conhecidas como Rampa, é a região acima das ventaneiras, onde ocorre a combustão e localiza-se a zona de coesão. O formato ajuda na sustentação da carga no interior do forno. Por fim, encontra-se o Cadinho onde o material líquido (ferro gusa e escória que se separam por densidade) é armazenado antes de ser vazado. Tem-se a presença de líquidos, sólidos e gases, com a ocorrência de algumas reações (Araújo,1997).

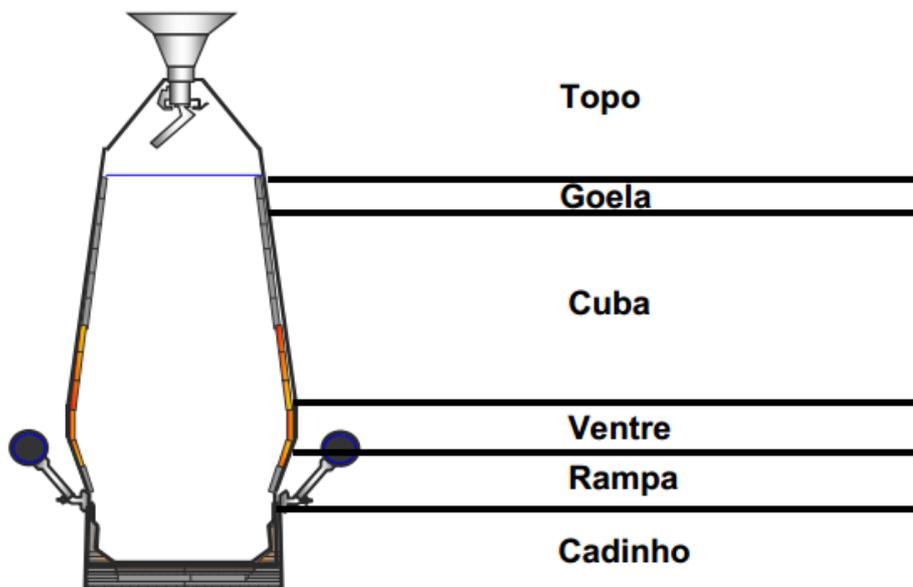


Figura 3. 3 - Corte transversal representando o alto-forno (adaptado de Araújo,1997)

### 3.2.1. Zonas do alto forno

Para entender melhor o funcionamento dos altos fornos, esses reatores foram dissecados em operação inicialmente na URSS, e depois em 1970 no Japão e 1980 na Alemanha. A partir destes estudos os altos fornos foram divididos em cinco zonas internas principais, conforme mostra esquematicamente a Figura 3.4.

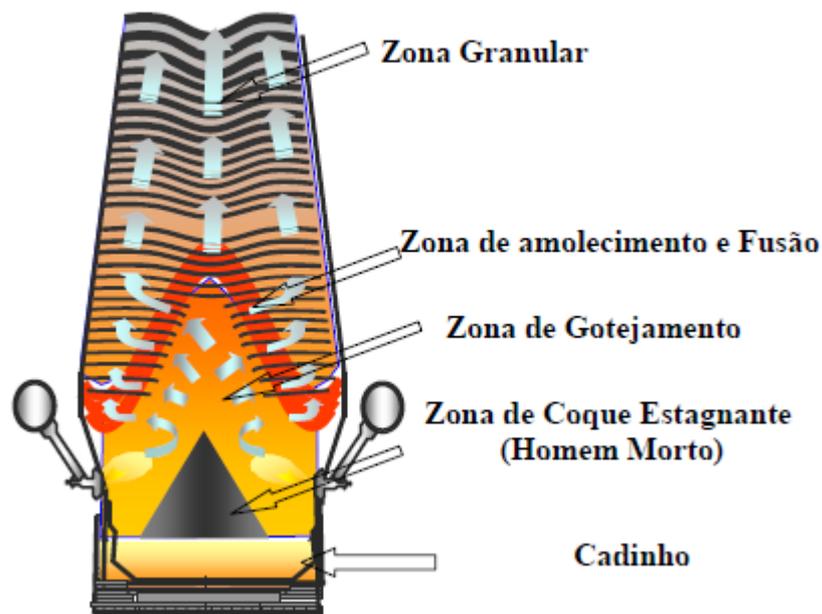


Figura 3. 4 - Corte do alto forno apresentado as regiões internas conforme (adaptado de Araújo, 1997)

- **Zona Granular:** Região onde a carga metálica e o coque descem em contracorrente com os gases. A medida que elas descem, as camadas se tornam mais estreitas, porém mantendo a distinção entre elas.
- **Zona Coesiva ou zona de amolecimento e fusão:** Região onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem, que são praticamente impermeáveis. Nesta região os gases ascendentes passam através do coque.
- **Zona de gotejamento:** Região localizada logo abaixo da zona coesiva, onde o metal e a escória estão líquidos e escoam em contracorrente com os gases através de um empilhamento de coque parcialmente reagido, que não se funde nas temperaturas encontradas nesta região. Esta pilha fornece coque para a combustão nas ventaneiras, conhecida como zona ativa. Na região mais

central encontra-se a zona estagnante (“homem morto”), que praticamente não reage. Nos interstícios entre as partículas de coque é possível encontrar ferro gusa e escória fundidos que atingiram o cadinho gotejando desde a zona de amolecimento e fusão.

- **Zona do *raceway* ou zona de combustão:** Região em frente as ventaneiras, onde ocorre a combustão do carbono do coque da zona ativa com oxigênio soprado. O *raceway* pode ser definido como uma cavidade formada pelo efeito do jato de ar emergido da ventaneira, onde as partículas de coque são circuladas e recirculadas em alta velocidade. É uma região importante, pois o movimento da coluna de carga e distribuição dos gases (desempenho do alto forno).
- **Zona do cadinho:** Região composta pelo empilhamento de coque do homem-morto junto com a escória e ferro gusa depositado no fundo do reator, que serão removidos do forno.

### 3.2.2. Funcionamento do alto forno

#### 3.2.2.1. Matérias Primas

As matérias primas utilizadas no alto forno são minério de ferro, coque e fundentes (formadores de escória). A carga é alimentada com temperatura ambiente e camadas alternadas de coque e minério de ferro, que pode ser utilizado nas formas de granulados, sinter ou pelotas. Sinter e pelotas são aglomerados de finos e apresentam teores de ferro maiores que o material granulado que, por sua vez, possui propriedades mais pobres de degradação sob redução e gera mais finos durante o transporte e manuseio e, por isso é menos utilizado, apesar de ser usado como alternativa barata às pelotas.

A composição da carga metálica é diferente em cada país, na Europa e na Ásia, por exemplo, a carga é composta por sinter, enquanto que na América do Norte e Escandinávia, o minério de ferro é utilizado na forma de pelotas (Geerdes *et al.*, 2007). Os formadores de escória, em geral, calcário e escória de aciaria, são adicionados junto com a carga metálica.

### 3.2.2.2. Operações do alto forno

Os gases e o calor gerado na base do forno, em frente as ventaneiras, têm trajetória ascendente em contracorrente à descida da carga, promovendo aquecimento, redução e fusão da carga metálica. Pelas ventaneiras também são injetados combustíveis auxiliares, geralmente carvão pulverizado. Estas ventaneiras injetam também ar quente. A composição do ar injetado possui 21% de oxigênio, e que pode chegar a 25%, quando enriquecido (Geerdes *et al.*, 2007)

A reação de combustão do carbono em contato com o oxigênio em frente as ventaneiras gera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esta reação é exotérmica e gera gases quentes o suficiente para fundir a carga de minério. O CO<sub>2</sub> então reage com o carbono do coque e forma o monóxido de carbono (CO). Esta reação é conhecida como reação de Bourdouard e está representada pela Equação 3.1:



A umidade contida no ar também contribui para a geração de gases redutores como CO e H<sub>2</sub>. O calor intenso das reações produz uma chama com temperatura em torno de 1800 – 2300°C. A temperatura da chama depende da temperatura e da umidade do ar soprado, além da quantidade de oxigênio e dos agentes de redução (Geerdes *et al.* 2007).

A wustita (FeO), que é o óxido que apresenta menor potencial de oxigênio dos três óxidos de ferro, entra em contato com um gás que apresenta elevado teor de CO, enquanto que a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) são reduzidas, mais acima, por um gás com menor potencial redutor.

Na zona de redução indireta ocorrem as reações indiretas e, caso parte da wustita permaneça não reduzida, ela é posteriormente reduzida por redução direta na região em que as temperaturas excedem 1000°C. Estas reações estão representadas na Figura 3.5 em função da zona de ocorrência.

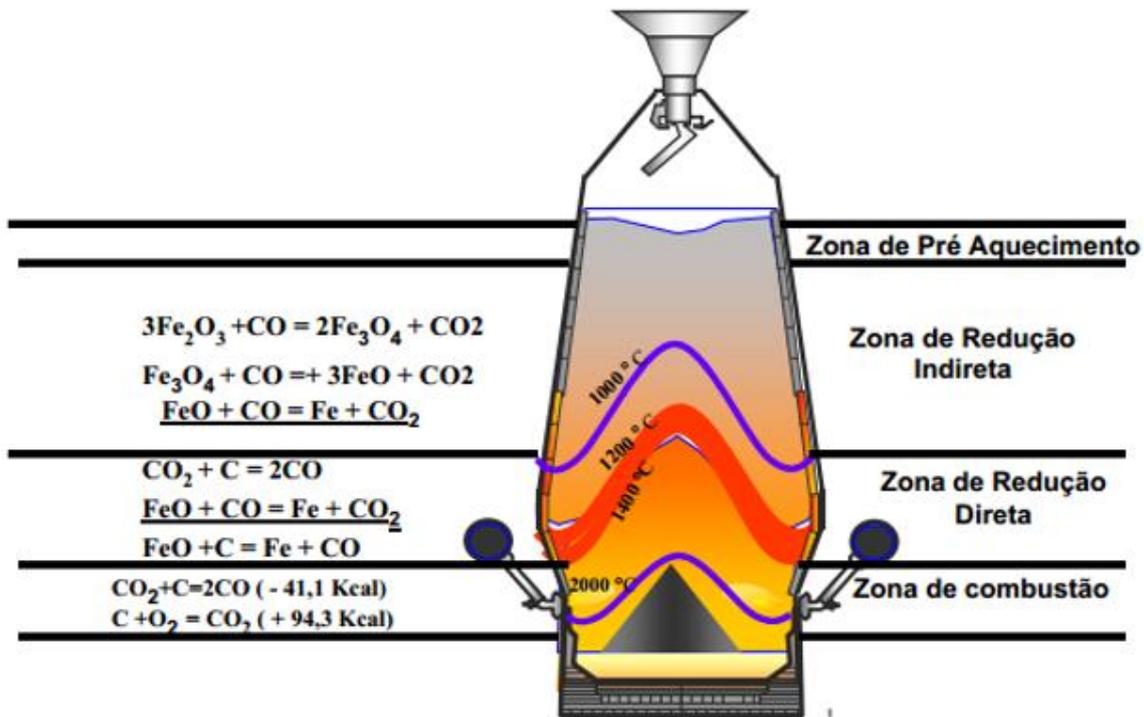


Figura 3. 5 - Reações de redução por zona do alto-forno (adaptado de Araújo, 1997)

À medida que o gás atinge as regiões mais altas do alto forno ocorre perda gradual de temperatura. O calor acima de uma temperatura de 1400°C é transferido para as camadas de carga metálica e de coque, promovendo fusão do minério. O mesmo ocorre para regiões em que o gás apresenta temperatura em torno de 1100°C. No entanto, a energia contida nele é suficiente apenas para o amolecimento do minério. Em regiões mais frias do forno, o gás é capaz de remover oxigênio do material da carga produzindo dióxido de carbono. Quanto mais oxigênio é removido, mais eficiente é o forno (Geerdes *et al.*, 2007).

O ferro gusa líquido produzido é composto por 92 a 95% de ferro, 4 a 5% de carbono, 0,2 a 1,5% de silício e pequenas quantidade de enxofre, manganês e fósforo.

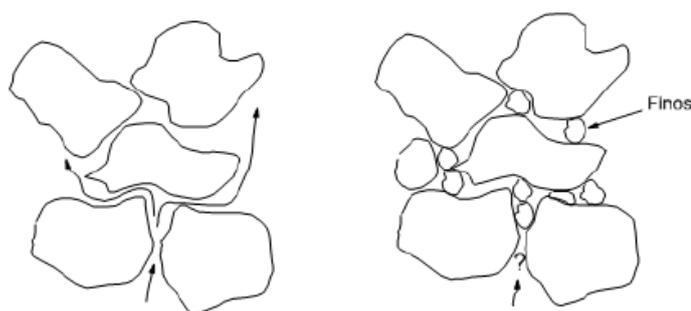
A escória produzida é líquida e composta por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{MgO}$ . A quantidade de cada óxido varia com relação à quantidade e composição química das matérias primas e também com as condições operacionais.

### 3.2.2.3. Permeabilidade e problema de finos

A eficiência do processo de redução está ligada diretamente com a retirada de oxigênio da carga. Quanto mais oxigênio retirado, maior o êxito do processo e isso faz com que seja muito importante o contato do gás com a carga. Sendo assim, a permeabilidade dos gases através da carga de minério deve ser ótima. Por exemplo, a facilidade de passagem dos gases não pode ser muito alta no centro pois faz com que a raiz da zona de fusão se aproxime demais das ventaneiras, consumindo mais combustível e aumentando a chance de danos. Este gás deve se distribuir pelos interstícios do coque até as camadas de carga. A permeabilidade também não pode ser baixa no centro, pois o gás escapará pelas paredes e se resfriará, prejudicando o contato entre o gás e a carga.

Um dos problemas que agravam a movimentação dos gases dentro do alto forno é a presença de finos. Segundo Araújo (1997), o escoamento dos gases é facilitado utilizando matérias primas com a faixas granulométricas estreitas e completamente isentas de materiais com granulometrias mais finas, denominados genericamente de finos, que acabam sendo um fator limitante ao processo. Estes finos tendem a se alojar nos vazios entre as partículas maiores, obstruindo a passagem do gás, conforme mostra a Figura 3.6.

No contexto do alto forno, os finos são considerados como aquelas partículas com granulometria abaixo de 10 milímetros.



**Figura 3. 6 - Diagrama esquemático do escoamento gasoso em um leito de partículas (Bradaschia, 1986)**

Essas partículas de menor granulometria podem ser introduzidas junto com a carga no topo do alto forno e são oriundas dos diversos esforços de queda, abrasão e compressão que as matérias primas sofrem durante o manuseio e carregamento. Araújo (1997) afirma ser essencial que as matérias primas suportem estes esforços

sem sofrer uma degradação significativa. Caso contrário, ocorrerá uma geração intensa de finos, que comprometem o escoamento gasoso no forno.

Além de introduzidos, os finos também são gerados dentro do alto forno com a ação de esforços cisalhantes (abrasão) e de compressão decorrentes das reações de redução. Durante a trajetória descendente da carga metálica ocorre a redução da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) para magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), nesta reação que é exotérmica e, por conseguinte, aumenta a temperatura da carga, tensões são criadas na estrutura cristalina da carga e ocorre degradação do material. Este fenômeno é conhecido como degradação sob redução em baixa temperatura.

Os finos tendem a se concentrar sob o ponto de impacto na superfície da carga (superfície do “homem morto”) e nas proximidades da parede do forno, e isso dificulta o fluxo de gás, prejudicando o aquecimento da carga no topo do forno e a redução da carga metálica, fazendo com que mais finos sejam gerados devido a degradação por redução. A presença de finos em teores acima do suportado pelo leito implicam também em problemas como arreamento de carga e mudança na forma do *raceway* na zona das ventaneiras.

Sendo assim, a permeabilidade da carga é um dos fatores que controlam a estabilidade operacional do alto forno (Monsôres, 2001). Se houver redução da permeabilidade, é sinal que a resistência à passagem do gás aumentou. Para amenizar os efeitos de uma baixa permeabilidade, normalmente aumenta-se a taxa de coque e ajusta-se o padrão de distribuição da carga, pois é necessário evitar queda de temperatura das paredes e perda de calor no interior do forno.

### **3.3. Coqueria**

#### **3.3.1. Matéria Prima: Carvão Mineral**

A matéria prima para a fabricação de coque para os processos de redução é o carvão mineral (Figura 3.7) que constitui uma massa compacta, estratificada, oriunda da deterioração de matérias vegetais. Estas matérias passaram por vários estágios de decomposição consequente de ações geológicas que provocam modificações em suas propriedades físicas e químicas.



**Figura 3. 7 - Partículas de carvão mineral**

Quimicamente ocorrem alterações complexas na estrutura vegetal com desprendimento de umidade, óxidos de carbono e metano, enquanto fisicamente têm-se mudanças de cor (escurecimento) e dureza e o aparecimento de resistência semelhante a minerais (Castro, 2004).

Devido ao maior ou menor tempo a que ficou exposta a decomposição a matéria vegetal dá origem a carvões com diferentes propriedades. A designação de um carvão como coqueificável ou não coqueificável, depende de sua ação quando aquecido em ausência de ar. Se o carvão amolece e eventualmente se solidifica em massa mais ou menos sólida, este é classificado como um carvão coqueificável, mas se este desagrega com o aquecimento ou forma uma massa fracamente consistente, é classificado como não coqueificável.

A matéria volátil do carvão ou do coque é o material liberado, exceto a umidade, quando estes são aquecidos, em ausência de ar, sob temperatura e pressão controladas. É composta de uma grande variedade de hidrocarbonetos, hidrogênio, monóxido de carbono, vapores de alcatrão, dióxido de carbono e água quimicamente liberada. O teor de matéria volátil presente na mistura de carvões tem influência sobre o processo de coqueificação, no que se refere à pressão de operação das baterias de coque, representando uma propriedade de grande importância para o controle do processo. Por esse motivo, visando os quesitos segurança e normalidade operacional das baterias, os carvões podem ser classificados de acordo com o teor de matéria

volátil como: baixo volátil, com pressão na faixa de 1,5 a 2,5 psi; médio volátil, com pressão na faixa de 2,5 a 15,0 psi; e alto volátil, com pressão superior a 15,0 psi (Ulhoa, 2003).

A dificuldade de encontrar um único carvão com todas as características desejadas faz com que, na prática, sejam formadas misturas proporcionalmente adequadas de dois ou mais carvões, produzindo assim coque de qualidade.

No hemisfério norte são encontradas 80% das reservas de carvões do mundo. Os maiores produtores são China, Estados Unidos, Rússia e Austrália (maior exportador de carvão para o mundo). No Brasil apenas o carvão metalúrgico de Santa Catarina é classificado como coqueificável, mas possui elevado teor de cinzas e de enxofre, por isso, é predominantemente utilizado para geração de termoeletricidade. Todo carvão para uso siderúrgico no Brasil é importado (Osório, 2008).

### **3.3.2. Produto: Coque**

Coque é um tipo de material carbonáceo empelotado, sólido, que apresenta textura dura, porosa, de cor cinza-prata e fissuração de diferentes tamanhos (Figura 3.8). Este material é obtido através da retirada de matéria volátil do carvão mineral, quando submetido a altas temperaturas na ausência de oxigênio.

A sua principal aplicação é nos altos fornos de usinas siderúrgicas integradas e desempenha três importantes funções:

- I. Combustível: o carbono do coque quando entra em contato com o oxigênio injetado pelas ventaneiras em altas temperaturas sofre combustão fornecendo calor ao processo.
- II. Redutor: por meio da combustão do coque, gases CO e CO<sub>2</sub> são gerados e quando entram em contato com a carga metálica (minério de ferro) reduzem o ferro até obter-se o ferro gusa.
- III. Permeabilizador da Carga: no seu trajeto descendente no interior do alto forno, o coque deve manter a passagem da corrente ascendente de gases através da carga. O coque é também importante componente estrutural da carga, ocupando maior volume do forno. Mesmo com as altas temperaturas e o peso das camadas de carga, o coque deve chegar ao nível das ventaneiras em condições granulométricas adequadas, pois desta forma será possível a geração de gases.

O coque apresenta características físicas e químicas que devem ser controladas e que são de grande importância para a elaboração de ferro gusa e, conseqüentemente, aço de alta qualidade:

➤ Características físicas:

- Resistência mecânica a frio
- Resistência mecânica a quente
- Permeabilidade e dureza
- Distribuição granulométrica
- Teor de umidade (%H<sub>2</sub>O)

➤ Características químicas:

- Teor de cinzas
- Teor de enxofre (S), fósforo (P), carbono total (C<sub>Total</sub>)
- Teor de voláteis



Figura 3. 8 - Partículas de coque

### 3.3.3. Tipos de Coqueria

Atualmente a produção de coque metalúrgico ainda é proveniente, principalmente, de baterias convencionais do tipo *by-products*, em fornos verticais. O segundo método mais utilizado é o *heat recovery* em países como, por exemplo, EUA, China e Brasil.

Segundo Valia (2008 *apud* da Silva, 2008), geralmente a qualidade do coque produzido em uma coqueria do tipo *heat recovery* será superior ao coque produzido por uma mesma mistura de carvões em uma bateria convencional. Esta diferença ocorre devido a diferenças em parâmetros fundamentais da coqueificação, como por exemplo, temperatura e tempo. Nas baterias *heat recovery*, a coqueificação é feita em geral em 48 horas (podendo chegar a 69 horas em algumas plantas) em fornos com temperatura de 1450°C e tempo de super-coqueificação de 2 horas, enquanto que em baterias convencionais a coqueificação ocorre em 16 horas em fornos com temperaturas de 1350°C e tempo de super-coqueificação de 1 hora.

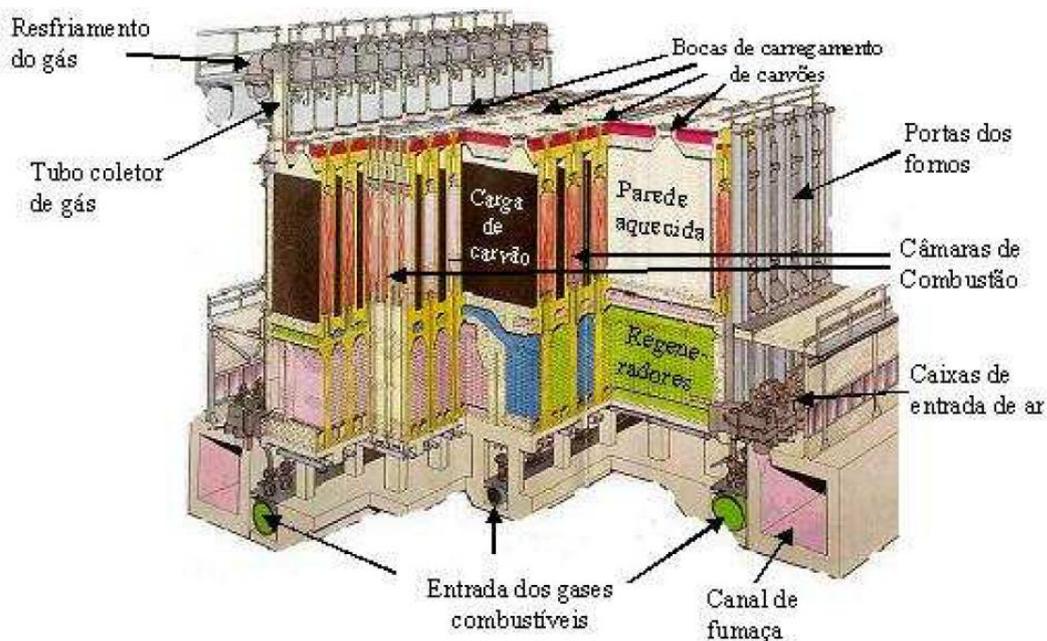
### 3.3.3.1. Coqueria Convencional

As baterias convencionais são conhecidas como baterias de fornos verticais. São do tipo *byproduct*, pois permitem o aproveitamento dos subprodutos. Os fornos têm altura entre 4 e 8 metros, comprimento entre 10 e 30 metros e largura entre 250 e 1000 milímetros. Os fornos possuem também entre três e cinco bocas pelas quais a mistura de carvões é carregada pelos carros de carregamento no topo da bateria, em fornos verticais que são aquecidos indiretamente pelas paredes laterais. Uma das características marcantes destas baterias é o aproveitamento dos gases gerados pela coqueificação em forma de gás de coqueria, alcatrão, piche, amônia, BTX e outros subprodutos, que podem ser usados como combustíveis (Costa *et al.*, 2003).

Em condições operacionais normais, os fornos são aquecidos com gás misto, o qual é injetado em uma rede de dutos e estes, por sua vez, são conectados aos regeneradores, que alimentam dois fornos de coqueificação adjacentes. Sua função é absorver calor dos gases queimados e, posteriormente, ao inverter o fluxo dos gases, eles servem para aquecer o ar que será usado para combustão (Casagrande, 2010).

As camadas de combustão de um gás localizam-se entre as paredes de fornos adjacentes, o que mantém as paredes dos fornos a uma temperatura exigida pelo processo.

A Figura 3.9 representa uma bateria com fornos “*underjet*”, onde o gás, quando utilizado puro para aquecimento, entra por um duto a partir do subsolo até a base da câmara de combustão. Porém existe também a bateria de fornos “*guntipe*”, na qual o gás de coqueria entra lateralmente por cima dos regeneradores e é distribuído pelas câmaras de combustão por um duto abaixo da soleira dos fornos.



**Figura 3. 9 - Esquema de uma bateria convencional (Costa et al.2003)**

Conhecidos como baterias de fornos horizontais, este tipo de bateria, além de não recuperar os subprodutos, direciona o gás residual para a caldeira de recuperação de calor, convertendo o excesso de calor em vapor para geração de energia.

Os fornos são agrupados de modo a formar uma unidade de produção (Figura 3.10). Existem inúmeros projetos com concepções diferentes, cada uma com vantagens operacionais e comerciais. Os fornos atuais atingem um volume útil de 80m<sup>3</sup>, que corresponde a cerca de 50 toneladas de coque, e as dimensões podem ser de 18m de comprimento, 7,6m de altura e 620mm de largura média. Os fornos são separados dos seus vizinhos por paredes feitas de tijolos de sílica, compostas por diversas câmaras de combustão (Figura 3.11). Com exceção das paredes mais externas da bateria, cada uma supre calor para dois fornos (Costa et al. 2003).

Durante o processo de coqueificação são gerados gases que serão utilizados para aquecimento do forno. Estes fornos apresentam tratamento dos fumos da combustão e aproveitamento do calor para a geração de energia elétrica. A mistura de carvões para o forno *Heat Recovey* deve ter entre 24 e 27% de matéria volátil, para gerar gás suficiente para a coqueificação sem superaquecer o forno. Com a modernização das máquinas móveis utilizadas para enforamento e desenforamento, aumentou-se a produtividade da usina. Em algumas plantas existe o compactador de mistura antes do enforamento, aumentando a qualidade do coque, com a possibilidade de utilização de carvões mais baratos.



Figura 3. 10 - Vista lateral de fornos tipo *Heat Recovery* (Geerds, 2008)

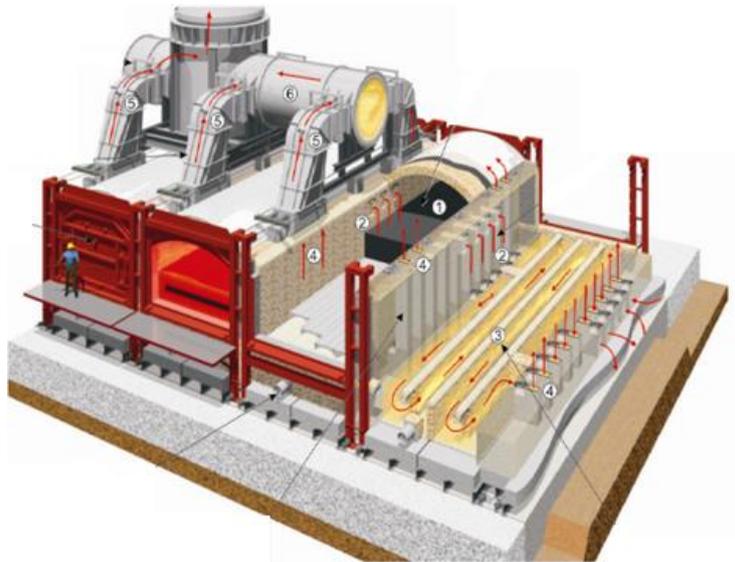


Figura 3. 11 - Esquema de fornos da bateria *Heat Recovery* (Casagrande, 2010)

O processo dessa bateria consiste em utilizar o gás bruto gerado durante a coqueificação. Este gás é queimado utilizando ar que entra pelas janelas das portas do forno e também por janelas nos dutos sob a soleira do forno. Parte do carvão também queima nesse processo. Por isso existe uma diferença de aproximadamente 3% entre o rendimento com processo *byproduct* e o *heat recovery*. Os fumos resultantes dessa queima são captados por dutos acima ou embaixo dos fornos e encaminhados para caldeiras nas partes centrais das baterias de fornos. Essas caldeiras enviam o vapor produzido para uma central termelétrica que gera energia elétrica. Os fumos resfriados após saírem das caldeiras são tratados em filtros de manga e também recebem tratamento para retirada do enxofre.

O controle do processo dessas plantas é feito com base na temperatura do domo dos fornos medido por termopar nessa região. As janelas de entrada de ar na porta dos fornos e na região abaixo da soleira possuem escotilhas que servem para regular manualmente a entrada de ar.

As misturas de carvões chegam a ter dez tipos de carvão diferentes. Com o intuito de obter um coque de qualidade uniforme, em que as partículas são bem fundidas é necessário moer os carvões em tamanhos adequados. Sendo assim, faz-se necessário um acompanhamento rigoroso desta etapa. Em países como EUA e França, mais de 65% das partículas são utilizadas com granulometria abaixo de 2 milímetros (Loison, *et al.*, 1989 *apud* Casagrande, 2010). Em algumas siderúrgicas os carvões sofrem britagem seletiva, ou seja, todos os tipos de carvão passam pelo mesmo britador e apresentam a mesma faixa granulométrica.

A máquina de enformamento é abastecida com a mistura de carvão nas torres pelos silos de dosagem. Os silos apresentam dosadores automáticos e sistemas de sopro de ar comprimido para evitar que haja obstrução em suas saídas. O material é então distribuído em uma matriz em camadas. Em algumas usinas existem compactadores de mistura que prensam as camadas, fazendo com que o material fique compactado em uma espécie de bloco. Esta compactação faz com que a massa preencha todo o volume útil do forno. Além disso, permite que à mistura de carvão sejam adicionados “carvões soft”, não coqueificáveis e de baixo custo, barateando a produção.

O bloco compactado é empurrado para dentro do forno pela máquina de enformamento. Dentro do forno a queima do gás gerado da mistura de carvões ocorre parcialmente na parte superior do forno e acaba de queimar nos labirintos sob a soleira do forno. A fumaça resultante da queima da matéria volátil é captada por dutos na parte superior do forno e é levada até as caldeiras. Na caldeira a fumaça gera vapor. Uma parte é utilizada para gerar energia elétrica utilizando turbinas ou em outras atividades na usina, como secagem do carvão para a mistura. O tempo de coqueificação é variável e depende de alguns parâmetros como umidade da mistura de carvão, sucção do forno, etc. Em geral é necessário em torno de 48 horas, em algumas usinas pode chegar a 69 horas. Após o término da coqueificação a massa deve ficar no forno por algumas horas para que o calor no bloco fique o mais homogêneo possível. Após este tempo o bloco incandescente de coque é empurrado para fora do forno e recebido pelo carro de apagamento do outro lado do forno. O bloco de coque é transportado até a torre de extinção, onde é apagado uniformemente com água ou a seco.

No caso do apagamento a úmido, é possível ver quando o tempo de coqueificação não foi completo pela queima da massa que está sendo despejada na rampa. Uma chama mais intensa indica que ainda há carvão na mistura, além disso quando ela cai na rampa pode haver explosão devido ao contato da matéria volátil com o oxigênio. Outro fator importante é a cor da fumaça. A cor mais natural é a branca, porém há situações que ela pode sair azul, indicando CO/CO<sub>2</sub> ou amarela indicando enxofre e matéria volátil

Após o apagamento, o coque é basculado na Rampa de Coque e levado à estação de peneiramento para classificação granulométrica. As partículas maiores que 90 milímetros são britadas. O coque que passou pela primeira peneira e os reduzidos passam por uma segunda peneira de 63 milímetros e o passante é enviado para o alto forno ou para estocagem, por meio das correias transportadoras.

O fluxograma do processo de uma bateria *heat recovery* está representado na figura 3.12:

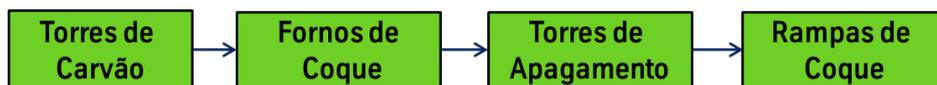


Figura 3. 12 - Fluxograma do processo de uma bateria *Heat Recovery*

### 3.3.4. Coqueificação

A coqueificação é o fenômeno que ocorre quando uma mistura de carvões com características adequadas a destilação é submetida a temperaturas elevadas em câmaras com ausência de oxigênio. Durante este processo, o carvão é decomposto pela divisão de moléculas orgânicas complexas produzindo gases (matéria volátil) e produtos orgânicos sólidos e líquidos de baixo peso molecular (ex.: gás de coqueria, alcatrão e óleos leves). O resíduo sólido, carbonoso, macroporoso, de alta resistência mecânica e infusível é denominado coque.

O processo de coqueificação ocorre de forma dinâmica dentro do forno. Em primeiro lugar, a temperatura da parede de aquecimento não é constante ao longo do tempo de coqueificação. Como o aquecimento dessas paredes é feito com um fluxo constante de calor, ao enfiar uma massa fria dentro do forno, há uma queda da temperatura a um valor mínimo e seguido de aumento no final da coqueificação. Outro aspecto importante é a dinâmica de formação da zona plástica e o fluxo do material volátil, do

vapor de água e do alcatrão ao longo do processo de coqueificação. As várias etapas da pirólise da mistura de carvão ocorrem ao mesmo tempo. A fase plástica forma um envelope que vai fechando com o passar do tempo. Do lado externo do envelope forma-se o semicoque e do lado interno ainda há carvão úmido. Parte dos gases que se formam, saem pelo lado quente, ou seja, o lado externo do envelope plástico e caminham junto à parede aquecida até o topo do forno. A outra parte segue em direção ao centro do forno e ao encontrar as partículas frias do carvão ocorre a condensação tanto do vapor d'água quanto do alcatrão gerado. Ao final da coqueificação, o envelope se fecha no centro e toda a massa enfiada se transforma em coque. A condutividade da massa de carvão é diferente daquela da fase plástica e esta também é diferente da condutividade do semicoque. Como há o deslocamento do envelope plástico, a espessura de cada camada varia com o tempo e assim há uma variação dinâmica da taxa de transferência de calor ao longo do tempo e da distância em relação ao centro do forno.

As reações de pirólise são endotérmicas até em torno de 600°C e exotérmicas a partir desta temperatura. Junto com esses fatores, a transferência de calor ocorre de diversas formas, por condução, convecção e radiação.

As principais etapas da coqueificação são:

1ª Etapa: durante o aquecimento da massa até 350°C ocorre a perda de umidade (entre 100 e 120°C) e o início da desvolatilização do carvão

2ª Etapa: conhecida como fase plástica, ocorre entre 350 a 500°C, a desvolatilização continua junto com decomposição do carvão em alcatrão e gases formando uma pasta que envolve as partes sólidas diluídas pelo líquido formado. Nesta etapa ocorre a primeira contração da massa.

A estrutura do carvão oferece resistência à liberação dos gases durante a desvolatilização, provocando a expansão da massa que, por sua vez, pressiona as paredes do forno (no caso de baterias convencionais) podendo provocar problemas. Esta condição está ligada diretamente a velocidade que os gases são liberados.

3ª Etapa: durante a última etapa do processo, que ocorre a partir de 500°C, com o aumento da temperatura há perda de mais matéria volátil (gases ricos em hidrogênio e pobres em metano) e inicia-se a resolidificação, contração (ocasionada pela perda de peso e aumento da densidade) e trincamento da pasta, formando semicoque e por fim, o coque.

Este bloco de coque é mantido dentro do forno por algumas horas para que a temperatura da massa seja uniformemente homogeneizada, equalizando suas propriedades físicas e químicas.

### **3.4. Fratura de partículas**

Nas siderúrgicas, o coque, assim como as pelotas, sinter e granulados, é manuseado em forma granular. Após saírem dos fornos da coqueria, os blocos de coque seguem para uma etapa de redução granulométrica para tamanhos de partículas inferiores a 63 milímetros. A variabilidade na distribuição de tamanhos implica em variações no comportamento mecânico. Desta forma, a análise do comportamento do coque durante os diversos impactos sofridos durante o transporte, manuseio e carregamento no alto forno, representa uma importante ferramenta na avaliação de sua resistência à fragmentação.

#### **3.4.1. Mecânica da Fratura**

Quando um sólido é submetido a um impacto ou qualquer outro tipo de esforço ele se deforma. As deformações são classificadas em dois tipos: as elásticas e as inelásticas.

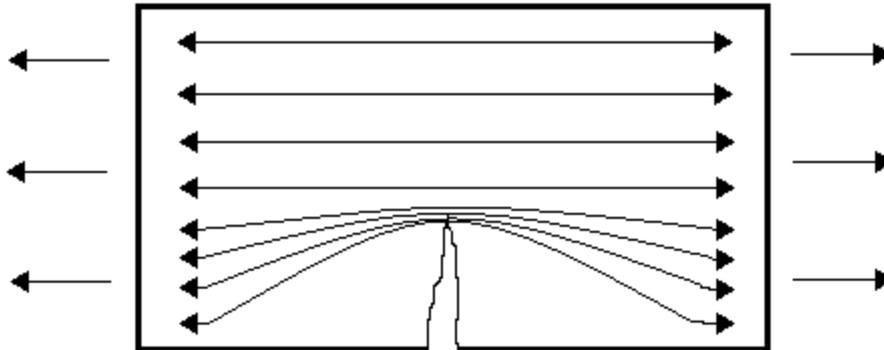
Elástica: o material reage somente em relação ao esforço atuante e recupera totalmente a energia oriunda da deformação após o descarregamento. Sendo assim, não há perda de energia.

Inelástica: o material sofre deformação permanente e só recupera parcialmente a energia usada na deformação. A outra parcela desta energia foi transformada em mecanismos de rearranjos internos de sua estrutura e, com isso, não é recuperável (Tavares, 2004). Logo, há perda de energia.

Deformações elásticas e inelásticas representam os mecanismos que o sólido (e a sua estrutura interna) dispõe de armazenar ou dissipar a energia mecânica aplicada sob a forma de esforços. Quando os esforços aumentam além de certo ponto, o sólido não resiste e a ruptura ocorre (Tavares, 1997).

O coque apresenta em sua estrutura micro e macro-defeitos, como por exemplo, poros, trincas e fissuras que governam todo o processo de fratura. Isso faz com que a tenacidade deste material seja reduzida.

Na mecânica da fratura clássica, o modelo baseado na teoria de Griffith (1920) descreve um balanço energético do aumento do tamanho de um defeito presente em um sólido elástico durante seu carregamento. Quando um material que contém uma trinca (defeito) é tensionado, esta trinca age como um concentrador de esforços em sua extremidade resultando em sua propagação através da criação de novas superfícies (Silveira, 2012). A Figura 3.13 mostra um esquema representando esse fenômeno no qual as setas indicam os esforços impostos ao material.



**Figura 3. 13 - Concentração de esforços na extremidade de uma trinca (Silveira,2012)**

Segundo Griffith, uma trinca irá propagar se a liberação de energia elástica de deformação for maior que a energia necessária para gerar duas novas superfícies (King, 2001).

Poros e trincas, podem dissipar a energia de deformação, interrompendo o crescimento da trinca responsável pela ruptura do sólido. Neste caso, a fratura só irá ocorrer quando essas trincas coalescerem, produzindo uma trinca que irá aflorar à superfície, criando uma fratura macroscópica. Apesar da fratura primária chegar a superfície, ainda pode haver um segundo estágio de dissipação de energia residual, que resulta em projeção das partículas.

### **3.4.2. Processo de fragmentação das partículas**

O estudo de materiais particulados envolve uma abordagem diferente das usadas na mecânica da fratura e na resistência dos materiais, uma vez que, partículas não possuem formatos regulares dificultando o conhecimento das distribuições internas dos esforços. Ocorre basicamente pela imposição de esforços compressivos gerados por meio de um impacto. Durante o impacto, a partícula é submetida, em seus polos de contato, a intensos esforços de compressão e cisalhamento. Estes são gerados

internamente na partícula e provocam a fragmentação e deformações inelásticas. Mais precisamente, em uma região de alta densidade de energia de deformação da partícula na qual, abaixo desta, começam a surgir esforços de tração que se estendem até o polo oposto de aplicação da carga. É nesse ponto, ou em uma trinca já existente, que se inicia uma ou mais fraturas da partícula (King, 2001).

A energia de fratura da partícula, em geral, é maior do que aquela envolvida na propagação da trinca, de forma que a energia residual aparece como energia cinética de partículas secundárias, geradas na fragmentação primária que podem sofrer novas fragmentações (Tavares, 2007). Esta energia ao ser dissipada, faz com que as partículas sejam projetadas.

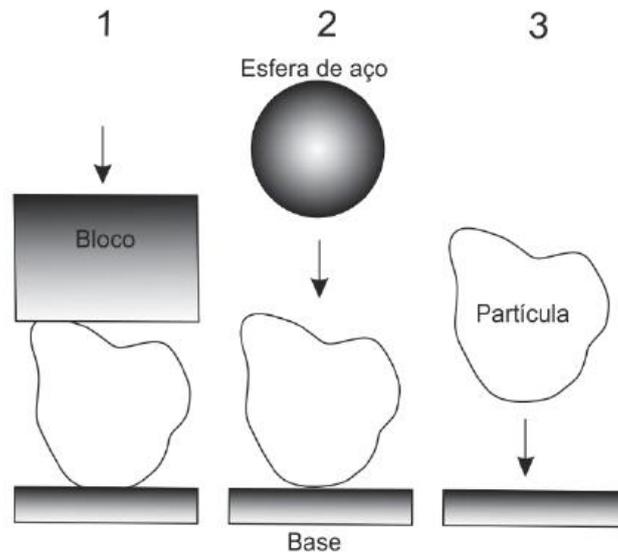
A fragmentação de partículas pode ocorrer de duas maneiras diferentes:

Quebra interparticular: ocorre quando uma partícula sofre compressão em diversos pontos da sua superfície, como por exemplo, o coque estocado em um silo. Somente as partículas que atingem o limite de tensão crítico são fragmentadas.

Quebra de partículas individuais: ocorre quando as partículas sofrem esforços individualmente, como por exemplo, durante o carregamento de um alto forno. Este mecanismo pode ser classificado com base no número de contatos da partícula, na velocidade e na forma como o carregamento é executado. Os três tipos possíveis de carregamento estão representados na Figura 3.14:

Nos ensaios de compressão, as partículas são fraturadas com carregamento lento e controlado como ocorre em prensas de compressão uniaxial. Já nos ensaios de impacto duplo, duas superfícies exercem forças de compressão com uma taxa de deformação moderada. Um exemplo que pode ser citado é a queda de um peso sobre uma partícula.

Nos ensaios de impacto simples as partículas são submetidas a queda livre, na qual a energia aplicada é a energia potencial da altura que a partícula foi solta, ou submetidas a lançamento de partícula sobre uma superfície rígida, onde a energia do impacto corresponde a energia cinética da partícula imediatamente antes de colidir contra a superfície de impacto



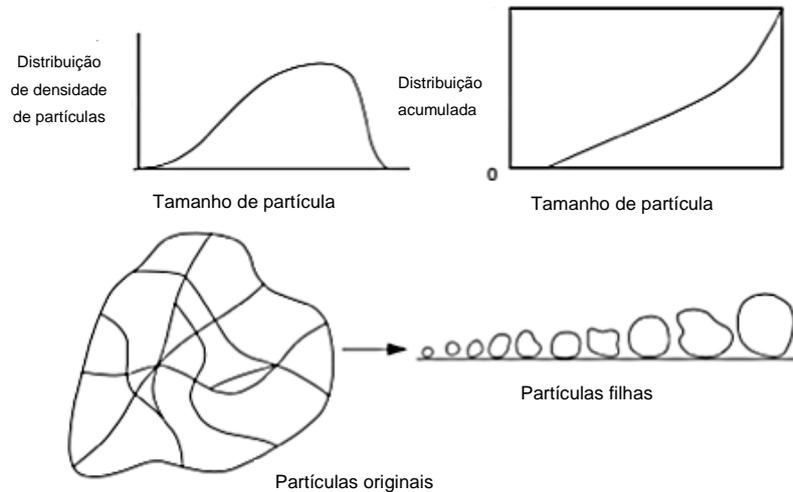
**Figura 3. 14 - Carregamento de partículas individuais: 1) compressão lenta; 2) impacto duplo; 3) impacto simples.**

A fragmentação das partículas depende da direção e intensidade dos esforços aplicados (Tavares, 2005). Estes esforços podem ser normais, causados por compressão (rápida ou lenta), e tangenciais, causados por cisalhamento. A fragmentação pode ser volumétrica ou superficial:

Fatiga Volumétrica: é relacionada ao estilhaçamento. Ocorre quando altas energias são aplicadas sob ação de esforços compressivos, fazendo com que a partícula quebre em um amplo intervalo de tamanhos de fragmentos. Após a primeira fratura, diversas fraturas secundárias ocorrem gerando novas partículas filhas até que a energia disponível para a fratura seja dissipada. Este mecanismo acontece com alta velocidade e por isso parece ser apenas um evento único.

A população de partículas filhas é composta por um número de subpopulações, oriundas da partícula original e que são resultados de quebras sucessivas. A distribuição de tamanho das partículas filhas será usada como base para modelos de funções de quebra (King, 2001).

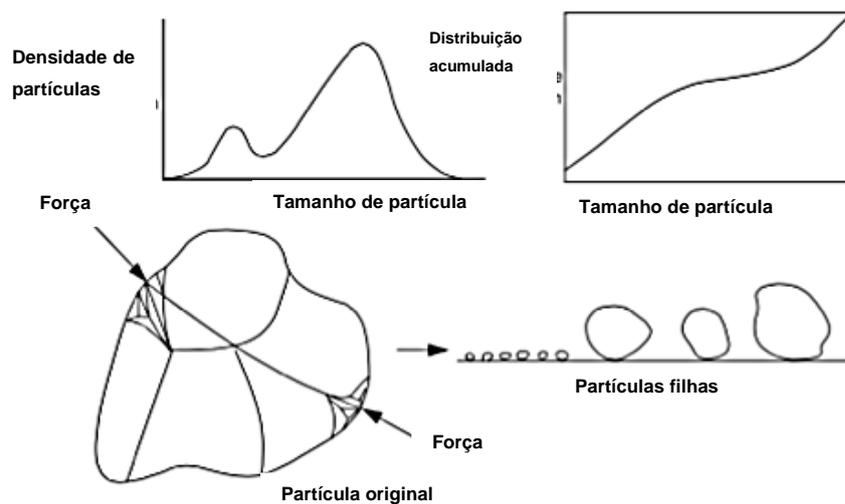
No gráfico de densidade de partículas por tamanho da partícula (Figura 3.15) pode-se ver uma distribuição mais heterogênea de tamanho das partículas, sem picos característicos como visto na quebra superficial.



**Figura 3. 15 - Mecanismos de fragmentação de partículas – fratura por estilhaçamento (modificado de King,2001)**

Outra forma se dá pela clivagem que ocorre quando baixas energias são aplicadas, resultando em fragmentos grossos e partículas finas próximo aos pontos de aplicação dos esforços. Isto acontece devido à presença de caminhos preferenciais ao longo do qual a fratura tem maior probabilidade de ocorrer.

O gráfico de densidade de distribuição granulométrica começa a apresentar alguns picos (Figura 3.16), pois a granulometria das subpopulações de partículas filhas passam a ser mais estreitas, diferentemente do estilhaçamento.

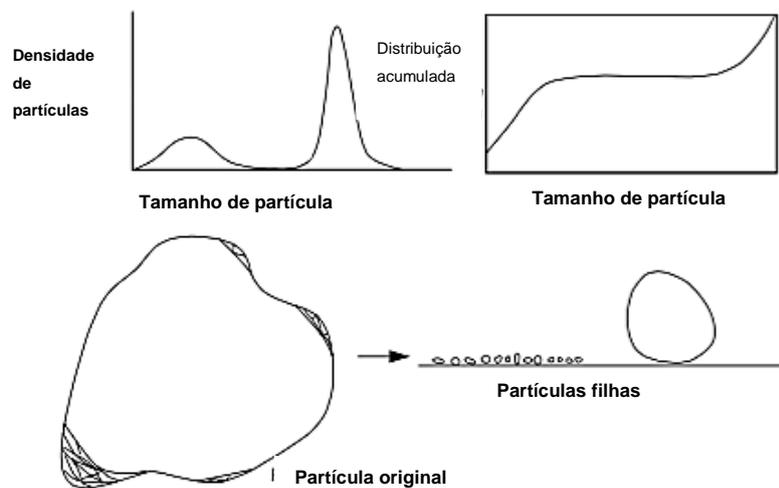


**Figura 3. 16 - Mecanismos de fragmentação de partículas – Fratura por Clivagem (modificado de King,2001)**

Fratura Superficial: é relacionada à abrasão ou lascamento, e ocorre quando os esforços normais não atingem valores críticos para a fragmentação total ou aplicação

de esforços cisalhantes na superfície da partícula causando quebra superficial. As partículas originais apresentam uma pequena redução de granulometria, mas as partículas filhas que são geradas são muito menores que as originais.

A distribuição de tamanhos de partículas característico deste tipo de quebra apresenta dois picos bem distintos. Um representará as partículas filhas e o outro as partículas originais, algumas destas passam a ter tamanho muito próximo do original quando sofrem lascamento. No exemplo apresentado na Figura 3.17 não há geração e partículas com tamanhos entre os picos que representam as frações grossas e finas respectivamente. Na forma acumulada, esta região intermediária é representada por uma linha horizontal reta, característica de produto de abrasão.



**Figura 3. 17 - Mecanismos de fragmentação de partículas – Fratura por Abrasão (modificado de King, 2001)**

### **3.4.3. Modelagem matemática da quebra de partículas**

Para entender a maneira como as partículas sofrem degradação são necessários modelos matemáticos e resultados de medidas que permitam avaliar essa suscetibilidade à degradação. Estes modelos são capazes de prever a degradação de partículas de coque, minério de ferro e pelotas, durante seu manuseio e transporte, e utilizar novas técnicas de caracterização que alimentem esses modelos.

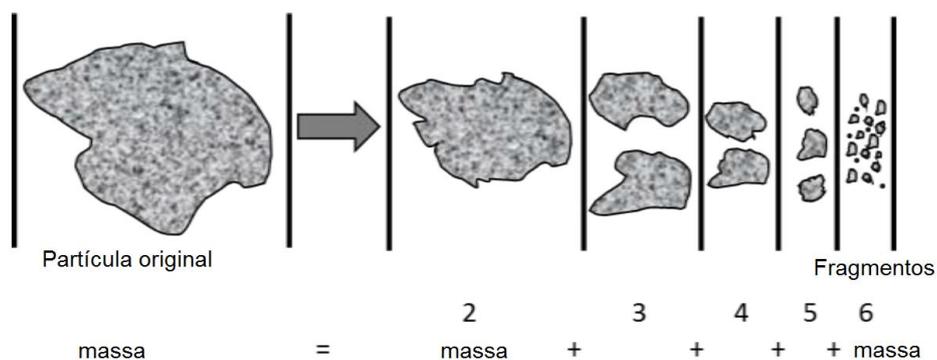
Pesquisadores como Teo e Waters (1988), Weedon e Wilson (2000), Sahoo (2007), entre outros, propuseram, ao longo de décadas recentes, novas metodologias e modelos matemáticos que pudessem ser utilizados para prever a ação deste fenômeno não só para pelotas, mas também para minérios. Infelizmente, estas

metodologias ainda não demonstraram ser capazes de fornecer previsões com a fidelidade desejada (Tavares e Carvalho, 2008).

No intuito de preencher esta lacuna, foi desenvolvido um modelo matemático de degradação no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ (Tavares e Carvalho, 2008), o qual sugere caracterizar a susceptibilidade do material à degradação, por meio do enfraquecimento contínuo, devido à aplicação repetida de esforços mecânicos, por meio da utilização do modelo da mecânica do dano (Tavares e King, 2002). Desafios foram, desde o início, identificados na sua aplicação a pelotas e ao coque, pois embora promissor, o modelo foi desenvolvido, originalmente, para granulados de minério. Além disso, o modelo demanda uma série informações sobre as características de quebra das pelotas que os ensaios de rotina usuais de monitoramento qualidade não fornecem (Cavalcanti, 2015).

### 3.4.3.1. Energia de Fratura

A fratura de partículas pode ser definida como a energia aplicada a uma partícula sólida que causa perda de massa da partícula original, gerando partículas filhas ou fragmentos (Carvalho, 2014), assim como representado na Figura 3.18:

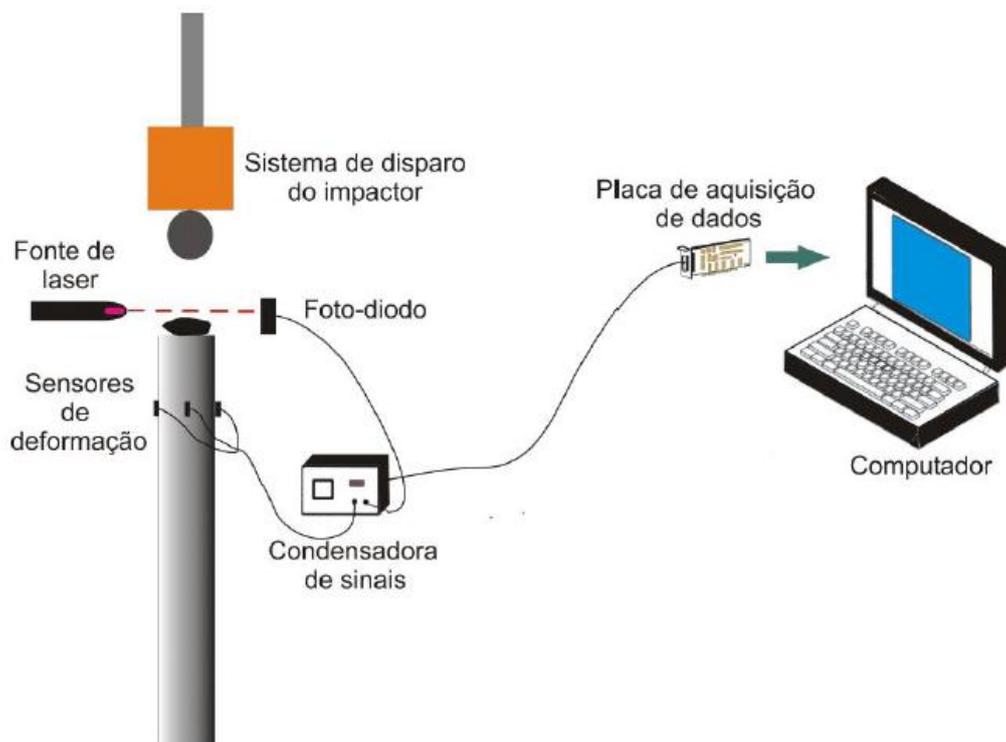


**Figura 3. 18 - Exemplo de quebra de partícula mãe e geração de partículas filhas (Carvalho, 2014)**

Dependendo do modo de aplicação de energia, uma partícula pode ou não fraturar. Cada partícula tem suas próprias características, tais como forma, tamanho e estrutura interna. O comportamento delas quando submetidas a diferentes energias já foi investigada por diversos autores, tais como King (2001), Austin e Concha (1994), entre outros (Carvalho, 2014).

Segundo Tavares (1997), existe uma variabilidade intrínseca relacionada a fratura em populações de partículas. Ou seja, em partículas do mesmo material, faixa granulométrica é possível encontrar uma grande variabilidade de partículas com diferentes resistências, sendo algumas mais fáceis que quebrar que outras. Esta é uma das maiores dificuldades encontradas para caracterizar a energia necessária para quebrar uma partícula.

Tendo em vista esta limitação, a caracterização em microescala de partículas individuais para entender a quantidade de energia necessária para a quebra tornou-se importante. Para isso foi utilizado a Célula de Carga de Impacto (CCI), criado por Weichert e Herbst (1986) representada na Figura 3.19, para medir a resistência de cada partícula em situações semelhantes às de quando sofrem esforços mecânicos durante as operações.



**Figura 3. 19 - Esquema da Célula de Carga de Impacto (Tavares, 2007)**

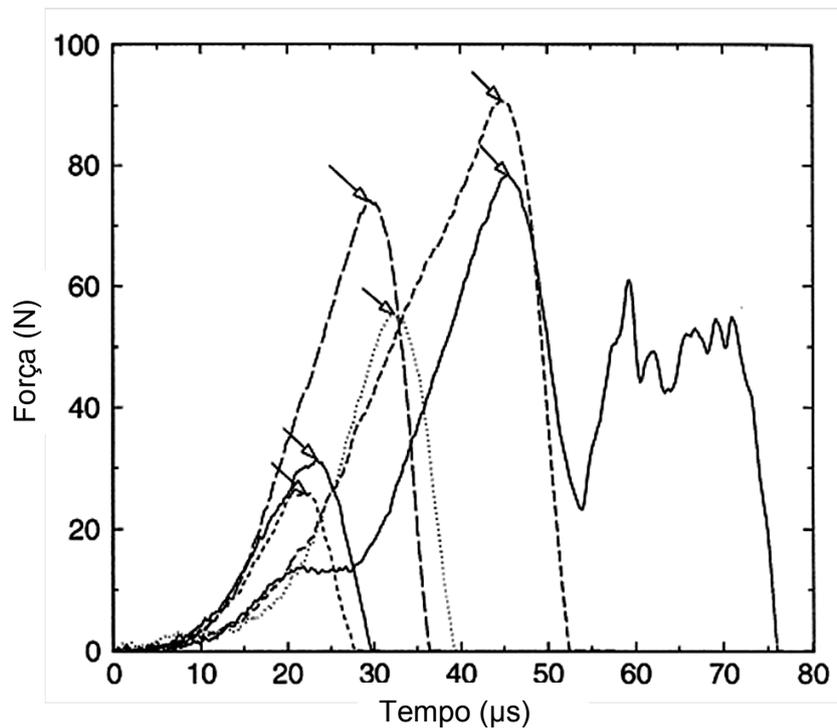
O experimento consiste na quebra de partículas individuais como resultado da simulação da queda de uma esfera de aço sobre a partícula descrevendo um processo de fragmentação e cada experimento consiste na utilização de 50 a 100 partículas contidas em um intervalo estreito de tamanho. As ondas mecânicas do choque se propagam pelo sensor de deformação. Os *strain gauges* instaladas no sensor de deformação transferem os dados para a placa de aquisição de dados e o aparelho

curvas de tempo-força, como mostrados na Figura 3.21. Estas curvas são descritas como a energia específica de fratura da partícula através da Equação 3.2:

$$E = \frac{1}{m_p} \left[ v_0 \int_0^{t_c} F(t) dt + g \int_0^{t_c} F(t) t dt - \frac{1}{2m_b} \left( \int_0^{t_c} F(t) dt \right)^2 - \frac{1}{\rho C A_c} \left( \int_0^{t_c} F^2(t) dt \right) \right] \text{ (Eq. 3.2)}$$

Onde  $t_c$  é o instante de tempo no qual a partícula sofreu a fratura primária,  $m_p$  é a massa da partícula,  $m_b$  é massa da bola,  $v_0$  é a velocidade do impacto,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $A$  é a área da seção transversal da barra,  $\rho$  é a densidade da barra e  $C$  a velocidade de propagação da onda na barra (Tavares, 2007, Tavares e King, 1998, Tavares e King, 2004 *apud* Carvalho, 2014).

As setas indicadas na Figura 3.20 mostram o instante de tempo em que ocorreu a fratura de uma determinada partícula. Além disso, uma significativa variação nos resultados das curvas força-tempo para partículas de mesma faixa granulométrica



**Figura 3. 20 - Curvas força-tempo obtidas com o ensaio no CCI em partículas de quartzo (Tavares e King, 1998)**

Segundo Tavares (2009), quanto menor a granulometria de materiais frágeis, como os coques, maior a energia específica de fratura. Sendo assim, espera-se que as partículas com maior granulometria apresentem maior proporção de quebra, enquanto

que as de menor granulometria sejam as mais resistentes. Este efeito do tamanho de partícula na energia de fratura é evidenciado na Figura 3.21 que mostra a compilação de resultados da caracterização de partículas de minérios de cobre em diferentes faixas granulométricas utilizando a Célula de Carga de Impacto.

A Figura 3.22 mostra o resultado de ensaios de impacto de 100 partículas de calcário com granulometria entre 4,5 - 3,75 mm na CCI. As distribuições dos valores das energias de fraturas das partículas de um dado tamanho são modeladas por uma distribuição estatística apropriada, com o intuito de obter os parâmetros estatísticos relevantes da amostra, tais como variância e mediana. Os melhores resultados na descrição de resultados de testes com a CCI são obtidos com a distribuição log-normal (Silveira, 2010), proposta por Tavares e King (1998) que, no caso da distribuição de energias específicas de fratura, é dada pela Equação 3.3:

$$F_j(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E_m - \ln E_{m50,j}}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde  $E_{m50,j}$  é a mediana da distribuição e  $\theta^2$  é a variação da distribuição e  $E_m$  é a energia específica de fratura.

$E_{m50,j}$  é a mediana da energia específica de fratura de partículas de tamanho  $j$  e representa a energia necessária para quebrar 50 das partículas de tamanho  $j$  com apenas um impacto.  $E_m$  é expresso em termos de energia específica representada pela razão entre a energia ( $E$ ) e a média das massas das partículas de tamanho  $j$  ( $M_{p,i}$ ), que para formas irregulares de partículas pode ser descrita pela Equação 3.4 (Carvalho, 2014):

$$M_{p,i} = \beta \rho d_i^3 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

na qual  $\beta$  é o fator de forma da partícula da classe de tamanho  $i$ ,  $M_{p,i}$  é a massa da partícula de tamanho  $i$  e  $d_i$  é o tamanho da partícula de tamanho  $i$ .

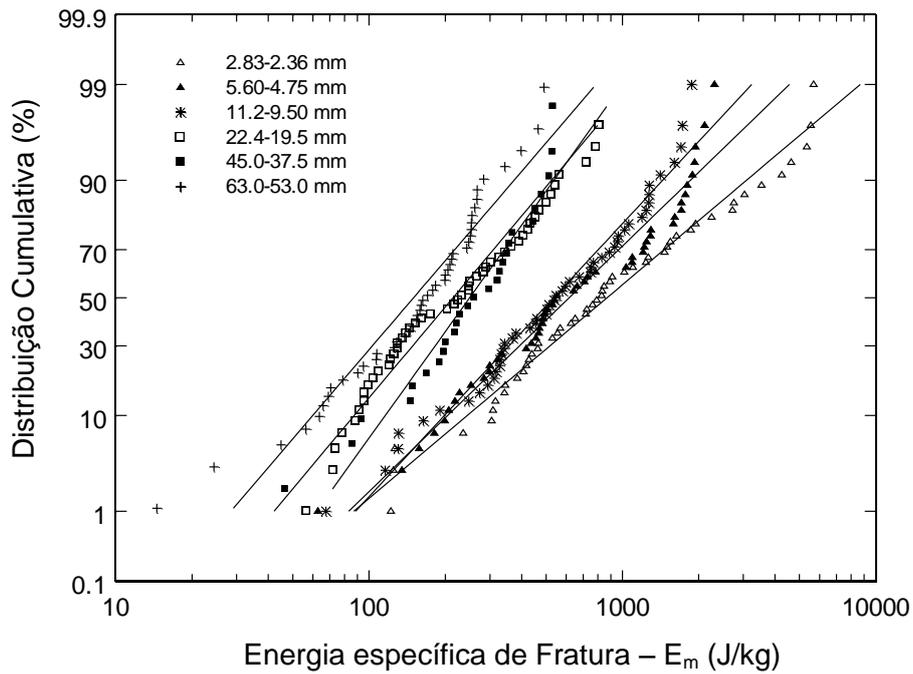


Figura 3. 21- Distribuição de energia de fratura para minérios de cobre. Cada ponto representa um teste de impacto feito em uma partícula individual (Carvalho, 2014)

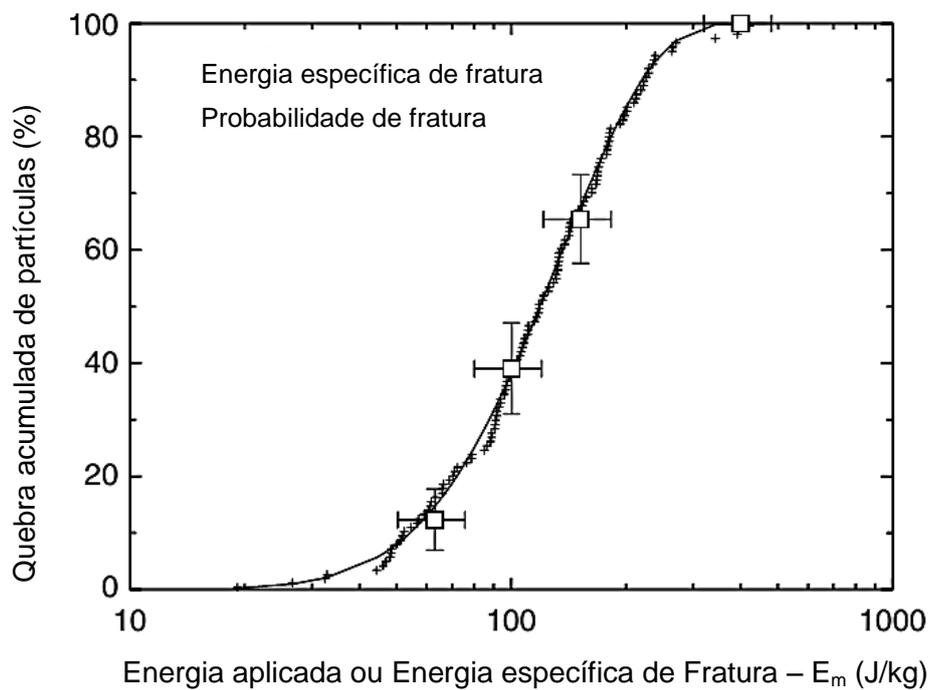


Figura 3. 22 - Distribuição da energia de fratura de partículas de 4,75x4,00 mm de calcário (Tavares, 2007)

A distribuição da resistência das partículas pode também ser modelada com uma função lognormal truncada, dada pela Equação 3.5:

$$F_j(E_m) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\ln E^* - \ln E_{m50,j}}{\sqrt{2\sigma_j^2}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Na qual  $E^* = \frac{E_{max} * E_m}{E_{max} - E_m}$

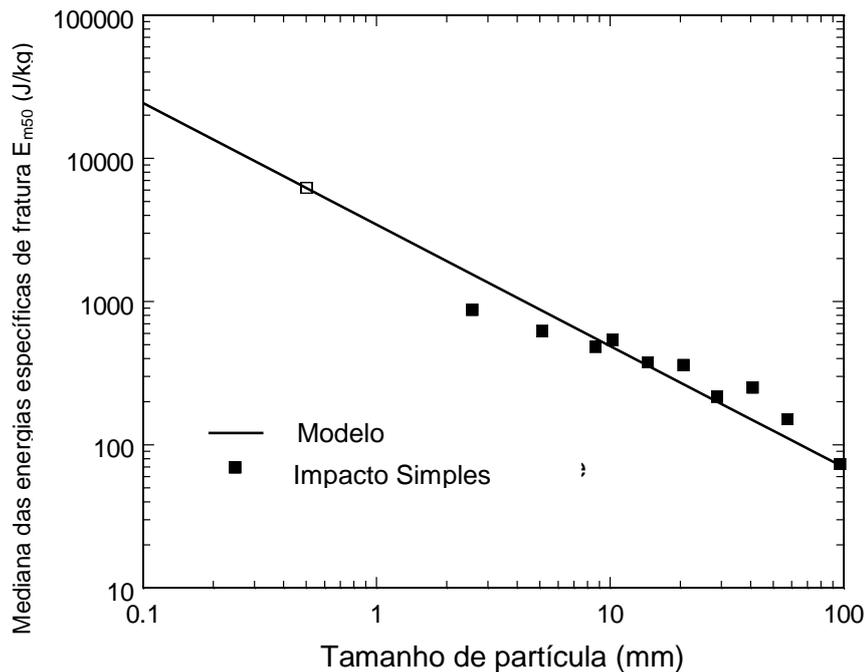
Tavares (2007) propôs uma função para descrever o efeito do tamanho da partícula na mediana da energia específica ( $E'_{m50,j}$ ), devido a variação de energia específica de fratura com o tamanho de partícula. Essa função (Equação 3.6) necessita de três parâmetros que devem ser obtidos a partir de dados experimentais (Carvalho,2014) e o resultado está demonstrado na Figura 3.23:

$$E_{50b,j} = E_{inf} \left[ 1 + \left( \frac{d_o}{d_j} \right)^\varphi \right] \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Em alguns casos a variância da distribuição da energia de fratura pode variar também com o tamanho de partícula, neste caso, uma equação similar foi proposta para este efeito (Carvalho e Tavares, 2013)

$$\sigma_i = \sigma_{inf} \left[ 1 + \left( \frac{d^*}{d_j} \right)^\theta \right] \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde,  $E_{inf}$ ,  $d_o$ ,  $d^*$ ,  $\sigma_{inf}$ ,  $\theta$  e  $\varphi$  são parâmetros variáveis que devem ser ajustados a partir de resultados experimentais.



**Figura 3. 23 - Medianas das energias específicas de fratura como funções dos tamanhos de partículas de minério de cobre. A linha representa o ajuste encontrado utilizando o modelo da Equação 3.6**

Uma alternativa viável para se determinar a distribuição de energias de fratura de uma população de partículas é a realização do ensaio de autofratura. Neste ensaio, partículas de mineiro são liberadas de uma altura pré-determinada e em queda livre atingem um anteparo de aço fixo no solo. Com este ensaio é possível obter a proporção de partículas que fratura em função da energia aplicada, que em termos específicos, ou seja, energia por massa da partícula, pode ser calculada pela Equação 3.8:

$$E = gh \tag{Eq. 3.8}$$

Na qual  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  a altura que a partícula foi liberada

Desta forma, é possível traçar uma estimativa da variação de energia necessária para a quebra dentro da população de partículas, além disso, é possível também identificar o efeito do tamanho das partículas como ocorre, por exemplo, em partículas minerais, nas quais a partículas maiores apresentam energia menor de fratura.

### 3.4.3.2. Mecânica do Dano

Por diversas vezes partículas sofrem impactos de determinadas energias e não quebram. Nestas situações a energia não é suficiente para que ocorra fratura e ocorre perda superficial de massa (quebra superficial). Além disso, a partícula acumula dano na forma de uma ou mais trincas, ou na propagação daquelas já existentes. Isto faz com que a partícula fique suscetível a quebra por energias mais baixas em impactos seguintes. Este enfraquecimento progressivo da partícula que ela sofre, por exemplo, em operações de manuseio pode ser estudado por uma abordagem mecanicista. Tavares e King (2002) desenvolveram um modelo, baseado na combinação da mecânica do dano com a teoria de contatos elásticos de Hertz, para descrever impactos em uma partícula esférica.

A Figura 3.24 demonstra a mudança de comportamento mecânico da partícula, representado por uma curva de força-deformação que, devido aos sucessivos impactos de mesma magnitude, sofre variação.

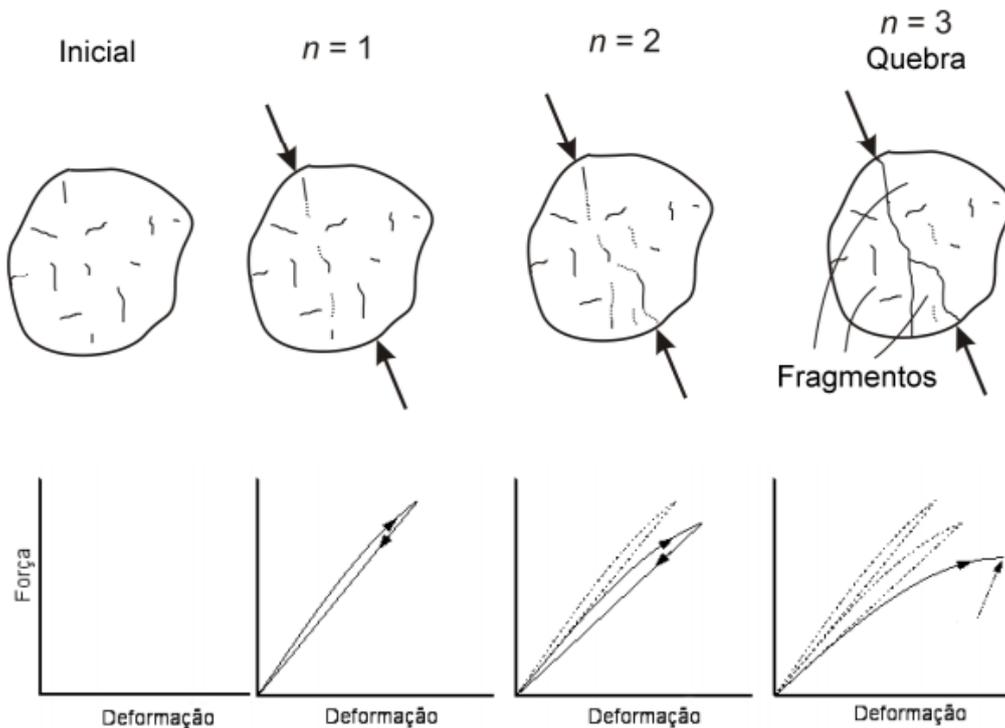


Figura 3. 24 - Efeito do enfraquecimento ocasionado pelo acúmulo de dano causado por impactos repetidos de mesma energia (Tavares, 2009)

O modelo prevê que, à medida que o material sofre impactos de energia insuficiente para a fratura da partícula, a rigidez do material sofre redução. Ou seja, o dano progressivo sofrido por impactos acumula energia em forma de deformação permanente, reduzindo a rigidez do material a cada impacto sofrido. O dano

acumulado pode ser descrito por meio da variação da razão entre a deformação ocasionada pelo impacto e a constante de deformação do material, de acordo com a Equação 3.9:

$$D = \left(\frac{\alpha}{\alpha_c}\right)^\gamma \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Na qual  $D$  é o dano,  $\alpha$  é a deformação sofrida pelo material com impacto  $\alpha_c$  é a constante de deformação do material,  $\gamma$  material, é um parâmetro que mede a susceptibilidade do material à fragmentação.

Presumindo que a Equação 3.9 se mantém válida após aplicação de diversos impactos, é possível estabelecer uma relação entre a energia específica de fratura e a energia de impacto em sucessivos impactos por meio da Equação 3.10:

$$E_n = E_{n-1}(1 - D) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

O modelo também se baseia na descrição da probabilidade de fratura do material original, que pode ser obtida a partir de experimentos realizados na célula de carga de impacto do LTM / COPPE/UFRJ.

Sendo assim, o modelo permite calcular como a distribuição de energias de fratura da população de partículas se altera em função de repetidos eventos de aplicação de esforços de energia  $E_k$ . A distribuição de energias de fratura resultante desses eventos pode ser calculada pela resolução da Equação 3.12, que fornece o valor do Dano ( $D$ ) em função da energia aplicada, energia de fratura mediana das partículas antes do impacto e do parâmetro de susceptibilidade ao dano. Esta equação quando combinada à Equação 3.10 fornece a distribuição após o impacto, que por fim, é incorporada à Equação 3.11.

$$F_n(E_n) = \frac{[F_n(E_n) - F_n(E_k)]}{1 - F_n(E_k)} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$D = \left[ \frac{2\gamma}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_{k,n}}{E_{n-1}} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Na Equação 3.11,  $F_n(E_n)$  é a proporção de partículas quebradas no  $n$ -ésimo impacto quando submetidas a aplicação de uma energia de impacto  $E_k$ . A principal vantagem deste modelo se deve ao fato de que dispensa a utilização direta das curvas de força-deformação, simplificando os cálculos, pois há apenas um único parâmetro a ser

substituído ou estimado. As equações não se apresentam na forma explícita, sendo necessário aplicar um método numérico apropriado para resolvê-las (Carvalho, 2013).

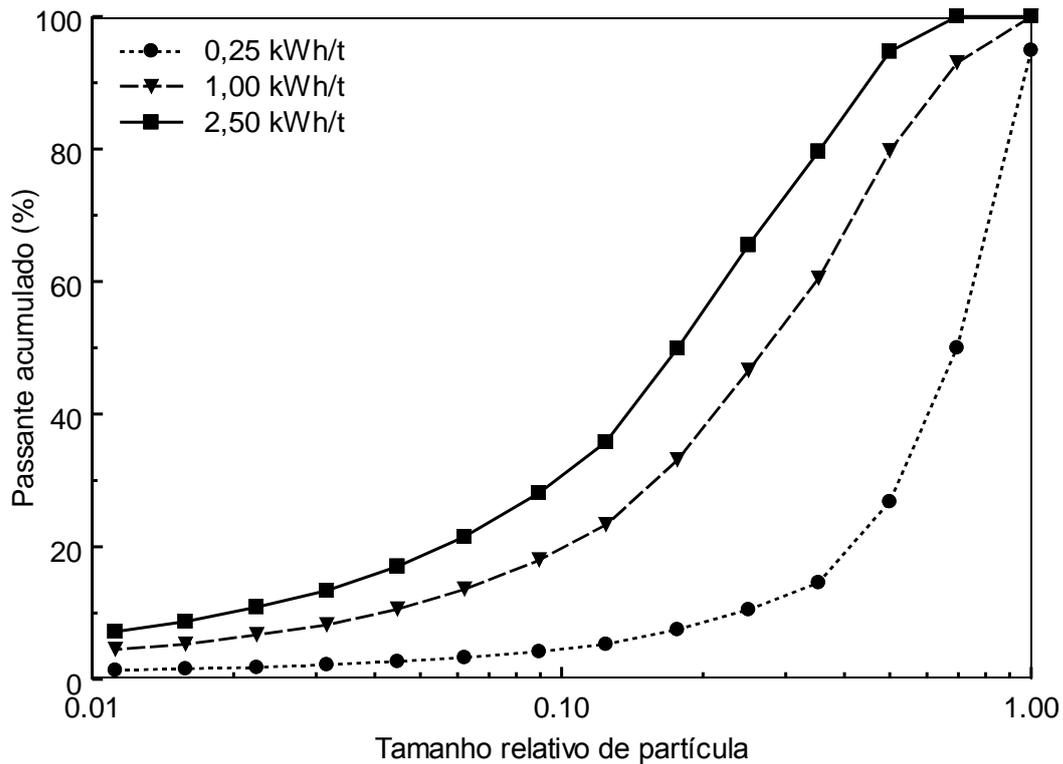
### 3.4.3.3. Função Quebra

A determinação adequada das características de quebra de partículas de matérias primas de alto forno é de grande importância no estudo dos processos de cominuição seja em na especificação de rotas de processo em novos projetos, ou em aplicações que dependem da modelagem matemática, como otimização e controle. Uma das maneiras de se caracterizar as propriedades de quebra de partículas é através da função quebra, que representa como fragmentos originados na fratura de uma partícula mãe se distribuem em tamanhos menores (partículas filhas).

Um dos métodos mais simples e utilizados para investigar as características da fragmentação dos materiais. O *Drop Weight Test* (DWT) ou teste de impacto por queda de peso faz a análise das características de resistência à fragmentação das partículas por impacto com energia variável. A partir dos resultados é possível estabelecer uma relação entre a energia de impacto e a intensidade de fragmentação resultante.

Uma das relações energia-tamanho é obtida pela comparação da distribuição granulométrica com a energia necessária para a partícula fraturar, ou seja, com a energia de fratura da partícula ( $E_m$ ). Nesse caso, as partículas filhas são recolhidas e é feita a análise granulométrica deste material. Para efeito de comparação, diferentes lotes devem ser separados para que seja possível variar as energias aplicadas ao material.

A Figura 3.25 indica que a distribuição das partículas filhas de um mesmo material, de mesma granulometria e forma, variam devido às diferentes distribuições de defeitos, por exemplo, poros e fissuras, em cada partícula. Ela também demonstra que quanto maior a energia imposta ao material, mais finas são as partículas filhas. Com o intuito de analisar como o processo de fragmentação é influenciado pela energia imposta a uma partícula, são conduzidos experimentos de energia variável para a determinação de relações energia-quebra. Estas curvas são caracterizadas pela presença de uma variável inclinação com o aumento da energia de impacto, o que torna o tratamento dos dados mais complicados (Tavares, 2007).



**Figura 3. 25 - Distribuição de tamanhos de partículas do produto de quebra no ensaio de queda de peso (DWT) de um minério de cobre na faixa de tamanho (22,4x19,2 mm) para três energias de impacto (Carvalho, 2009)**

A alta complexidade da variação de inclinação na distribuição granulométrica das partículas filhas quando se altera a energia aplicada fez Narayanan e Whiten proporem uma descrição alternativa (King, 2001). Ao invés de relacionar matematicamente o passante acumulado como uma função do tamanho das partículas filhas, Narayanan e Whiten (1988) propuseram descrever como função de um número de parâmetros calculados das curvas de distribuição granulométrica. Estes parâmetros são conhecidos como  $t_n$  e representam a fração granulométrica menor que  $1/n$  do tamanho representativo das partículas originais. O principal é o que corresponde a  $n = 10$ , conhecido como  $t_{10}$ , que corresponde à fração granulométrica menor que  $1/10$  da partícula original. Estes valores são obtidos pela análise da Figura 3.26 e estão representados na Tabela 3.3:

Tabela 3. 3–  $t_{10}$  x  $t_n$ s experimentais para o minério de cobre (Carvalho, 2009)

$t_{10}$	$t_{1,2}$	$t_{1,5}$	$t_2$	$t_4$	$t_{25}$	$t_{50}$	$t_{75}$
32,3	100,0	100,0	95,9	68,4	16,6	10,7	8,3
20,9	97,8	93,7	82,6	49,5	10,4	6,6	5,1
4,8	80,9	54,3	31,9	11,4	2,6	1,8	1,5

Os resultados de quebra são parametrizados em função dos valores dos  $t_n$ s, de acordo com a Figura 3.27. Na qual cada conjunto de pontos a partir de um dado  $t_{10}$  representa uma distribuição de tamanho das partículas da quebra de partículas. A definição de “*appearance function*” é normalmente dada pelas coordenadas interpoladas para valores de  $t_{10}$  fixos, como por exemplo 10, 20 ou 30 %. Pelo modelo de Whiten, os valores de  $t_n$ s são obtidos pela interpolação utilizando o método das *splines* cúbicas. (Napier-Munn *et al.*, 1996)

A função beta incompleta apresenta o comportamento característico do conjunto de relações  $t_n=f(t_{10})$ , e depende apenas de dois parâmetros para cada valor  $d$  e  $n$ . Sua forma funcional pode ser escrita por,

$$beta(\alpha, \beta, x) = \frac{1}{\int_0^1 y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1} dy} \int_0^x y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1} dy \quad (\text{Eq. 3.13})$$

e quando aplicada à ao modelo de  $t_{10}$  se torna (Carvalho, 2009),

$$t_n(t_{10}, \alpha_n, \beta_n) = \frac{1}{\int_0^{t_{10}} t^{\alpha_n-1} (1-t)^{\beta_n-1} dt} \int_0^{t_n} t^{\alpha_n-1} (1-t)^{\beta_n-1} dt \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Um exemplo de *appearance function* e com seu respectivo ajuste utilizando a função beta incompleta é apresentado na Figura 3.27, nas quais os pontos representam os pontos experimentais ( $t_n$ s) e as cada linha a resposta do modelo para um par de valores de  $\alpha_n$  e  $\beta_n$ .

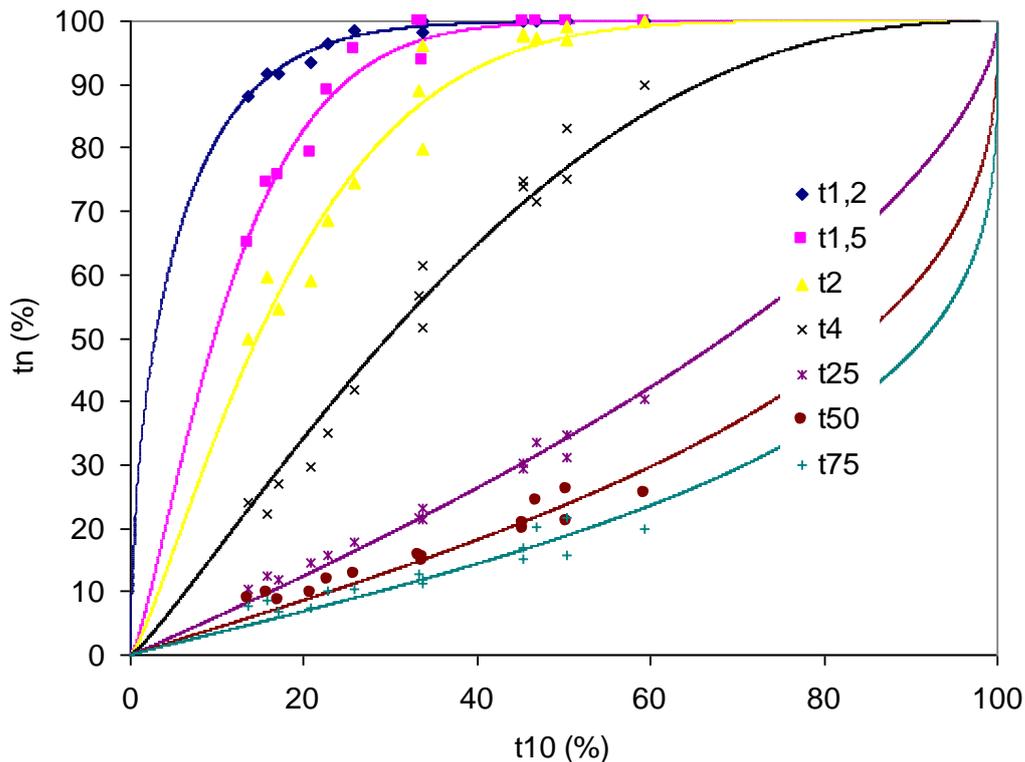
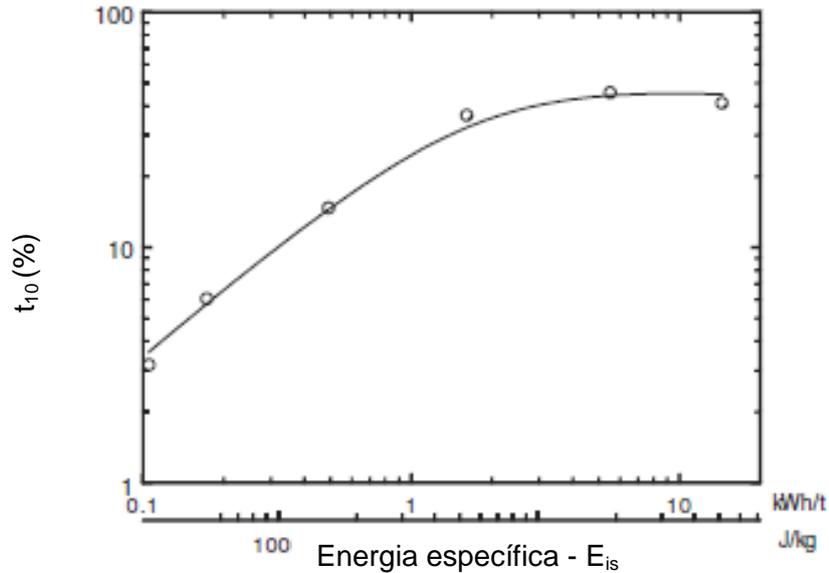


Figura 3. 26 - Conjunto de dados  $t_{10}$  e  $t_n$ s e o ajuste pela função beta incompleta (Carvalho, 2009)

Adicionalmente, para que seja possível descrever a distribuição granulométrica da quebra das partículas uma última etapa é necessária: estabelecer uma relação entre a energia aplicada nas partículas e a granulometria do produto, que é possível através da Equação 3.15:

$$t_{10} = A[1 - \exp(-bE_{cs})] \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Com  $t_{10}$  dado em percentual e  $E_{cs}$  dado em  $\text{kWh t}^{-1}$  (onde  $1 \text{ kWh t}^{-1} = 3600 \text{ J kg}^{-1}$ ). Nos ensaios de DWT a energia escolhida pode ser considerada como energia de cominuição ou a aplicada. O resultado da utilização da Equação 3.15 está demonstrada na Figura 3.27. Os parâmetros  $A$  e  $b$  caracterizam o comportamento de fragmentação do material, com  $A$  caracterizando o valor limite de  $t_{10}$ .  $A*b$  representa a inclinação da curva quando não há energia. Valores de  $A*b$  são passíveis de variação e um baixo valor indica que a partícula é difícil de quebrar.



**Figura 3. 27 - Relação entre o  $t_{10}$  e a energia aplicada construída através da Equação 3.13 (Tavares, 2007)**

Tavares (2009) propôs uma modificação na estimação da função quebra, de forma a incorporar o efeito da energia de fratura, que varia em função do tamanho da partícula na relação de  $t_{10}$  com a energia aplicada. O que faz a função quebra do material ser caracterizada não só pela energia aplicada ao material, mas também função da distribuição da energia de fratura das partículas que quebraram em um impacto (Equação 3.16).

$$t_{10} = A \left[ 1 - \exp\left(-b' \frac{E_m}{E_{50b}}\right) \right] \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Nesta equação, os parâmetros  $A$  e  $b'$  são funções do material e são determinados ajustando a equação do  $t_{10}$  usando dados de fratura de partículas de diversos tamanhos.  $E_{50b}$  é a mediana da distribuição de energia de fratura de uma partícula das partículas que quebram em um impacto que é equivalente ao  $E_{m50}$  quando todas as partículas quebram.

A Figura 3.28 mostra o resultado da Equação 3.16 que descreve a relação entre a energia aplicada e a distribuição dos fragmentos, incluindo o efeito do tamanho de partícula.

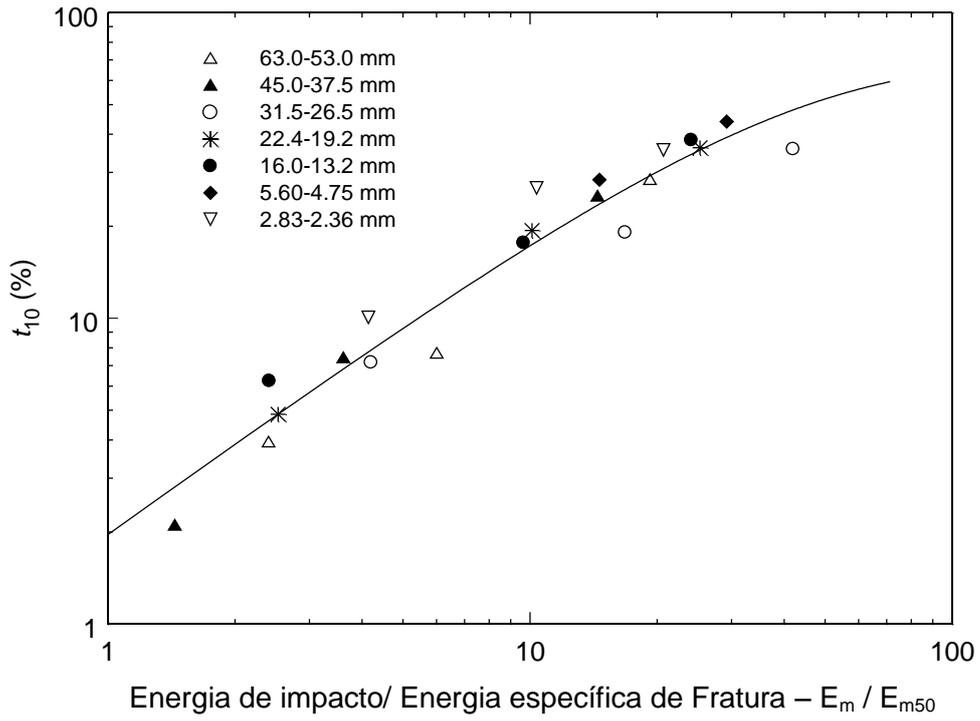


Figura 3. 28 -  $t_{10}$  como função da razão entre as energias de impacto e de fratura do material (Tavares, 2007).

## 4. Metodologia

Os materiais utilizados para a realização deste trabalho foram coques provenientes de diferentes empresas. Com o intuito de evitar exposição dos produtores os coques serão chamados de Coque A e Coque B. Além disso, o processo de produção dos dois coques foram diferentes: o Coque A foi fabricado em uma coqueria convencional enquanto que o Coque B é oriundo de uma coqueria *Heat Recovery*.

A caracterização dos coques foi feita por meio da análise granulométrica, ensaio de fator de forma, autofratura e ensaio de queda de peso (*Drop Weight Test*). Foram utilizados 142 kg de cada coque, e estes ensaios estão detalhados a seguir.

### 4.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica de partículas consiste simplesmente em separar uma amostra destas partículas em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre os limites correspondentes às aberturas das peneiras.

Uma partícula apresenta diversas dimensões que variam com sua forma, do ponto de vista granulométrico, o tamanho de uma partícula é definido pela abertura da malha, com forma determinada, através da qual ela passa, ficando retida em uma malha idêntica e de menor abertura.

Para fazer a análise granulométrica do material recebido, todo o coque foi peneirado no Laboratório de Tecnologia Mineral do Departamento/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O peneiramento foi realizado manualmente e a seco para que o desgaste das partículas fosse minimizado. As peneiras, padrão *Produtest*®, foram dispostas em ordem decrescente de abertura (de cima para baixo), sendo o último um recipiente coletor para os finos, material menor que 19 mm. Conhecendo a massa inicial da amostra, o cálculo da porcentagem das massas dos materiais retidos em cada peneira é facilitado.

A sequência de peneiras escolhidas seguiu a sequência padrão de 75,0; 63,0; 50,0; 45,0; 37,5; 31,5; 26,5, 22,4 e 19 milímetros.



**Figura 4.1 - Série de peneiras padrão Produtest® utilizadas na análise granulométrica dos coques utilizados nesse trabalho**

## **4.2. Análise deforma**

Para análise da forma das partículas de coque foram determinados índices de lamelaridade e alongamento das partículas com três granulometrias distintas: 63x50, 45x37,5 e 31,5x26,5 milímetros. Foram ensaiados um lote com 50 partículas de cada tamanho e de cada tipo de coque.

Os índices de lamelaridade e alongamento foram determinados conforme a Norma Britânica BS812 e serão detalhados a seguir. As medidas foram realizadas no próprio LTM.

Para este ensaio todas as partículas tiveram suas massas determinadas, obtendo uma massa total  $M_1$  para cada lote que será utilizada no cálculo dos parâmetros. As maiores e menores dimensões foram medidas com um paquímetro conforme apresentado na Figura 4.2.

Para determinar se uma partícula era lamelar ou alongada (ou os dois ao mesmo tempo) foram criados dois parâmetros. O parâmetro  $A$  e o parâmetro  $L$ , calculados conforme Equações 4.1 e 4.2 respectivamente.

$$A = 1,8 * \text{ tamanho médio da peneira} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$L = 0,6 * \text{ tamanho médio da peneira} \quad (\text{Eq. 4.2})$$



**Figura 4.2 - Medição da menor dimensão (esquerda) e maior dimensão (direita) da partícula com paquímetro**

### **Índice de Alongamento**

As maiores dimensões das partículas são comparadas com o parâmetro “A” e em caso positivo, a partícula deve ser considerada alongada e ter sua massa aferida. Desta forma, pode-se determinar o Índice de Alongamento (*IA*) do lote através da seguinte equação

$$IA = \frac{M_2}{M_1} 100 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde  $M_1$  é a massa de total de partículas e  $M_2$  a massa total de partículas alongadas.

Quando mais de 40% das partículas de um lote são consideradas alongadas, ou seja, quando *IA* for maior que 40%, pode-se afirmar que a população daquela faixa granulométrica é alongada.

### **Índice de Lamelaridade**

As menores dimensões das partículas são comparadas com o parâmetro *L* e, caso sejam menores, a partícula pode ser considerada alongada. Ao fim desta comparação, a massa das partículas lamelares  $M_3$  foi determinada. Desta forma, é possível determinar o Índice de Lamelaridade (*IL*) do lote através da seguinte equação

$$IL = \frac{M_3}{M_1} * 100 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

na qual  $M_3$  é a massa de partículas lamelares e  $M_1$  é a massa total de partícula do lote.

Quando mais de 35% das partículas de um lote são consideradas alongadas, ou seja, quando IL maior que 35% pode-se afirmar que toda população daquela faixa granulométrica é alongada.

Por meio da análise do fator de forma pode-se identificar o formato das partículas, e isso é importante para entender também sobre a resistência que estas possuem aos impactos. Para tal intento são calculados os índices de alongamento e lamelaridade das amostras.

A lamelaridade é um parâmetro de forma na qual a espessura é pequena em relação às outras dimensões, ou seja, são partículas que são achatadas ou em formato de lâmina. Enquanto que o alongamento é um parâmetro de forma no qual o comprimento é grande em relação às demais dimensões.

A Figura 4.3 representa como as partículas são classificadas. Na região 1 encontram-se as partículas alongas; Região 2 são as partículas Alongadas e Lamelares; Região 3 são partículas Não-alongadas e Não-lamelares e na Região 4 as partículas Lamelares.

O formato ideal das partículas é correspondente à Região 3 do esquema acima, pois as partículas apresentam um formato mais próximo possível de uma esfera. Isso evita que haja presença de partículas com cantos “vivos”, que são protuberâncias que são mais suscetíveis a quebra e geração de finos. Além disto, com este formato não-lamelar e não-alongado as partículas apresentam maior resistência, pois suas dimensões são mais equilibradas.

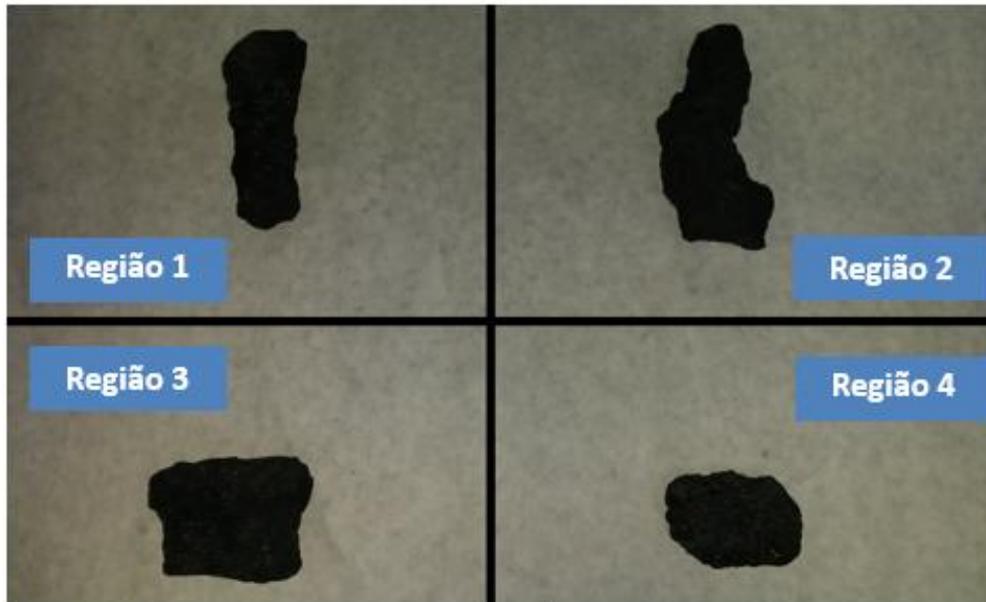


Figura 4. 3 - Diagrama apresentando as diferentes formas encontradas na população de partículas de uma das amostras de coque

### 4.3. Autofratura

Com a intenção de simular os tipos de impactos que as partículas sofrem durante o manuseio até chegar ao alto forno, por exemplo, estocagem em silos e trocas de correias transportadoras, foi realizado um experimento em escala laboratorial.

Este ensaio consiste em submeter partículas a quedas de diferentes alturas conhecidas sobre uma placa de aço chumbada no chão. Para a maior altura foi utilizado dois tubos de PVC. O primeiro com altura total de aproximadamente 8,4 metros e 200 mm de diâmetro, suficientemente largo para garantir uma limitada interação com as partículas de coque e o segundo tubo com diâmetro de 400 mm sobre a chapa de aço que foi utilizado para evitar que as partículas se perdessem. Na Figura 4.4 encontra-se imagens do local do ensaio e na Figura 4.5 está exemplificado um diagrama esquemático do aparato utilizado.



Figura 4. 4 - Foto do aparato de autofratura montado no LTM. À direita o tubo de confinamento, chapa de impacto e tubo guia

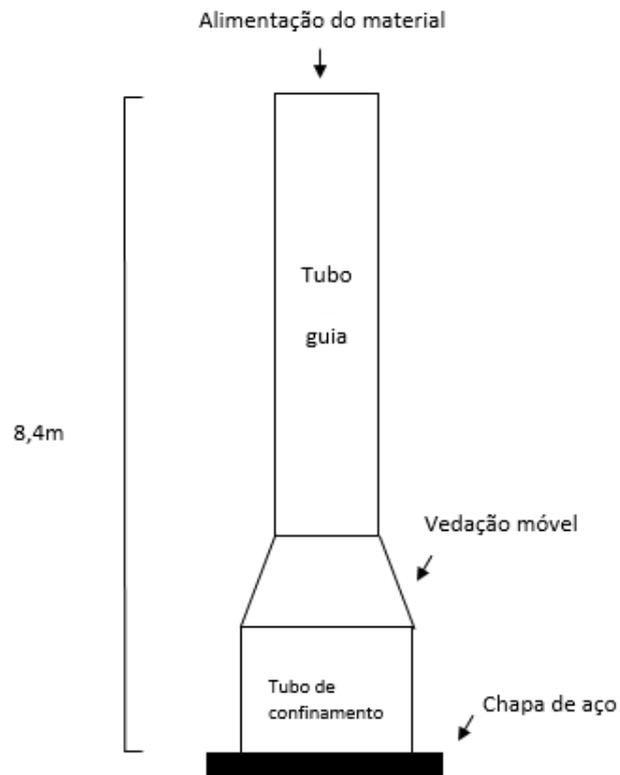


Figura 4. 5 - Esquema do aparato de autofratura montado no LTM/COPPE/UFRJ. À direita o tubo de confinamento, chapa de impacto e tubo guia (Silveira, 2012)

Para o experimento foram preparados três lotes balanceados de 50 partículas com granulometria 63x50, 45x37,5 e 31,5x26,5 milímetros dos dois tipos de coque, que representam juntas 58,43 e 61,78% dos lotes do Coque A e Coque B, respectivamente. As partículas de coque foram submetidas a uma sequência de impactos sucessivos por queda livre contra a chapa de aço.

A metodologia adotada para o ensaio consistiu nas seguintes etapas (Figura 4.6):

1. Balanceamento dos três lotes de 50 partículas de cada tamanho (Figura 4.7);
2. Medição da massa individual de cada partícula;
3. Liberação do material, partícula por partícula, em três alturas diferentes (1, 2 e 4 metros);
4. Após cada impacto, em um total de 20, medida da massa individual de cada partícula;
5. As partículas que não fraturaram ou perderam menos que 10% de sua massa inicial, voltam para a próxima queda. As demais são separadas para posterior análise granulométrica;
6. Por fim o material é separado em três grupos distintos: partículas resistentes, partículas fraturadas e abrasão/lascamento
7. Análise granulométrica de cada um dos grupos de partículas

As energias associadas às quedas de 1, 2 e 4 metros são calculadas através da Equação 3.8:

Para os lotes de partículas que foram testadas de 1 metro o procedimento foi diferente. A primeira queda foi feita manualmente e as partículas foram pesadas. A partir da segunda queda utilizou-se o moinho de tamboramento operado a uma velocidade de 12,7 rpm de forma a garantir que as partículas sejam submetidas a impactos equivalente a queda livre de 1 metro de altura (Figura 4.8). Para simplificar o procedimento, cada partícula só teve sua massa aferida após sofrer 20 quedas no moinho de tamboramento.



Figura 4. 6 – Fluxograma do ensaio de Autofratura



Figura 4. 7 - Amostras individuais de partículas de tamanho 63x50 mm separadas para ensaio de autofratura



**Figura 4. 8 - Tambor de abrasão utilizado para simular 20 quedas sucessivas de equivalentes a 1 metro de altura**

Para iniciar o ensaio a partícula é posicionada sobre uma superfície rígida, utilizando um impactor em queda livre a partir de uma altura conhecida (Figura 4.9). As massas dos impactores e altura são reguláveis, fazendo com que seja possível variar a energia aplicada. Esta energia é calculada pela seguinte fórmula:

$$E_i = m_b g h_0 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde,  $m_b$  é a massa do impactor e o  $h_0$  é a distância entre o topo da partícula e o impactor.

Após o impacto, os fragmentos, oriundos da fratura da partícula são recolhidos e analisados por meio de peneiramento. Este procedimento é repetido para energias diferentes e através dos seus resultados pode-se criar uma relação entre a energia aplicada e a distribuição granulométrica do produto de fragmentação.

Esses ensaios foram conduzidos por meio da adaptação do padrão adotado pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC) na caracterização da quebra de partículas por impacto (Napier-Munn *et al.*,1996). Uma das diferenças é o uso da Célula de Carga de Impacto COPPE (Figura 4.10) ao invés do *Drop Weight Tester* (DWT), usado no JKMRC. Contudo, a equivalência entre ambos foi estabelecida

previamente por meio de ensaios comparativos realizados com um minério de cobre (Tavares, 2003).



**Figura 4. 9 - Partícula de 63x50mm posicionada para o Teste de Queda de Peso (LTM COPPE UFRJ)**

Para executar o ensaio foram realizadas as seguintes etapas:

- Separação de três lotes com massas balanceadas, cada um dos quais contendo 30 partículas para cada fração de tamanhos escolhidos. No caso, ensaios nas faixas de 63x50, 45x37,5 e 31,5x26,5 milímetros.
- As energias específicas de impacto aplicadas foram: 0,1, 0,5 e 1 kWh/t
- Cálculo da altura de queda, por meio da Equação:

$$h_i = h_f + \frac{mE_{is}}{0,0272Md} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Sendo  $h_i$  a altura de queda (em cm) a partir da qual o peso é solto,  $h_f$  a altura final de repouso do peso (em cm e estimada a partir de resultados anteriores), a massa média das partículas ensaiadas (em g),  $M_d$  a massa do peso a ser solto (em kg) e  $E_{is}$  é a energia específica de impacto aplicada (em J/kg). Presumindo que a restituição do peso após o impacto pode ser ignorada, a energia específica de impacto aplicada é considerada equivalente à energia específica de cominuição ( $E_{cs}$ ).

- Quebra de partículas, uma a uma, na Célula de Carga de Impacto
- Coleta dos fragmentos e peneiramento a seco usando peneiras que seguem uma série com razão igual à raiz quadrada de dois.
- Normalização da distribuição granulométrica dos produtos de cada ensaio em relação ao tamanho médio das partículas originais. Cálculo do  $t_{10}$  para cada energia específica de impacto, através de interpolação linear da distribuição

granulométrica do material fragmentado. Estimação dos parâmetros A e b' da Equação 3.15

- Determinação da relação entre  $t_{10}$  e os diversos  $t_n$ s, a fim de determinar o padrão de fragmentação do coque



Figura 4. 10 - Célula de carga de impacto para ensaio de DWT

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Análise Granulométrica

A partir da análise granulométrica das amostras dos coques A e B foi possível conhecer como as populações de partículas se distribuem nas diversas faixas de tamanho. A Tabela 5.1 mostra que as frações com as maiores populações estão nas peneiras de 63x50 e 45x37,5 milímetros e por isso foram escolhidas para fazer os ensaios. A de 31,5x26,5 milímetros foi escolhida, pois das mais finas é a que apresenta maior número de partículas.

Tabela 5.1 - Distribuição granulométrica dos coques A e B

Coque Tamanho (mm)	A		B	
	Retido (%)	Passante (%)	Retido (%)	Passante (%)
100 x 90	0,00	100,00	0,00	100,00
90 x 75	2,92	97,08	5,78	94,22
75 x 63	10,48	86,60	13,03	81,18
63 x 50	25,31	61,29	37,10	44,08
50 x 45	11,84	49,45	9,72	34,37
45 x 37,5	27,89	21,57	22,23	12,13
37,5 x 31,5	11,97	9,59	8,13	4,00
31,5 x 26,5	5,24	4,35	2,45	1,55
26,5 x 22,4	1,66	2,70	0,33	1,22
22,4 x 19	0,18	2,52	0,03	1,19
< 19	2,52	0,00	1,19	0,00

Os resultados mostram que o material do coque B apresenta granulometria mais grosseria que a do coque A. Por ser um material importado, pode-se presumir que o coque A sofreu mais impactos que o material do coque B, da sua produção até o ponto de amostragem na usina explicando portanto, a granulometria mais fina apresentada.

## 5.2. Análise do Fator de Forma

A análise do fator de forma revelou que dos seis lotes analisados, apenas o lote de partículas do coque B com granulometria de 26,5 milímetros foi considerado alongado e o único a estar fora da região desejada (região 3), conforme ilustrado na Figura 5.1 que apresenta a classificação das partículas de ambos os coques nas três diferentes faixas de tamanho em função dos índices de alongamento e de lamelaridade obtidos.

Segundo Castro *et al.*(2004), os formatos das partículas de coque sofrem influência da operação dos fornos da coqueria. Partículas alongadas se formam quando a mistura de carvão apresenta alta taxa de matérias voláteis e foi aquecida rapidamente. Entretanto, apesar de apresentar forma ligeiramente fora do desejado, estima-se que este lote (Coque B – 31,5x26,5 mm) apresente as mesmas características de queima do coque B com granulometrias de 45x37,5 e 63x50 milímetros. Assim sendo, é necessário que haja um cuidado maior quando este lote for manuseado, pois ele está mais suscetível à perda mássica (geração de finos) através dos impactos sofridos pelo material.

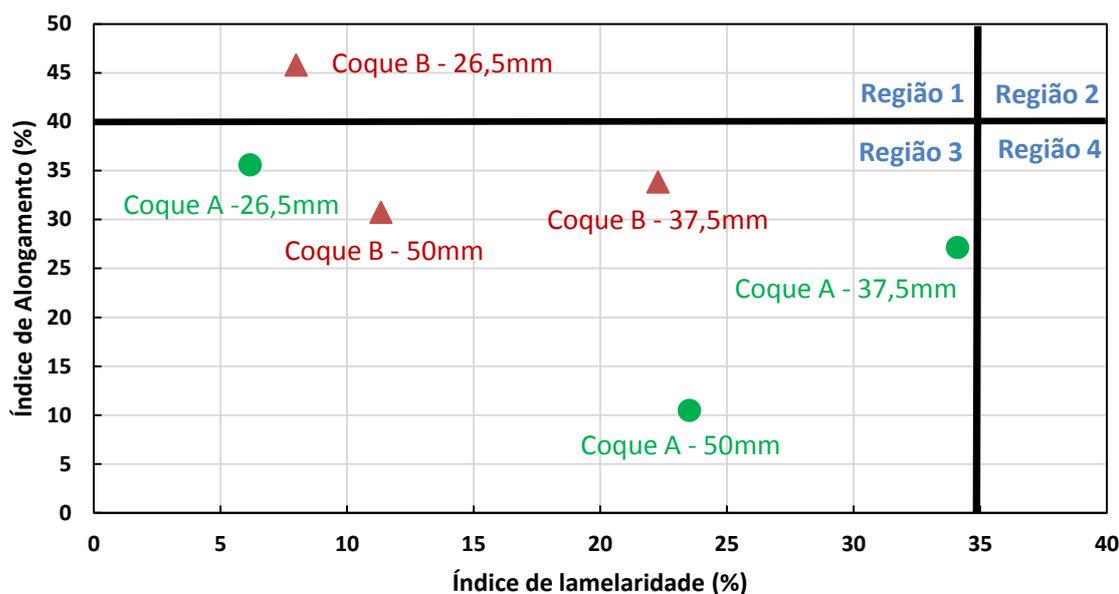


Figura 5. 1 - Classificação das partículas em relação aos seus índices de lamelaridade e alongamento

### 5.3. Autofratura e Ensaios de queda de peso

#### 5.3.1. Energia necessária para quebra (energia de fratura)

Os resultados de autofratura mostram que, para o Coque B, para os três tamanhos de partículas testados, houve quebra de partícula apenas a partir de energia equivalente a uma queda de 4 metros, ou seja, 39,24 J/kg. Enquanto que para o Coque A, 2% das partículas sofrem quebra ao impacto de 2 metros de altura na chapa de aço. As figuras 5.4 e 5.5 apresentam resultados que mostram a proporção de partículas quebradas no primeiro impacto para cada um dos tamanhos ensaiados em cada uma das alturas de queda (1m, 2m, 4m e 8,4m) que respectivamente representam energias de 9,81 J/kg, 19,6 J/kg, 39,24 J/kg e 78,48 J/kg.

O ensaio de autofratura realizado alcança a energia máxima equivalente a queda de 8,4 metros, que é limitada pela distância de lançamento do segundo piso do laboratório até a plataforma de aço fixada no subsolo. Entretanto, para ambos os coques e faixas de tamanho avaliados, a proporção máxima de partículas que quebraram no primeiro impacto não passou de 20 % para o coque B, e 25 % para o coque A. Normalmente, para determinar a distribuição de energias de fratura de partículas, faz-se necessário utilizar energias de impacto mais elevadas que consigam

quebrar praticamente toda a população. Diante desta limitação na altura máxima possível nos ensaios de autofratura, optou-se por utilizar informações de quebra resultantes dos ensaios de queda de peso para complementar esses dados, que serão discutidos adiante.

As curvas log-normais que melhor representam cada conjunto de dados de energia por proporção quebrada são representadas por linhas contínuas nas Figuras 5.2 e 5.3. Foi possível obter um único conjunto de parâmetros ótimos para simultaneamente representar as distribuições de energias de fratura para diferentes tamanhos de partículas de um mesmo material utilizando-se a função de minimização por simplex implementada na ferramenta solver do Excel 2013 (Microsoft, 2013). O resultado do ajuste da Equação 3.6 é apresentado na Tabela 5.2, que mostra também a função que relaciona a energia mediana de fratura com o tamanho de partícula para ambos os materiais.

Para que fosse possível identificar a mediana de distribuição de energias de fratura ( $E_{m50}$ ) foi necessário utilizar dados do ensaio de queda de peso para que resultados da quebra de partículas utilizando energias mais altas fossem utilizadas. Foi possível identificar que a mediana da distribuição de energias específicas de fratura para o Coque A é sistematicamente menor do que para o coque B, conforme apresentado na Figura 5.4. Para a construção deste gráfico foi utilizada a Equação 3.6

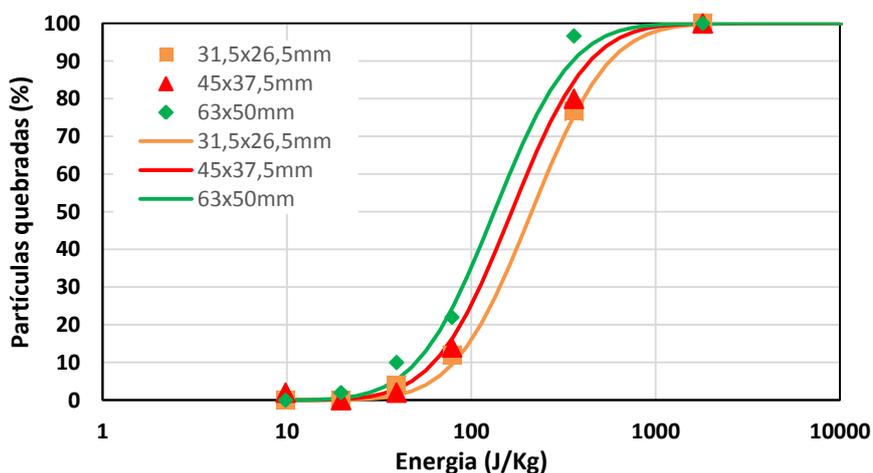


Figura 5.2- Proporção de partículas quebradas no primeiro impacto do Coque A

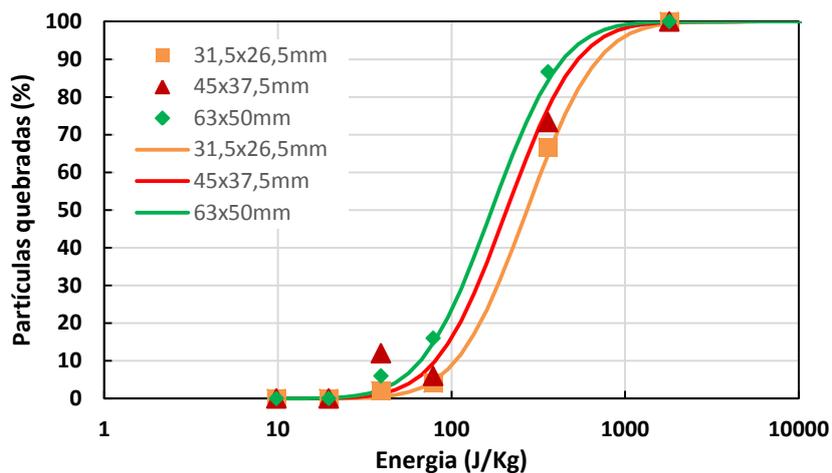


Figura 5.3- Proporção de partículas quebradas no primeiro impacto do Coque B

Tabela 5.2 - Parâmetros da equação do  $E_{50}$  para os coques A e B

Parâmetros	Coque A	Coque B
$E_{inf}$	15,886	91,344
$\phi$	0,781	1,243
$d_o$	727,08	50,00
Desvio padrão	0,76	0,738

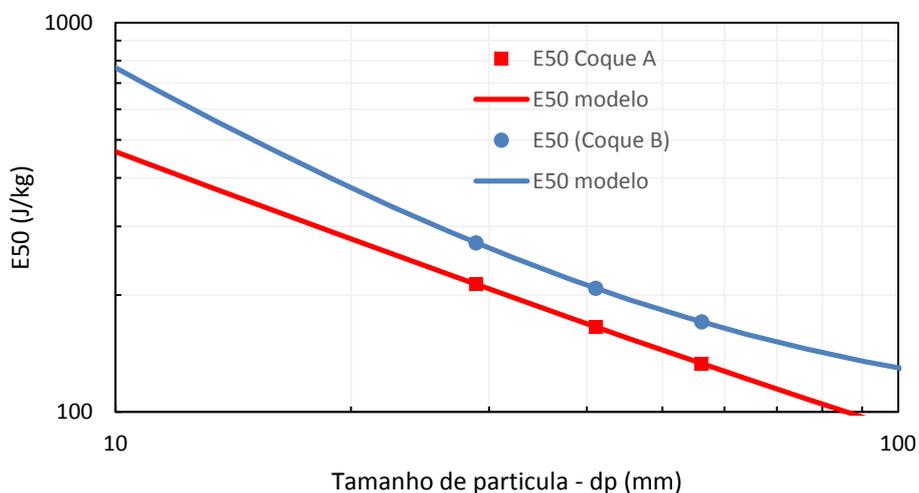


Figura 5.4- Comparação das energias específicas de fratura dos Coques A e B em relação aos seus tamanhos representativos

### 5.3.2. Acúmulo de dano nas pelotas

O acúmulo de dano que as partículas de coque sofrem em cada impacto, para cada faixa granulométrica, é um parâmetro necessário para modelar a quebra volumétrica do coque. Esse acúmulo de dano é medido pelo parâmetro  $\gamma$ , proposto pelo modelo de Tavares e King (2002).

Utilizando a proporção de partículas quebradas por impacto resultantes do ensaio de autofratura e da distribuição de energia de fratura das partículas de coque foi realizado o ajuste do  $\gamma$  para cada lote de partículas estudadas. A Tabela 5.3 mostra os valores de  $\gamma$  obtidos para cada granulometria de cada tipo de coque. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam resultados da quebra acumulada (pontos) e as curvas ajustadas de acordo com o valor de  $\gamma$ .

Tabela 5.3 - Valores de  $\gamma$  para cada lote de partículas dos coques A e B

Lote	Coque A	Coque B
31,5x26,5 mm	3,23	4,06
45x37,5mm	3,51	3,85
63x50mm	2,74	3,73

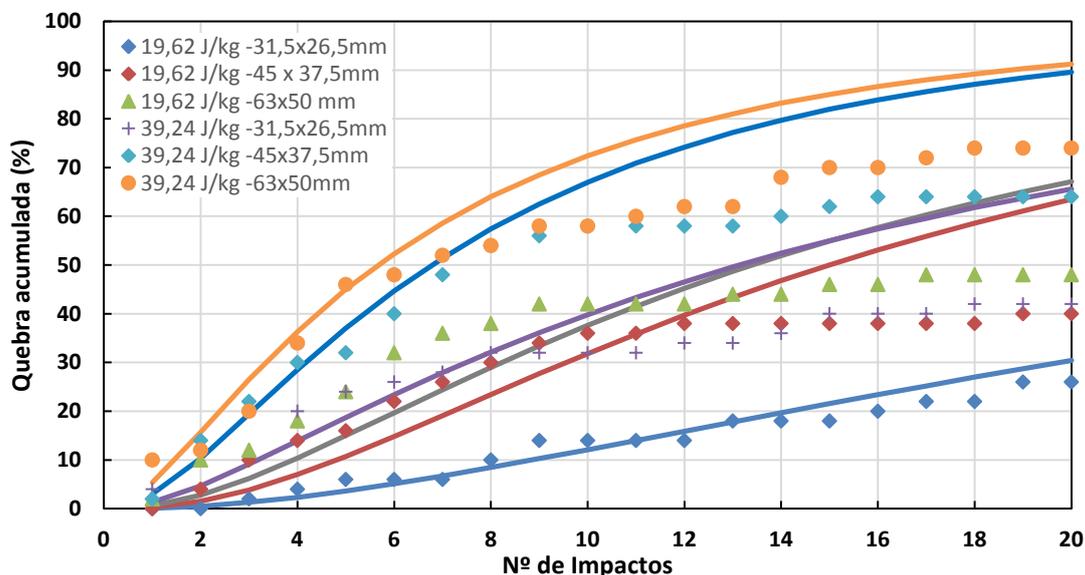
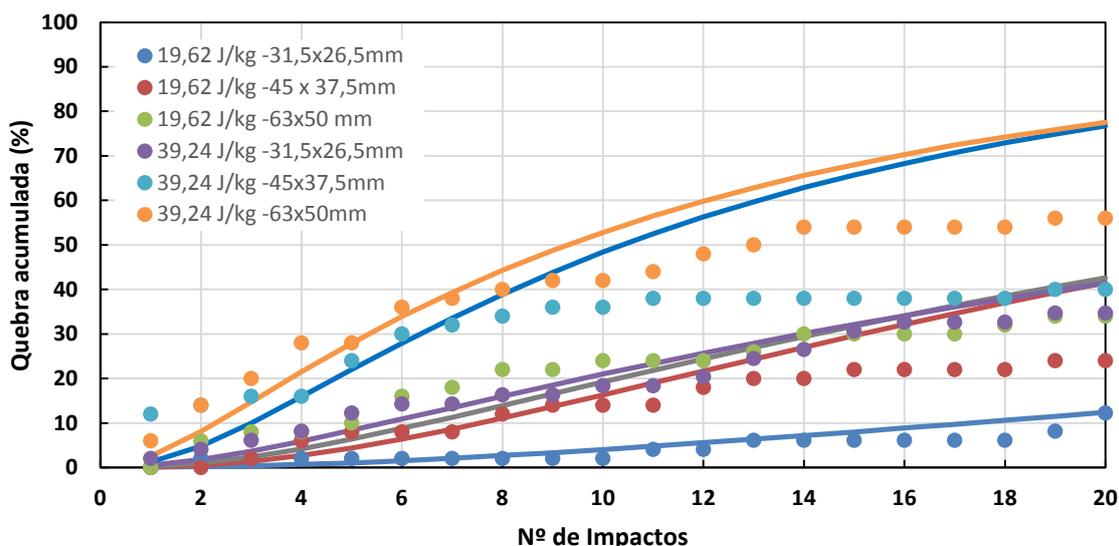


Figura 5.5– Comparação da porcentagem quebrada de partículas de impactos repetidos para diferentes energias, granulometrias e valores de gama do Coque A. Os pontos são os dados obtidos experimentalmente e as linhas são ajustes do modelo.



**Figura 5.6– Comparação da porcentagem quebrada de partículas de impactos repetidos para diferentes energias, granulometrias e valores de gama do Coque B. Os pontos são os dados obtidos experimentalmente e as linhas são ajustes do modelo.**

Como se pode observar na tabela 5.3, o  $\gamma$  varia com o tipo de coque, porém a variação dos valores de gama entre as faixas granulométricas é muito baixa. Quanto menor o valor de  $\gamma$ , mais dano o material recebe, ou seja, mais suscetível a quebra por impactos repetidos. Os lotes do coque A apresentam menores valores de  $\gamma$ , o que implica em uma resistência menor aos impactos.

Pode-se observar pelos gráficos representados nas Figuras 5.5 e 5.6 o efeito da energia aplicada às partículas e como era esperado, as partículas que sofreram impactos de maior altura apresentaram uma proporção de quebra maior. Outro efeito importante foi o do tamanho de partícula, comprovando que para partículas menores é necessário aplicar maiores energias específicas para quebrá-las. Por fim, a proporção de partículas quebradas do coque A foi superior as do coque B. Comparando, por exemplo, as partículas de 63x50 mm submetidas a impactos de 39,24 J/kg (4 metros), a proporção de quebra para o coque A ultrapassa 70% enquanto que para o coque B este valor fica abaixo de 60%. O que mostra uma resistência maior a impactos do Coque B em relação ao Coque A.

Entretanto, os dados apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 indicam que para ambos os coques há um comportamento crescente de quebra de partículas até o décimo impacto. Após este ponto, o que se observa é uma constância nos valores de quebra, uma espécie de platô e por isso o ajuste do modelo não descreveu bem o comportamento das partículas. Este problema pode ser explicado pela variabilidade

intrínseca relacionada a fratura em populações de partículas, proposto por Tavares, como visto na seção 3.4.3.1. Ou seja, em partículas do mesmo material, em uma faixa granulométrica é possível encontrar uma grande variabilidade de partículas com diferentes resistências, sendo algumas mais fáceis de quebrar que outras. Uma das hipóteses para isso ocorrer é devido à distribuição das falhas internas serem diferentes em cada partícula, como por exemplo, porosidades e trincas. Esse fenômeno ocasiona uma distribuição bimodal no acumulado de quebra de partículas. Para caracterizar este fenômeno completamente é necessário que sejam realizados testes com energias maiores ou com maior número de repetições dos impactos.

### 5.3.3. Função Quebra

As figuras 5.7 e 5.8 representam a distribuição granulométrica da quebra de partículas no ensaio de queda de peso do Coque A e do Coque B na granulometria de 45x37,5 mm. Por meio destes gráficos pode-se observar um padrão na distribuição granulométrica do material para três energias distintas (360, 1800 e 3600J/kg).

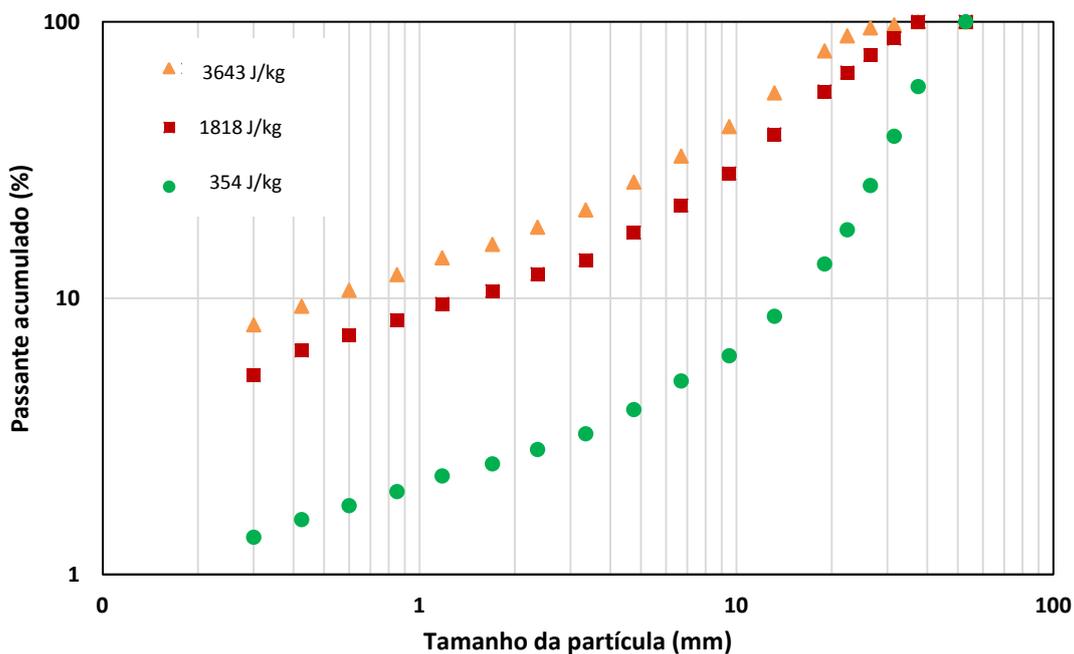


Figura 5.7– Distribuição granulométrica da quebra de partículas do Coque A do lote de 45x37,5mm em diferentes energias aplicadas

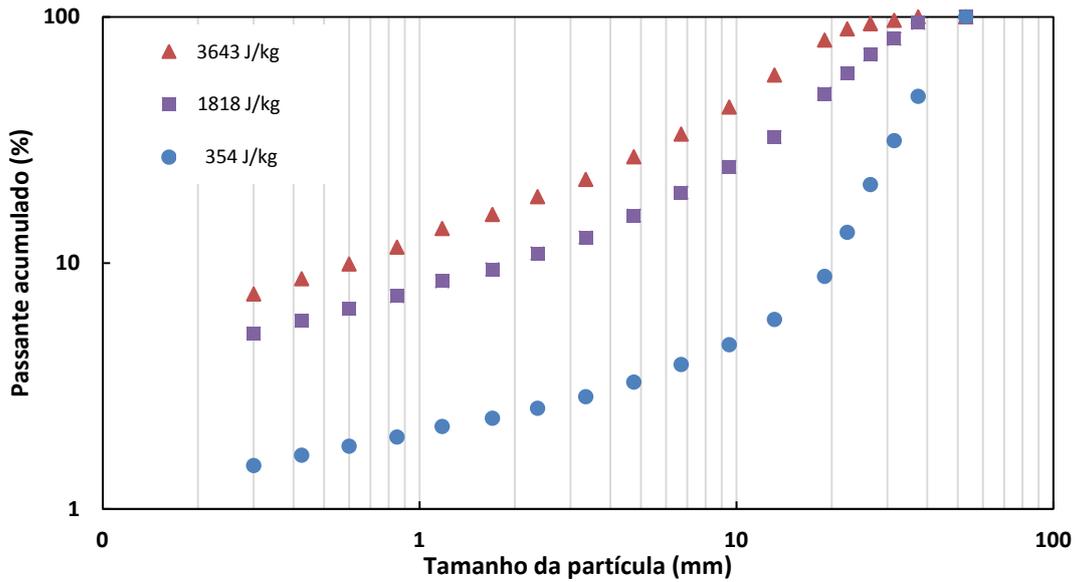


Figura 5.8– Distribuição granulométrica da quebra de partículas do Coque B do lote de 63x50mm em diferentes energias aplicadas

Com os dados da fragmentação das partículas foi possível obter os valores de  $t_{10}$ , que é a fração de partículas menores que 10% da partícula original. Fazendo uma correlação deste parâmetro da distribuição granulométrica com as energias aplicadas é possível construir o gráfico representado na Figura 5.9, no qual mostra o comportamento do valor do  $t_{10}$  com a energia dos impactos. Para esta granulometria pode-se observar que os valores do  $t_{10}$  são muito similares nas três energias testadas.

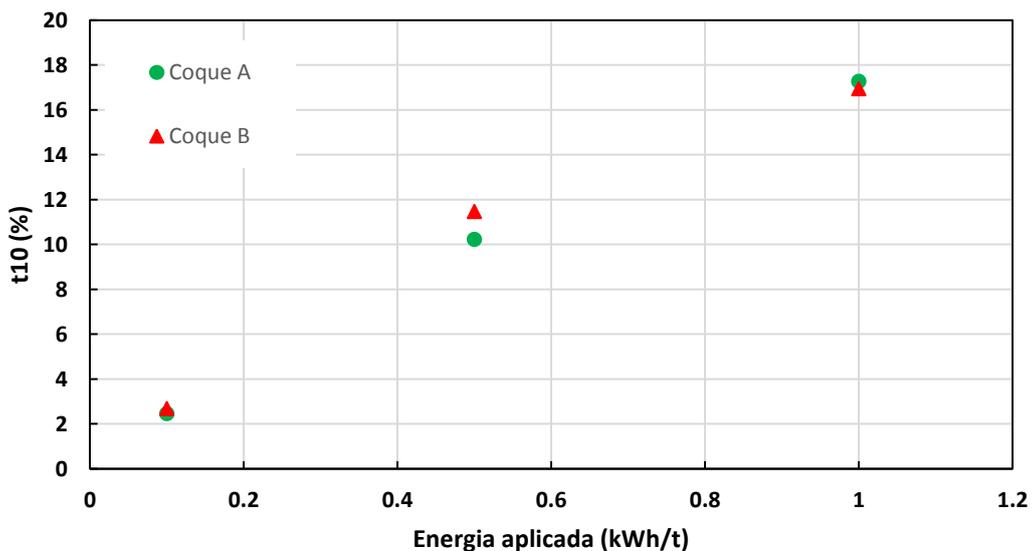


Figura 5.9– Gráfico do  $t_{10}$ s pelas energias aplicadas no lote de 45x37,5 mm dos Coques A e B

Utilizando o valor do  $t_{10}$  é possível calcular os demais parâmetros que aparecem no gráfico da *appearance function*, que é o gráfico dos  $t_{10}$  em função dos  $t_n$ s representada nas Figura 5.10, para o Coque A e 5.11 para o Coque B. Os pontos representam os dados experimentais e as curvas representam o ajuste do modelo. Pode-se observar que para o material mais fino gerado o ajuste foi melhor do que para os ajustes de granulometrias próximas ao tamanho original

A Tabela 5.4 mostra os parâmetros utilizados na função beta incompleta utilizada para construir a *appearance function*.

Tabela 5.4 - Parâmetros da função beta incompleta utilizada para construir a *appearance function* dos coques A e B

$n$	Coque A		Coque B	
	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\alpha_n$	$\beta_n$
1,2	0,622	7,694	0,761	10,614
1,5	0,905	6,658	1,116	8,902
2	1,312	6,288	1,426	7,648
4	1,090	2,179	1,223	2,792
25	0,929	0,573	0,906	0,523
50	0,877	0,389	0,865	0,359
75	0,851	0,314	0,088	0,310

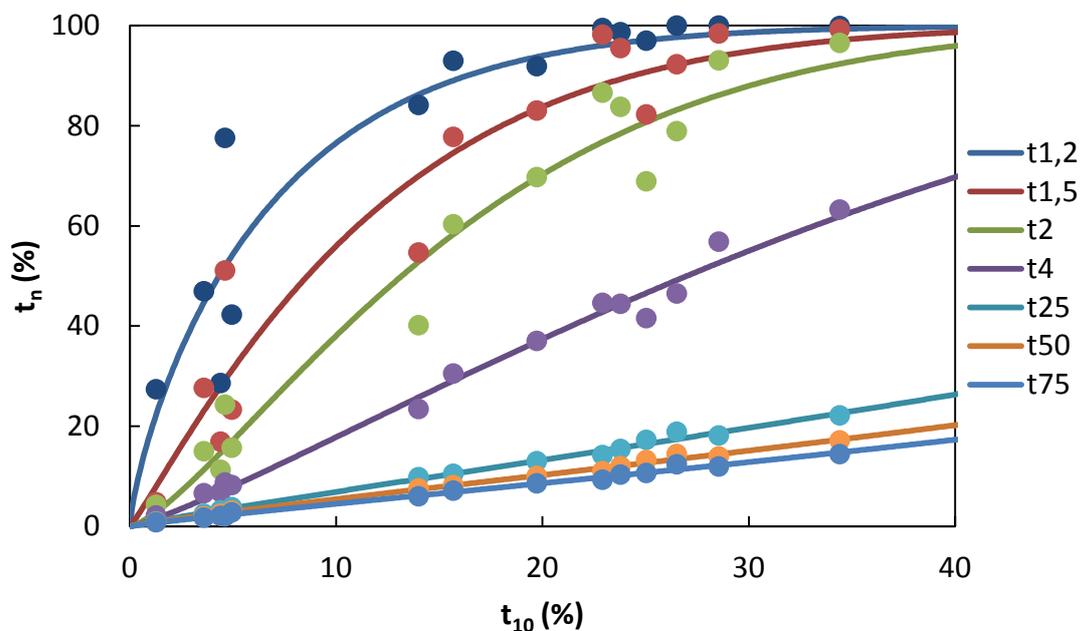


Figura 5.10 - *Appearance function* para o Coque A. Pontos são os dados experimentais e as linhas os dados modelados pela função beta incompleta (Eq. 3.12) e parâmetros da Tabela 5.4

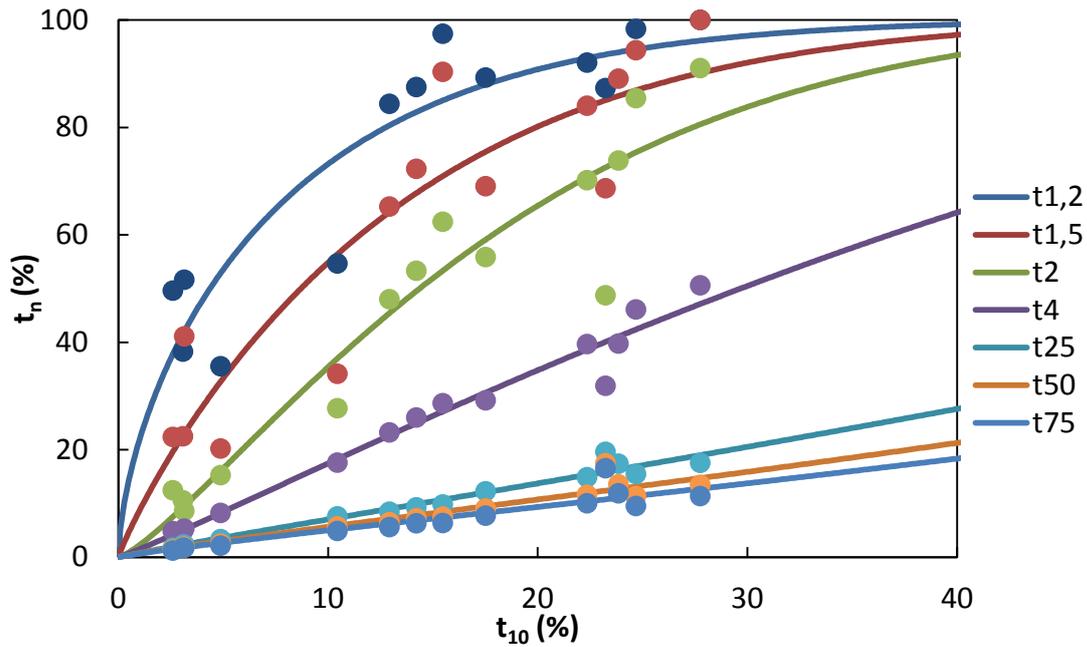


Figura 5.11- *Appearance function* para o Coque B. Pontos são os dados experimentais e as linhas os dados modelados pela função beta incompleta (Eq. 3.12) e parâmetros da Tabela 5.4.

Entretanto, apenas a *appearance function* não é suficiente para descrever a distribuição granulométrica das partículas. Para isso, é necessária uma importante relação que pode ser obtida entre a fragmentação resultante e a energia de impacto. Esta relação pode ser obtida através da Equação 3.12, proposta por Tavares (2009), onde é possível incorporar o efeito da energia de fratura, que varia em função do tamanho da partícula.

A Figura 5.12 apresenta os resultados obtidos a partir da Equação 3.12 para os dois tipos de coque, onde os triângulos representam os dados experimentais e as linhas representam os ajustes do modelo. A Tabela 5.5 mostra os diferentes parâmetros de  $A$  e  $b'$  da Equação 3.12, obtidos para os dois coques.

Tabela 5.5 – Parâmetros do modelo da função quebra para os coques A e B

Parâmetro	Coque A	Coque B
$A$	27,3	69,63
$b'$	0,111	0,0285

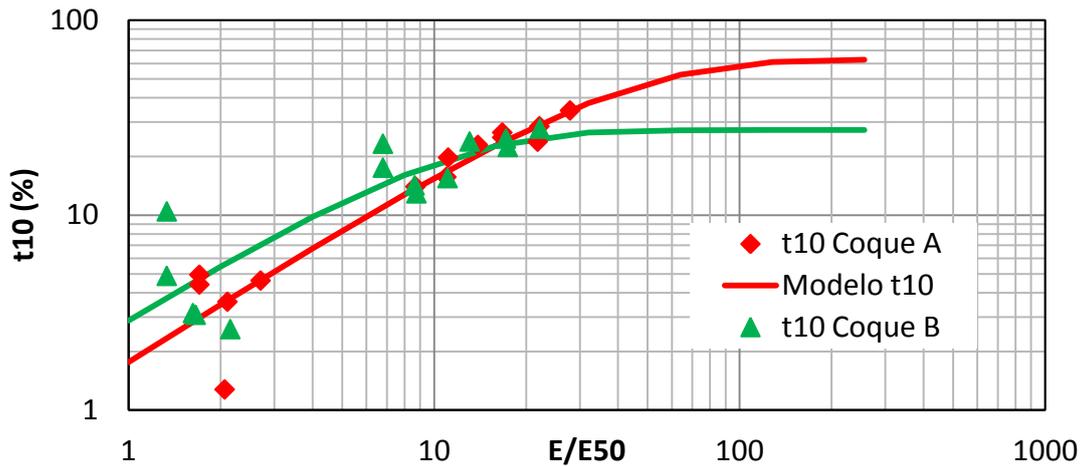


Figura 5.12– $t_{10}$  como função da razão entre as energias de impacto e de fratura para os Coques A e B. Os pontos são dados experimentais e as linhas contínuas são os ajustes obtidos para o modelo da Equação 3.12 cujos parâmetros estão listados na Tabela 5.5.

É possível observar na Figura 5.12 que os modelos para o cálculo do  $t_{10}$  em função da energia de fratura apresentaram curvas diferentes, porém os dados experimentais são muito próximos. Algumas das medições podem ser *outliners* que deslocaram as curvas fazendo com que haja esta falha no ajuste do modelo.

Apesar deste problema foi possível fazer o caminho inverso e reconstruir a distribuição granulométrica com os valores de  $t_{10}$ , da energia de impacto e de fratura, como mostra a Figura 5.13 e 5.14, onde os pontos representam os valores obtidos experimentalmente e as linhas apresentam os valores simulados.

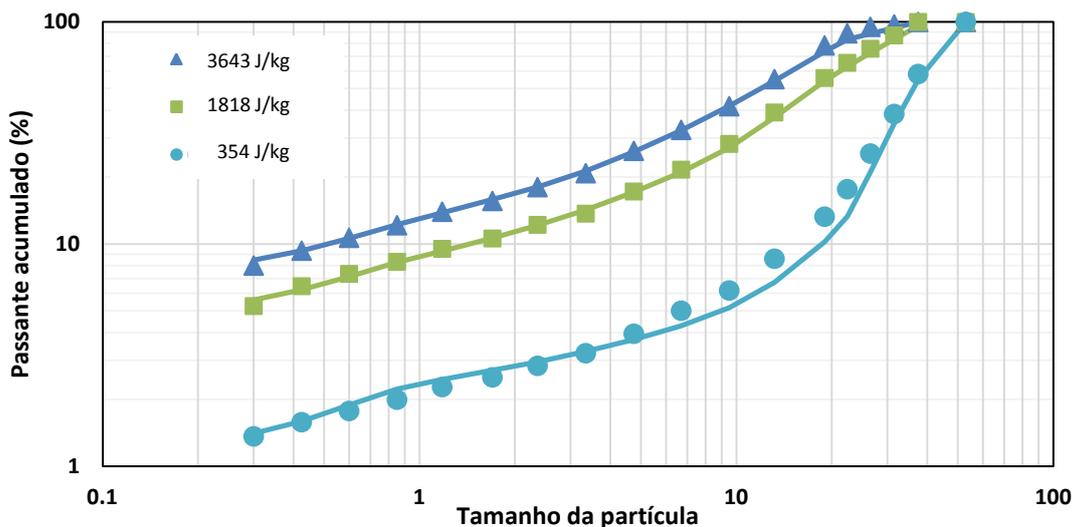
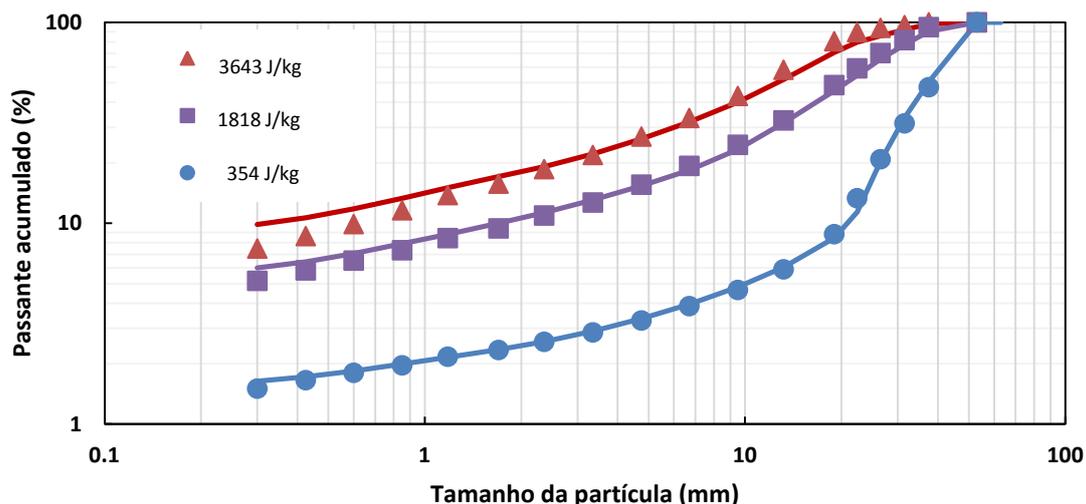


Figura 5.13 - Reconstrução da distribuição granulométrica da quebra das partículas de 45x37,5mm do Coque A



**Figura 5.14– Reconstrução da distribuição granulométrica da quebra das partículas de 45x37,5mm do Coque B fragmentação superficial**

Por meio dos ensaios de autofratura foi possível quantificar a perda de massa por partícula após cada impacto. Quando uma partícula perde menos que 10% da sua massa original após um impacto, considera-se que a partícula sofre uma fratura superficial, também chamada de abrasão ou lascamento. Ao pesar cada partícula individualmente gera-se um grande número de informações a respeito do percentual de massa perdido por cada impacto de uma partícula. Combinando-se essas informações na forma de uma distribuição cumulativa, obtém-se os resultados mostrados nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17, que evidenciam como a perda mássica por abrasão varia em função do tamanho de partícula e da energia de impacto para os dois tipos de coque. Na Figura 5.15 são apresentados os resultados com partículas de coque na faixa de 31,5x26,5 mm, na Figura 5.16 os resultados com partículas de coque na faixa de 45x37,5 mm enquanto na Figura 5.17, são apresentados os resultados para a faixa de 63x50 mm. Em todos os gráficos, cada ponto representa a perda mássica de uma partícula após um impacto.

Na Figura 5.15 é possível observar que maior a altura de queda das partículas, mais para a direita as linhas estão deslocadas. Este comportamento era esperado, pois quanto maior a energia aplicada, maior a perda mássica das partículas. Fazendo a comparação entre os tipos de coque em cada uma das alturas, pode-se observar que o coque B apresenta maior resistência abrasão que o coque A. Esse comportamento se repete também nos gráficos da Figura 5.16 e da Figura 5.17 nas granulometrias de 45,37,5 mm e 63x50 mm, respectivamente.

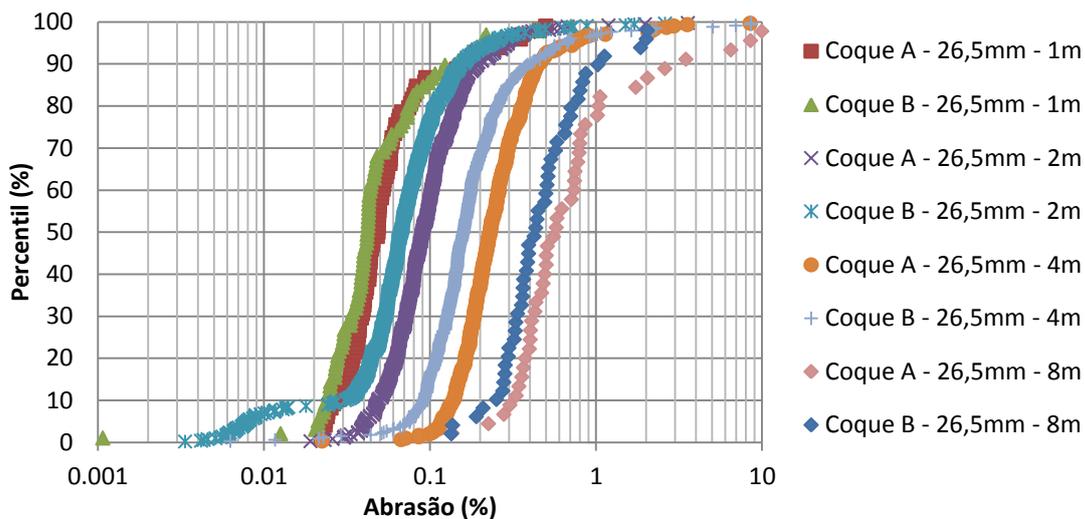


Figura 5. 15 - Abrasão por impacto para partículas de 31,5x26,5mm em diferentes alturas

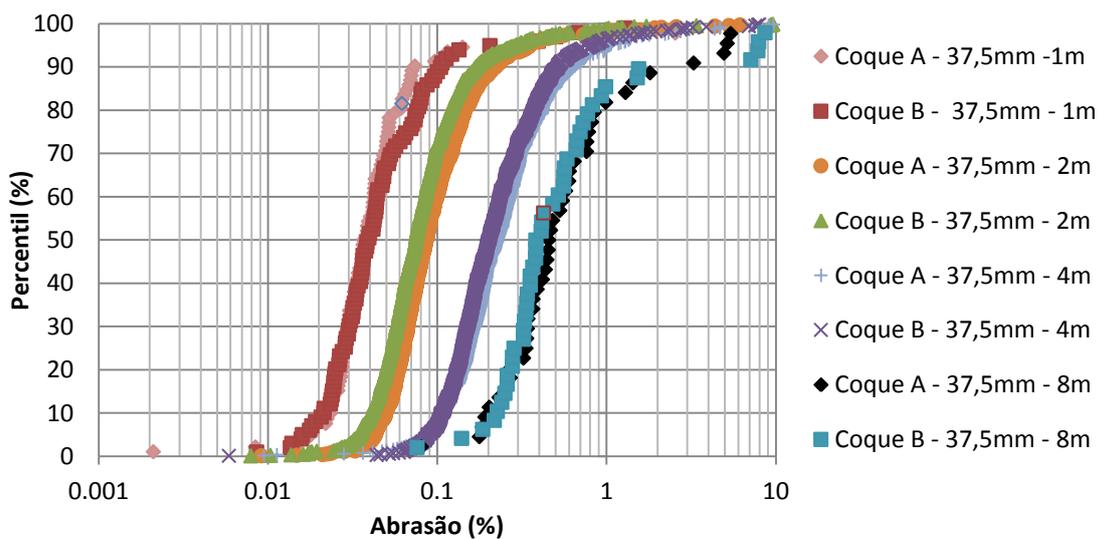


Figura 5. 16 - Abrasão por impacto para partículas de 45x37,5 mm em diferentes alturas

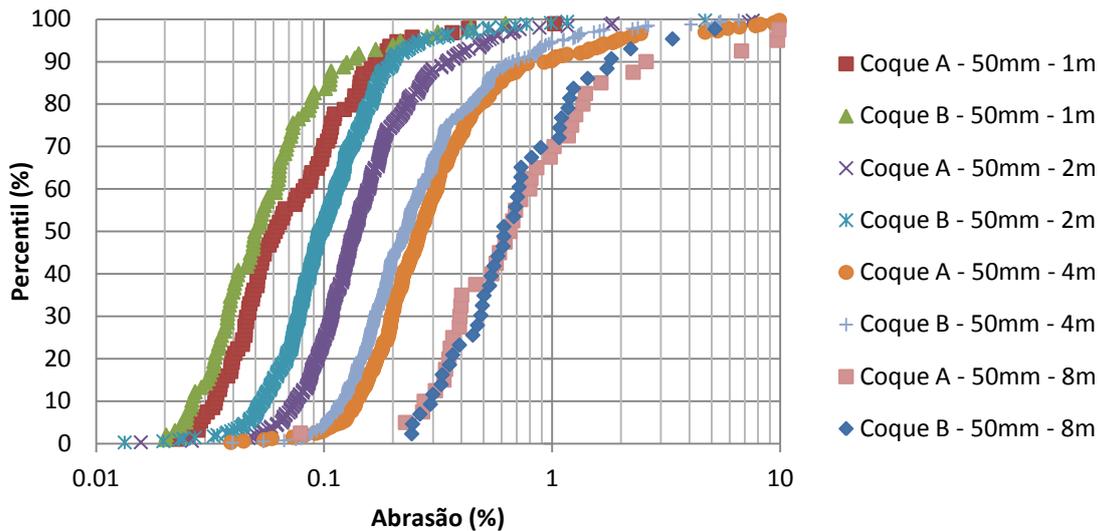


Figura 5. 17- Abrasão por impacto para partículas de 63x50 mm em diferentes alturas

Pode-se dizer que as curvas delineadas pela distribuição de perdas mássicas nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 podem ser descritas por uma função log-normal. Desta forma, é possível extrair o valor de suas medianas que representam a perda mássica de abrasão equivalente a 50% da população das partículas de cada coque nas três diferentes alturas e com estes valores foi possível construir os gráficos das Figuras 5.18 e 5.19 que correlaciona a massa superficial perdida com a energia aplicada no impacto.

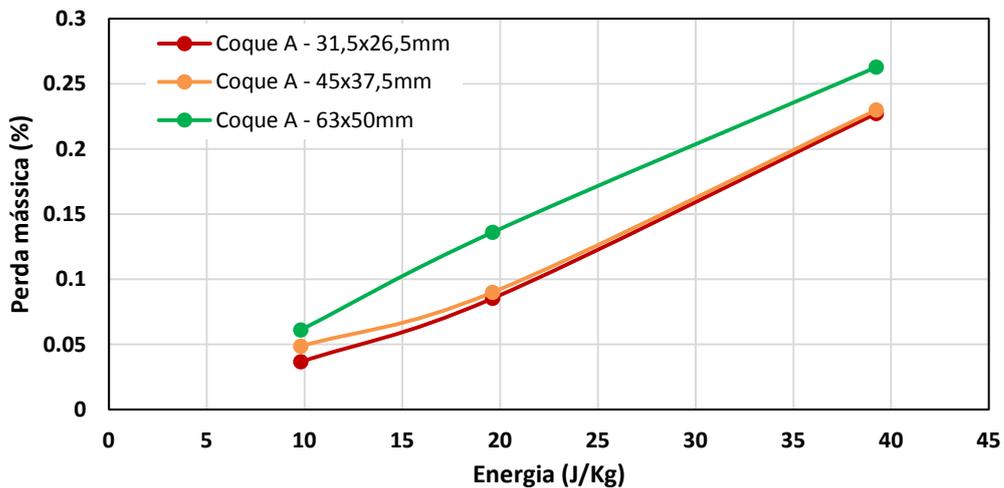
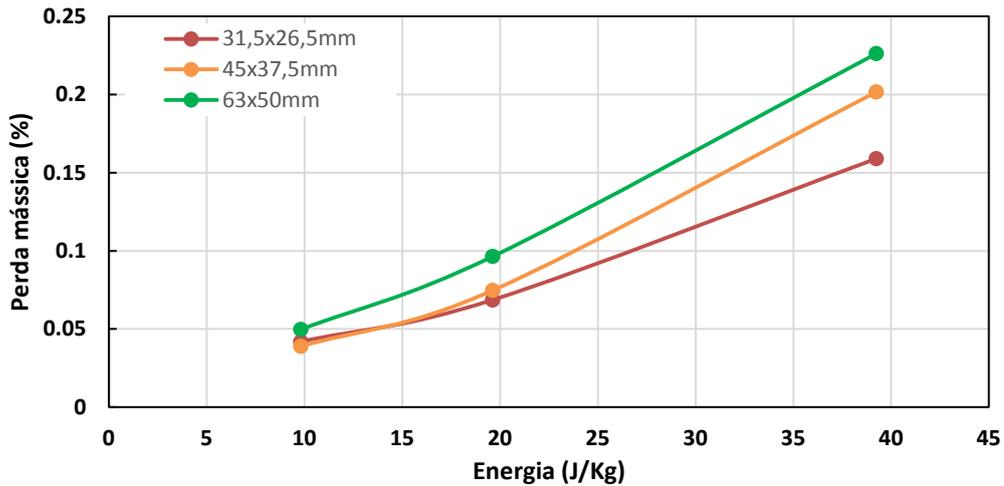


Figura 5. 18 - Perda mássica por impacto por partícula em função da energia aplicada por impacto ao Coque A



**Figura 5. 19- Perda mássica por impacto por partícula em função da energia aplicada por impacto ao Coque B**

Na Figura 5.18 e na Figura 5.19 pode-se observar o efeito da altura de queda das partículas, mostrando que quando submetidas a maiores energias de impacto tendem a apresentar maior perda mássica que partículas submetidas à menores energias. Outro efeito importante é o da granulometria, quanto mais grosso o material, maior é a perda mássica. Entretanto, na Figura 5.18, que mostra o comportamento de partículas do Coque A, não há grande diferença entre as partículas do lote de 31,5x26,5 mm para o de 45x37,5 mm. Isto ocorre, pois há um comportamento bimodal dentro de cada lote, como observado na seção 5.3.2. Pelo fato da escolha das partículas ser aleatória, partículas menos resistentes da granulometria mais fina podem ter sido utilizadas nos ensaios fazendo com que a perda mássica se assemelhe a do lote de tamanho intermediário.

Fazendo uma comparação entre os gráficos dos dois coques, a perda mássica por impacto de todos os lotes de Coque A para energia de 39,24 J/kg foi acima de 0,20% da massa enquanto que para o Coque B a perda mássica por impacto do lote mais fino foi bem próximo de 0,15%. Mais uma vez, pode-se observar menor resistência a impactos do Coque A em relação ao Coque B.

## 6. Conclusões

Os coques apresentaram resistência a impactos e a abrasão diferentes. Segundo Valia (2008), geralmente a qualidade do coque produzido em uma coqueria do tipo *heat recovery* será superior ao coque produzido por uma mesma mistura de carvões em uma bateria convencional. Esta diferença ocorre devido a diferenças em parâmetros fundamentais da coqueificação, como por exemplo, temperatura e tempo. Esta hipótese se confirmou por meio dos resultados das técnicas de caracterização, pois permitiram identificar as características de quebra catastrófica, enfraquecimento e perda mássica para impactos de baixa energia e granulometria dos finos gerados. Estes resultados indicam que o Coque B (produzido em bateria *Heat Recovery*) apresentou nos ensaios de fragmentação maior resistência a quebra e a abrasão do que o Coque A (produzido em bateria convencional). Entretanto, o comportamento de ambos os coques é muito similar, na forma, no acúmulo de dano e até mesmo na distribuição granulométrica dos fragmentos gerados após quebra catastrófica, apresentando valores de  $t_{10}$  semelhantes.

O modelo de distribuição de energia de fratura log-normal talvez não seja o mais apropriado para descrever o comportamento das partículas de coque sujeitas à repetidos impactos, visto que foi possível descrever matematicamente por meio de um ajuste razoável apenas até o décimo impacto. A partir do décimo primeiro há formação de um platô na quantidade de partículas quebradas em função do número de impactos. Isso indica que provavelmente há duas populações de partículas contidas na mesma faixa de tamanho, sendo uma delas menos resistente e uma outra mais resistente, esse comportamento pode ser representado por uma distribuição de energias de fratura bimodal. Entretanto não foi possível realizar experimentos adicionais para confirmar esta hipótese, ficando, portanto, como sugestão para trabalhos futuros a investigação desta hipótese.

Por meio das técnicas de caracterização utilizadas neste trabalho foi possível construir um modelo que permite prever a distribuição granulométrica do coque quando este é submetido a impactos de energias conhecidas, incluindo efeitos de perda mássica por abrasão, quebra catastrófica e enfraquecimento da partícula quando submetida a impactos sucessivos. Com isso pode-se esperar que os modelos de quebra utilizados nesse trabalho também apresentem bons resultados na investigação das propriedades de quebra do sinter.

## 7. Referências

- ARAÚJO, L. A., 1997, *Manual de Siderurgia*. Volume 2. São Paulo, Editora Arte & Ciência.
- BRADASCHIA, C., 1986, *Siderurgia para não-siderurgistas*. São Paulo, Curso ABM
- BAJAY, V. B., 2009, *Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico (2025): Eficiência Energética na Siderurgia*. Nota técnica, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília.
- CARVALHO, R. M., TAVARES, L. M., SECCHI, A. R., 2009. *Determinação de parâmetros ótimos da função quebra de minérios utilizando o modelo da função beta incompleta In: 15th European Symposium on Comminution and Classification. Proceedings of the 15th European Symposium on Comminution and Classification*, v.1, 343-343.
- CARVALHO, R. M., 2013. *Mechanistic modelling of semi-autogenous grinding*. Tese de Doutorado, PEMM/COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- CARVALHO, R.M., TAVARES, L. M., 2013, *Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model. Minerals Engineering*, 43-44, pp. 91-101.
- CASAGRANDE, C.M.2010, *Avaliação dos parâmetros de CRI e CSR do coque produzido em forno industrial, forno de soleira aquecida e box test*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- CASTRO, L.F.A., FIGUEIRA, R. M., TAVARES, R. P. 2004. *Princípios Básicos e processos de fabricação do gusa ao aço líquido*. Volume 1. Belo Horizonte. Editora Arte & Ciência
- CAVALCANTI, P.P.S., 2015. *Calibração e validação de modelo matemático de degradação de pelotas queimadas de minério de ferro durante manuseio e transporte*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro.
- COSTA, L.C., 2003 *Transporte, caracterização e controle de qualidade de coque de alto-forno*. In: ULHÔA, Murilo B. 2003 *Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno*. São Paulo. ABM
- CUNHA, E. R., CARVALHO, R. M. D. & TAVARES, L. M. 2013. *Mechanistic model of the vertical shaft impact crusher. In: 13th European Symposium on Comminution and Classification. Proceedings of the 13th European Symposium on Comminution and Classification*, v.1, 343 – 343.
- Evolução da quantidade de coque exportado e preço médio FOB do coque - Disponível em <[www.metalprices.com/historical/database/coke/coke](http://www.metalprices.com/historical/database/coke/coke)>. Acesso em 05 de Dezembro de 2015.
- GEERDES, M., VAN DER VLIET, C., TOXOPEUS, H. & MEDEIROS, F. T., 2008 *Práticas modernas para operação de alto-fornos*. Volume 1. Belo Horizonte. Danieli Corus.

- KING, R. P. 2001. *Modeling and simulation of mineral processing systems*, Oxford, Butterworth-Heinemann
- NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T., 1996, *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization*, University of Queensland, Brisbane.
- OSÓRIO, E., VILELA, A.C.F., SAMPAIO, C. H., 2008. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico, 8-9.
- Produção Mundial de Aço com Alto Forno - Disponível em <[www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/iron-stats/2015/Iron-production-Jan-Dec-2015-vs-2014](http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/iron-stats/2015/Iron-production-Jan-Dec-2015-vs-2014)>. Acesso em 05 de Dezembro de 2015.
- SILVEIRA, M.A.C.W., 2012, *Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante manuseio e transporte*. Dissertação de Mestrado. PEMM/COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- SILVA, O.J. da, 2008. *Caracterização Tecnológica de Carvões para Coqueria*". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais. Brasil
- TAVARES, L.M.M., 1997, *Microscale investigation of particle breakage applied to the study of thermal and mechanical predamage*. Tese de doutorado, University of Utah, EUA.
- TAVARES, L.M., 2004, Optimum routes in particle breakage by impact, *Powder Technology*, v. 142, 81–91.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2007, Impact work index prediction from continuum damage modeling of particle fracture, *Minerals Engineering* 20, 1368–1375.
- TAVARES, L. M. & CARVALHO, R. M. 2009. Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills. *Minerals Engineering*, 22, 650–659.
- TAVARES, L.M., KING, R.P., 1998, "Single particle fracture under impact loading", *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, p. 1-28.
- TAVARES, L. M. & KING, R. P. 2002. Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. *Powder Technology*, 123 (2-3), 138-146.
- TAVARES, L.M., CARVALHO, R.M., 2008, Modeling iron ore degradation during handling, 3rd International Meeting on Iron making and 2nd International Symposium on Iron Ore, September 22–26, São Luis. Maranhão. Brasil.
- TAVARES, L. M. & SILVEIRA, M. A. C. W. 2008. Comparison of measures of rock crushability. In: *Meftuni Yekeler. (Org.). Fine Particle Technology and Characterization. Kerala: Research Signpost*, 1-20.
- ULHÔA, Murilo B. 2003. *Caracterização de carvão para fabricação de coque de alto-forno*. São Paulo: ABM, pp. 117 – 148.