



CRITÉRIOS DE PROJETO
PARA
MOINHOS DE CIMENTO PORTLAND

Gabriel Augusto Rodrigues Nunes Oliveira

EQW 501 Projeto de Final de Curso

Orientador:

Prof. Dr. Abraham Zakon

Janeiro de 2012

CRITÉRIOS DE PROJETO
PARA
MOINHOS DE CIMENTO PORTLAND

Gabriel Augusto Rodrigues Nunes Oliveira

**Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de
Engenheiro Químico.**

Aprovado por:

Prof. Estevão Freire

Prof^a. Leila Yone Reznik

Prof^a. Margarida Lourenço Castelló

Orientado por:

Abraham Zakon, D.Eng.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro de 2012

Oliveira, Gabriel Augusto Rodrigues Nunes.

Critérios de projeto para moinhos de cimento Portland/ Gabriel Augusto Rodrigues Nunes Oliveira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ,2012

xiii, 107 p.; il.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química,2012.

Orientador: Abraham Zakon

1. Moinho de bolas. 2. Cimento Portland. 3. Moinho vertical de rolos 4. Projeto Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Abraham Zakon.

I. Critérios de projeto para moinhos de cimento Portland

À minha mãe, Rose, pelo exemplo de vida, de honestidade, de sucesso, de moral e por me amar e me apoiar incondicionalmente em todas as etapas da minha vida.

“...Procurem deixar este mundo um pouco melhor do que encontraram e, quando chegar a hora de morrer, poderão morrer felizes, sentindo que pelo menos não desperdiçaram o tempo, e que procuraram fazer o melhor possível...”

Robert Stephenson Smith Baden-Powell

AGRADECIMENTOS

PRIMEIRAMENTE A DEUS, QUE ME PERMITIU CHEGAR ATÉ AQUI!

A minha namorada Nathália, pelo carinho, amor e pela paciência na elaboração desse projeto.

A Lafarge Brasil, por ter me dado uma oportunidade de estágio que foi o ponto de partida para esse projeto e pelos livros e documentos usados como referências.

Ao meu orientador, Prof. Abraham Zakon pela orientação e por compartilhar seu conhecimento e sua experiência de vida e profissional.

Resumo do Projeto Final
apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro
como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de
Engenheiro Químico.

CRITÉRIOS DE PROJETO PARA MOINHOS DE CIMENTO PORTLAND

Gabriel Augusto Rodrigues Nunes Oliveira

Janeiro, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Abraham Zakon

O coprocessamento de resíduos industriais e urbanos possibilitou reduzir o consumo de combustíveis naturais na fabricação de cimentos Portland por via seca, pois os das vias úmidas foram abandonados pelo mesmo motivo. A adoção de moinhos verticais de rolos para farinha ou produto numa indústria cimenteira segue essa tendência de redução de custos operacionais, podendo atingir um abatimento entre 10 a 20% da despesa relacionada com o consumo de energia. A variedade existente de moinhos horizontais e verticais é apreciável, existindo, inclusive modelos de ambos os tipos que utilizam bolas, enquanto outros adotam rolos ou cilindros metálicos maciços. Os mecanismos de moagem presentes num moinho de bolas podem ser individuais ou associados e dependem de ações fraturantes oriundas de impacto, compressão e abrasão. O mecanismo de moagem num moinho vertical de rolos baseia-se na força centrífuga e na ação de compressão que os corpos moedores exercem contra as partículas finas de sólidos sobre uma mesa moedora e/ou um anel ou cuba de retenção e esmagamento. Os moinhos de bolas possibilitam secar o material moído, sendo associados a separadores externos para reciclar o material grosso, ao passo que o moinho vertical de rolos executa três operações num único equipamento: secagem, moagem e separação. Os ensaios de Bond e de Hardgrove servem para determinar a moabilidade de sólidos naturais e sintéticos em moinhos de bolas e de bolas em anéis. Apesar de existir no mercado um moinho laboratorial envolvendo um rolo vertical numa pequena cuba similar a um Moinho Raymond, aparentemente inexiste um procedimento padronizado para embasar o projeto deste tipo de moinho vertical de rolos que seja aplicável aos sólidos naturais e sintéticos. Da mesma forma, parece inexistirem aparatos laboratoriais e procedimentos pertinentes para determinar a moabilidade em outras modalidades de moinhos verticais de rolos. O presente projeto final de graduação elencou os critérios principais que são adotados para dimensionar, selecionar e detalhar moinhos de bolas e moinhos verticais de rolos para sua aquisição por indústrias cimenteiras, bem como alguns parâmetros para controle do processo de moagem, aplicáveis a casos reais que dependem dos dados de processo químico industrial, que devem ser fornecidos pelas empresas interessadas.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – OBJETIVO DO PROJETO.....	1
1.2 – METODOLOGIA ADOTADA	2
1.3 – BUSCA DE INFORMAÇÕES.....	2
CAPÍTULO 2 - PRODUÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND	3
2.1 - PROCESSOS CONSAGRADOS DA FABRICAÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND.....	3
2.2 – COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FÁBRICAS DE CIMENTO PORTLAND	6
2.2.1 – Coprocessamento no Brasil e no exterior	7
2.2.2 – Estágio atual da evolução tecnológica da fabricação de cimentos Portland	7
2.2.3 – Vantagens ambientais e sociais do coprocessamento	7
2.2.4 – Vantagens técnicas do coprocessamento em fornos de clínquer.....	9
2.2.5 – Limitações do coprocessamento em fornos das indústrias cimenteiras	9
2.3 - CLINQUERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	10
2.3.1 – A composição do clínquer para cimento Portland	10
2.3.2 – As etapas físicas e químicas da clinquerização	11
2.3.2 - Zonas de termoprocessamento no forno de clínquer	12
2.4 - PROCESSOS E CONCEITOS DE FRAGMENTAÇÃO EMPREGADOS NAS INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS.....	13
2.4.1 – Denominações usuais para fragmentação.....	13
2.4.2 – Concepções clássicas e parâmetros operacionais para britadores e moinhos industriais.	13
2.4.3 – Britagem de matérias-primas.....	15
2.4.4 – Evolução de alguns moinhos industriais	18
2.4.5 – Moagem de matérias-primas, combustíveis e cimento Portland	20
2.4.5.1 - Moagem de cru	20
2.4.5.2 - Moagem de Combustível.....	20
2.4.5.3 - Moagem de cimento Portland	20
2.4.6 - Moinhos adotados nas indústrias cimenteiras	20
2.4.6.1 - Moinho de Barras	21
2.4.6.2 - Moinhos Autógenos.....	21
2.4.6.3 - Moinhos de Bolas	22
2.4.6.4 - Moinho Vertical de bolas ou seixos Metso	23
2.4.6.5 - Moinhos de Rolos	25
2.5 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 2.....	28
2.6 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2.....	29
CAPÍTULO 3 - OFERTA E CONSUMO DE CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL	31
3.1 - TIPOS NORMALIZADOS E APLICAÇÕES DE CIMENTO PORTLAND	31
3.2 - APLICAÇÕES NORMALIZADAS DOS CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL	32
3.2.1 - Cimento Portland Comum CP I e CP I-S (NBR 5732)	32
3.2.2 - Cimento Portland CP II (NBR 11578)	32
3.2.2.a - Cimento Portland CP II-Z.....	32
3.2.2.b - Cimento Portland Composto CP II-E.....	32
3.2.2.c - Cimento Portland Composto CP II-F	32
3.2.3 - Cimento Portland de Alto Forno CP III (NBR 5735)	32
3.2.4 - Cimento Portland CP IV (NBR 5736)	33
3.2.5 - Cimento Portland CP V ARI - (Alta Resistência Inicial - NBR 5733).....	33
3.2.6 - Cimento Portland CP RS - (Resistente a sulfatos - NBR 5737)	33
3.2.7 - Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) - (NBR 13116)	34
3.2.8 - Cimento Portland Branco (CPB) - (NBR 12989)	34
3.2.9 - Cimento Portland para Poços Petrolíferos (CPP) -(NBR 9831).....	34
3.3 - MERCADO BRASILEIRO.....	35
3.4. CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 3.....	36
3.5. REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 3.....	36

CAPÍTULO 4 - FRAGMENTAÇÃO E CLINQUERIZAÇÃO NAS INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS	37
4.1 - PROPRIEDADES DO MATERIAL A FRAGMENTAR.....	37
4.1.1 - Dureza	37
4.1.2 - Moabilidade.....	38
4.1.2.1 - Ensaio de Bond para determinar a moabilidade em moinhos de bolas.....	38
4.1.2.2 - Ensaio de Hardgrove para moabilidade em moinho de bolas com anel.....	40
4.2 - INFLUÊNCIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS NA MOAGEM DA FARINHA PARA CLINQUERIZAÇÃO.	41
4.2.1 - Calcário	41
4.2.2 - Argila	42
4.2.3 - Bauxita	42
4.2.4 - Minério de ferro.....	43
4.2.5 - Efeitos da moagem da farinha sobre a sua clínquerização	43
4.3 - INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	45
4.4 - FATORES DE INFLUÊNCIA NA MOABILIDADE DO CLÍNQUER.....	46
4.4.1 - Proporção dos constituintes presentes na moagem e no clínquer	46
4.4.2 - O nível de cozimento do clínquer	47
4.4.3 - Porosidade do clínquer	47
4.4.4 - Idade do clínquer	47
4.5 - INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO DO CLÍNQUER NA MOAGEM DE CIMENTO.	47
4.6 - INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES FINAIS NA MOAGEM DE CIMENTO PORTLAND	48
4.6.1 - Gesso	48
4.6.2 - Escória granulada de alto forno	49
4.6.3 - Materiais Pozolânicos	49
4.6.4 - Materiais carbonáticos.....	50
4.7 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 4.....	50
4.8- REFERÊNCIAS DO CAPITULO 4.....	51
CAPÍTULO 5 - MECANISMOS DE MOAGEM INDUSTRIAL DE FARINHAS E CLÍNQUER. ...	52
5.1 - CURVAS CINÉTICAS DE MOAGEM.	52
5.1.1 - Função de seleção e velocidade específica de quebra.	52
5.1.2 - Função de Quebra	54
5.1.3 - Função de classificação.	54
5.2 - MECANISMOS DE COMINUIÇÃO NUM MOINHO DE BOLAS	55
5.2.1 - Impacto.....	55
5.2.2 - Compressão	55
5.2.3 - Abrasão	55
5.3 - MOVIMENTOS DOS CORPOS MOEDORES NO INTERIOR DOS MOINHOS DE BOLAS	56
5.3.1 - Catarata de bolas.....	56
5.3.2 - Cascata de corpos moedores	56
5.3.3 - Centrifugação dos corpos moedores	57
5.4 - O DESGASTE DOS CORPOS MOEDORES	57
5.5 - CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA NUM MOINHO.	59
5.5.1 - Primeira lei da fragmentação de Rittinger ou "Teoria de superfície".....	59
5.5.2. - Segunda lei da fragmentação de Kick ou "Teoria de Volumes"	59
5.5.3 - Terceira lei da cominuição	60
5.5.4 - Teoria de Charles e Hukki	60
5.6 - O TRANSPORTE DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS NO INTERIOR DE UM MOINHO CILÍNDRICO DE BOLAS	61
5.6.1 - Condições de processamento num moinho de bolas	61
5.6.2 - A passagem de ar no interior de um moinho de bolas	62
5.6.3 - Razão de preenchimento de material a moer	64
5.7 - MECANISMO DE COMINUIÇÃO NUM MOINHO VERTICAL DE ROLOS INCLINADOS.	65
5.7.1 - A operação industrial de um moinho de rolos verticais inclinados	66
5.7.2 - Efeitos da operação de um moinho de rolos verticais inclinados	67
5.7.3 - Ângulo de pinçamento do rolo moedor	69
5.7.4 - Leitões formados na moagem vertical com rolos inclinados.....	69
5.8 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 5	70
5.9 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 5.....	71

CAPÍTULO 6 - DIMENSIONAMENTO, PROJETO E SELEÇÃO DE MOINHOS INDUSTRIAIS	72
6.1 – DIMENSIONAMENTO DO TAMANHO DE UM MOINHO DE BOLAS	72
6.2 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS PARA MOINHOS DE BOLAS	72
6.2.1 – Calha de alimentação	72
6.2.2 – Carcaça de um moinho de bolas	73
6.2.3 – Portas de acesso ao moinho de bolas	74
6.2.4 – Revestimentos internos de um moinho de bolas	74
6.2.4.1 – Revestimentos de suspensão para moinhos de bolas	74
6.2.4.2 – Revestimentos de classificação para moinhos de bolas	75
6.2.5 – Grelhas dos moinhos de bolas	77
6.2.6 – Descarga de pó num moinho de bolas	78
6.2.6.1 – Descarga por transbordo	78
6.2.6.2 – Descarga por diafragma	78
6.2.7 – Corpos moedores para moinhos de bolas	79
6.2.7.1 – Fabricação de bolas metálicas para moagem	79
6.2.7.2 – Determinação do tamanho de bolas para moagem	80
6.3 – PARÂMETROS DO DIMENSIONAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO MOINHO DE BOLAS	81
6.3.1 – Energia consumida para acionar as rotações do moinho cheio	81
6.3.2 – Velocidade rotacional do moinho em rotações por minuto	81
6.3.3 – Volume da carga específica de corpos moedores ou de enchimento	82
6.3.4 – Resfriamento do moinho	83
6.4 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS PARA MOINHOS VERTICAIS DE ROLOS	83
6.4.1 – A carcaça	83
6.4.2 – Rolos de moagem vertical	85
6.4.3 – Mesa de moagem do moinho vertical de rolos	86
6.4.4 – Anel de Barragem de mesas de moagem (Dam Ring)	87
6.4.5 – Anel defletor de mesas de moagem (Nozzle Ring)	88
6.4.6 – Separador ou classificador interno de tamanho de partículas do moinho vertical	89
6.4.7 – Detecção e separação de metais alimentados ao moinho	90
6.4.8 – Injeção de água	91
6.4.9 – Sistema de carregamento hidráulico	92
6.5 – DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UM MOINHO VERTICAL DE ROLOS	92
6.5.1 – Alimentação para um moinho vertical de rolos	92
6.5.2 – Pressão específica do rolo sobre as partículas	93
6.5.3 – Velocidade da mesa moedora de um moinho vertical de rolos	94
6.6.4 – Consumo de energia de um moinho vertical de rolos	95
6.6 – VANTAGENS DO MOINHO VERTICAL DE ROLOS	96
6.7 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE DESEMPENHO DE MOINHOS DE ROLOS INCLINADOS COMERCIAIS	98
6.7.1 – Moinho vertical de rolos inclinados QUADROPOL da Polysius	98
6.7.2 – Moinho vertical de rolos inclinados Gebr. Pfeifer	100
6.7.3 – Moinho vertical de rolos inclinados Loesche	101
6.8 – ETAPAS GENÉRICAS DE SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE UM MOINHO PARA INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS	103
6.8.1 – Etapas do dimensionamento de um moinho de bolas para fábricas de cimentos Portland	103
6.8.2 – Etapas do dimensionamento de um moinho vertical de rolos para indústrias cimenteiras	104
6.9 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 6	104
6.10 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 6	106
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Parâmetros de projeto e operação de equipamentos físicos e químicos.....	1
Figura 2.1 - Rotas tecnológicas para a produção de cimento Portland	3
Figura 2.2 - Sistemas de queima adotados em fábricas de cimento Portland	4
Figura 2.3 - Fluxograma de fabricação de cimento Portland	5
Figura 2.4 - Matérias-primas para fabricar cimento Portland	6
Figura 2.5 - Pontos de alimentação de material para Co-processamento nas indústrias de cimento.....	8
Figura 2.6 - Forno rotativo de clínquerização em Cantagalo, RJ	11
Figura 2.7 - Zonas distintas do piroprocessamento de um forno de clínquer para Cimento Portland	12
Figura 2.8 - Tipos de britadores e moinhos de rolos, F = finos, G = grossos, M = médios e.....	14
Figura 2.9 - Aplicabilidade de equipamentos de cominuição	15
Figura 2.10 - Britador de mandíbulas.....	17
Figura 2.11 - Britador de martelos	17
Figura 2.12 – a) Moinho Raymond	19
..... b) Moinho Trapezoidal	19
Figura 2.13 - Moinhos de barras	21
Figura 2.14 - Moinho Autógeno.....	21
Figura 2.15 - Moinho de bolas com 2 câmaras (a) e 3 câmaras (b)	22
Figura 2.16 - Esquema de moagem do VERTIMILL.	23
Figura 2.17 - Moinho Vertical de bolas ou seixos.....	24
Figura 2.18 - Moinhos de rolos prensas de alta pressão	25
Figura 2.19 - Sistema de cominuição com um pré-moinho.....	26
Figura 2.20 - Moinho vertical de Rolos	27
Figura 4.1 - Moinho de bolas padronizado para o ensaio de Bond para determinar a moabilidade	38
Figura 4.2- Máquina para ensaios de moabilidade de Hardgroove	40
Figura 4.3 - Mina de calcário da fábrica de cimento Portland Mauá da Lafarge em Cantagalo, RJ.	41
Figura 4.4 - Mina de argila em Cantagalo, RJ da fábrica de Cimento Portland da Lafarge.....	42
Figura 4.5 - Relação entre quantidade de combustível e redução de rejeitos.....	43
Figura 4.6 - Zona regular de CaO livre no clínquer de cimento Portland	44
Figura 4.7- Grandes cristais de belita.....	44
Figura 4.8 - Influência da belita no consumo energético do moinho.....	46
Figura 4.9 - Influência da porosidade no consumo energético do moinho	47
Figura 5.1 - Relação entre a taxa específica de quebra e o tamanho da partícula.....	53
Figura 5.2 - Determinação da função de quebra.....	54
Figura 5.3 - Fratura por impacto.	55
Figura 5.4 – a) Fratura por compressão.	55
..... b) Fratura por abrasão.	55
Figura 5.5 - Movimentos de catarata e de cascata.....	57
Figura 5.6 - Movimento de centrifugação comparado aos anteriores.....	57
Figura 5.7 - Desgaste de corpos moedores	58
Figura 5.8 - Relação entre energia consumida e tamanho da partícula.....	60
Figura 5.9 - Ultrapassagem de sólidos por baixo da carga moedora no moinho de bolas	62
Figura 5.10 - Tiragem de ar no moinho de bolas.....	62
Figura 5.11 - (a) Bolas grandes e (b) bolas finas.	63
Figura 5.12 - Moagem inter-partículas.	64
Figura 5.13 - Taxa de quebra contra razão de preenchimento.	65
Figura 5.14 - Mesa moedora	65
Figura 5.15 – Esquema de um moinho vertical de rolos inclinados da FLS-Smidth.....	66
Figura 5.16 - Fluxo de material numa mesa moedora	67
Figura 5.17 - Trituração normal	67
Figura 5.18 - Mesa de moagem sobrecarregada.....	68
Figura 5.19 - Mesa de moagem subdosada	68
Figura 5.20 - Exemplos de angulo de pinçamentos.....	69
Figura 5.21 - Leito instável em moinhos de rolos	69

Figura 6.1 - Calha de alimentação por tambor.....	73
Figura 6.2 - Carcaça de um moinho de bolas.....	73
Figura 6.3 - Revestimentos internos de um moinho de bolas (a) tipo levantador b) ondulado	75
Figura 6.4- Tipos de revestimentos ondulados	75
Figura 6.5 - a) Mecanismo de classificação e (b) Revestimentos classificadores	76
Figura 6.6 - Revestimentos classificadores.....	76
Figura 6.7 - Vista lateral esquemática de um diafragma	77
Figura 6.8 - Diafragma de um moinho de bolas	77
Figura 6.9 - Munhão de um moinho.....	78
Figura 6.10 - a) Descarga por transbordo b) descarga por diafragma.....	78
Figura 6.11 - (a) Corpos moedores (b) Entupimento de grelhas	79
Figura 6.12 - Forças atuantes no corpo moedor	82
Figura 6.13 - Gráfico para determinar as dimensões desejadas do moinho vertical de rolos em função da produção mássica demandada.	84
Figura 6.14 - Dimensionamento de um moinho vertical de rolos.	84
Figura 6.15 - Vedação do rolo.....	85
Figura 6.16 - Revestimento rígido	86
Figura 6.17 - Altura do anel de barragem da mesa de moagem	87
Figura 6.18 - Anel defletor de mesa de moagens	88
Figura 6.19 - Inclinação do anel defletor	88
Figura 6.20 - Instalação de chapas.....	89
Figura 6.21 - Separador com recirculação externa.	90
Figura 6.22 - Representação esquemática de um de separador magnético	91
Figura 6.23 - Forças aplicadas sobre as partículas num moinho vertical de rolos	93
Figura 6.24 - QUADROPOL.....	98
Figura 6.25 - Interior de um moinho vertical de rolos QUADROPOL.....	99
Figura 6.26 - Moinho MVR da Gebr. Pfeifer.....	100
Figura 6.27 - Moinho vertical de rolos.	102
Figura 6.28 - Mesa de moagem de um moinho vertical de rolos inclinados	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Componentes minerais majoritários do clínquer de cimento Portland.....	10
Tabela 2.2 - Etapas da clínquerização	12
Tabela 2.3 - Principais tipos de britadores	16
Tabela 2.4 - Configurações geométricas de alguns moinhos de rolos	18
Tabela 2.5 - Diferenças operacionais entre moinhos horizontais e verticais.....	19
Tabela 3.1 - Tipos de cimento	31
Tabela 3.2 - Composição química dos tipos de cimento Portland	31
Tabela 3.3 - Consumo mundial de cimento Portland	35
Tabela 3.4 - Dados do consumo nacional (brasileiro) (em 1.000 t).....	35
Tabela 3.5 - Produção brasileira de 2010 por tipos de cimento.	36
Tabela 4.1 - Tabela de dureza de Mohs	37
Tabela 4.2 - Índice de trabalho de alguns materiais.....	39
Tabela 4.3 - Classificação de moabilidade de clínqueres baseado no índice de Bond.	39
Tabela 4.4 - Influência da finura do cimento CP1	48
Tabela 4.5 - Influência da escória.....	49
Tabela 4.6 - Influência do calcário aditivo	50
Tabela 6.1 - Tabela de relação L/D para diferentes condições de moagem.....	72
Tabela 6.2 - Materiais usados na fabricação de revestimentos	74
Tabela 6.3 - Diferentes tipos de composições de corpos moedores.....	79
Tabela 6.4 - Especificações sobre diferentes tamanhos de bolas.	80
Tabela 6.5 - Dimensões do moinho vertical de rolos	85
Tabela 6.6 - Resultados do teste de redução da altura do anel	87
Tabela 6.7 - Valores de pressão específica do rolo sobre as partículas em kN/m ²	94
Tabela 6.8 - Fator C de velocidade da mesa moedora de um moinho vertical de rolos	94
Tabela 6.9 - Informações sobre diferentes tipos de mesa	95
Tabela 6.10 - Ensaios de desempenho de cimento Portland tipo CP I em moinhos de bolas e vertical com rolos inclinados.....	96
Tabela 6.11 - Comparação entre moinho de bolas e moinho vertical.....	97

CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivo do projeto

O projeto de um moinho, assim como o de qualquer equipamento de engenharia, visa, inicialmente, atender a uma demanda de capacidade de trabalho, que pode ser a produção por batelada ou por unidade de tempo, e suas dimensões externas e internas e os materiais de construção devem ser definidos para atender as exigências do serviço.

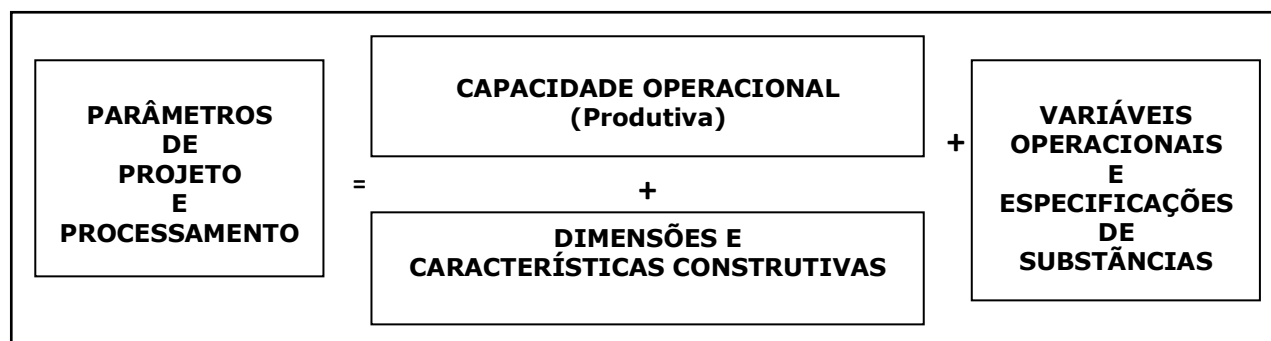


Figura 1.1 – Parâmetros de projeto e operação de equipamentos físicos e químicos.
(Zakon, 2005)

O “projeto básico” de um equipamento ou de uma instalação industrial inicia-se pelo seu dimensionamento em função da massa ou do volume e das especificações físicas, químicas e biológicas de substâncias ou artefatos consumidos, processados ou produzidos, configurando-se, então, a coleção de dados descritivos da sua capacidade e operação (ou variáveis operacionais) (Figura 1.1). O projeto básico pode ser definido pelo detentor de uma tecnologia industrial ou pelo demandante ou consumidor potencial deste produto comercial (em geral, um departamento de compras de uma empresa).

Os fabricantes de equipamentos são os principais desenvolvedores do projeto de detalhamento de equipamentos, e são convidados a apresentar propostas de fornecimento para novos empreendimentos ou instalações industriais, expondo suas vantagens que cabe aos engenheiros de projeto dos compradores avaliarem para comprar um tipo apropriado.

Os engenheiros (ou empresários) compradores de tecnologias industriais e equipamentos desenvolvem seus projetos de detalhamento de instalações de acordo com as possibilidades de integração de suas demandas com as disponibilidades dos equipamentos ofertados ao mercado. Há equipamentos produzidos em série por algumas caldeirarias ou indústrias mecânicas que são denominados “produtos de prateleira” e muitos são projetados e fabricados por encomenda específica.

O presente projeto final de graduação visa elencar os critérios que são adotados para dimensionar, selecionar e detalhar moinhos de bolas e moinhos verticais de rolos para sua aquisição por indústrias cimenteiras, bem como alguns parâmetros para controle do processo de moagem.

1.2 – Metodologia adotada

Para atender o objetivo desse projeto, foi preciso inicialmente apresentar os processos consagrados de fabricação de Cimento Portland e a influência das matérias-primas, do clínquer e das adições finais nos processos de moagem de farinha e de cimento. Paralelo a isso foi apresentada a grande variedade de equipamentos existentes no mercado para os processos de cominuição nas indústrias e as possíveis aplicações de cada um.

Um capítulo sobre o mercado brasileiro e mundial de cimento Portland e os diferentes tipos produzidos aqui foi inserido no projeto para demonstrar a importância desse tema, visto que o Brasil ocupa a quarta posição em uma lista com os maiores consumidores de cimento no mundo.

Após isso, o presente projeto passou a focar nos dois tipos de moinhos indicados para as etapas de moagem nas indústrias cimenteiras, o moinho de bolas e o moinho vertical de rolos. Foram detalhados os mecanismos de cominuição, as possíveis situações resultantes da operação e os movimentos dos corpos moedores.

Por fim, foram detalhados os principais componentes, as formas de dimensionamento, as características construtivas e as vantagens e desvantagens de ambos os moinhos. Exemplos de moinhos verticais de rolos comerciais foram apresentados para ilustrar que esse tipo de moinho é o mais indicado hoje para novas plantas de moagem.

1.3 – Busca de informações

Para a parte inicial foi priorizada a utilização de referências encontradas na literatura especializada, em teses de mestrado e doutorado e em sites especializados em cimento como o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o do Sindicato Nacional das Indústrias cimenteiras (SNIC).

Como o moinho de bolas é um equipamento mais antigo, sua tecnologia está amplamente estudada e detalhada em diferentes livros como o do Beraldo (1987) e o do Sanchez (1990) e por isso essas fontes foram priorizadas.

Já o moinho vertical de rolos é uma tecnologia moderna, que ainda está sendo estudada e otimizada e por isso ainda não tem no mercado um livro que seja referência no assunto, sendo assim as informações disponibilizadas pelos fabricantes e pela empresa Lafarge Brasil S.A. foram utilizadas como guias para as informações contidas nesse projeto.

A Lafarge Brasil S.A. disponibilizou outras referências sobre moagem, incluindo um amplo grupo de figuras, por isso, a utilização em excesso de imagens da empresa pode ser observada no projeto.

CAPÍTULO 2 - PRODU O DE CIMENTOS PORTLAND

2.1 - Processos consagrados da fabrica o de cimentos Portland

Segundo a Norma Brasileira (NBR 5732/1991): "Cimento   um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a opera o, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem   permitido adicionar a essa mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos".

O clínquer Portland resulta da moagem e queima de uma mistura apropriada de calcário e argila (e, opcionalmente, ferro e carvão) em altas temperaturas (1400 C - 1470 C), e do resfriamento rápido do material que forma pelotas sinterizadas no interior de um forno rotativo até 1200 C entre o queimador e a saída desse ambiente, para depois sofrer novo resfriamento até temperaturas próximas   do ambiente.

Segundo a Norma Européia (197-1 1995): "Cimento   um aglomerante hidráulico, ou seja, uma matéria inorgânica finamente moída, que quando amassada com água, constitui uma pasta que d  pega e endurece em consequência de rea o es do processo de hidrata o e que, após o endurecimento, conserva sua resistência e estabilidade mesmo em contato com  gua".

O processo de fabrica o de cimento Portland sofreu altera o es ao longo dos anos devido a busca por processos com menor consumo térmico ou energético, mais econ micos e menos poluentes. Dentre as principais mudanças, a mais drástica ocorreu com a farinha alimentada ao forno cuja moagem e homogeneiza o mudou da via úmida para a via seca. As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam as etapas e sistemas de queima das rotas tecnológicas consagradas de fabrica o de cimento Portland.

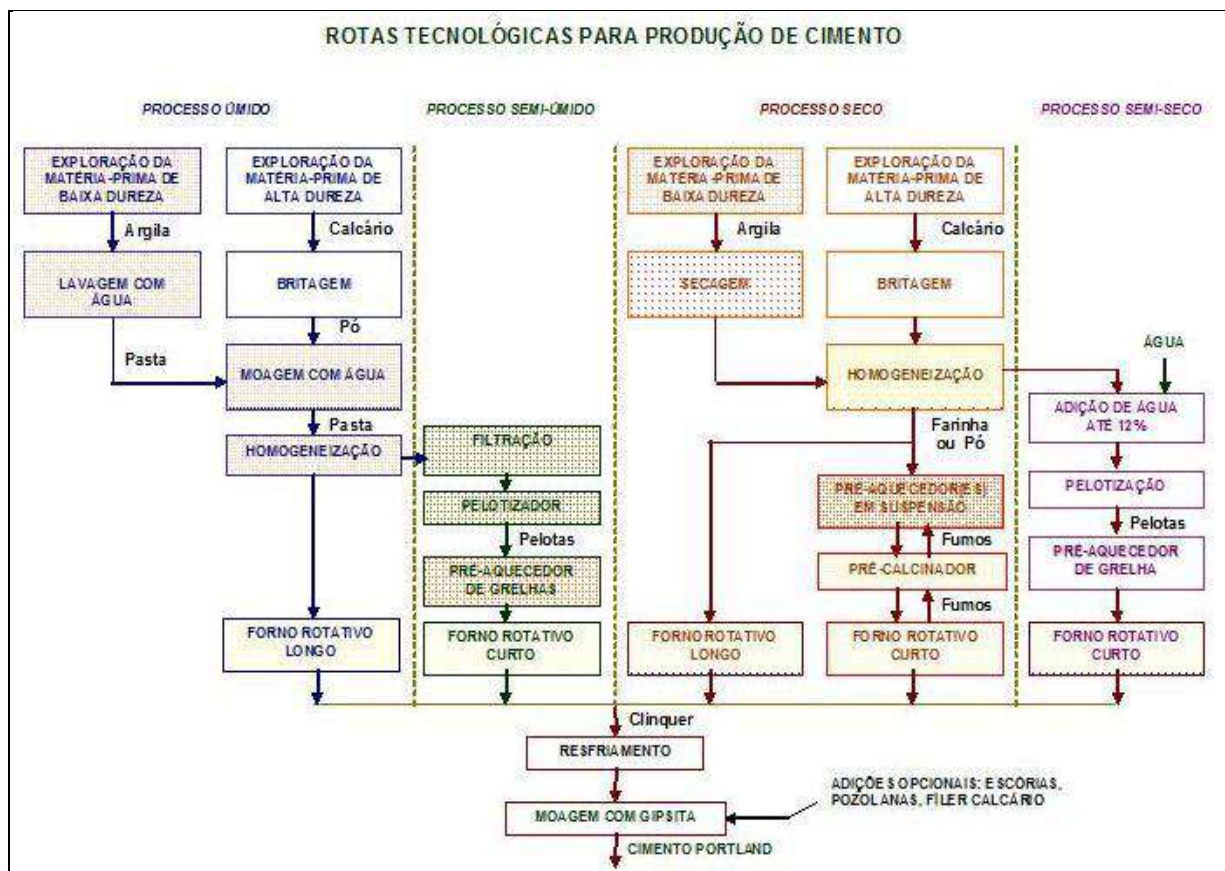


Figura 2.1 - Rotas tecnológicas para a produ o de cimento Portland (Zakon, 1991)

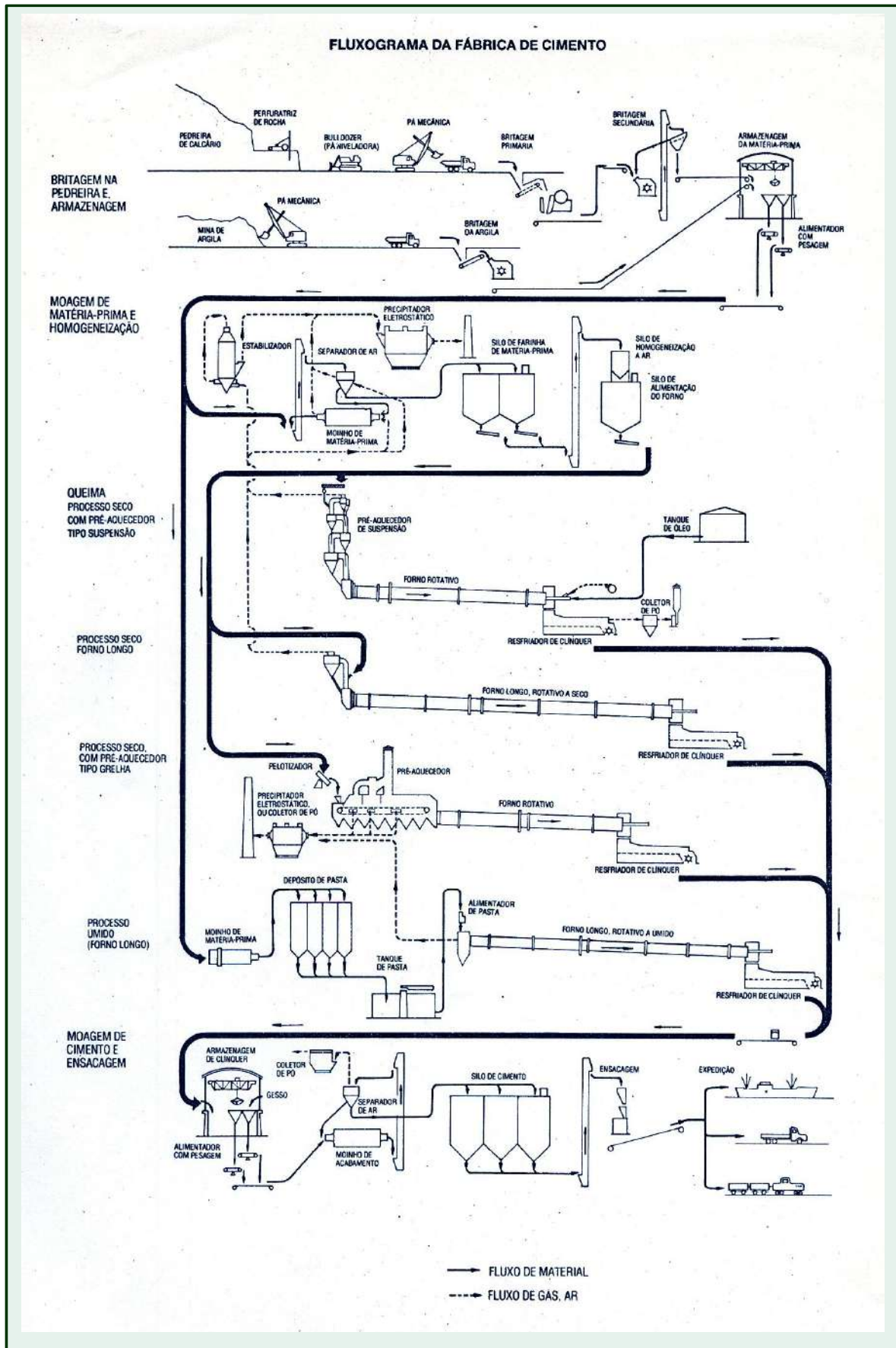


Figura 2.2 - Sistemas de queima adotados em fábricas de cimento Portland (Dedini, 1983)

No processo por via úmida, a moagem e a homogeneização eram realizadas em presença de água e produziam uma pasta alimentada ao forno. A farinha recebia o acréscimo de água em um tanque de homogeneização até atingir cerca de 40% de umidade. No processo de via semi-úmida, a umidade atingida era menor, não ultrapassando os 20%. (Beraldo, 1987)

No processo semi-seco, a matéria-prima era moída com 12% de água, demandando fornos de clínquer menores, pois ocorria a sua pré-calcinação num forno anterior gerando a descarbonatação da farinha e a redução no tempo e percurso de clínquerização. No processo de via seca as matérias-primas são moídas e homogeneizadas no estado seco, isto é, sem água. Observa-se, assim, que no início da produção industrial de cimentos Portland empregando fornos rotativos, estes eram longos, mas foram diminuindo de tamanho após a adoção das rotas semi-úmida, semi-seca e seca, e ainda conforme foram sendo adicionados pré-aquecedores e pré-calcinadores. (Beraldo, 1987)

Os processos de via seca são, hoje, os mais utilizados no mundo para produzir cimento Portland, pois empregam fornos menores de clínquerização porque as reações de termodecomposição do calcário e da argila ocorrem nas etapas anteriores: nos pré-aquecedores e pré-calcinadores. No Brasil, predominam os processos de vias secas, devido ao programa de economia de combustível firmado entre as indústrias cimenteiras e o governo federal (Zakon, 1991).

A Figura 2.3 apresenta um fluxograma da fabricação de cimento Portland pelo processo contínuo por via seca, envolvendo várias etapas interligadas, onde cada uma tem influência direta sobre a outra.

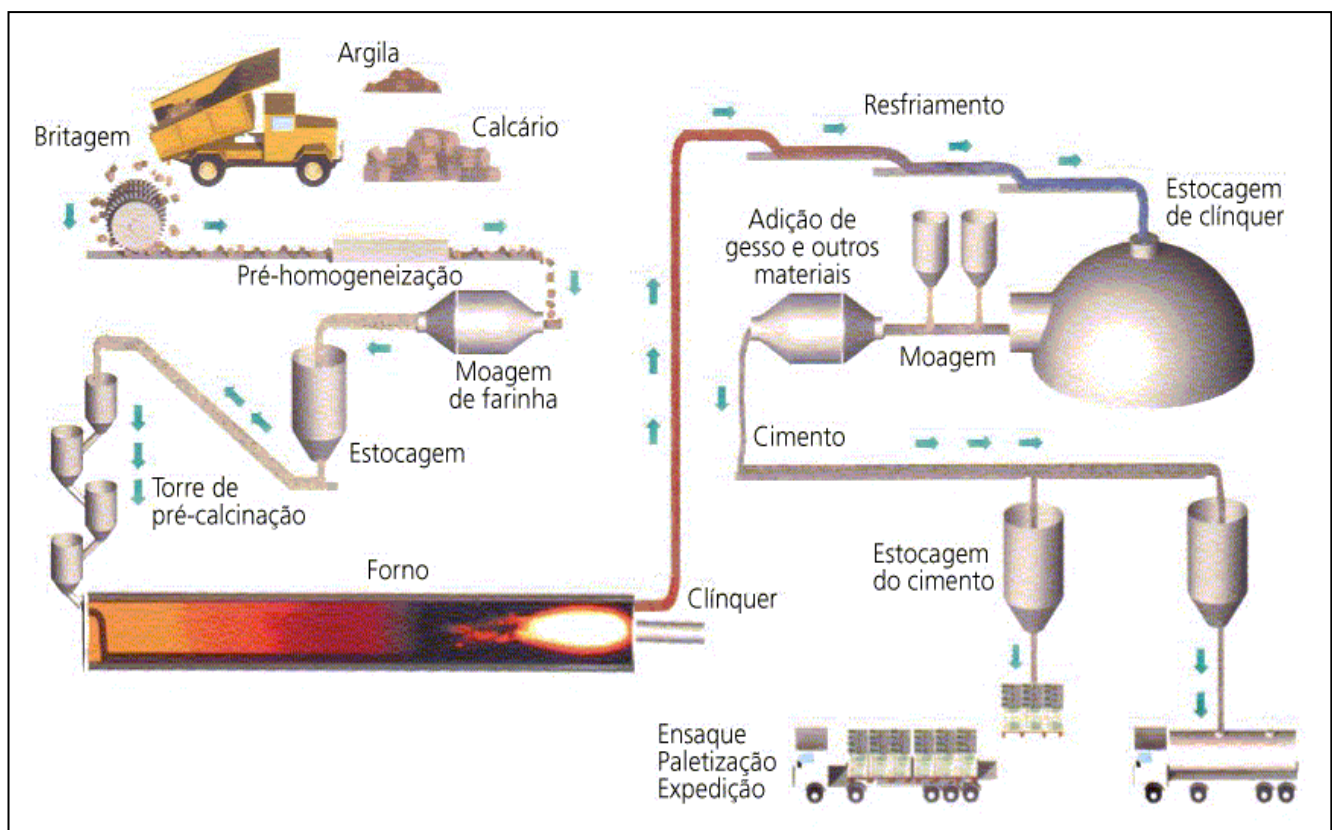


Figura 2.3 - Fluxograma de fabricação de cimento Portland
(Paula, 2010)

A Figura 2.3 revela a existência de uma "torre de pré-calcinação", que corresponde a uma edificação aberta, onde é montada em sequência uma bateria de ciclones de pré-secagem da farinha ou cru, que pode incluir um pré-calcinador da mesma. A farinha descarbonatada é enviada para um forno cilíndrico rotativo de clínquerização.

2.2 – Coprocessamento de resíduos industriais em fábricas de cimento Portland

Para garantir que a mistura de calcário e argila utilizada como matéria-prima transforme-se em clínquer, uma grande quantidade de combustível é necessária para queimar e fornecer calor suficiente para que a temperatura dentro do forno atinja 1450°C (Figura 2.4). Os combustíveis mais utilizados na indústria cimenteira são o carvão mineral, o óleo combustível, o gás natural e, mais recentemente, o coque de petróleo. O óleo combustível foi o mais usado até 1984 e seu custo crescente forçou a indústria cimenteira a adotar rotas tecnológicas por via seca e a utilizar outras fontes. O uso de carvão mineral pelas indústrias cimenteiras foi expressivo durante o mesmo período. Então, o coque de petróleo surgiu como solução viável para substituir o óleo combustível e o carvão (Bernardo, 2009).

Nos dias atuais, o óleo combustível é empregado para dar partida no forno após uma parada de manutenção ou quando a operação no forno não ocorre com uniformidade, pois seu elevado custo impede o uso contínuo. O mesmo ocorre com o carvão mineral.

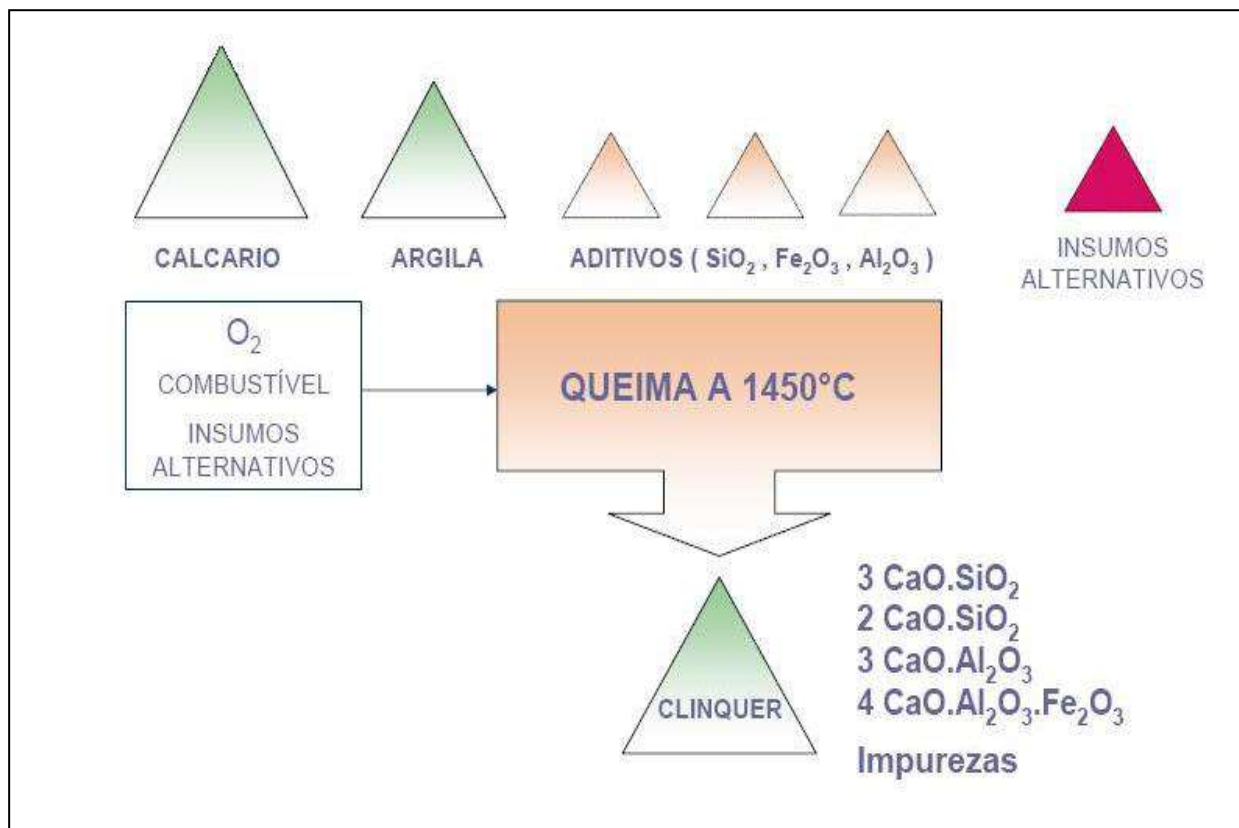


Figura 2.4 - Matérias-primas para fabricar cimento Portland
(Verzbickas, 2007)

O coprocessamento é a técnica de destruição térmica pela queima de resíduos industriais e de passivos ambientais utilizando as excelentes condições proporcionadas pelos fornos de fabricação de clínquer para cimento Portland. Os fornos, devidamente licenciados pelo órgão ambiental responsável e adaptados para esta finalidade, reciclam estes resíduos, aproveitando não só seu possível aporte térmico, como sua fração mineral. Contribuem, assim, para que resíduos potencialmente danosos ao meio ambiente tenham uma correta destinação e ainda sejam úteis para a economia de combustíveis e matérias-primas minerais (ABETRE, 2002; SNIC, 2011).

2.2.1 – Coprocessamento no Brasil e no exterior

Das 48 fábricas integradas (com fornos) instaladas no Brasil, 36 estão licenciadas para coprocessar resíduos. Essas fábricas representam mais de 80% da produção nacional de clínquer. A queima de resíduos em fornos de cimento é amplamente explorada nos Estados Unidos, na Europa e no Japão, e em expansão na América Latina. A Noruega, por exemplo, usa o coprocessamento como método oficial de destruição de resíduos perigosos do país. O setor cimenteiro no Brasil possui uma capacidade crescente de queima que pode chegar a até 2,5 milhões de toneladas de resíduos eliminados anualmente (ABETRE, 2002; SNIC, 2011).

2.2.2 – Estágio atual da evolução tecnológica da fabricação de cimentos Portland

O coprocessamento de resíduos industriais e urbanos nas indústrias cimenteiras é uma realidade tecnológica, despoluente e econômica irreversível. Pelo menos uma indústria cimenteira, a Lafarge S.A., pratica o coprocessamento com resíduos urbanos além dos industriais em Cantagalo, RJ. A Figura 2.5 apresenta os pontos de alimentação de material para coprocessamento adotados nas indústrias cimenteiras (Verzbickas, 2007).

2.2.3 - Vantagens ambientais e sociais do coprocessamento

Vários ideais da gestão ambiental são realizados no coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquerização (Furtado, 2005; SNIC, 2011):

- 1º - Eliminar definitivamente passivos ambientais dos resíduos perigosos de forma ambientalmente correta e segura, sem gerar cinzas;
- 2º - Reduzir e economizar o consumo de recursos naturais energéticos não renováveis pela substituição do combustível convencional, sem alterar as características do cimento Portland e atendendo às normas internacionais de qualidade;
- 3º - Preservar a saúde pública, destruindo os pneus velhos que servem de focos de desenvolvimento do mosquito transmissor da dengue.

O coprocessamento de resíduos industriais constitui uma prestação de serviço de destruição térmica quando são susceptíveis à combustão e não representam fontes de danos para a qualidade do clínquer. Embora a princípio qualquer forno industrial consiga incinerar resíduos, as unidades cimenteiras são mais adequadas para a queima e há 3 décadas, por todo o mundo, vêm atuando nessa frente de trabalho. (Furtado, 2005).

Os principais resíduos coprocessados pela indústria de cimento Portland incluem: pneumáticos, borrachas, lodo de esgoto ou estações de tratamento de efluentes líquidos, plástico, corante, tintas e vernizes, solventes e óleos residuais, tortas de filtração, papel e papelão, borras ácidas, refratário, catalisadores usados, produtos fotográficos, resíduos de madeira, borras oleosas e graxas, entulhos da construção civil, terra contaminada (ABETRE, 2002; SNIC, 2011).

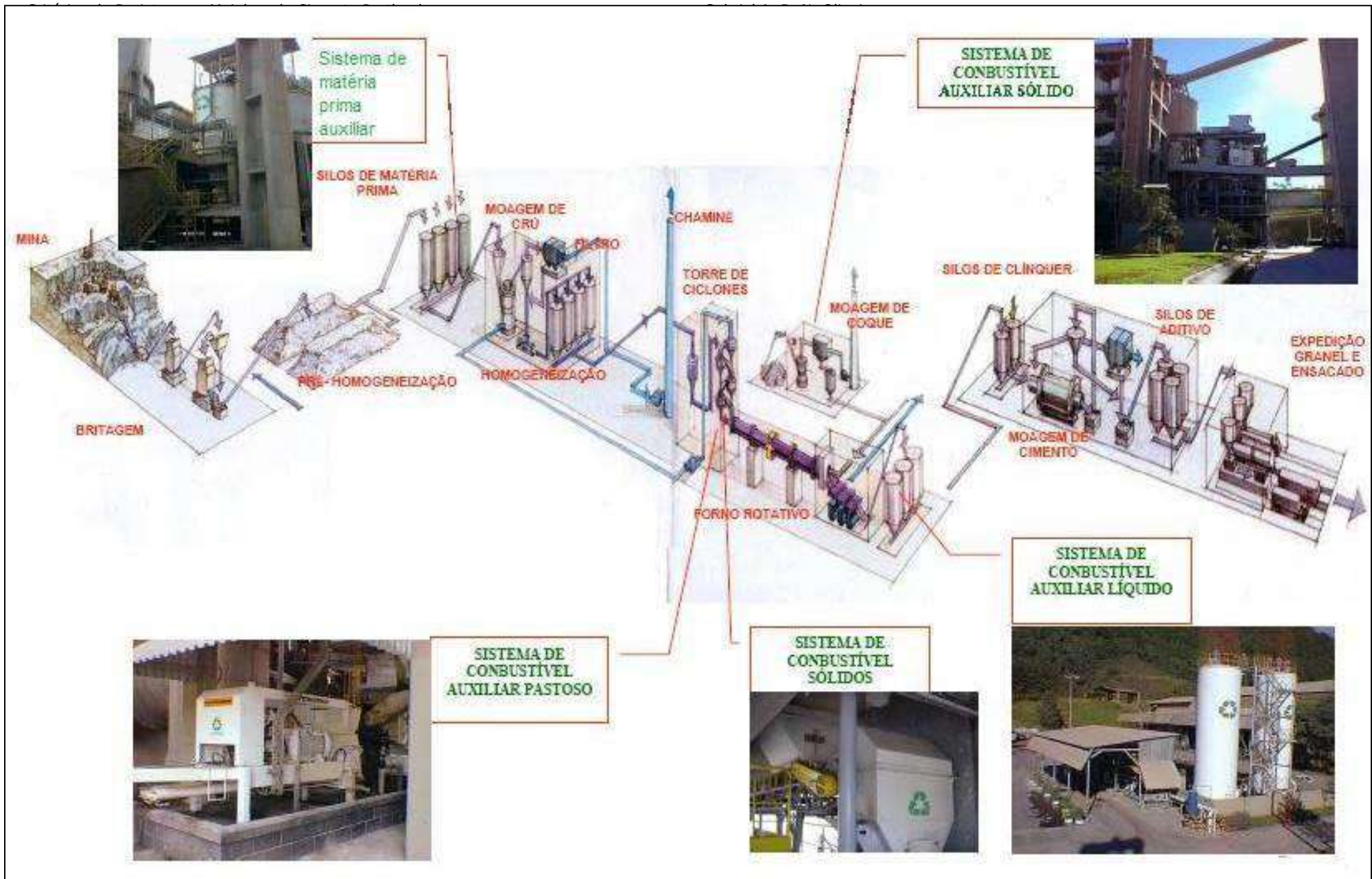


Figura 2.5 - Pontos de alimentação de material para Co-processamento nas indústrias de cimento (Verzbickas, 2007)

2.2.4 - Vantagens técnicas do coprocessamento em fornos de clínquer

As vantagens da destruição, em fornos de clínquer, de resíduos industriais e alguns resíduos urbanos pré-selecionados em usinas de reciclagem de lixo municipal são (ABETRE, 2002, Kihara, 2004; Furtado, 2005):

- Destruição em altas temperaturas (no gás até 2.200°C e na massa sólida/fundida, 1.450°C);
- Possuem elevado tempo de residência (5 seg. acima dos 1.200°C);
- A atmosfera alcalina no interior do forno favorece a neutralização de diversos contaminantes, os removendo dos gases de exaustão pela interação com os sólidos particulados que aportam no seu interior e com a massa semi-fundida do clínquer que desce lentamente no percurso interno do equipamento;
- Alimentação de oxigênio (no ar primário e no ar secundário) que assegura combustão completa e turbulência, no forno rotativo, e resulta numa boa oxidação da massa de matérias-primas.
- Promovem o consumo e desaparecimento de matérias orgânicas pela sua queima e conversão em gases de combustão;
- No caso de metais pesados e outros componentes inorgânicos, ficam quimicamente ligados à estrutura cristalina dos silicatos do cimento;
- Exige-se que a operação dos fornos inclua sistemas extremamente eficazes de filtros, com eficiência da ordem de 99,9996%;
- Há monitoramento da operação do forno durante 24 horas por dia, já que esta característica é, como as demais citadas acima, inerente ao processo de fabricação de clínquer;
- O processo de eliminação dos materiais é total, pois não há geração de nenhum resíduo no processo.

2.2.5 – Limitações do coprocessamento em fornos das indústrias cimenteiras

Devido à impossibilidades técnicas dos fornos de fabricação de clínquer e às limitações impostas por legislações específicas, o coprocessamento não é indicado para eliminação de determinados tipos de resíduos, tais como os radioativos, hospitalares, com altos teores de metais pesados ou cloro, lixo urbano não-classificado ou resíduos que não tenham contribuição nem energética, nem mineral.

O Certificado de Destruição Térmica (CDT) expedido pelo co-processador é o documento que assegura ao gerador do resíduo que o material foi destruído de forma segura e definitiva através da tecnologia do coprocessamento (ABETRE, 2002).

Os principais elementos químicos constituintes do cimento Portland como cálcio, silício, alumínio e ferro são encontrados na natureza em maiores quantidades, e o clínquer resulta das reações dos seus compostos.

Entretanto, elementos químicos como magnésio, enxofre, sódio, potássio, manganês, fósforo e titânio também são encontrados no cimento, oriundos das próprias matérias-primas ou do combustível empregado. Outros elementos apresentam-se em concentrações menores que 0,02% no cimento, tais como cromo, chumbo, zinco, vanádio, níquel e outros, sendo denominados "elementos traços". A introdução de uma tecnologia de coprocessamento implica num possível aumento de elementos traços no cimento e exige a realização de análises químicas rigorosas para que não afetem as propriedades do clínquer produzido (Bernardo, 2009).

Verificou-se que o aumento da moabilidade dos clínqueres com certos elementos-traços resulta da constatação de eles favorecerem a formação de fase líquida, durante a clinquerização, e, ainda, por formarem soluções sólidas com as alitas e belitas, reduzindo, desse modo, sua dureza (Silva, 2007).

2.3 - Clinquerização das matérias-primas

2.3.1 – A composição do clínquer para cimento Portland

O clínquer compõe-se majoritariamente de quatro fases minerais sintéticas (que constituem quase 95% do mesmo), as quais são identificadas por meio de uma nomenclatura desenvolvida pelos químicos cimenteiros, que incluem as abreviaturas clássicas de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF e mais alguns elementos menores, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Componentes minerais majoritários do clínquer de cimento Portland
(Paula, 2010)

Nome	Fórmula Química	Abreviatura	%	Contribuição no desempenho do produto Cimento Portland
Silicato Tricálcio – Alita	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 – 70	Durabilidade e resistência total.
Silicato Bicálcio – Belita	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	10 – 20	Durabilidade de longo prazo
Aluminato Tricálcio	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	1 – 15	Durabilidade e tempo de secagem curto
Ferro-aluminato Tetracálcio	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	0,5 – 15	Determina a cor do cimento (quanto mais C_4AF mais escuro o cimento). Não contribui para a durabilidade

Essas abreviaturas são válidas somente para as fases puras, as quais jamais aparecem no clínquer industrial. Os verdadeiros minerais de clínquer contêm impurezas de elementos secundários, tais como Al, Fe, Mg, Na, K, Cr, Ti, Mn, P, entre outros, sob a forma de soluções sólidas. A cristalização desses minerais depende da composição e finura do cru, do tratamento térmico (condições de pré-secagem, pré-calcinação, clinquerização e resfriamento) e de reações de difusão entre as fases sólida e líquida. Portanto, essas abreviaturas representam simplificações de várias fases cristalóquímicas que possuem composição química similar, cujas diferenças aparecem em difratogramas de raios-X e análises microscópicas. (Paula, 2010)

Se a clinquerização for mal processada ou se houver impurezas na farinha, além desses compostos minerais sintéticos ou íons dissolvidos nas fases intersticiais, pode ocorrer a presença de compostos minoritários que afetarão o desempenho do sistema de queima e a qualidade do produto final, o cimento Portland, como a cal livre e o periclásio (óxido de magnésio livre, MgO), além dos álcalis.

A cal livre é formada por óxido de cálcio, CaO , sendo oriunda da farinha que não reagiu completamente. Sua presença deve ser controlada em torno de 1 a 2%, pois o CaO quando absorve água, libera calor e provoca expansão da massa do cimento Portland após sua hidratação, fato altamente danoso em construções, porque resulta em dilatações diferenciadas com relação aos silicatos e aluminatos de cálcio. A presença de periclásio indica a utilização de calcário magnesiano com moagem insatisfatória e pode provocar sua lenta expansão vários anos após a hidratação do cimento Portland numa obra de construção civil, o que é indesejável ou perigoso.

Outros elementos químicos presentes em teores menores como os álcalis (Na, K), sulfatos, P_2O_5 , o Zn e o Cl são acompanhados durante o processo de fabricação do clínquer. Os álcalis e os sulfatos são óxidos e sais voláteis e estão relacionados, principalmente, com a resistência mecânica do cimento. A presença de íons do cloro pode influenciar também na vazão de material na torre, uma vez que esses íons podem volatilizar completamente no interior do forno. E ao atingir temperaturas mais frias como as paredes dos ciclones superiores na torre, esses íons podem reagir com outros íons e sofrerem condensação formadora de incrustações que causam entupimentos em vários equipamentos ou dutos, além de participarem ativamente do processo de corrosão.

2.3.2 – As etapas físicas e químicas da clinquerização

A clinquerização é o processo em que ocorre a transformação dos óxidos de silício, cálcio, alumínio e ferro (contidos nas matérias-primas) em silicatos e aluminatos de cálcio do clínquer de cimento Portland. Essa transformação cristaloquímica ocorre quando as matérias-primas são introduzidas no forno - após a moagem e mistura simultânea - para serem queimadas em altas temperaturas em ambiente oxidante, produzindo a conversão de fases minerais naturais cristalinas em novas fases líquida e cristalinas sintéticas. (Paula, 2010)

Para que a temperatura da mistura reativa atinja 1450°C necessária à clinquerização, a temperatura correspondente na chama do queimador interno do forno deve atingir 2000°C. Para que isso ocorra, o forno deve girar continuamente de forma a garantir uma boa mistura ao longo do trajeto interno da mistura de minérios e um cozimento adequado (Silva, 2007).

Nos processos modernos de fabricação de cimento Portland que contam com pré-calcinadores e pré-aquecedores, a farinha entra no forno de clínquer à 900°C porque existem etapas prévias de secagem e pré-calcinação antes da queima em forno de clinquerização, e seu grau de descarbonatação varia entre 90-94%.

A Figura seguinte apresenta uma fotografia de um forno rotativo de clinquerização na fábrica de cimento Portland da Lafarge Brasil, em Cantagalo, RJ.



Figura 2.6 - Forno rotativo de clinquerização em Cantagalo, RJ
(Lafarge, 2011)

Após a queima que produz a formação dos sais inorgânicos sintéticos, o clínquer é bruscamente resfriado até, aproximadamente, a temperatura de 200°C, para evitar que ocorram reações indesejáveis que alterem as características cristaloquímicas do mesmo. Quanto mais rápido for este resfriamento, mais reativo será o cimento Portland durante sua hidratação numa obra de construção civil e será evitada a formação de cal livre pela decomposição do silicato tricálcico em silicato dicálcico mais óxido de cal (se a redução de temperatura for lenta). A Tabela 2.2 apresenta as etapas e fenômenos físicos, físico-químicos e cristaloquímicos de um processo de clinquerização.

Tabela 2.2 - Etapas da clinquerização
(Paula, 2010)

TEMPERATURA	REAÇÃO	TIPO TÉRMICO
Até 100°C	Evaporação da água livre	Endotérmica
500°C	Desidratação dos minerais argilosos	Endotérmica
800°C	Decomposição dos calcários	Endotérmica
900°C	Recristalização dos minerais da argila	Exotérmica
900°C - 1200°C	Reação do CaO com os alumino - silicatos	Exotérmica
1200°C - 1280°C	Início de formação da fase líquida	Endotérmica
1280°C	Formação do C ₂ S	Exotérmica
1280°C - 1330°C	Formação principal da fase líquida e formação do C ₃ S	
1330°C - 1450°C	Crescimento dos cristais de C ₃ S e C ₂ S	
1200°C	Cristalização da fase líquida	Exotérmica

2.3.2 - Zonas de termoprocessamento no forno de clínquer

Dentro do forno, a farinha previamente descarbonatada sofre uma série de reações até transformar-se em clínquer. Pode-se considerar a existência de 5 zonas distintas, onde ocorrem: 1ª - descarbonatação da farinha; 2ª - transição superior; 3ª - clinquerização, queima ou sinterização; 4ª - transição inferior; 5ª - pré-resfriamento (Figura 2.7), sendo que nos fornos modernos com pré-calcinadores e pré-aquecedores a zona de descarbonatação acontece praticamente fora do forno. CaCO₃

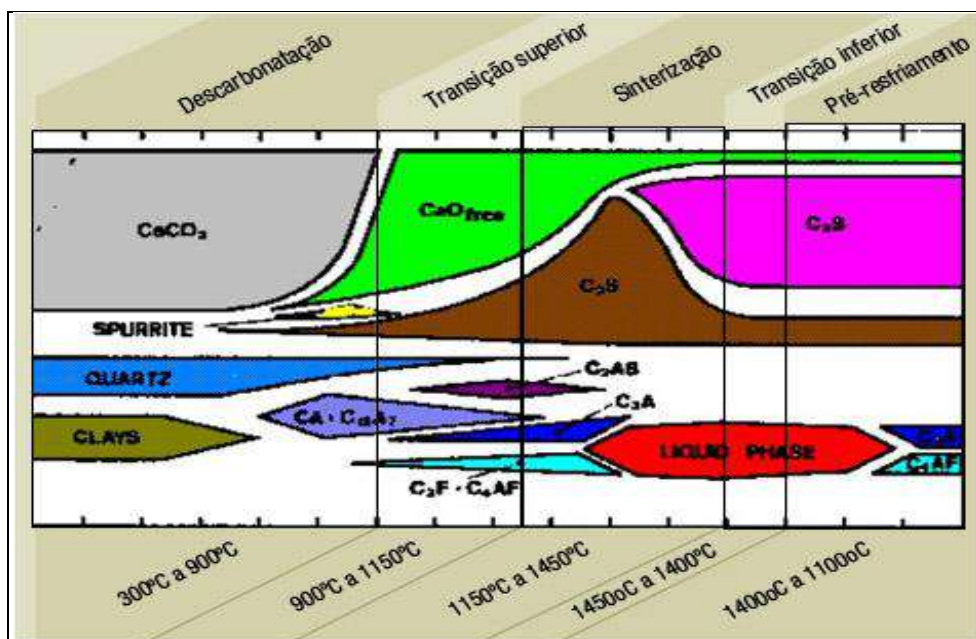


Figura 2.7 - Zonas distintas do piroprocessamento de um forno de clínquer para Cimento Portland
(Magnesita, 2011)

Cada zona interna do forno de clínquer corresponde a um comprimento que varia de acordo com o perfil de temperatura ao longo do equipamento cilíndrico rotativo. Ensaio feitos nas fábricas de cimento da Lafarge mostram que uma zona de queima curta favorece a moabilidade e o desenvolvimento das resistências, ou seja, uma zona de queima curta e quente dá origem a um clínquer fácil de moer (Lafarge, 2010).

2.4 - Processos e conceitos de fragmentação empregados nas indústrias cimenteiras.

2.4.1 – Denominações usuais para fragmentação.

Há conceitos que foram preservados na literatura de Engenharia Química e outros que foram sofisticados em prejuízo da clareza necessária para os iniciantes, conforme se pode observar nas diferentes edições, a partir do *Chemical Engineers' Handbook, Fourth Edition*, de 1963, editado por J.H. PERRY. Os termos "britagem" e "moagem" tornaram-se genéricos e de uso comum (Zakon, 2004).

QUEBRA ("breaking"), BRITAGEM ("crushing") e CORTE ("cutting") designam a redução de grandes blocos ou pedras, duros ou moles, para tamanhos intermediários ou substancialmente menores.

MOAGEM ("grinding"), COMINUIÇÃO ("comminution"), PULVERIZAÇÃO ("pulverization"), DESINTEGRAÇÃO ("disintegration"), e DISPERSÃO ("dispersion") designam a redução de partículas médias ou pequenas até dimensões finas ou pulverulentas (pó).

Porém, as empresas e os engenheiros adotam critérios arbitrários e práticos, tais como:

- BRITAGEM: fragmenta partículas que medem de 60 até 0,25 polegadas.
- MOAGEM: é usada para cominuir partículas menores, através de pulverização ou desintegração.
- PULVERIZAÇÃO e DESINTEGRAÇÃO diferem na homogeneidade do material processado, duro ou mole (também denominado "macio").

Há indústrias que traduzem "size reduction" como "trituração" e seus equipamentos são denominados "trituradores". Assim, distinguem apenas seus modelos de equipamentos para atender aos propósitos de trituração grosseira ou fina, ignorando a existência de vários *handbooks* ou Manuais de Engenharia que classificam os fragmentadores em britadores, moinhos e pulverizadores.

O termo "cominuição" foi adotado na 5ª edição do *Chemical Engineers' Handbook* (ou Manual de Engenharia Química) em que se pretendeu, talvez, enfatizar a moagem de substâncias sólidas, porém, essa menção pode confundir os leitores e profissionais interessados.

2.4.2 – Concepções clássicas e parâmetros operacionais para britadores e moinhos industriais.

A Figura 2.8 apresenta um elenco consagrado de equipamentos de redução de tamanhos aplicado a minérios e alguns tipos de produtos químicos (Zakon, 2003).

As condições operacionais da carga num moinho industrial incluem:

1º - O tipo de esforço aplicado:

- entre duas superfícies (compressão e tensão de cisalhamento),
- por uma única superfície (impacto),
- através do meio circundante, ou
- através de transferência de energia não-mecânica;

2º - O estado de agregação dos grãos: partículas individuais ou grupos de partículas;

3º - A intensidade do esforço aplicado quantificado pela energia de fraturamento em relação ao volume ou em massa, a força de reação em relação à área de superfície, e a taxa de redução;

4º - A velocidade da carga no impacto, pois a energia fornecida em relação à massa é uma função da velocidade de impacto ($W_m = V^2/2$);

5º - A frequência de aplicação de esforço: aplicações únicas ou múltiplas;

6º - A dureza e a forma da superfície redutora de tamanho (lisa ou moldada);

7º - A temperatura da massa ou do meio operacional.

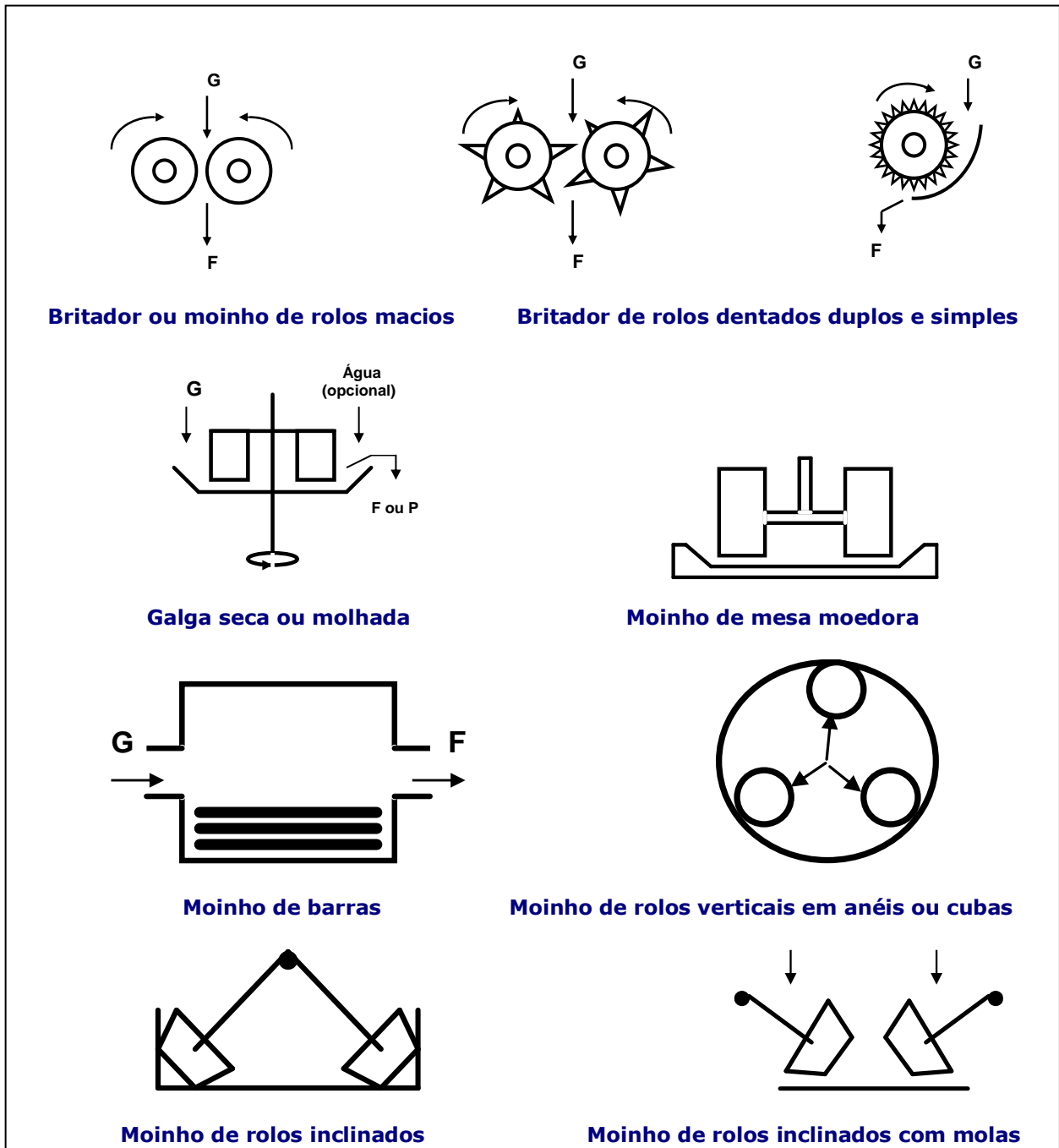


Figura 2.8 - Tipos de britadores e moinhos de rolos, F = finos, G = grossos, M = médios e P = pasta.

(Zakon, 2001 – após Norton, 1973; Sanchez, Matsushita e Pons, 1990).

As etapas de moagem podem ser realizadas em circuito fechado (o material grosso barrado no separador retorna ao moinho para ser moído novamente) ou aberto (o material só passa uma vez pelo moinho).

2.4.3 - Britagem de matérias-primas

A função do britador é fragmentar e diminuir a granulometria das rochas oriundas da mina, para que essas sejam compatíveis com outros equipamentos do processo e, através da subsequente moagem ou pulverização, obter a homogeneização do material. A britagem pode ser realizada em um ou mais estágios conforme a dureza ou abrasividade do calcário (inclusive para outras rochas duras).

A britagem é realizada por britadores que utilizam a combinação dos mecanismos de impacto, atrito, cisalhamento e compressão. Quando a partícula é grande, a energia a ser aplicada a cada partícula é elevada, embora a energia total por unidade de massa seja baixa; a aplicação dessa energia faz-se praticamente de forma individualizada. Quando a partícula é fina, a energia aplicada por partícula é pequena, embora seja elevada a energia aplicada por unidade de massa; a energia, neste caso, é aplicada de forma distribuída. Os britadores tem de ser estruturalmente reforçados para a aplicação de elevados esforços localizados. Os moinhos devem ser capazes de distribuir uma grande energia sobre um volume grande de partículas (Beraldo, 1987).

A Figura 2.9 mostra a aplicabilidade dos diversos tipos de equipamentos atualmente utilizados em processos de cominuição, em função da granulometria, da dureza e da umidade do minério.

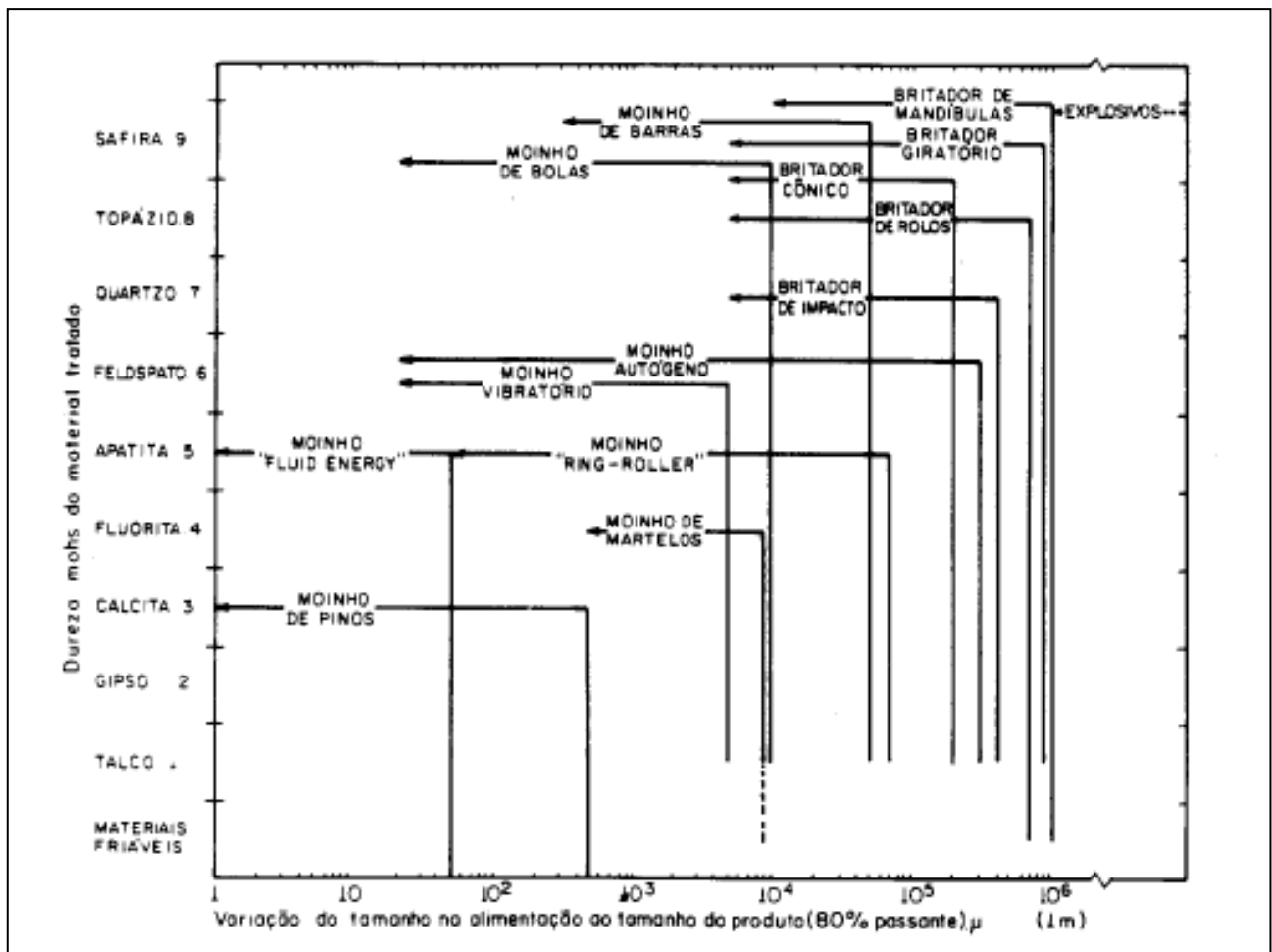


Figura 2.9 - Aplicabilidade de equipamentos de cominuição
(Beraldo, 1987)

Existe uma variedade de britadores que se diferenciam pelo modo como o material é britado e a escolha de um desses tipos depende das características físicas e químicas do material a ser triturado, bem como da necessidade do processo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Principais tipos de britadores
(Beraldo, 1987)

TIPO	TAMANHO (mm)	POTÊNCIA (kW)	APLICAÇÕES
Mandíbulas	125 * 150 a 1.660 * 2100	2,25 a 225	Pequenas a médias capacidades. Mineração subterrânea. Tolera material pouco argiloso. É esporadicamente usado como britador secundário.
Giratório	760 * 1.400 a 2.135 * 3.300	5 a 750	Médias e grandes capacidades. Não aceita material argiloso. É esporadicamente usado como britador secundário.
Impactos de martelos	160 * 230 a 1.400 * 2.300	11 a 450	Pequenas e médias capacidades. Material pouco abrasivo. Aceita material argiloso. Usado em carvão.
Rolo simples	500 * 450 a 1.500 * 2.100	15 a 300	Material não abrasivo, friável. Aceita material argiloso. Usado em fragmentação de carvão
Rotativo	2.100 * 3.650 a 4.300 * 9.750	7 a 112	Britagem seletiva de carvão ROM. Rejeição de ganga.
Cônicos	Ø = 600 a Ø = 3.050	22 a 600	Rebritadores de material abrasivo. Não aceita material argiloso
Gyradise	Ø= 900 a Ø= 2.100	100 a 400	Britagem pedra com pedra. Britagem fina de material abrasivo e sem argila.
Rolo duplo	750 * 350 A 1.800 * 900 a 860 * 2.100	27 a 112	Rebritagem de rocha mole, não-abrasiva. Usado em fragmentação de carvão

O britador mais utilizado é o de mandíbulas (Figura 2.10). Suas vantagens incluem:

- 1ª - Grande capacidade de trabalho.
- 2ª - Mecânica fácil de ser operada.
- 3ª - Baixos custos de manutenção e de consumo de energia.

Sua principal desvantagem é que a quebra das substâncias sólidas não é totalmente uniforme e produz tamanhos variados das partículas.

Algumas indústrias utilizam o britador de martelos (Figura 2.11) para britar calcário e clínquer.

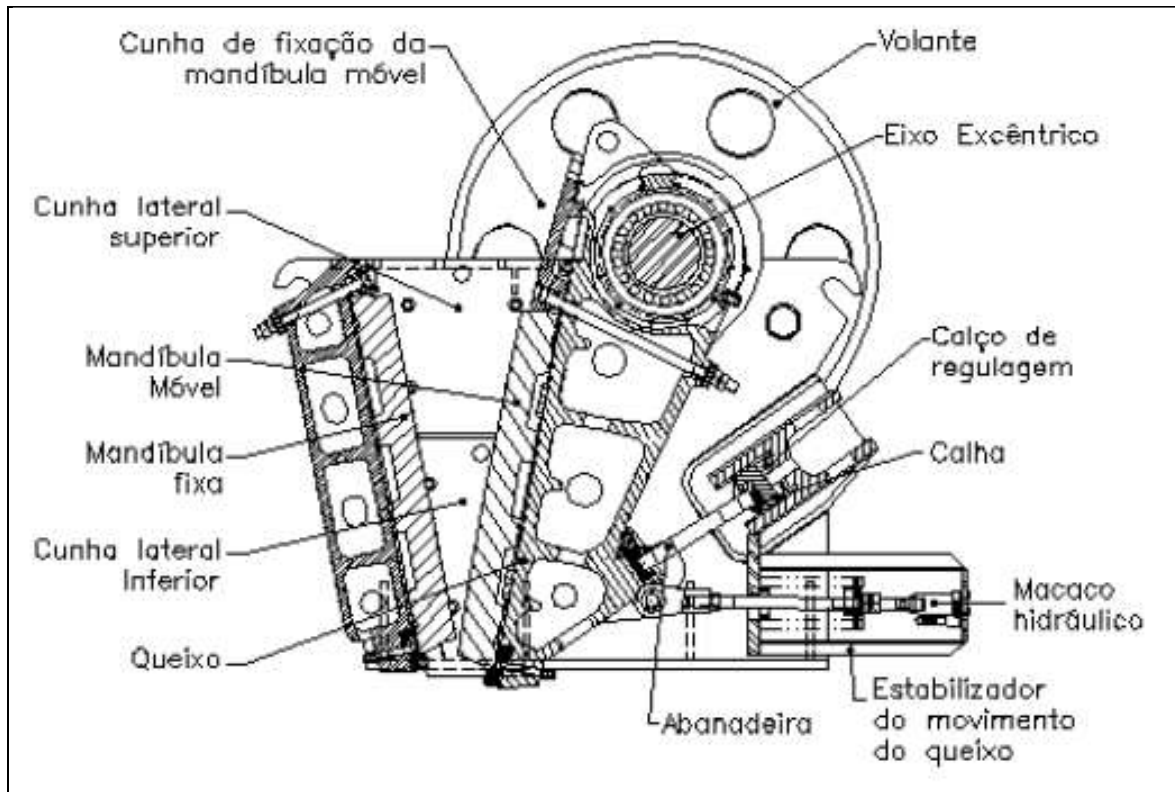


Figura 2.10 - Britador de mandíbulas
 (www.reducaosolidos.tripod.com, 2011)

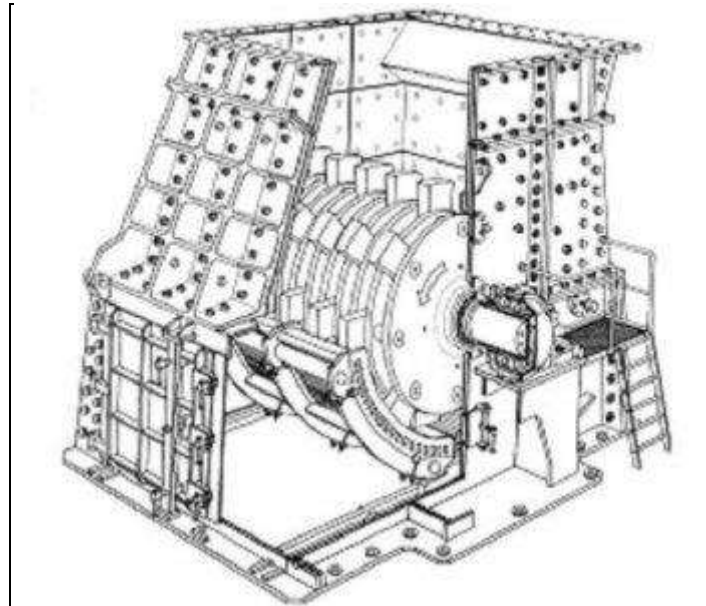


Figura 2.11 - Britador de martelos
 (SKF, 2011)

Os processos de fragmentação (britagem e moagem (ou cominuição)) podem ser realizados a seco ou a úmido. As operações de moagem são, em sua maioria, conduzidas a úmido e as de britagem são efetuadas principalmente a seco.

2.4.4 – Evolução de alguns moinhos industriais

A concepção de moinhos depende da disposição dos corpos moedores ou dispositivos de moagem no seu interior (Tabela 2.4). Assim, para os casos de moinhos de bolas e de rolos, deve-se considerar os seguintes aspectos construtivos e operacionais:

1º - a orientação vertical ou horizontal da carcaça do moinho.

2º - a orientação vertical ou horizontal de alguns corpos moedores ou fragmentadores.

Tabela 2.4 - Configurações geométricas de alguns moinhos de rolos

MOINHOS	DIREÇÃO DA CARÇAÇA	POSIÇÃO DOS ROLOS	POSIÇÃO DAS BOLAS
BOLAS	Horizontal	Ausente	Indiferente
BARRAS	Horizontal	Horizontal	Ausente
AUTÓGENO	Horizontal	Ausente	Indiferente
VERTICAL DE BOLAS OU SEIXOS	Vertical	Ausente	Cadentes em calha espiralada
RAYMOND	Vertical	Horizontal	Ausente
ROLOS VERTICAIS	Vertical	Vertical ou inclinado	Ausente
TRAPEZOIDAIS	Vertical	Vertical e Horizontal	Ausente

Os moinhos com carcaça horizontal foram os primeiros a serem usados nas indústrias, com destaque para os moinhos autógenos (rochas ao invés de corpos moedores sintéticos), de barras (ou rolos maciços compridos) e o tradicional moinho de bolas. Durante o século 19 e meados do século 20, essa tecnologia foi amplamente estudada, aplicada e otimizada. Porém, a necessidade das indústrias em economizar energia resultou na busca por mecanismos de moagem mais eficientes, surgindo assim os moinhos verticais.

Os moinhos verticais de bolas e os moinhos Raymond foram os primeiros modelos com carcaça orientada verticalmente utilizados pela indústria. Em seguida, o conceito de rolos de moagem, por exemplo, utilizado pela empresa CBC em seu moinho Raymond (Figura 2.12a) sofreu várias mudanças e adaptações físicas, geométricas e mecânicas por outros fabricantes, gerando novos tipos de moinhos verticais. Assim, surgiram modelos com carcaças verticais, alguns dotados de rolos com eixos horizontais ou inclinados, que são denominados "moinhos verticais de rolos" pelos fabricantes, porque a disposição da sua carcaça determina a sua denominação.

A rolagem horizontal dos rolos dos moinhos Raymond produz a redução de tamanho dos grãos na interface entre os moedores e uma cuba ou anel periférico. A rolagem vertical dos moinhos verticais de rolos fragmenta as partículas que caem sobre uma mesa moedora (horizontal). Nos últimos anos, foi desenvolvido um moinho de rolos denominado "trapezóide" ou "trapezoidal" com superfícies múltiplas de moagem, que emprega simultaneamente os mecanismos de moagem dos moinhos de rolos em cubas e, também, do moinho vertical de rolos (Figura 2.12b).

A Tabela 2.5 apresenta as diferenças operacionais entre os moinhos horizontais e verticais.

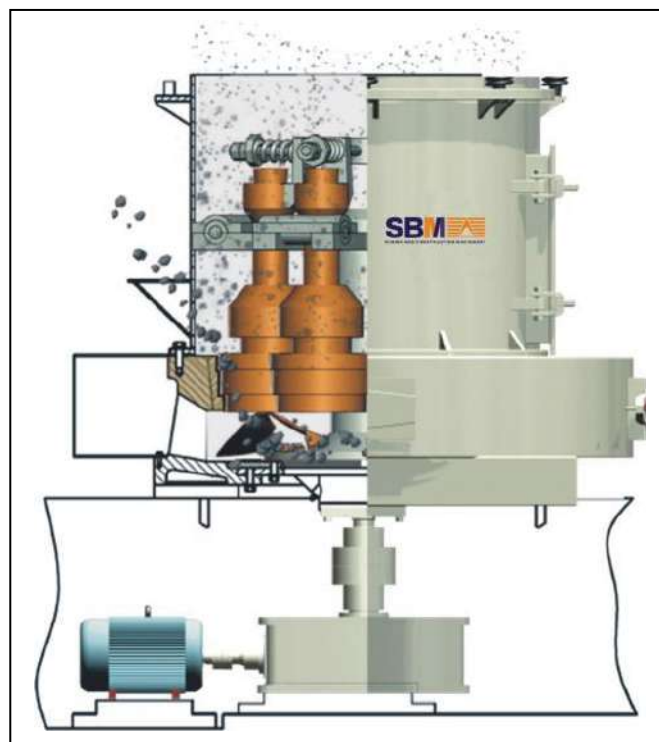
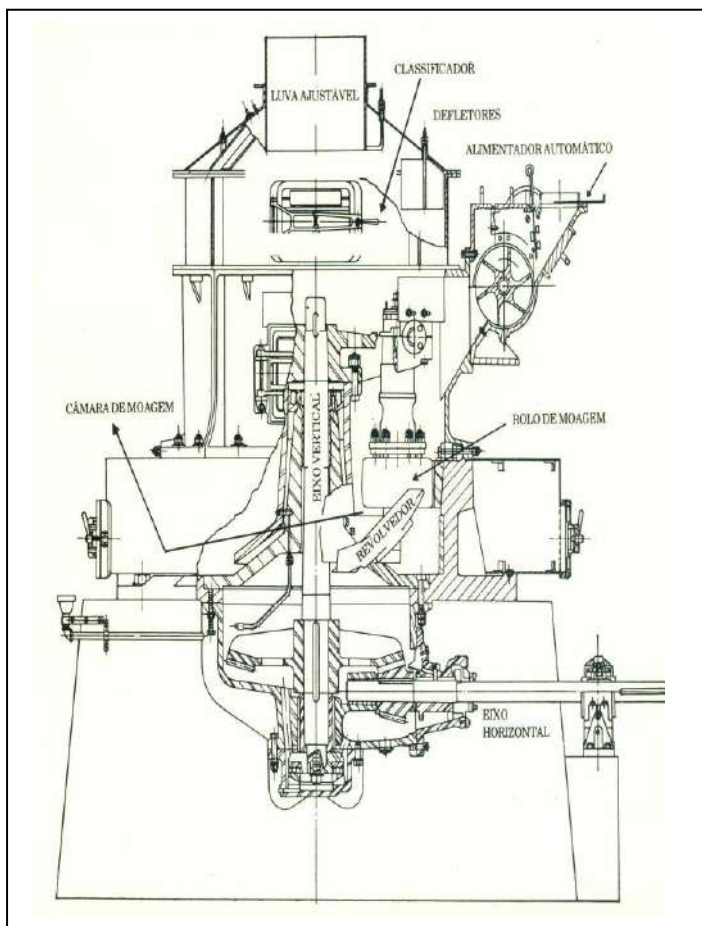


Figura 2.12 – a) Moinho Raymond
(CBC, 1986)

b) Moinho Trapezoidal
(Shangai, 2012)

Tabela 2.5 - Diferenças operacionais entre moinhos horizontais e verticais

MOINHOS	Mecanismo ou processo de cominui�o
BOLAS	Reduzem o tamanho dos gr�os por impacto e atrito entre os corpos moedores em formas de bolas.
BARRAS	Reduzem o tamanho dos gr�os por impacto e atrito entre os corpos moedores em forma de barras.
AUTÓGENOS	Reduzem o tamanho dos gr�os por atrito entre fragmentos do próprio mineral.
RAYMOND	Empregam rolos moedores que exercem pressão sobre os grãos cadentes contra um anel de moagem (ou cuba).
ROLOS VERTICAIS SOBRE UMA MESA MOEDORA	Pressionam um leito de grãos individuais para mo�-los, embora a maioria destes seja consideravelmente menor que a espessura da camada sob pressão.
TRAPEZÓIDE OU TRAPEZOIDAL	Empregam rolos moedores que exercem pressão sobre os grãos cadentes contra um anel de moagem (ou cuba) e também sobre os grãos moídos sobre uma mesa moedora.

2.4.5 - Moagem de matérias-primas, combustíveis e cimento Portland

A moagem é uma operação unitária de redução de tamanho em que o tamanho médio das partículas sólidas é reduzido pela aplicação de forças de impacto, compressão e abrasão. Utiliza energia mecânica para reduzir a granulometria. É frequentemente utilizada em grãos, para reduzi-los a farinha ou pó e sua eficiência pode ser medida pelo aumento da superfície criada por unidade de energia consumida.

No processo de fabricação de cimento Portland, a moagem é necessária em três situações:

2.4.5.1 - Moagem de cru

O cru precisa ser moído para satisfazer ao parâmetro físico de aptidão ao cozimento. A finura necessária para assegurar uma boa queima varia muito com a natureza das matérias-primas. Durante a moagem é realizada, também, a secagem das matérias primas utilizando-se o gás de exaustão do pré-aquecedor. Quanto mais fino for o cru, mais fácil e melhor será o seu cozimento, porém uma moagem mais fina significa maior gasto de energia e que, portanto, não deve-se moer o cru mais fino do que o necessário para uma boa queima.

2.4.5.2 - Moagem de Combustível

O objetivo da moagem de combustíveis sólidos consiste em misturar os combustíveis diferentes a fim de obter uma mistura uniforme e levar a uma finura suficiente para assegurar uma combustão rápida e completa na tubulação do queimador.

O coque atualmente é o combustível mais usado nas fábricas de cimento no mundo. As principais vantagens do coque em relação aos outros combustíveis são o baixo custo e o fato de originar menos cinzas. As desvantagens que podem ocorrer incluem o elevado teor de enxofre, a combustão difícil devido ao baixo teor de materiais voláteis e a necessidade de moer o coque antes de entrar no forno.

2.4.5.3 - Moagem de cimento Portland

É nessa etapa da fabricação que o clínquer produzido, o gesso e outras possíveis adições como calcário aditivo e escória são misturados a seco e moídos, dando origem ao cimento Portland. As adições feitas determinam o tipo de cimento Portland produzido assim como a finura do material moída influencia a resistência e a qualidade do cimento produzido.

2.4.6 - Moinhos adotados nas indústrias cimenteiras

Os moinhos mais utilizados na indústria cimenteira são os de barras, autógenos, de bolas e, mais recentemente, de rolos verticais inclinados.

Os moinhos de rolos verticais Raymond são muito empregados em indústrias específicas de produção de calcário em pó com granulometrias médias e finas e de exploração de outros minerais, como os carboníferos, carbonatados, argilosos, fosfatados, etc (CBC, 1986).

Os moinhos trapezóides são indicados para produzir pó de materiais minerais não inflamáveis e não explosivos com dureza inferior a 9.3 na Tabela de Mohs e umidade inferior a 6%, tais como barita, calcário, quartzo, calcita, granito, argila de porcelana, gesso, etc (Shangai, 2012).

2.4.6.1 - Moinho de Barras

Os moinhos de barras (Figura 2.13) utilizam corpos moedores cilíndricos maciços. São moinhos tubulares, cuja relação comprimento/diâmetro é maior que 1,25:1. São fabricados até o tamanho máximo de 4,5 m de diâmetro por 6,0 m de comprimento. Devido às suas limitações técnicas, tais como comprimento das barras e problemas de capacidade de fluxo de material no interior, esse tipo de moinho não é muito utilizado na moagem do cimento, sendo mais usado como uma pré-moagem de material para posterior alimentação no moinho de bolas (Beraldo, 1987).



Figura 2.13 - Moinhos de barras
(Metso, 2011)

2.4.6.2 - Moinhos Autógenos

Na fragmentação autógena o britador ou moinho utiliza fragmentos do próprio minério para atuar como corpos moedores e a moagem se faz pelo atrito entre as suas frações resultantes. Os moinhos autógenos possuem uma grande relação diâmetro/comprimento (Figura 2.14). São aplicáveis a minérios que produzem blocos que não se degradam facilmente. Em geral, esse tipo de moagem apresenta um consumo energético superior ao consumo em moagem convencional, o que torna esse tipo de moinho pouco útil, sendo usado mais como uma pré-moagem. Existem moinhos semi-autógenos, nos quais uma pequena carga de bolas é adicionada para diminuir o consumo energético do moinho quando o material não apresenta blocos suficientemente competentes, ou caso haja a concentração de partículas intermediárias. Os moinhos autógenos e semi-autógenos são indicados para materiais que apresentem dificuldades na britagem e no peneiramento (úmidos e argilosos) (Beraldo, 1987).



Figura 2.14 - Moinho Autógeno
(Lafarge, 2002)

2.4.6.3 - Moinhos de Bolas

O moinho tubular de bolas é o equipamento mais utilizado na moagem convencional. Consiste em um tambor cilíndrico e pode ser dimensionado para diferentes diâmetros e comprimentos. O moinho de bolas pode conter um, dois ou três compartimentos ou câmaras. Geralmente, possui três câmaras: uma para secagem e duas para moagem, separadas por um diafragma ou grelha.

No segundo compartimento, que pode conter corpos moedores de até 100 mm de diâmetro, são moídos os nódulos mais grosseiros, enquanto no terceiro, com corpos moedores com diâmetro igual ou menor do que 60 mm, ocorre a moagem mais fina.

Os moinhos de bolas são revestidos internamente com placas de aço ou borracha, contendo em seu interior corpos moedores, que ocupam de 20 a 40% do volume do moinho (grau de enchimento), e se movem livremente promovendo a cominuição do material processado. Os revestimentos protegem a carcaça do moinho do desgaste, podendo ser substituídos quando necessário, e permitem minimizar efeitos de escorregamento dos corpos moedores e da carga a ser moída, reduzindo o desperdício de energia. Além de poderem ser fabricados com diversos materiais, podem apresentar várias formas (Silva, 2007).

Moinhos de bolas são utilizados para moagem em processos secos ou úmidos e normalmente fazem parte de um estágio secundário de moagem sendo o primeiro ocupado por moinhos de barras ou autógenos. Normalmente, o tamanho da partícula na alimentação é da ordem de 20 mm, e do material moído entre 44 e 250 μm . Apresentam baixo rendimento energético (Constantino, 2005)

O moinho de bolas é pouco utilizado na moagem de combustível devido às questões de segurança, pois devido à maior facilidade de formação de fagulhas torna-se extremamente necessário uma atmosfera inerte para minimizar os riscos de explosões. O risco é maior com carvão do que com coque, devido ao maior teor de voláteis. Seu uso principal é na moagem final.

A Figura 2.15 apresenta 2 moinhos de bolas, sendo um com 2 câmaras e o outro com 3 câmaras.

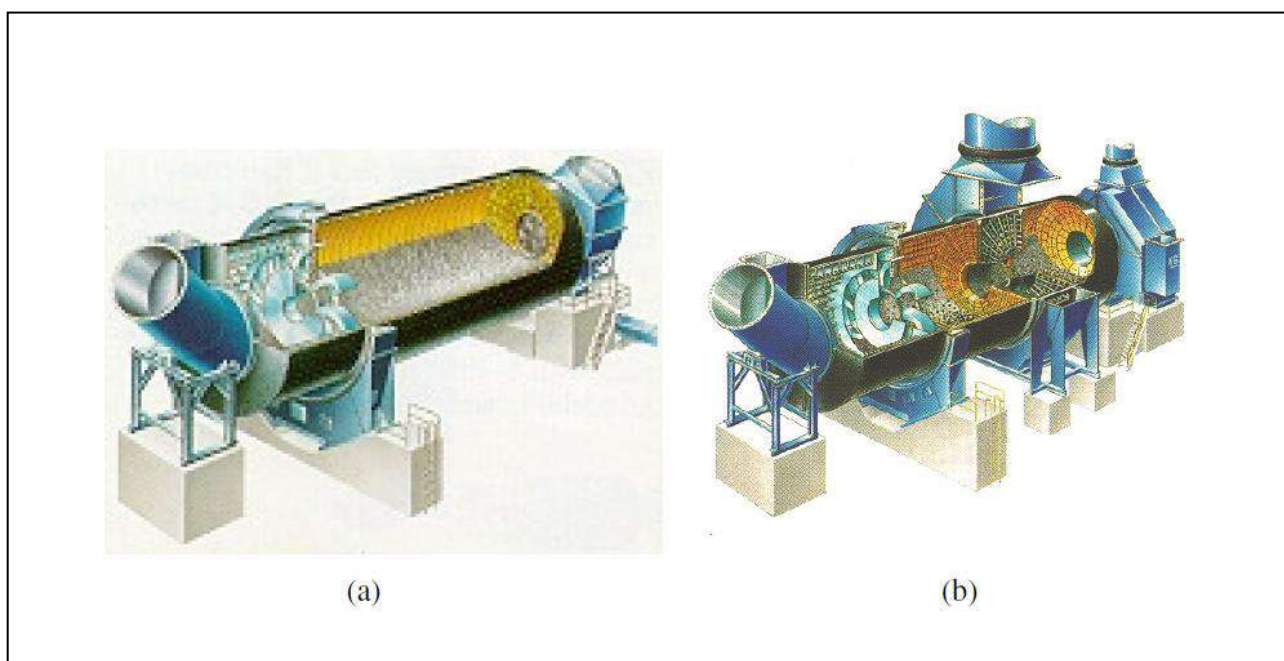


Figura 2.15 - Moinho de bolas com 2 câmaras (a) e 3 câmaras (b)
(Silva, 2007)

2.4.6.4 – Moinho Vertical de bolas ou seixos Metso

O VERTIMILL (Figura 2.16) é o moinho vertical da Metso e surgiu no final de 1979 sendo que desde então foram vendidas mais de 300 unidades em todo o mundo. Possui um mecanismo de moagem diferente dos outros apresentados anteriormente, sendo parecido com um moinho de bolas. É capaz de processar minérios com dimensões na alimentação de até 6 mm e moer produtos menores do que 20 micrômetros. O VERTIMILL possui versões com dimensões padronizadas cuja potência varia de 15HP (11 kW) a 3000 HP (2240 kW). Para a moagem de calcário com alimentação a partir de $\frac{3}{4}$ de polegadas, a Metso sugere um sistema composto de um britador seguido por um moinho vertical VERTIMILL (Metso, 2011).

Os corpos moedores, tais como bolas de aço ou seixos cerâmicos ou naturais, são agitados por uma hélice de rosca dupla suspensa (ou agitador de alimentação). O material de alimentação é introduzido, juntamente com a água, através de uma abertura na parte superior do Moinho Vertical (VERTIMILL). Uma bomba de reciclagem externa tem por finalidade predeterminar uma aceleração ascendente que provoca a classificação das partículas na parte superior do corpo do moinho. A pré-classificação e a remoção da granulometria do produto na alimentação reduzem a remoagem e aumentam a eficiência da operação. As partículas pequenas sobem ao passo que as maiores são arrastadas para os corpos moedores e moídas. A moagem ocorre por atrito/abrasão.



Figura 2.16 - Esquema de moagem do VERTIMILL.
(Metso, 2011)

A eficiência de moagem aumenta devido à pressão relativamente elevada existente entre os corpos moedores e as partículas que devem ser moídas. Pelo fato de haver maior pressão entre os corpos moedores e menor geração de calor e ruído, o Moinho VERTIMILL consome menor quantidade de energia do que o moinho horizontal para executar o mesmo trabalho. Os corpos moedores preenchem a parte inferior do corpo do moinho, com exceção do pequeno espaço diretamente abaixo das roscas. Ao usar bolas de aço, a altura típica atinge de 1,8 m a 2,4 m. O material é levado para cima pelas roscas e cai no espaço existente entre as extremidades das roscas ponta do arrastador e o diâmetro interior do corpo do moinho (Figura 2.17).

A massa de pó transborda para fora do corpo do moinho até um tanque separador, equipado com uma válvula tipo dardo e dispositivos de controle que dividem a massa em corrente de processo e corrente de reciclagem. A corrente de reciclagem é controlada a fim de produzir uma aceleração ideal ascendente destinada à aplicação de moagem específica. A corrente de processo tanto pode ser de produto acabado ou servir de alimentação para um sistema de classificação externo.

Os principais benefícios do VERTIMILL são:

- Maior eficiência no uso de energia – normalmente 30 a 35% podendo ser maior que 50%.
- Menores custos operacionais.
- Menor consumo dos meios – normalmente coincide com a economia de energia.
- Requer pouca manutenção – economiza tempo e mão-de-obra.
- Maior vida útil – a substituição ocorre em maiores prazos.
- Maior disponibilidade – o usual supera 98%.
- Menor custo de instalação – prazo menor e fundações mais simples.
- Menor nível de ruído – geralmente abaixo de 85 db.
- Maior segurança operacional.

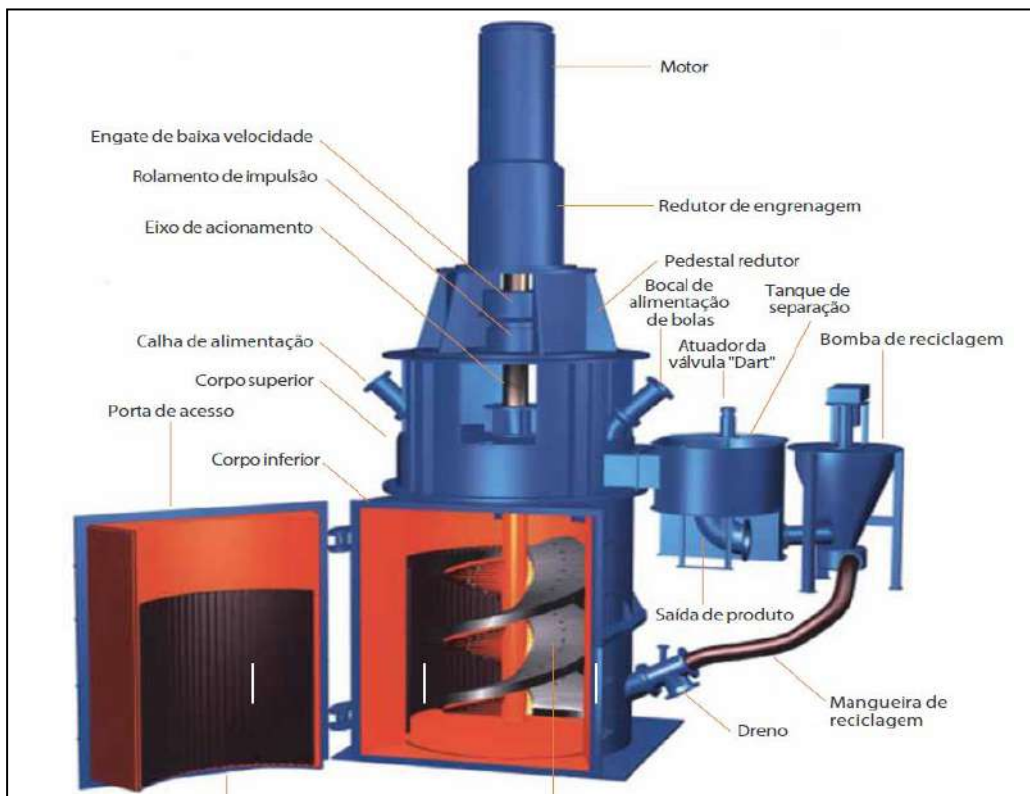


Figura 2.17 - Moinho Vertical de bolas ou seixos
(Metso, 2011)

2.4.6.5 - Moinhos de Rolos

Os moinhos de rolos usam corpos moedores cilíndricos para moer todos os tipos de materiais - ao invés de britá-los ou cominuí-los entre bolas tal como numa instalação tradicional - e constituem sistemas industriais ideais de fragmentação contendo etapas de britagem, secagem, moagem, classificação e transporte numa só máquina.

De acordo com a estrutura projetada, os moinhos de rolos podem ser divididos em dois tipos genéricos: horizontais e verticais.

Um **moinho de rolos horizontal** significa que o cilindro moedor é horizontal, (girando em torno de seu próprio eixo horizontal). Um exemplo é o Roller Press (Figura 2.18) que possui 2 rolos tipo prensas e apesar de poder ser usado como moinho único, é mais usado como parte de um sistema conjunto com um moinho de bolas (Figura 2.19), tendo a função de pré-moagem de materiais (FLS-Smidth, 2012).

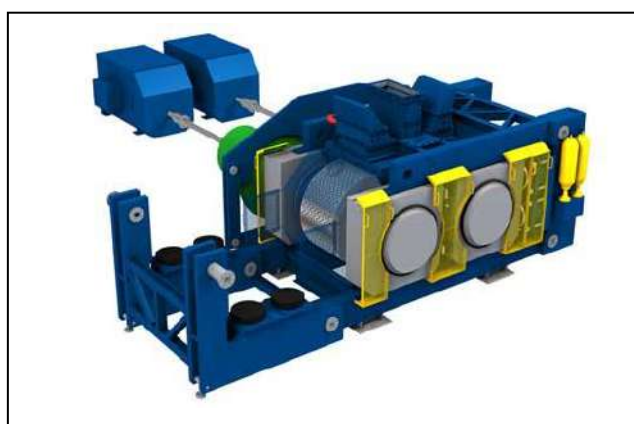


Figura 2.18 - Moinhos de rolos prensas de alta pressão
(FLS-Smidth, 2012)

Na cominuição realizada no moinho prensa de rolos de alta pressão (Roller Press) a matéria-prima é exposta à pressão muito alta por um curto período de tempo. A alta pressão provoca a formação de micro fissuras nas partículas alimentadas e gera uma quantidade substancial de material fino.

Se o material moído é alimentado diretamente para um moinho de bolas, o consumo de energia necessário para a produção de cimento acabado será muito inferior a de um moinho alimentado com material grosso. Isso torna possível aumentar a capacidade de um moinho de bolas de determinado tamanho em até 100% e reduzir o consumo de energia específica do sistema de moagem em 20 a 30% em comparação com um sistema sem essa pré-moagem.

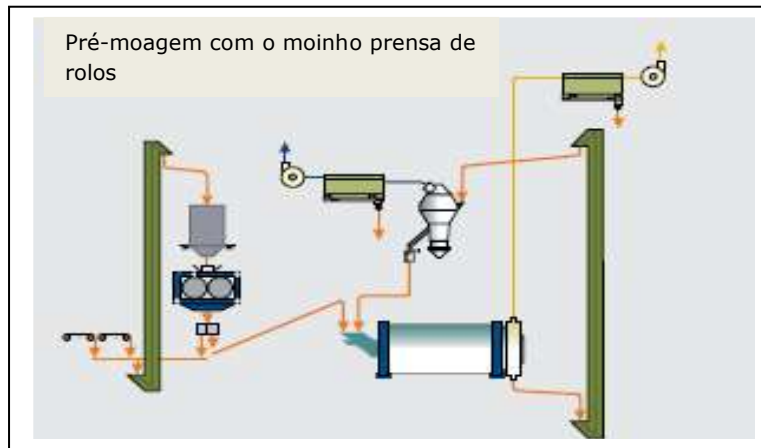


Figura 2.19 - Sistema de cominuição com um pré-moinho.
(FLS-Smidth, 2012)

O **moinho vertical de rolos** é um equipamento de moagem fina contendo uma instalação vertical com um sistema de mistura. Esse tipo de equipamento abrange os princípios operacionais de vários outros tipos de moinhos:

Capítulo 1 -**Moinho de rolo**: a moagem do material é feita por rolos rotativos

Capítulo 2 -**Moinho de disco**: a moagem do material é feita por discos rotativos com eixos horizontais ou eixos verticais

Capítulo 3 -**Moinhos centrífugos**: a moagem do material é feita através da força centrífuga produzida pela alta velocidade de rotação dos componentes

Capítulo 4 -**Moinho Vibracional**: a alta frequência de vibração gerada pelos eixos fazem o material e o equipamento colidirem entre si completando assim o processo de moagem.

É adequado para baritas, bentonita, silicatos de cálcio, cimento, carvão, gangas, gesso, calcário, mármore, coque de petróleo, minerais não-metálicos com dureza baixa, média e elevada entre mais de uma centena de tipos.

Basicamente, são equipamentos que utilizam grandes rolos inclinados que são pressionados por um sistema pneumático contra o material sobre uma mesa rotativa para realizar o trabalho de moagem. A moagem se dá entre os rolos e a pista. Os moinhos verticais com rolos inclinados são empregados principalmente nas etapas das moagens de farinha e de combustíveis sólidos.

Os **moinhos verticais com rolos inclinados** apresentam um baixo consumo de energia, requerem menos espaço para as instalações e custam menos, no entanto, necessitam de uma alta vazão de gás para o transporte interno do material, de modo que o consumo específico de energia do seu ventilador é próximo do consumo de energia do moinho. Apresentam como vantagens: instalação compacta; baixo consumo específico de energia em casos de alta umidade e maior capacidade de secagem pois suportam altas temperaturas de gases e alimentação com partículas de 50 – 100 mm (Silva, 2007).

Um moinho vertical com rolos inclinados é apresentado na Figura 2.20.

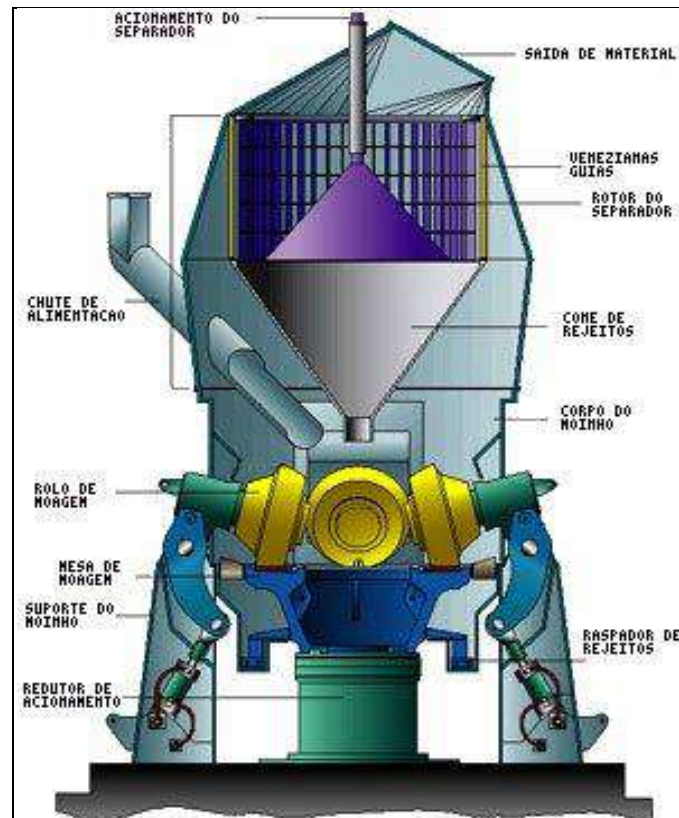


Figura 2.20 - Moinho vertical de Rolos
(Lafarge, 2007)

Os moinhos verticais de rolos - segundo informações dos principais fabricantes de equipamentos para moagem industrial (FLS-Smith, Loesche, Polysius e Gebr. Pfeifer), dos estudos da Lafarge (Gupta, 2007) e de Alsop (2007) - são considerados no meio fabril como os mais apropriados para otimizar as operações de novas instalações de moagens de matérias-primas e dos cimentos Portland, e constituem o foco principal da presente abordagem.

2.5 - Constatações do Capítulo 2

1ª - O processo de fabricação de cimento Portland mais utilizado atualmente é o de via seca, que inclui ciclones de pré-aquecimento e um forno pré-calcinador, pois consome menos energia do que os precedentes de vias úmida, semi-úmida e semi-seca.

2ª - Para reduzir o gasto com combustíveis naturais, as indústrias cimenteiras adotaram o coprocessamento de resíduos industriais e urbanos, resolvendo também um problema da destinação de substâncias perigosas ou danosas ao meio ambiente, pois o forno de clínquerização destrói totalmente vários rejeitos orgânicos e incorpora as cinzas de natureza inorgânica no clínquer.

3ª - No âmbito da redução de tamanho de partículas, "britagem" é o termo designado para partículas com tamanho até 0,25 polegadas e "moagem", "pulverização" e "cominuição" para partículas menores.

4ª - Os britadores são empregados para reduzir minérios duros e secos com grandes tamanhos, como o calcário e os tipos mais utilizados são os modelos de mandíbulas e o de martelo.

5ª - Os moinhos são usados para moer misturas de matérias-primas (denominadas "farinhas" ou "cru"), carvões e cimentos Portland (compostos de clínquer e adições finais, que incluem gesso e escória de alto-forno).

6ª - O moinho de bolas é o mais utilizado para moer farinhas para clínquerização e cimentos Portland, porém, está sendo substituído gradativamente pelos moinhos verticais de rolos.

2.6 - Referências do Capítulo 2

ABETRE – **Tecnologia, Co-processamento** - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos, Disponível em <www.abetre.org.br>. Acessado em 2002.

ALSOP, P. A. – **Cement Plant Operations Handbook, For Dry Process Plants 5ª Ed-** International Cement Review, EUA, 2007.

BERNARDO, A. C. S. M. - **Otimização estocástica multi-objetivos na produção de cimento Portland com co-processamento de resíduos e adição de mineralizadores** – Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2009.

BERALDO, J. L. - **Moagem de minérios em moinhos tubulares** - Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1987.

Britador de mandíbulas – Disponível em <<http://reducaosolidos.tripod.com/mandibulas.htm>>. Acessado em 20 de novembro de 2011.

CBC - **Moinhos de rolos verticais Raymond** – CBC, São Paulo, 1986.

CONSTANTINO, J. - **Relatório de Trainee** – Relatório técnico sobre a Fábrica de Montes Claros, Lafarge, Montes Claros – MG, 2005.

DEDINI – **Catálogo de equipamentos para indústrias de cimento Portland** – São Paulo, 1983.

FLS-SMIDTH –**Hydraulic Roller Press** – Catálogo, FLS Smidth – extraído de www.flsmidth.com em 10 de janeiro de 2012.

FURTADO, M. - **Coprocessamento de resíduos** – Química e Derivados XL (436): 12-22 – abril de 2005.

GUPTA, D.; BRANDT, B.; STOIBER, W. - **Technical Agenda Vertical Raw Mill,Lafarge Cement-** Diretoria de Performance,Lafarge S.A., França, 2007.

KIHARA, Y. – **A sustentabilidade e a competitividade da indústria de cimento** – VI SIMAI, 2004.

LAFARGE - **Treinamento do produto**, Diretoria Industrial, Lafarge Brasil S.A. - Rio de Janeiro, 2002.

LM - **Roller Mill Introduction** – LIMING HEAVY INDUSTRY (SHANGAI) Disponível em <http://www.shanghai-crusher.com/Products/Grinding_Plant/roller_mill.html?gclid=CMWmrsOLw60CFdKR7QodG0D7-w>. Acessado em 09 de janeiro de 2012.

MAGNESITA – **Forno Rotativo**, Disponível em <<http://www.magnesita.com.br/solucao-em-refratarios/cimento/forno-rotativo>>. Acessado em 15 de outubro de 2011.

METSO - **Moinho Vertical (VERTIMILL™) Moagem de Finos e Ultrafinos em Via Úmida**– Catálogo, Metso Minerals, Sorocaba – São Paulo- Brasil, 2006. Disponível em <<http://www.metso.com/br/miningandconstruction/mineracaoconstrucao.nsf/WebWID/WTB-091020-22576-5D857?OpenDocument>>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

NORTON, F.H. - **Introdução à Tecnologia Cerâmica** - Editora Edgard Blücher Ltda, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

PAULA, F. de, **Apostila de microscopia do clínquer**, Laboratório de controle químico e de qualidade, Lafarge, Cantagalo – RJ, 2010.

PERRY, J.H. (Editor)- **Chemical Engineers´ Handbook, Fourth Edition** – McGraw-Hill Book Company e Kogakusha, Tóquio, 1963.

PERRY, R.H. e CHILTON, C.H. - **Manual de Engenharia Química, 5a Edição** - Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.

RTA - **Principais aplicações da RTA em projetos** – RTA Engenharia e Ambiental, Cubatão – SP. Extraído de <http://www.rtaambiental.com.br/tecnologia.htm> em 26 de dezembro de 2011.

SÁNCHEZ, I.C.C.; MATSUSHITA, K. e PONS, F.C. - **Moagem e Moinhos** – FILK e S.A. Indústrias Votorantim, São Paulo, 1990.

SHANGAI – **MTM Medium Speed Trapezium Mill** – Shangai Shibang Machinery Co., China, 2012.

SILVA, M. C. C. - **Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínqueres de cimento Portland** – Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PEMM, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SKF - **Moinhos de martelo e trituradores de impacto**. Disponível em <<http://www.skf.com/portal/skf/home/aptitudexchange?contentId=0.296683.296684.296687.296717.341341>>. Acessado em 15 de outubro de 2011.

SNIC – **Press Kit 2011** – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Rio de Janeiro. Disponível em <www.snic.com.br>. Acessado em 03 de dezembro de 2011.

VERZBICKAS, F. - **Co-processamento em fornos de produção de clínquer**. Apresentado em seminário realizado no BNDES em novembro de 2007. Essencis Soluções Ambientais (versão reduzida). Disponível em <www.essencis.com.br>. Acessado em dezembro de 2011.

ZAKON, A. – **Notas de aulas Engenharia de Processos Inorgânicos** - Escola de Química, UFRJ, 2004.

ZAKON, A. - **Introdução à Engenharia e Gestão das Tecnologias Inorgânicas** - Departamento de Processos Inorgânicos - DPI, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

ZAKON, A. - **Reciclagem de Rejeitos Sólidos Industriais: Desenvolvimento de Clínquer para Cimento Portland em Escala de Laboratório a partir de Xisto Retornado do Processo Petrosix (Petrobrás)** - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Tese de Doutorado, Orientador: Prof. Dr. Pérsio de Souza Santos, 1991.

CAPÍTULO 3 - OFERTA E CONSUMO DE CIMENTOS PORTLAND NO BRASIL

3.1 - Tipos normalizados e aplicações de cimento Portland

O mercado brasileiro de cimento Portland dispõe de 12 tipos diferentes de cimento Portland de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem final do produto, e que foram normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (Tabela 3.1). Podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial e coloração (ABCP, 2011). Na Tabela 3.2, temos as diferenças de composições entre os tipos de cimento.

Tabela 3.1 – Tipos de cimento
(ABCP, 2011)

SIGLA	DENOMINAÇÃO
CP I	Cimento Portland Comum
CP I – S	Cimento Portland Comum com Adição
CP II – E	Cimento Portland Composto com Escória de Alto Forno
CP II – Z	Cimento Portland Composto com Pozolanas
CP II – F	Cimento Portland Composto com Filler
CP III	Cimento Portland de Alto Forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP – RS	Cimento Portland Resistente a Sulfatos
CP – BC	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
CPB	Cimento Portland Branco
CPP	Cimento Portland para Poços Petrolíferos

Tabela 3.2 - Composição química dos tipos de cimento Portland
(ABNT, 2009)

CIMENTO NORMALIZADO PELA ABNT	Classe de Resistência Mecânica (MPa)	Componentes (% em Massa)			
		Clínquer + Gesso	Escória de Alto Forno	Pozolana	Material Carbonático
CP I	25-32-40	100		0	
CP I-S	25-32-40	99-95		1-5	
CP II-E	25-32-40	94-56	6-34	0	0-10
CP II-Z	25-32-40	94-76	0	6-14	0-10
CP II-F	25-32-40	94-90	0	0	6-10
CP III	25-32-40	65-25	35-70	0	0-5
CP IV	25-32	85-45	0	15-50	0-5
CP V-ARI	n/a	100-95	0	0	0-5
CPP		100	n/a	n/a	n/a
CP-RS		CP I e CP II cujo teor de C_3A no clínquer é $\leq 8\%$ CP III com teor de escória $> 60\%$ CP IV com teor de pozolana $\geq 25\%$			

3.2 - Aplicações normalizadas dos Cimentos Portland no Brasil

3.2.1 - Cimento Portland Comum CP I e CP I-S (NBR 5732)

É um tipo de cimento Portland sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega) muito adequado para o uso em construções de concreto, e, em geral, quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas ou se não são exigidas propriedades especiais para o seu desempenho. Por outro lado, também é oferecido ao mercado o cimento Portland Comum com adições CP I-S, com até 5% de adições (escórias, pozolanas, material carbonático) em massa, recomendado para construções em geral, com as mesmas características válidas para serviços menos exigentes em termos de desempenhos mecânico (ABCP, 2011).

3.2.2 - Cimento Portland CP II (NBR 11578)

É o tipo de cimento Portland Composto que foi modificado para reduzir a velocidade de reação exotérmica e o calor gerado pelo cimento Portland Comum, sendo indicado para lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa conformada. O cimento Portland CP II apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo, sendo recomendado para obras sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento (ABCP, 2011).

3.2.2.a - Cimento Portland CP II-Z

É empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais, produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. O concreto feito com este produto é mais impermeável e por isso mais durável (ABCP, 2011).

3.2.2.b - Cimento Portland Composto CP II-E

É recomendado para estruturas que exijam um desprendimento moderado ou lento de calor ou que possam ser atacadas por sulfatos (ABCP, 2011).

3.2.2.c - Cimento Portland Composto CP II-F

Aplica-se genericamente para preparar argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento (ABCP, 2011).

3.2.3 - Cimento Portland de Alto Forno CP III (NBR 5735)

Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão resultante de possíveis ataques de álcalis sobre os agregados (reação álcali-agregado, sendo resistente a sulfatos. O cimento Portland CPI III pode ser usado genericamente em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, de concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, magro e outras, sendo particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos (ABCP, 2011).

3.2.4 - Cimento Portland CP IV (NBR 5736)

Serve para obras envolvendo argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, sendo especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação (ABCP, 2011).

3.2.5 - Cimento Portland CP V ARI - (Alta Resistência Inicial - NBR 5733)

Apresenta valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa para 1 dia de idade após sua hidratação na massa de uma argamassa ou de um concreto e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para, respectivamente, os tempos de endurecimento de 1, 3 e 7 dias.

O CP V ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados. Pode ser utilizado no preparo de concreto e argamassa em obras pequenas até a construção das edificações de maior porte, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada seguida de desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é obtido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP, 2011).

3.2.6 - Cimento Portland CP RS - (Resistente a sulfatos - NBR 5737)

O CP-RS oferece resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. Pode ser usado em concreto dosado em central, concreto de alto desempenho, obras de recuperação estrutural e industriais, concretos projetado, armado e protendido, elementos pré-moldados de concreto, pisos industriais, pavimentos, argamassa armada, argamassas e concretos submetidos ao ataque de meios agressivos, como estações de tratamento de água e esgotos, obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas.

De acordo com a norma NBR 5737, cinco tipos básicos de cimento - CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI - podem resistir aos sulfatos, desde que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes condições (ABCP, 2011):

- 1ª - Possuir teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- 2ª - Cimentos do tipo alto-forno devem conter entre 60% e 70% (p/p) de escória granulada de alto-forno;
- 3ª - Cimentos do tipo pozolânico devem conter entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- 4ª - Devem ser cimentos que apresentem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

3.2.7 - Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) - (NBR 13116)

Essa modalidade congrega um grupo de variedades de cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação é designada por siglas e classes específicas pertinentes ao seu básico, acrescidas da sigla genérica BC. Por exemplo: CP III-32 (BC) é o cimento Portland de Alto-Forno com baixo calor de hidratação, determinado pela sua composição, que tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento (ABCP, 2011).

3.2.8 - Cimento Portland Branco (CPB) - (NBR 12989)

O cimento Portland Branco se diferencia por coloração e pelo conteúdo dos silicatos e aluminatos de cálcio, porque não pode conter o elemento químico ferro, sendo fabricado e classificado em dois subtipos: estrutural e não-estrutural. O cimento CPB estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, com classes de resistência 25, 32 e 40, similares às dos demais tipos de cimento. Já o cimento CPB não-estrutural não tem indicações de classe e é aplicado, por exemplo, em rejuntamento de azulejos e outras aplicações não-estruturais, podendo ser utilizado nas mesmas aplicações dos cimentos cinzentos. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com nenhum ou baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante sua fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim branco ou de cor clara no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78%. Adequado aos projetos arquitetônicos mais ousados, o cimento branco oferece a possibilidade de escolha de cores, uma vez que pode ser associado a pigmentos coloridos para ampliar o leque de variedades comerciais (ABCP, 2011).

3.2.9 - Cimento Portland para Poços Petrolíferos (CPP) –(NBR 9831)

O cimento Portland CPP, constitui um tipo com uso específico qual seja a cimentação de poços petrolíferos. Seu consumo é pouco expressivo quando comparado ao de outros tipos de cimentos Portland normalizados no País. E no processo de sua fabricação são tomadas precauções para garantir que o produto conserve as propriedades reológicas (tais como a plasticidade) necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas presentes a grandes profundidades, durante a aplicação nos poços petrolíferos. O CPP pode ser identificado como sendo um cimento classe G (CPP-G) na norma API. (ABCP, 2011). Segundo a norma API especificação 10A existem oito classes de cimento (de A a H) que podem ser empregadas em poços conforme a profundidade, temperatura e pressão de trabalho (Tavares, 2008).

3.3 - Mercado Brasileiro.

O consumo de cimento no Brasil continua crescendo consideravelmente, como se pode observar nas Tabelas seguintes.

Tabela 3.3 - Consumo mundial de cimento Portland
(www.cimento.org, 2011)

Maiores Consumidores de Cimento (milhões de toneladas)									
Países	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	% cresc.
China	857,8	961,9	1058	1218,1	1345,3	1369,9	1600,0	1851,0	116%
Índia	117,8	124,8	133,7	152,6	166,4	181,5	185,1	212,0	80%
USA	113,5	121,3	128,3	127,4	114,8	96,8	70,5	69,0	-39%
Brasil	34,9	35,8	37,7	41,1	45,1	51,6	51,9	60,0	72%
Iran	29,7	31,4	31,3	34,8	40,0	43,5	47,8	56,0	89%
Vietnã	24,2	26,2	30,9	32,7	35,0	40,0	47,9	50,0	107%
Rússia	39,4	44,0	46,6	52,5	60,5	60,3	44,0	50,0	27%
Egito	26,5	26,9	31,9	34,3	36,8	39,6	47,9	50,0	89%
C. do Sul	58,3	54,9	46,3	48,4	50,8	50,6	48,5	47,7	-19%
Turquia	28,1	30,7	35,1	41,6	42,5	40,6	41,1	46,0	64%
Mundo	2014,2	2178,7	2334	2588,2	2778,8	2824,0	3004,7	3294,0	64%

O mercado global continua indicando perspectivas de crescimento, mesmo com os sinais externos que apontam para uma possível crise na Europa e até mesmo uma possível recessão nos Estados Unidos da América, que vem registrando anualmente quedas consecutivas no consumo de cimento.

O Brasil poderá galgar mais uma posição no ranking mundial de consumo de cimento, saindo da recém conquistada 4ª posição, para a 3ª colocação no cenário mundial, perdendo apenas para China e Índia. Isso se as expectativas positivas para o Brasil e as previsões nada otimistas para os Estados Unidos da América, que apontam para um crescimento nulo ou mesmo uma queda de 2 a 3% em 2011 se confirmarem (www.cimento.org, 2011).

A região sudeste brasileira é a maior consumidora de cimento Portland, porém a região norte foi a que mais cresceu no último ano (Tabela 3.4) e segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento o tipo CP II é o mais consumido pela população brasileira (Tabela 3.5).

Tabela 3.4 - Dados do consumo nacional (brasileiro) (em 1.000 t)
(SNIC, 2011)

Origem	Jan a Agosto		%
	2010	2011	2011/2010
Norte	2.029	2.290	12,9%
Nordeste	7.255	7.621	5,1%
Centro Oeste	4.089	4.467	9,2%
Sudeste	19.446	20.967	7,8%
Sul	5.675	6.092	7,3%
Venda Merc. Interno	38.494	41.437	7,6%
Exportação	26	27	3,2%
Venda Total	38.520	41.464	7,6%

Tabela 3.5 - Produção brasileira de 2010 por tipos de cimento.
(SNIC, 2011)

Produção anual de cimento portland, segundo os tipos (em 1.000 toneladas)									
Portland cement annual production, by type (1.000 tonnes)									
ANO / YEAR	TIPOS DE CIMENTO / CEMENT TYPE						SUBTOTAL	AJUSTES*/ADJUSTMENTS*	TOTAL
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco / White			
2005	786	25.180	6.792	2.545	2.040	96	37.439	1.266	38.705
2006	794	27.116	7.239	2.846	2.436	93	40.524	1.371	41.895
2007	1.034	29.848	7.842	3.876	3.254	115	45.969	582	46.551
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577	86	51.682	288	51.970
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377	-	51.187	560	51.747
2010	88	38.474	8.345	6.686	4.211	-	57.804	1.313	59.117

(*) Dados estimados. / Estimated data.

3.4. Constações do Capítulo 3.

1ª - O mercado brasileiro dispõe de 12 tipos de cimentos Portland normalizados, que devido às diferenças de composições e de características podem ser indicados para uso em diferentes situações.

2ª - O consumo brasileiro de cimento Portland vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, devendo assumir o posto de terceiro maior consumidor do mundo.

3ª - A variedade de cimento Portland CP II é a mais consumida no Brasil.

3.5. Referências do Capítulo 3.

ABCP - **Guia básico de utilização do cimento Portland** - Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1999.

ABCP - **A versatilidade do cimento Brasileiro** - Disponível em <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acessado em 20 de novembro de 2011.

Cimento Mundo - Disponível em <http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=30>. Acessado em 20 de novembro de 2011.

SNIC - **Relatório Anual de 2010** - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. Disponível em <www.snic.org.br>. Acessado em 20 de novembro de 2011.

Tavares, L. M. - **Estudo da influência do tipo de cimento usado em poços de petróleo na carbonatação acelerada por CO₂ supercrítico**, III Mostra de Pesquisa da Pós-Graduação - PUCRS - Rio Grande do Sul, 2008.

CAPÍTULO 4 -FRAGMENTAÇÃO E CLINQUERIZAÇÃO NAS INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS

4.1 - Propriedades do material a fragmentar

No caso da fragmentação de minérios, o conhecimento das propriedades do material sólido envolve várias dificuldades, pois ao invés de constituir uma fase sólida contínua, formam uma dispersão composta por um grupo de partículas com diferentes formas, densidades e tamanhos. A reação de uma partícula a uma tensão aplicada depende de seu tamanho e forma, bem como as condições em que o esforço é aplicado, cujo efeito não é função apenas da energia fornecida.

As propriedades dos materiais consideradas relevantes para a execução de um processo de redução do tamanho podem ser divididas em dois grupos de parâmetros operacionais:

1º - Característicos da resistência à ruptura: dureza da partícula, energia aplicada, probabilidade de fratura, e fração de quebra resultante.

2º - Característicos do efeito ao esforço aplicado: função de quebra (distribuição de tamanho dos fragmentos resultantes), aumento da área superficial e a utilização da energia.

A forma irregular das partículas e os efeitos do tamanho das partículas causam dificuldades no processo de fragmentação. Os parâmetros operacionais mencionados são definidos de tal forma que possam ser medidos e correspondem ao uso prático. Assim sendo, os parâmetros operacionais não podem ser derivados ou relacionados com propriedades conhecidas do material, como módulo de Young, resistência à tração, eles devem ser obtidos experimentalmente através de ensaios específicos (Schonert, 2002).

As propriedades dos materiais importantes durante uma fragmentação dependem da natureza da alimentação no moinho e das condições de carga (massa de minério a moer). Os parâmetros de alimentação de um material sólido a um moinho são:

- 1º - Tipo, origem e estado após o tratamento prévio de material;
- 2º - Tamanho das partículas;
- 3º - Forma das partículas;
- 4º - Homogeneidade das partículas.

4.1.1 - Dureza

Devido ao seu efeito sobre o produto resultante e quanto ao custo operacional e de manutenção, a dureza de uma substância é importante em britagem e moagem industrial. Dureza é a propriedade física que caracteriza a resistência mecânica de um material ao ser riscado. Porém, não é relevante para resistir mecanicamente a impactos, como se pode observar no caso de um material muito duro como o diamante que é relativamente fácil de quebrar por ação de um martelo (Lowrison,1974). A dureza dos materiais naturais e sintéticos pode ser descrita através da escala de Mohs (Tabela 4.1) que representa a capacidade crescente dos materiais duros para riscar os materiais macios ou moles.

Tabela 4.1 - Tabela de dureza de Mohs
(Lowrison, 1974)

1. Talco	6. Feldspato
2. Gipsita	7. Quartzo
3. Calcita	8. Topázio
4. Fluorita	9. Corindor
5. Apatita	10. Diamante

4.1.2 – Moabilidade

A capacidade de um material fragmentar-se pode ser medida pela sua moabilidade, que revela sua aptidão a fragmentação, e depende do estado de agregação química da matéria (pois resulta das ligações químicas presentes) e da presença de defeitos na estrutura cristaloquímica. Materiais de composição similar ou próxima podem revelar comportamentos diferentes, como é o caso dos calcários e mármore.

Inexistem valores característicos absolutos para a moabilidade, os quais resultam de ensaios experimentais, que são válidos para o equipamento de moagem no qual foram testados. Os dois ensaios de moabilidade mais utilizados são os de Bond e de Hardgrove.

4.1.2.1 – Ensaio de Bond para determinar a moabilidade em moinhos de bolas.

Para avaliar a moabilidade de um material destinado a ser fragmentado num moinho de bolas industrial, utiliza-se no ensaio de Bond um equivalente de escala laboratorial (de bancada), que possui dimensões padronizadas (305 x 305mm) com revestimento interno liso e cantos curvados, operando à frequência de 70 rotações por minuto (Figura 4.1). A carga de bolas inserida no cilindro é de 20kg. O material a ser avaliado é britado para obter frações totalmente passantes em peneira com abertura de 3,35mm. São introduzidas massas do material de 700g e efetuadas 100/150 rotações. Após a moagem, a massa fragmentada é retirada e peneirada em malha de 100 mesh. Retira-se a fração passante e completa-se a carga com matéria nova para compensar os finos removidos. Repete-se o ciclo de moagem tantas vezes quanto necessárias para atingir o equilíbrio entre a carga nova e a fração passante.



Figura 4.1 - Moinho de bolas padronizado para o ensaio de Bond para determinar a moabilidade
(Silva, 2007)

Determina-se o número de rotações, a produção por rotação no equilíbrio, a malha pela qual temos 80% de passante para calcular o "índice de Bond" ou "índice de trabalho" através da equação seguinte.

$$W_i = \frac{445}{d_{p100}^{0,23} \times P^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{d_{p80}}} - \frac{10}{\sqrt{d_{f80}}} \right)} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo:

d_{p100} = a malha da peneira com 100% de passante (material alimentado);

d_{f80} = a malha da peneira com 80% de passante (material alimentado);

d_{p80} = a malha da peneira com 80% de passante (produto acabado);

P = a produção do produto (g/rev. do moinho);

W_i = índice de Bond.

O Índice de Bond permite classificar os materiais seguindo a aptidão à moagem e calcular a energia de moagem para os moinhos de bolas. A Tabela seguinte apresenta valores (médios) de índice de trabalho (índice de Bond) calculados nos laboratórios da Lafarge para diversos materiais usados em indústrias cimenteiras.

Tabela 4.2 - Índice de trabalho de alguns materiais.
(Lafarge, 2005)

Material	KWh/ton
Clínquer	13,5
Escoria	15,7
Calcário	10,2
Gesso natural	8,1
Argila	7,1
Argila calcinada	1,4
Carvão	11,4
Coque verde	20,7

O índice de trabalho das misturas é calculado como a soma ponderada dos constituintes. Com base nos resultados de ensaios de moabilidade de Bond realizados com cerca de 200 clínqueres industriais foram estabelecidos critérios que permitem a classificação de clínqueres, em função dos valores de W_i , com relação a sua moabilidade (Silva, 2007). A Tabela 4.3 apresenta tal classificação.

Tabela 4.3 - Classificação de moabilidade de clínqueres baseado no índice de Bond.
(Opoczky e Gavel, 2004)

W_i (kWh/t)	Classificação	Símbolo
> 15	Difícil moabilidade	D
12 - 15	Média moabilidade	M
< 12	Fácil moabilidade	F

4.1.2.2 – Ensaio de Hardgrove para moabilidade em moinho de bolas com anel

Hardgrove concebeu sua máquina para ser usada no moinho de bolas em anel. Os resultados desse ensaio têm aplicabilidade, portanto, especial para esse tipo de equipamento sem necessariamente restringir os outros moinhos.

A máquina (Figura 4.2) consiste em um recipiente estacionário inferior de aço para moagem que é acoplado com um anel de moagem à parte superior, composto por oito bolas de aço que giram a 20 rpm. O anel de moagem gira por um eixo impulsionado por um motor e uma correia, no qual são adicionados 29 kg de pesos removíveis, que exercem pressão sobre as oito bolas rotativas. Um conjunto de contador/chave conta o número total de revoluções e para automaticamente a máquina ao completar 60 revoluções (Preiser, 2011).



Figura 4.2- Máquina para ensaios de moabilidade de Hardgrove
(Preiser, 2011)

O peso (W) passando a 200 mesh é determinado e o índice Hardgrove (HGI) é calculado pela expressão:

$$\text{HGI} = 13 + 6,93 \times W \quad (\text{Eq. 4.2})$$

O índice de Bond pode ser calculado a partir do índice Hardgrove pela relação:

$$W_i = \frac{435}{\text{HGI} \times 0,91} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Fabricantes de vários tipos de moinhos mantêm laboratórios nos quais são feitos ensaios de moabilidade para determinar a adequação de suas máquinas. Quando a comparação dos valores de moabilidade é feita em pequenos equipamentos dos mesmos moinhos industriais dos próprios fabricantes, adquire-se uma base de dados confiável para fazer uma ampliação de escala ("scale-up"), sendo essa opção melhor do que realizar ensaios de moabilidade em moinhos de bolas para estimar tamanho e capacidade de outros tipos de moinhos como o vertical.

4.2 - Influência das matérias-primas na moagem da farinha para clínquerização.

4.2.1 – Calcário

O maior componente da farinha é o calcário (CaCO_3) (76 a 80%), pois fornece o cálcio, que está na forma de cal (CaO) através do processo de descarbonatação.



Sua ocorrência em jazidas (Figura 4.3) que afloram à superfície, possibilita sua extração a céu aberto, através de detonações. Em geral, são extraídas rochas calcárias com 85% de CaCO_3 . Os 15% restantes são considerados como impurezas, que incluem: óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro III (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e enxofre (S) na forma de sulfetos.



Figura 4.3 - Mina de calcário da fábrica de cimento Portland Mauá da Lafarge em Cantagalo, RJ.

O calcário é classificado pelos teores de carbonatos de cálcio e de magnésio (CaCO_3 e MgCO_3), que resultam em massas específicas e estruturas cristalinas diferentes.

Calcítico → teor de Mg menor ou igual a 5%

Magnesianos → teor de Mg maior que 5% e menor que 12%

Dolomítico → teor de Mg maior que 12%

Segundo o *British Geological Survey* (2005), o teor máximo permitido de MgO no cimento é 5%. Esta restrição implica no uso de matéria-prima com até 3% deste óxido, ou seja, emprega-se calcário calcítico cujo teor de magnésio varia de 0 a 5%, porque sua presença em excesso no clínquer pode gerar um cimento com menor durabilidade visto que o óxido de magnésio pode expandir na estrutura no concreto depois de vários anos.

O calcário por ser o componente majoritário é o que mais influencia na moagem da farinha. Assim, emprega-se um britador para reduzir as pedras de calcário até 25 mm, que na etapa inicial de extração por detonação da rocha podem atingir tamanhos de 1 m de comprimento (e sofrem britagem com auxílio de martelos hidráulicos ou pneumáticos).

4.2.2 – Argila

As argilas são oriundas de rochas ígneas (formadas pela solidificação do magma), e podem apresentar-se duras ou moles, sendo constituídas de elementos minerais em proporções variáveis. Os minerais argilosos são essencialmente silicatos de alumínio hidratados. Em algumas argilas o alumínio é substituído pelo ferro. Quando ocorre na forma de um material terroso, com granulação fina, sua extração das minas é mais simples que a de maciços rochosos, pois não é necessário produzir uma detonação, bastando uma escavadeira para retirar o material (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Mina de argila em Cantagalo, RJ da fábrica de Cimento Portland da Lafarge.

A argila compõe de 5 a 15% do cru dependendo da qualidade e composição do calcário, pois tem como função fornecer os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , necessários a fabricação do cimento Portland. O grande problema da argila em relação à moagem da farinha reside na sua reatividade com a água, pois retém água e transforma-se numa pasta que pode aumentar o consumo de energia do moinho, entupir as instalações do moinho e gerar uma farinha de baixa qualidade. Por isso as indústrias normalmente armazenam a argila em depósitos cobertos (para evitar a incidência das chuvas), ao contrário do calcário.

4.2.3 - Bauxita

É uma mistura mineral natural de óxidos de alumínio hidratados com alto teor de Al_2O_3 , (entre 40 a 60%) sendo utilizada para completar alguma deficiência de conteúdo de alumínio nas matérias-primas, podendo atingir apenas 0,5% da composição da farinha. Assim, não exerce muita influência na moagem do cru (Mansur, 2008).

4.2.4 - Minério de ferro

É uma expressão que designa minerais ricos em ferro. Os mais comuns incluem:

Hematita – Fe_2O_3 - 70% de ferro

Magnetita – Fe_3O_4 - 72% de ferro

O minério de ferro é usado como fundente para reduzir a temperatura de fusão das fases líquidas que se formam dentro do forno no processo de clinquerização. Também não influencia na moagem da farinha por representar no máximo 1% da matéria crua.

4.2.5 – Efeitos da moagem da farinha sobre a sua clinquerização

A moagem da farinha maximiza as superfícies de contato dos reagentes, devido ao fato de as reações de clinquerização serem reações “sólido-sólido”. Um aumento na superfície de contato permite melhorar a eficiência do combustível consumido (Figura 4.5), pois facilita a transferência de calor gerada, favorecendo a ocorrência das reações químicas desejadas e a melhoria da qualidade do produto.

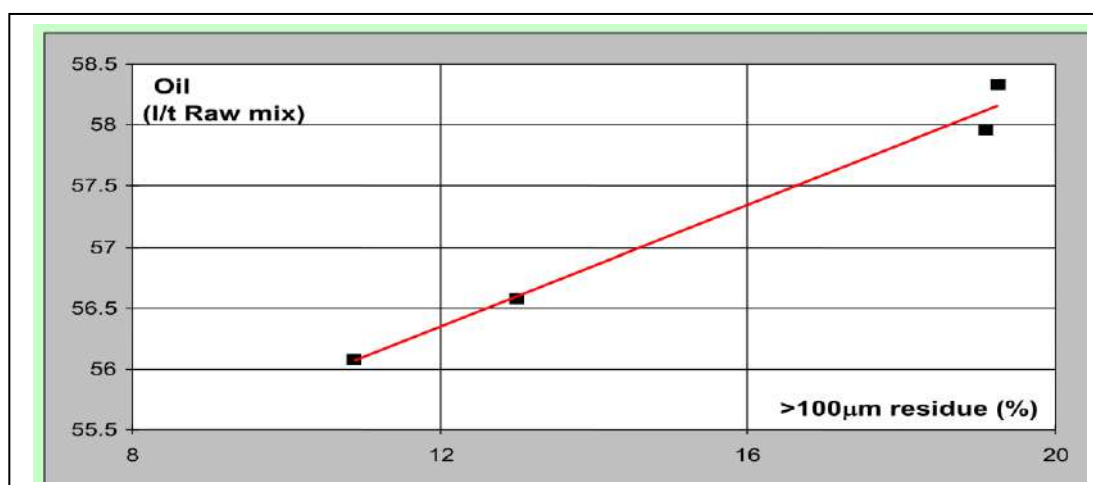


Figura 4.5 - Relação entre quantidade de combustível e redução de rejeitos
(Lafarge, 2001)

Um cru bem dosado para clinquerização apresenta cerca de 10 a 20% de fração retida na peneira de 100 µm. A redução do teor dos rejeitos do cru permite reduzir a temperatura de cozimento e a energia de moagem. Estudos feitos nos laboratórios da Lafarge mostram que quando a quantidade de rejeitos em 100 µm é reduzida de 20 para 10%, o balanço energético global da moagem cru + cimento é reduzido em aproximadamente 4 kWh/ t de cimento (Lafarge, 2001).

Analisando-se a fração retida no peneiramento de 100 µm, é possível obter algumas informações úteis:

- i. Se a composição do rejeito for próxima ao do cru dosado então possíveis problemas com a qualidade do cimento não são de responsabilidade da composição do cru.
- ii. Se os rejeitos forem essencialmente calcários, surge risco da formação de grãos grossos de cal livre. A cal livre traz riscos de expansão do cimento Portland .
- iii. Se os rejeitos contiverem alumina e ferro em excesso, os mesmos serão consumidos na formação da fase líquida durante a clinquerização. Se forem silicosos, especialmente quartzosos, reagirão com dificuldade mesmo em altas temperaturas aumentando assim o tempo de residência no forno. Se a cal livre for pouco ativa tenderá a não combinar-se com as fontes de alumina, sílica e óxidos de ferro e poderá manter-se acima dos limites toleráveis no clínquer formado, o que resultará em riscos de expansão diferenciada durante a fase de hidratação do cimento Portland e esse teor irá resultar na rejeição do lote produzido.

Através da análise por microscopia ótica do clínquer é possível obter algumas informações sobre o que ocorreu na moagem da farinha. A presença constante de zonas regulares de CaO livre (formada por uma massa arredondada de cristais coloridos) significa que o calcário era compacto e difícil de moer, e formou rejeitos calcários no teste de peneiramento (Figura 4.6).

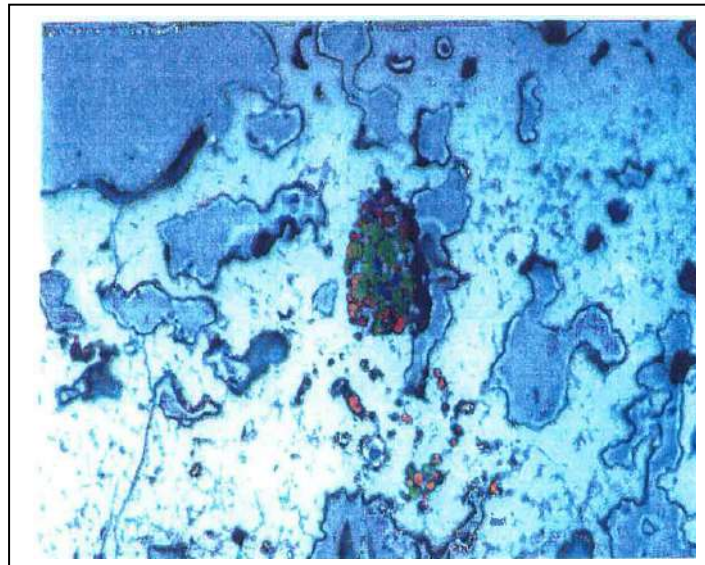


Figura 4.6 - Zona regular de CaO livre no clínquer de cimento Portland
(Lafarge, 2002)

Quando se observam cristais grandes de belita (silicato dicálcico constituinte do clínquer) na forma de uma partícula arredondada significa que temos uma deficiência localizada de CaO, o que facilitou a formação da belita em detrimento à formação da alita (silicato tricálcico constituinte do clínquer) e foi gerada pela presença de elemento silicosos difíceis de moer (Figura 4.7).

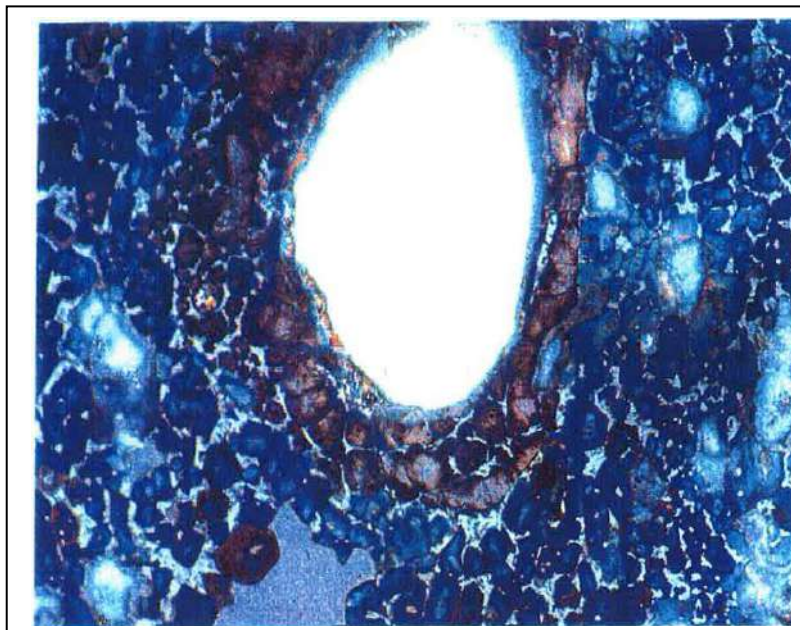


Figura 4.7- Grandes cristais de belita
(Lafarge, 2002)

4.3 - Influência da granulometria das matérias-primas.

O estudo da granulometria para os agregados graúdos, considerados isoladamente, não tem a mesma importância que para os agregados miúdos. A análise granulométrica dos agregados graúdos é realizada por peneiração nas peneiras superiores à da malha 4,8 mm da série normal ou da série TYLER, de acordo com o método MB-7 para uma amostra representativa do material, separada conforme o método MB-6, amostragem dos agregados (Petrucci, 1983).

A série normal também inclui peneiras intermediárias, que guardam entre si a mesma proporção na abertura das malhas que as peneiras normais. São as seguintes as aberturas das malhas das peneiras empregadas na análise granulométrica dos agregados graúdos.

Série Normal	Intermediária
Entre 19 e 38 mm	25 mm
Entre 38 e 75 mm	50 mm
Entre 75 e 150mm	100 mm

Da peneiração, na série normal de peneiras, resultam percentagens retidas do material nas várias peneiras. Com esses valores, determina-se por somatório as percentagens retidas acumuladas. O Módulo de Finura (MF) será, por definição, a soma das percentagens de grãos retidas, acumuladas nas peneiras da série normal (excluídos, portanto, os valores correspondentes às peneiras intermediárias) divididas por cem.

$$MF = \frac{\% \text{ retidas acumuladas na série normal de peneiras}}{100} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A qualidade do clínquer produzido é influenciada pela finura (valor equivalente a superfície específica) das farinhas cruas de cimento. A finura é uma característica usada pela indústria cimenteira que designa tanto a superfície específica quanto a porcentagem de fração retida na peneira de nº 200.

Na prática industrial, sabe-se que quanto mais fina é a farinha, mais fácil é sua queima, menor a temperatura de clinquerização e, portanto, menor o consumo de energia. É importante a obtenção de uma finura ótima, compatível com a natureza das matérias-primas e com os processos da fabricação, a custos industriais adequados. Os custos de moagem representam uma parcela significativa dos custos de produção, bem como a dificuldade da clinquerização representa um acréscimo importante no consumo de combustível.

A cinética das reações de clinquerização é fortemente influenciada pela finura da farinha. O grau de combinação da cal (óxido de cálcio) com as fontes de sílica, alumina e óxidos de ferro diminui com o aumento da granulometria da farinha, propiciando um aumento do teor de cal livre.

A moabilidade do clínquer é influenciada por vários fatores que estão sendo estudados constantemente por diversos pesquisadores no mundo inteiro. A moabilidade é uma medida do inverso da resistência à moagem de determinado material. Sendo assim, valores altos de moabilidade são característicos de materiais que apresentam baixa resistência à moagem (Silva, 2007).

4.4 – Fatores de influência na moabilidade do clínquer.

4.4.1 - Proporção dos constituintes presentes na moagem e no clínquer

Devido às suas características distintas, os componentes do clínquer apresentam comportamentos diversos durante a cominuição de modo que é necessário adotar alguns parâmetros para garantir um bom proporcionamento das matérias-primas e das fases minerais sintéticas desejadas. Os principais parâmetros para formulação das farinhas e controle do processo químico de clínquerização são adimensionais e incluem: o Módulo de Silica (MS) e o Módulo de Alumina (MA), definidos e aceitos através das seguintes expressões, nas quais as fórmulas indicam suas respectivas massas na farinha, no clínquer produzido e no cimento Portland final.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

O MS em geral varia de 2,5 a 3,5 e o MA varia entre 1,3 a 1,6 (Lafarge, 2010).

A partir da composição do cru é possível calcular esses parâmetros através das fórmulas de Bogue (Duda, 1977), descritas a seguir, que expressam a composição potencial do clínquer.

$$C_3S = 4,071 CaO - 7,6 SiO_2 - 6,718 Al_2O_3 - 1,43 Fe_2O_3 \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$C_2S = 8,602 SiO_2 + 5,068 Al_2O_3 + 1,078 Fe_2O_3 - 3,071 CaO \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,692 Fe_2O_3 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$C_4AF = 3,043 Fe_2O_3 \quad (\text{Eq. 4.10})$$

A belita é o constituinte do clínquer mais difícil para moer. Toda ação para limitar o teor da belita resultará numa redução do consumo energético da moagem. As belitas geralmente ocorrem no produto moído como fragmentos angulosos nos agrupamentos cristalinos do clínquer. Quando aparecem no clínquer sem formar agrupamentos, os grãos esféricos de belitas facilitam a moagem uma vez que a propagação das trincas através da estrutura porosa ou até mesmo da fase intersticial é mais fácil. Sendo assim, a forma como os cristais de belita aparecem dentro do clínquer determina diretamente a moabilidade do clínquer na moagem fina (Figura 4.8), de forma mais dominante do que a porosidade. Os agrupamentos de belitas dificilmente são penetrados por fraturas nos estágios iniciais da moagem, fazendo com que os mesmos retenham a sua forma. A maior resistência das belitas e de seus agrupamentos faz com que esse componente tenda a se concentrar nas frações mais grossas do produto do moinho (Silva, 2007).

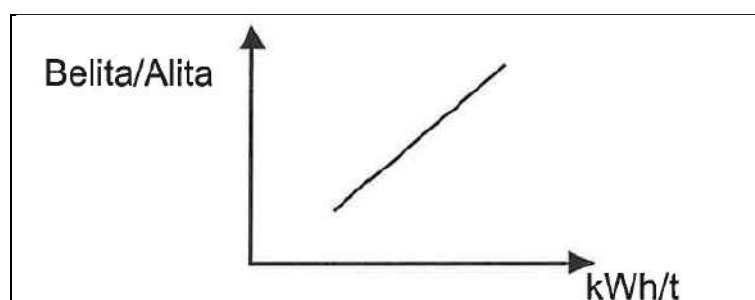


Figura 4.8 - Influência da belita no consumo energético do moinho
(Lafarge, 2002)

4.4.2 - O nível de cozimento do clínquer

A temperatura de cozimento na clínquerização tem uma grande influência na moabilidade. O sobrecozimento (temperatura acima de 1500°C) tende a deteriorar a moabilidade (os cristais se tornam maiores). Se o aumento da CaO livre for devido a uma redução no sobrecozimento, cerca de 2 a 3% de kWh/t podem ser economizados quando a CaO livre passar de 0,2 para 1,2%.

4.4.3 - Porosidade do clínquer

Os poros do clínquer apresentam forma irregular ou mais arredondada, podendo aparecer isolados ou interligados com uma das formas dominante. A porcentagem de poros está diretamente relacionada à densidade do clínquer e, de modo geral, depende, por exemplo, do teor de fase intersticial, da finura da farinha, da quantidade de elementos menores e da temperatura de queima (de Paula, 2010). Em geral, o clínquer rico em pequenos poros pode levar a uma redução do consumo da energia da moagem (Figura 4.9).

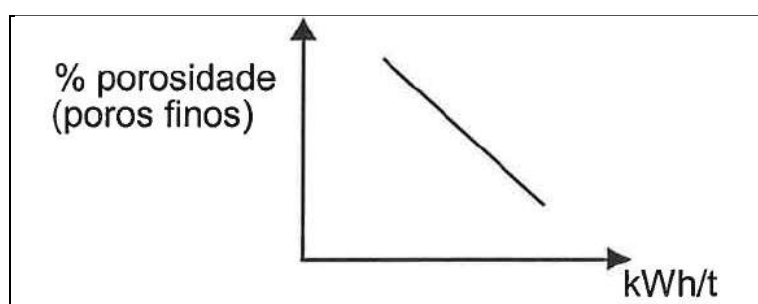


Figura 4.9 - Influência da porosidade no consumo energético do moinho
(Lafarge, 2002)

4.4.4 - Idade do clínquer

A idade do clínquer influencia o consumo energético na moagem. Verifica-se que, devido à crepitação (liberação espontânea de energia interna), é mais difícil moer um clínquer recém-queimado e resfriado. Um clínquer envelhecido com a possível ocorrência de hidratação de cal livre (CaO, que é expansiva) pode reduzir o consumo da energia de moagem. No entanto, as resistências mecânicas também serão afetadas (Lafarge, 2010).

4.5 - Influência do resfriamento do clínquer na moagem de cimento.

O clínquer sai do forno em forma de pelotas com diâmetro máximo variável entre 1 a 3 cm, temperatura variando entre 1200 a 130°C, sendo resfriado rapidamente no resfriador para preservar as estruturas cristalinas dos silicatos e aluminatos de cálcio obtidas no forno, e atingir uma temperatura compatível com o manuseio, armazenamento e moagem. Além disso, o resfriador recupera alguma carga térmica transferida para a corrente do ar que o percorre em escoamento cruzado que será consumida como ar secundário de queima no interior do forno ou ar terciário no forno de pré-calцинаção. O clínquer pode apresentar-se na saída do resfriador com temperaturas entre 50°C e 80°C. (Lafarge, 2010)

Durante o resfriamento podem ocorrer reações de decomposição dos compostos formados, principalmente de C₃S (alita) em C₂S (belita) e cal livre. Esta reação reversa é maior quanto mais lento for o resfriamento. Ou seja, o resfriamento deve ser rápido (Constantino, 2005). Já foi dito antes que a belita é mais difícil de ser moída do que a alita, então um resfriamento lento pode aumentar o consumo energético do moinho devido à maior presença de cristais de belitas.

4.6 - Influência das adições finais na moagem de cimento Portland

As adições do cimento Portland são os materiais misturados ao clínquer (antes da moagem final) e em quantidades delimitadas (maiores do que 5% em massa), e que alteram as propriedades de desempenho tais como reatividade e calor de reação liberado durante a sua hidratação. Tais adições acrescentam maior resistência do cimento Portland a sulfatos, menor calor (exotérmico) de hidratação, maior impermeabilidade do produto cristalizado (seco) e resultam num custo menor na produção, além de consumir subprodutos industriais. (Constantino, 2005).

As matérias-primas comumente utilizadas como adições são as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos (naturais e sintéticos como cinzas de processos de queimas de combustíveis), os materiais carbonáticos (como o calcário moído) e o gesso. Segundo a ABCP, as adições aos cimentos Portland proporcionaram um aumento de produção no mercado nacional, porque atualmente cerca de 75% desses aglomerantes produzidos constituem uma variedade intitulada "cimento Portland composto". A adição de gesso é aplicada em todos os tipos de cimento para controlar a exotermia da reação de hidratação do aluminato trricálcio (C_3A) e retardar o início de endurecimento do cimento quando este entra em contato com a água (ABCP, 2002).

A energia consumida no processo de moagem depende do material a ser moído, ou seja, do tipo de cimento a ser preparado, assim como a granulometria final do produto. As variedades das adições e suas propriedades de desempenho são abordadas a seguir.

4.6.1 - Gesso

Existem 2 tipos de gessos usados nas indústrias de cimento: o gesso natural ou sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), que é o mineral gipsita, que provém de rochas sedimentares e o gesso sintético que é subproduto de processos industriais, tais como a fabricação de ácido fosfórico (Gesso Fosfórico) e ácido láctico (Purac), entre outros. O gesso é adicionado ao clínquer para regular o tempo de pega, pois o C_3A contido no clínquer é altamente reativo com água e endurece rápido, e sua reação libera muito calor, podendo até causar fissuras devido à evaporação da água contida na pasta do cimento umedecido. A hidratação do gesso forma uma camada impermeável de etringita em torno do C_3A , que regula o tempo de pega e faz com que o C_3S comece a hidratar (Lafarge, 2006), permitindo assim, que os operários possam produzir argamassas ou concretos e lança-los na peça ou local da obra antes que o cimento endureça instantaneamente (Bernardo, 2009). A Tabela 4.4 demonstra a influência da finura do cimento Portland normal (clínquer + gesso) sobre o consumo de energia da instalação de moagem.

Tabela 4.4 - Influência da finura do cimento CP1
(Constantino, 2005)

Finura	250 m ³ / kg	300 m ³ / kg	350 m ³ / kg	400 m ³ / kg
Energia requerida (kWh/t)	29,2 ± 11	39,8 ± 13	51,8 ± 14,5	65,3 ± 17

É possível notar que o aumento da finura corresponde a uma elevação significativa da energia consumida no processo de moagem, conforme os engenheiros comentam frequentemente a respeito das operações unitárias de maior custo operacional, inclusive quando lecionam.

4.6.2 - Escória granulada de alto forno

É o subproduto fluido da redução química de minério de ferro em alto-forno, que sobrenada o ferro gusa (fundido) removido na base do mesmo, sendo obtido sob a forma granulada por resfriamento brusco após sua saída do reator. É constituído em sua maior parte de silicatos e alumino-silicatos de cálcio. Existem 2 tipos de escória, a escória básica e a escória ácida. Sua adição no cimento produz melhorias de desempenho nas propriedades como: maior durabilidade, maior resistência mecânica final e maior resistência química ao ataque a sulfatos (Constantino, 2005). Sendo a escória constituída de substâncias semelhantes às dos componentes do clínquer, sua hidratação também tem fases fenomenológicas bem parecidas, é usada como substituinte de clínquer.

A substituição de clínquer por escória é uma alternativa de redução das emissões de CO₂, que é uma característica intrínseca da fabricação de clínquer devido à descarbonatação do calcário e à queima de combustíveis fósseis, promovendo assim uma maior sustentabilidade. Ensaio feitos em 2008 por Duarte, Pecchio e Kihara, apontam uma redução na emissão de CO₂, em aproximadamente 2,5% na farinha com adição de escória ácida e 9% na farinha com adição de escória básica, quando comparados com a farinha de referência sem adição de escória. Os resultados apontaram também uma redução da utilização de calcário e argila na farinha em 2,5% e 19,4%, respectivamente, com adição de escória ácida e de 9,0% e 26,1%, respectivamente, com adição de escória básica.

Por contribuir com mais qualidade ao cimento, a escoria básica é mais utilizada pelas indústrias cimenteiras, porém, a escória ácida tem um custo bem inferior, o que torna vantajosa a substituição parcial da escória básica por escória ácida. A Tabela 4.5 apresenta a influência da escória na moagem final, destacando-se o fato de requerer um consumo adicional de energia, aproximadamente, da ordem de 10%.

Tabela 4.5 - Influência da escória
(Constantino, 2005)

Finura (superfície específica)	300 m³/kg
Clínquer	48,0 kWh/t
Clínquer + 28% Escória	52,0 kWh/t

4.6.3 - Materiais Pozolânicos

Segundo a norma técnica brasileira **NBR-12653 (1992)** os materiais pozolânicos são "substâncias silicosas ou silico-aluminosas que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias". Esses materiais podem ser naturais como rochas vulcânicas (pozolana) ou industriais como argila queimada em elevadas temperaturas e cinzas volantes que são resíduos finamente divididos que resultam da combustão de carvão mineral nas usinas termoelétricas. Esses materiais influenciam as resistências iniciais e finais e conferem maior impermeabilidade ao concreto, evitando assim microfissuração.

4.6.4 - Materiais carbonáticos.

São minerais calcários que tornam os concretos e as argamassas mais trabalháveis (ou moldáveis), porque os grãos ou partículas desses minerais moídos possuem dimensões adequadas para alojar-se entre os grãos dos demais componentes do cimento, funcionando como um "lubrificante sólido particulado". São conhecidos genericamente como "filler (es) calcário(s)".

A Tabela 4.6 expressa a influência da pozolana e do calcário na moagem final, revelando que o seu consumo possibilita reduzir o consumo de energia em determinados intervalos de valores da finura visada, contribuindo para tornar o produto final mais econômico ou lucrativo.

Tabela 4.6 - Influência do calcário aditivo
(Constantino, 2005)

Finura	300 m³/kg	350 m³/kg
Clínquer	47,0 kWh/t	57,6 kWh/t
Clínquer + 33% de Calcário	21,8 kWh/t	28,2 kWh/t
Clínquer + 25% de Pozolana	19,1 kWh/t	25,5 kWh/t

4.7 – Constatações do Capítulo 4.

1ª - Dureza é a propriedade física que caracteriza a resistência mecânica de um material ao ser riscado. Porém, não é relevante para resistir mecanicamente a impactos.

2ª - Moabilidade é a capacidade de um material em fragmentar-se, que depende do estado de agregação cristalóquímica da matéria e da presença de defeitos na estrutura.

3ª - São conhecidos os ensaios de Bond e Hardgrove em escala de bancada para determinar a moabilidade de sólidos em moinhos cilíndricos de bolas e moinhos de bolas em anel.

4ª - O calcário é a matéria-prima que mais influencia a moagem da farinha, pois constitui cerca de 80% da composição do cru.

5ª - A finura da farinha, as reações de clínquerização e a qualidade do clínquer resultante e da sua especificação influenciam no consumo de energia do moinho.

6ª - A moabilidade do clínquer depende dos teores de seus componentes majoritários e minoritários presentes, do nível de cozimento, da porosidade e da sua idade após o resfriamento.

7ª - A belita é o componente majoritário do clínquer mais difícil de moer, tornando a etapa de resfriamento muito importante, pois um resfriamento lento favorece a decomposição da alita e sua conversão em belita e cal livre (em menor proporção).

8ª - A adição de escória provoca um aumento do consumo de energia na moagem.

9ª - Até a presente data, para as finalidades de moagem com rolos ao invés de bolas, desconhece-se a existência de algum tipo de ensaio laboratorial específico e os valores obtidos nos procedimentos preconizados por Bond e Hardgrove podem ser aceitos como indicativos da moabilidade para outros equipamentos industriais.

4.8- Referências do capítulo 4.

ABCP - **Guia básico de utilização do cimento Portland** - Associação Brasileira de Cimento Portland - 7ª edição, São Paulo, 2002.

BERNARDO, A. C. S. M. - **Otimização estocástica multi-objetivos na produção de cimento Portland com co-processamento de resíduos e adição de mineralizadores** - Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2009.

CONSTANTINO, J. - **Relatório de Trainee** - Relatório técnico sobre a Fábrica de Montes Claros, Lafarge, Montes Claros - MG, 2005.

DUDA, W. H, "Manual tecnologico del cemento". Barcelona: Editores Tecnicos Asociados, 1977

DUARTE T. B.; PECCHIO M.; KIHARA Y. - **UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUERES ECOLÓGICOS DE CIMENTO PORTLAND** - Disponível em <www.cprm.gov.br/publique/media/evento_0133.pdf>. Acessado em 2 de dezembro de 2011.

LAFARGE - **Composição do Cimento** - Lição do CECIL, aplicativo de treinamento da Lafarge - Lafarge Brasil S.A.- Rio de Janeiro, 2006.

LAFARGE - **Os 10 mandamentos do clínquer** - Diretoria Industrial, Lafarge Brasil S.A. - Rio de Janeiro, 2001.

LAFARGE - **Treinamento do produto**, Diretoria Industrial, Lafarge Brasil S.A. - Rio de Janeiro, 2002.

LOWRISON, G. C. - **Crushing and Grinding**, Butterworth, Londres, 1974.

MANSUR, A.G. - **Lógica do cru** - Palestra de treinamento para o pessoal do laboratório de controle químico e de qualidade, em arquivo MS-PowerPoint, Lafarge S.A. - Cantagalo, RJ, 2008.

PAULA, F. de, **Apostila de microscopia do clínquer**, Laboratório de controle químico e de qualidade, Lafarge, Cantagalo - RJ, 2010.

PETRUCCI, E. G. - **Materiais de Construção** - Editora Globo, Porto Alegre- RS, 1983.

PREISER SCIENTIFIC - **Moabilidade (Hardgrove)** - Disponível em <http://preiserinternational.com/index.php/preiser/pt/products/hardgrove_grindability/>. Acessado em 02 de dezembro de 2011.

OPOCZKY, L.; GAVEL, V. - **Effect of certain trace elements on the grindability of cement clinkers in the connection with the use of wastes**. International Journal of Mineral Processing, v. 74S, p. S129-S136, EUA, 2004.

SCHONERT, K; BERNOTAT, S. - **Size Reduction** - Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol 33, Wiley-VCH, Alemanha, 2002.

SILVA, M. C. C. - **Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínqueres de cimento Portland** - Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - PEMM, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia - COPPE, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Capítulo 5 - MECANISMOS DE MOAGEM INDUSTRIAL DE FARINHAS E CLÍNQUER.

A fragmentação de partículas e sua redução de tamanho é uma especialidade das engenharias que operam com sólidos naturais e sintéticos ou materiais de construção, e que envolve materiais duros e macios (ou moles), as ordens de grandeza dos tamanhos nominais (p.ex., rochas originais, blocos, pedras, pós) e seus formatos geométricos.

Um processo de fragmentação envolve o tempo de operação, que se for excessivo pode resultar em prejuízo energético ou da qualidade do produto que se deseja obter. Há processos de fragmentação em que se devem realizar experimentos laboratoriais para estabelecer as curvas cinéticas de moagem de uma ou várias substâncias para ser identificado o momento em que as partículas finas podem sofrer os fenômenos de aglomeração e de cobrimento (Zakon, 1991). Em geral, a determinação das curvas cinéticas de moagem encontra-se muito disseminada para os moinhos de bolas, e assim serão abordadas.

5.1 - Curvas cinéticas de moagem.

A cinética de fraturamento das partículas é o ponto de vista sob o qual tem-se estudado o processo de cominuição, buscando desenvolver modelos desses processos e também analisar a relação entre os parâmetros desses modelos e as variáveis operacionais. Essa análise pode ser utilizada em projetos de otimização, controle e até em dimensionamento de instalações.

Como a modelagem matemática tem uma base teórica e o consumo de energia é mais empírico, é esperado que o modelo cinético complemente ou até mesmo substitua o enfoque principal em energia consumida no desenvolvimento de novas tecnologias de processo de cominuição. Três funções podem representar a cinética do processo (Beraldo, 1987):

5.1.1 - Função de seleção e velocidade específica de quebra.

Durante o processo de cominuição, para que a partícula sofra fragmentação é necessário que seja submetida a uma força que exceda sua resistência de quebra. No interior de um equipamento de cominuição se processam vários eventos praticamente individuais de fragmentação em elevada frequência. Nesses eventos, cada partícula absorve determinada quantidade de energia, que pode levá-la ou não a fragmentação. Caso a fragmentação ocorra, partículas secundárias são geradas e passam pelo mesmo processo, que continua, até que toda a energia de impacto seja consumida (Silva, 2007).

Se submetermos uma amostra de massa $W_j(F)$ de material graduado granulometricamente a um processo de cominuição, poderemos observar depois de certo intervalo de tempo que uma fração da amostra sofre redução, enquanto que o restante, $W_j(P)$, não sofre.

A **função de seleção S** é a probabilidade apresentada por partículas sujeitas a um processo de fragmentação, sendo expressa pela relação entre a massa que sofre fragmentação e a massa inicial de material, conforme a equação (5.1) abaixo.

$$S = \frac{W_i(F) - W_i(P)}{W_j(F)} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

A função de seleção pode ser determinada em ensaio de velocidade de desaparecimento de material na granulometria de alimentação. Essa definição é válida para qualquer processo de cominuição.

No caso particular de fragmentação em moinhos de bolas, a função de seleção tem uma característica cinética e pode ser caracterizada por uma velocidade de quebra, pois é uma função crescente do tempo a que a amostra foi submetida a moagem.

Considerando-se a velocidade de quebra proporcional a massa de material, define-se como velocidade específica de quebra (S_j), a relação entre a velocidade de quebra e a massa existente. (equação 5.2) (Beraldo, 1987)

$$S_j = \frac{-dw_j}{dt w_j} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Integrando a expressão acima e considerando S_j constante, tem:

$$W_j(t) = W_j(0) \exp(-S_j t) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

A velocidade específica de quebra e a função de seleção dependem do diâmetro. Em casos em que o diâmetro das bolas é bem maior que o diâmetro das partículas x_i , é usual a função de seleção ser proporcional a uma função-potência do diâmetro (equação 5.4).

$$S_i = a (x_i/x_0)^a \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Onde: x_i e x_0 são em mm e a em (minuto)⁻¹.

Esse resultado apesar de não ser adequadamente explicado em bases teóricas é amplamente demonstrado experimentalmente. De um modo geral, à medida que o tamanho das partículas aumenta em relação ao tamanho dos corpos moedores, também aumenta a velocidade com que o material desaparece da classe (velocidade específica de quebra). Isso ocorre devido à maior probabilidade de as partículas sofrerem impactos dos corpos moedores, e à queda na resistência das partículas, em função do aumento da quantidade de defeitos e do aumento da probabilidade da existência de trincas de tamanho crítico. A velocidade específica de quebra é menor para os tamanhos de partículas menores, em relação ao diâmetro dos corpos moedores, porque é mais difícil transmitir esforços a uma massa unitária quando constituída por partículas menores. O valor de a é positivo, varia entre 0,5 e 1,5, sendo uma característica do material, mas o valor de a mostra uma grande variação de materiais moles a materiais duros (Beraldo, 1987).

A equação 5.4 é válida para condições de moagem em que a abrasão seja pouco importante. Para partículas maiores em relação ao diâmetro dos corpos moedores, verifica-se que a velocidade de quebra não segue uma cinética de primeira ordem, parecendo consistir em uma velocidade inicial mais rápida seguida de uma velocidade mais lenta. Verifica-se que algumas partículas são muito grandes para ser fraturadas pela ação dos corpos moedores e, além disso, a acumulação de finos parece servir de colchão para impedir a ação das bolas sobre as partículas maiores (Figura 5.1).

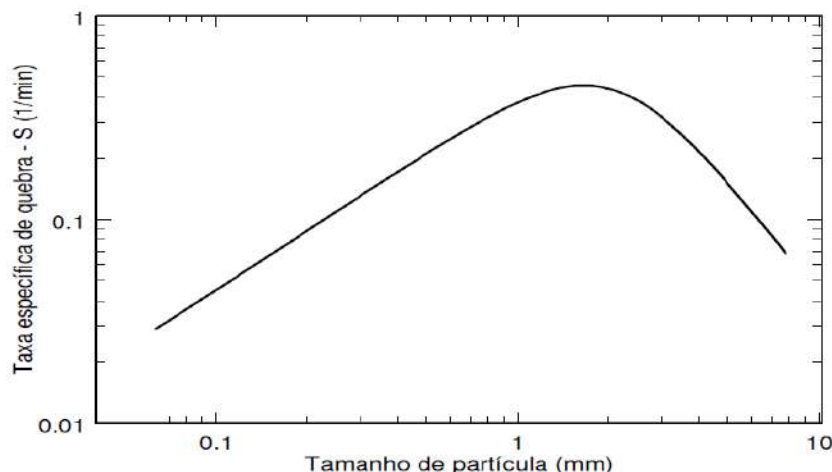


Figura 5.1 - Relação entre a taxa específica de quebra e o tamanho da partícula.
(Silva, 2007)

5.1.2 - Função de Quebra

Uma distribuição granulométrica completa de partículas menores é produzida quando um material de tamanho j é fragmentado. Essas partículas menores se misturam à carga do moinho sofrendo novas quebras. A **função de quebra** é definida como a distribuição granulométrica das partículas provenientes da quebra primária de uma partícula maior. Na forma de distribuição granulométrica acumulada, define-se a **função de quebra B_{ij}** , que é fração de material do tamanho j que se quebrou, indo aparecer em tamanhos menores que x_i .

Os valores de B_{ij} podem ser descrita pela Equação (5.5). Ela é própria do processo de cominuição e do material a ser moído e não representa a distribuição granulométrica do produto final do processo, uma vez que várias outras etapas de fragmentação estão envolvidas (Silva, 2007).

$$B_{ij} = \phi \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\gamma \left(\frac{x_i}{K}\right)^\omega + (1 - \phi) \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\beta \quad (\text{Eq. 5.5})$$

A Equação 4.5 é a forma cumulativa da função e o primeiro termo apresenta a contribuição das partículas finas, enquanto o segundo, a contribuição das partículas grossas. ϕ , β , ω , γ e K são parâmetros do modelo, funções do material. Podemos calcular b_{ij} , ou seja, a quantidade de material quebrado da classe j que foi para a classe i , pela equação (5.6).

$$B_{ij} = B_{i,j} - B_{i+1,j} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

A **função quebra** geralmente independe do tamanho máximo das partículas e sim da relação entre os tamanhos do material original (j) e do fragmentado (i). A Figura 5.2 apresenta resultados para ensaios de função de quebras (Beraldo, 1987).

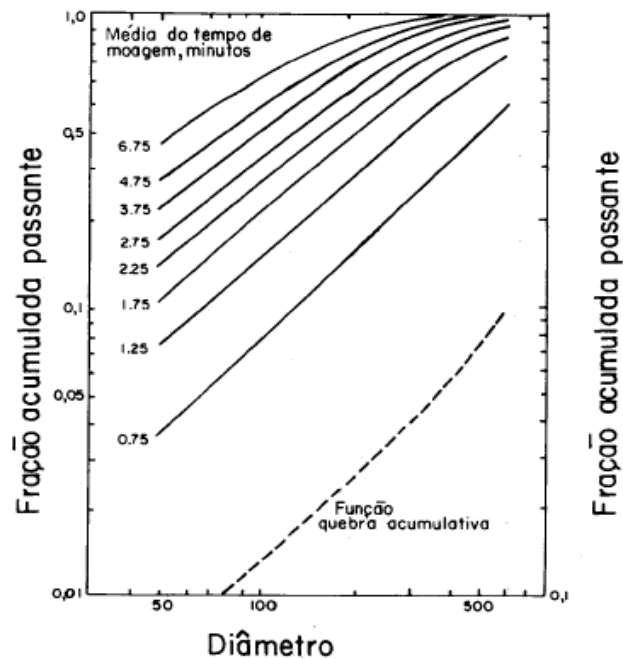


Figura 5.2 - Determinação da função de quebra.
(Beraldo, 1987)

5.1.3 - Função de classificação.

Em todos os processos de cominuição existe um **efeito de classificação** que consiste na operação de classificação que retém as partículas mais grossas e impede sua passagem para o evento de quebra subsequente. Isso porque um processo de fragmentação é constituído de uma série de eventos de quebra, nos quais se aplicam as funções de seleção e de quebra. Esse efeito é mais observado em moinho de barras (Beraldo, 1987).

5.2 - Mecanismos de cominuição num moinho de bolas

Numa operação do moinho de bolas podem ocorrer vários tipos de ações fraturantes: impacto, compressão, abrasão - individualizados ou simultâneos (predominantemente associados).

5.2.1 - Impacto

Ocorre quando uma força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula. O resultado do impacto é que a partícula se desintegra em muitas partículas menores, porém em pouca quantidade. Esse tipo de fratura produz apenas cerca de 10% de pó muito fino. A Figura 5.3 representa o momento de fratura por impacto de corpos moedores em uma partícula.

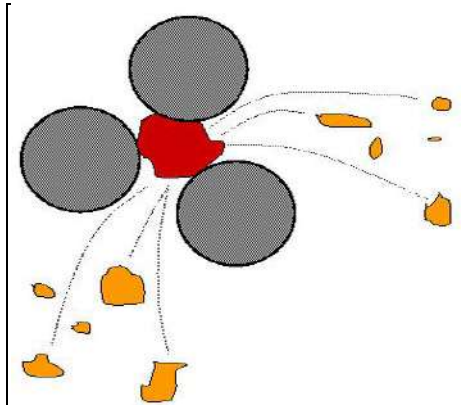


Figura 5.3 - Fratura por impacto.
(Lafarge, 2008)

5.2.2 - Compressão

Ocorre quando 2 ou mais corpos moedores comprimem as partículas. A força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado e com isso a força aplicada é apenas ligeiramente superior a resistência da partícula. Resulta em uma partícula grande, quase do mesmo tamanho da original e em uma "lasca" muito menor. A Figura 5.4a apresenta uma fratura por compressão de uma partícula.

5.2.3 - Abrasão

Ocorre quando a força aplicada é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Os resultados desse tipo de fratura são uma partícula com diâmetro pouco menor que a partícula original e partículas menores. Esse tipo de fratura ocorre ao ser realizada a fricção entre duas superfícies que podem ser as partículas ou entre corpos moedores e partículas. A Figura 5.4b apresenta esse tipo de fratura.

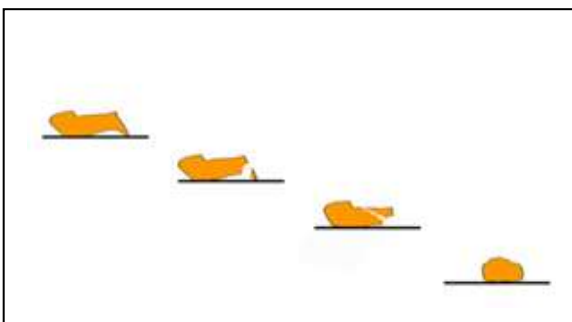
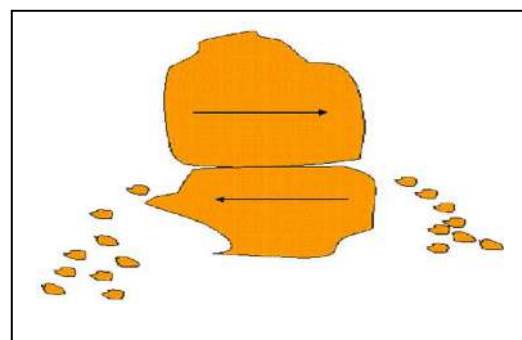


Figura 5.4 - a) Fratura por compressão.



b) Fratura por abrasão.

(Lafarge, 2008)

5.3 – Movimentos dos corpos moedores no interior dos moinhos de bolas

Os três tipos de ações fragmentadoras ocorrem simultaneamente nos moinhos de bolas e de acordo com as variáveis operacionais um deles predominará. A compressão e a abrasão são consideradas “fragmentação por atrito” e são consideradas as responsáveis pela maior parte das ações de redução de tamanho ou “geração de área de superfície” que ocorrem num moinho de bolas.

A dinâmica da carga de esferas dentro de um moinho é gerada pela combinação de alguns fatores como: velocidade de rotação, força centrífuga, perfil do revestimento interno, grau de enchimento e gravidade.

Quando a força gravitacional é maior que a força centrífuga, os corpos moedores que foram elevados pelo movimento rotativo da carcaça do moinho até determinado ponto caem sobre os outros corpos moedores localizados na parte inferior da carcaça e sobre o material que ocupa os interstícios entre estes. O perfil de revestimento, a velocidade de rotação e o grau de enchimento definem três tipos de movimento dos corpos moedores: movimento de cascata, de catarata e centrífugo (Lafarge, 2008).

5.3.1 – Catarata de bolas

Nesse movimento, a carga de esferas é levantada, através do aumento da velocidade do moinho e/ou através de revestimentos internos com perfil levantador, até um ponto de liberação relativamente alto. Nesse momento a força da gravidade supera a força centrífuga e a carga de esferas cai livremente em direção a parte inferior, onde está o material a ser fragmentado. Esse movimento é dominado pela fratura do tipo impacto, pois essa queda produz o impacto necessário para a fratura das partículas (Lafarge, 2008).

5.3.2 – Cascata de corpos moedores

Nesse movimento a carga de esferas também é levantada, porém a um ponto mais baixo do que o movimento de catarata devido a uma velocidade menor do moinho ou através de revestimentos com perfil classificador ou liso. Logo que ultrapassa o nível de material a ser fragmentado, a carga escorrega sobre si própria rolando sobre o material a ser fragmentado e reentrando na superfície. No movimento de cascata, a fratura é dominada pelos movimentos de abrasão e compressão necessários para a moagem fina (Lafarge, 2008).

A Figura 5.5 apresenta os movimentos simultâneos de catarata e de cascata no interior do moinho de bolas. Na prática, a transição entre os movimentos dos corpos moedores ocorre suavemente e cada movimento ocorre numa câmara diferente para moinhos com mais de uma câmara (Lafarge, 2006).

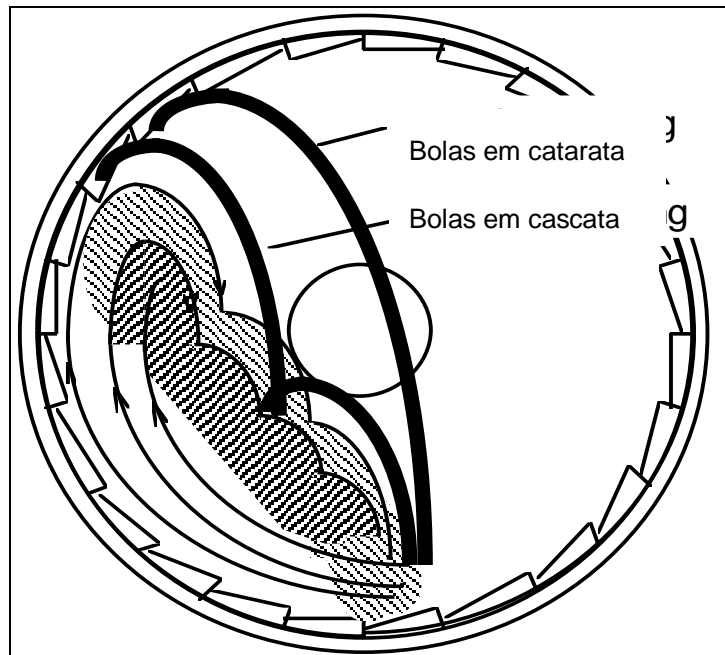


Figura 5.5 - Movimentos de catarata e de cascata.
(Lafarge, 2008)

5.3.3 – Centrifugação dos corpos moedores

Quando a força centrífuga é maior que a força da gravidade, a trajetória teórica dos corpos moedores é tal que eles caíram para fora da carcaça, de maneira que eles permanecem aderidos à superfície lateral do moinho (Figura 5.6). Quanto mais próximo desse ponto, mais os corpos moedores tendem a acompanhar o movimento da carcaça do moinho, tornando seu movimento cada vez mais centrífugo, minimizando a incidência de impactos sobre a carga e com isso reduzindo a eficiência da moagem (Lafarge, 2008).

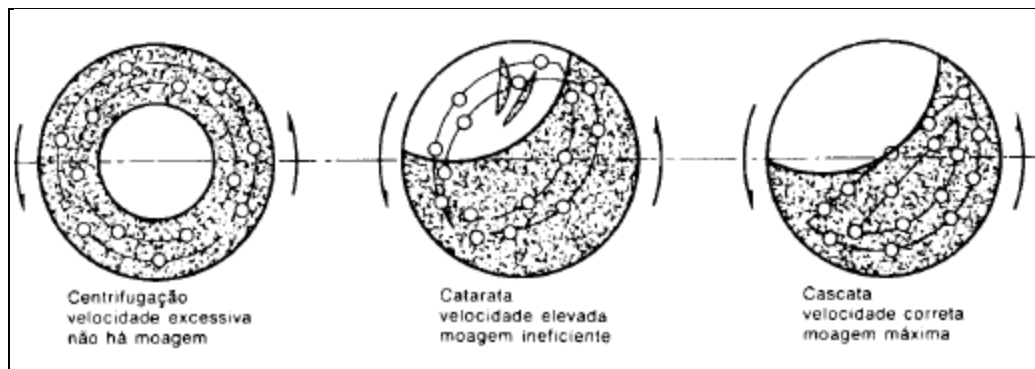


Figura 5.6 - Movimento de centrifugação comparado aos anteriores
(NGK, 1985)

5.4 – O desgaste dos corpos moedores

O desgaste de corpos moedores - em particular, bolas ou esferas metálicas ou de alumina - varia muito em função da qualidade e composição do material a ser moído, grau de enchimento do moinho, sistema de moagem (seco/úmido) dentre outros fatores. O desgaste, em geral, é calculado em função da produção do equipamento e os índices mais usados são:

- 1º - Perda mássica específica dos corpos moedores por unidade de energia consumida na câmara (independente da finura) (em g /kWh);
- 2º - Perda mássica dos corpos moedores por tonelada de produto do moinho (em g/t) (a qual depende da finura);

3º - Perda mássica dos corpos moedores por unidades de tempo de funcionamento do moinho ou velocidade de desgaste dos corpos moedores (em kg/h).

Para o cálculo da perda mássica, mede-se a massa dos corpos moedores no momento da recarga e verifica-se quantos gramas foram perdidas devido ao desgaste.

O desgaste em moinhos de cimento varia normalmente entre 1 a 2 g/ kWh para bolas de alto cromo fundido e representa uma porção significativa dos custos de operação associados ao moinho de bolas. Além do custo de reposição dos componentes, a perda de produção associada ao desgaste interno pode ser de 10% ou mais (Sanchez, 1990).

A Figura 5.7 apresenta os corpos moedores desgastados por diferentes agentes (impacto, abrasão e corrosão).



Figura 5.7 - Desgaste de corpos moedores
(Silva, 2007)

5.5 - Cálculo do consumo de energia num moinho.

O movimento dos corpos moedores não determina necessariamente o processo de cominuição, mas é vital na determinação da potência de alimentação do moinho. O bom aproveitamento da energia para a cominuição de um material necessita que as condições de moagem sejam adaptadas ao material. Por exemplo, a energia de impacto de um corpo moedor deve ser elevada o suficiente para quebrar as partículas mais grosseiras da alimentação, e baixa o suficiente para evitar a briquetagem, processo onde os finos gerados da partícula original reaglomeram-se.

O consumo energético define o desempenho do moinho. Parte da potência é utilizada para erguer o material a ser moído e a carga moedora e outra parte para manter o moinho girando (Silva, 2007).

A maioria dos processos industriais de cominuição apresenta baixa eficiência, considerando-se a energia teórica necessária para criar uma nova superfície. Por este motivo, juntamente com o alto impacto da energia nos custos de produção, os estudos dos processos de cominuição têm sido focados na energia consumida (Silva, 2007).

Foram feitas diversas tentativas de relacionar a energia consumida com a redução de tamanho da partícula. Essas tentativas deram origem a diversas leis, porém nenhuma delas de caráter conclusivo. (Sanchez, 1990).

Estudiosos observaram experimentalmente que a relação entre a variação de diâmetro das partículas e a energia consumida é inversamente proporcional a uma função-potência do diâmetro. Eles propuseram então a expressão genérica abaixo (Sanchez, 1990):

$$dE = - K dx / x^n \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Onde: E = energia consumida.

x = diâmetro das partículas.

K e n = constantes dependentes do material.

Diversos autores interpretaram esta relação de diferentes maneiras e criaram leis próprias que podem ser obtidas a partir dessa equação mais genérica.

5.5.1 - Primeira lei da fragmentação de Rittinger ou "Teoria de superfície"

Foi desenvolvida em 1867, na qual sugere-se que a energia consumida na cominuição é proporcional à nova superfície produzida. Por outro lado, a superfície específica dos materiais granulares é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, do que se origina a expressão (5.8) (Beraldo, 1987).

$$E = K (1/x_2 - 1/x_1) \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Onde: x_2 = diâmetro das partículas do produto.

x_1 = diâmetro das partículas de alimentação.

5.5.2. – Segunda lei da fragmentação de Kick ou "Teoria de volumes"

Kick sugeriu em 1885 que a energia consumida na cominuição depende apenas da relação de redução, sendo independente da granulometria original (Beraldo, 1987). A energia é proporcional ao volume e ao peso dos corpos sendo representada pela expressão (4.9). Para $n = 1$ na equação (5.7), aparece a Lei de Kick.

$$E = K \ln (x_1/x_2) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

5.5.3 - Terceira lei da cominui o

Foi desenvolvida por Bond em 1952.   uma lei empírica   qual Bond pretendeu dar um apoio teórico ao sugerir que a energia consumida na moagem   proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que se desenvolvem no fraturamento (Beraldo, 1987).   representada pela equa o (5.10):

$$E = K (1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}) \tag{Eq. 5.10}$$

5.5.4 - Teoria de Charles e Hukki

Charles em 1957 propôs um modelo que correspondesse aos resultados práticos da fragmenta o, uma vez que as leis anteriores s  são válidas para um determinado tamanho e s  representavam uma fra o pequena da energia total consumida pelo moinho (Souza, 2002).

Integrando a expressão 5.7 para $x \neq 1$, obt m-se a Lei de Charles:

$$E = K (1/x_2^{(n-1)} - 1/x_1^{(n-1)}) \tag{Eq. 5.11}$$

As Leis de Rittinger e de Bond apesar de terem sido propostas antes, podem ser obtidas fazendo $n= 2$ e $n = 1,5$ na equa o (5.11) respectivamente.

Na prática, nenhuma das 3 leis anteriores   aplicável no intervalo operacional total de trabalho, isto  , de 1-2 metros até os m crons. Em 1961, Hukki propôs a expressão (5.12), após verificar que as leis de cominui o tinham aplica es somente em certos intervalos granulométricos (Beraldo, 1987).

$$dE = - K (dx / x^{f(x)}) \tag{Eq. 5.12}$$

A Figura seguinte expõe a rela o estabelecida por Hukki para o consumo de energia de cominui o em fun o da granulometria do produto e mostra que a lei de Bond   a mais indicada para o intervalo de valores correspondente a moagem.

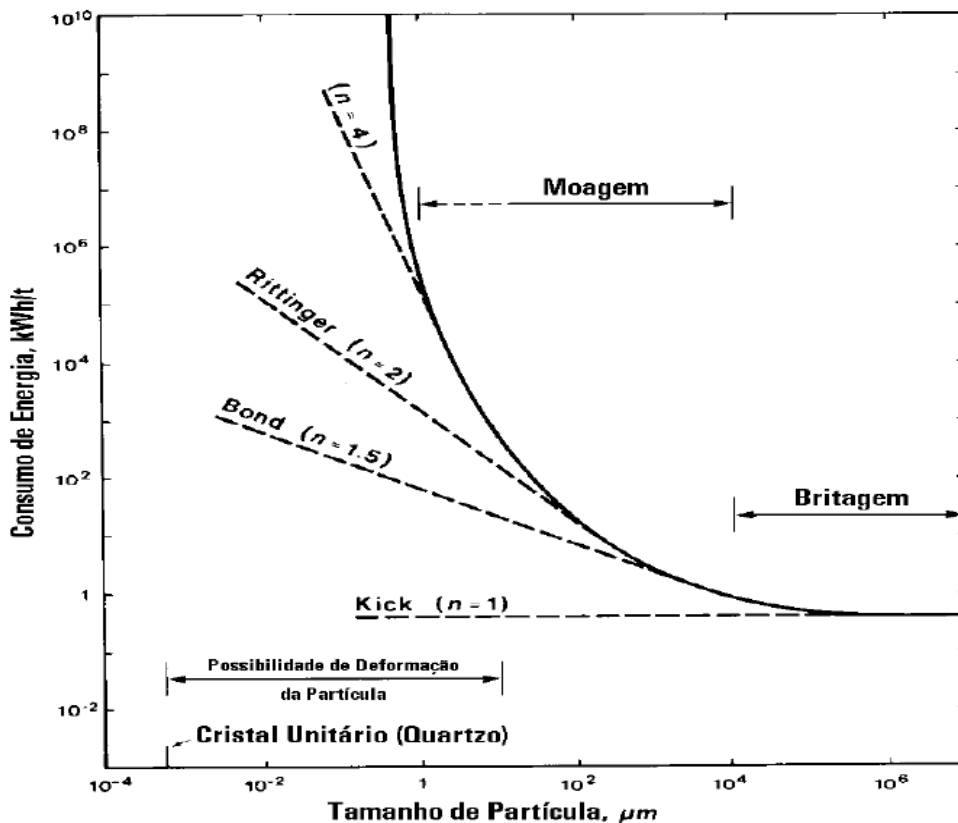


Figura 5.8 - Rela o entre energia consumida e tamanho da partícula
(Mazzinghy, 2009)

A consideração da energia como uma função do trabalho de moagem, entretanto, tem validade em condições bastante limitadas. Deve-se considerar, primeiramente, que o trabalho útil de moagem, ligado a uma função do diâmetro, é uma fração muito reduzida da energia consumida nos equipamentos de cominuição. Assim, a maior parte da energia consumida é devido a perdas nos equipamentos, o que vem a demonstrar a estreiteza da aplicabilidade das chamadas leis de cominuição (Beraldo, 1987). Em geral, podemos dizer que a teoria de Kick é válida para britagem, a teoria de Bond é válida para moagem grossa e a teoria de Rittinger é válida para moagem fina.

5.6 – O transporte das partículas sólidas no interior de um moinho cilíndrico de bolas

O transporte (e a passagem) de um material particulado num moinho de bolas sendo quase constantemente fraturado é um processo muito complexo.

5.6.1 – Condições de processamento num moinho de bolas

As propriedades e condições que contribuem para a atividade de transporte de material:

1ª - Quando o moinho gira, o movimento rotacional faz o material particulado fino comportar-se como um fluido em movimento.

2ª - Quando o material começa a fluir, ele torna-se “viscoso” e, assim, seu movimento é dificultado por qualquer superfície fixa (forros, grades, carga de bolas moedoras).

3ª - A carga de bolas moedoras constitui um obstáculo real no caminho do fluxo de material, sendo a principal fonte de resistência ao processo de transporte interno das partículas sob fragmentação.

4ª - O fluxo do material através do moinho deve-se a um impulso de materiais criado pela alimentação do moinho (principalmente), por ação de bombeamento dos diafragmas intermediário e de descarga e pela tiragem de ar do moinho.

5ª - À medida que aumenta a alimentação total do moinho (material novo mais a carga circulante), a quantidade de material no moinho aumenta e a carga de bolas se expande para certo limite além do qual ocorre uma ultrapassagem (“by-pass”) do material no moinho. Consequentemente, para uma determinada carga de bolas, há uma quantidade ideal de material a ser alimentada e transportada.

Se o transporte de material através do moinho for inibido por entupimento, por falta de aditivos de moagem, perda de ventilação do moinho ou carga de bolas muito finas (muitas bolas pequenas), pode ocorrer um transbordamento traseiro do moinho. Isso pode limitar o sistema de circulação de carga para um nível abaixo do ideal, que pode causar a trituração em excesso no moinho e produção de finos com qualidade indesejável. A Figura 5.9 apresenta um exemplo de ultrapassagem (“by-pass”) de material por baixo dos corpos moedores devido à carga de bolas encontrar-se expandida. Isso pode acarretar um entupimento nos diafragmas se o material não foi moído, diminuindo assim a produção do moinho.

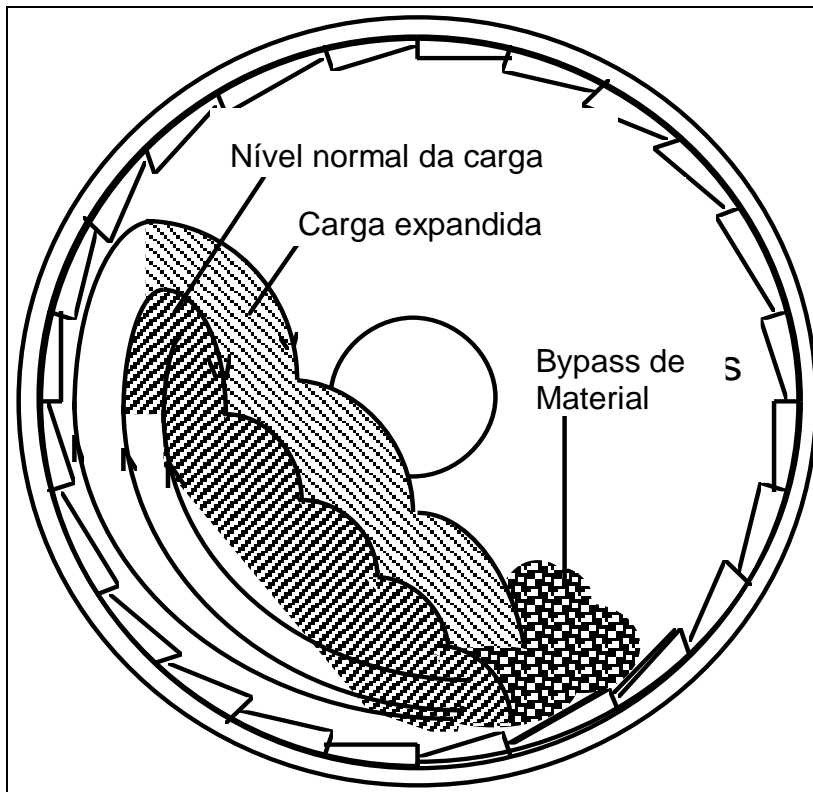


Figura 5.9 - Ultrapassagem de sólidos por baixo da carga moedora no moinho de bolas
(Lafarge, 2008)

5.6.2 – A passagem de ar no interior de um moinho de bolas

A tiragem de ar no moinho serve para o transporte do material através do mesmo e, também, para diminuir a temperatura interna, reduzindo a necessidade da injeção de jatos de água, além de reduzir a umidade do material pelo aumento da capacidade de secagem e, ainda, para remover as partículas finas, aumentando a eficiência da moagem e reduzindo as chances de formação de crostas (ou cobrimentos) no revestimento interno do equipamento e nos seus corpos moedores.

Um aumento na tiragem pode reduzir o tempo de residência do material dentro do moinho. A velocidade mínima de tiragem é 0.5m/s acima da carga de bolas e normalmente fica entre 1 e 1,5 m/s = fluxo de varredura do moinho / área transversal acima da carga de bolas (Figura 5.10) (Lafarge, 2005).

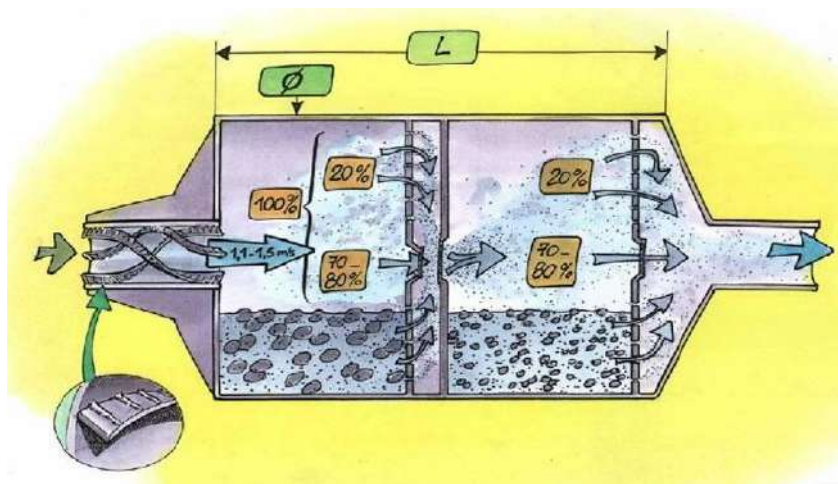


Figura 5.10 - Tiragem de ar no moinho de bolas.
(Lafarge, 2005)

A carga de esferas do moinho é o principal fator de resistência ao fluxo de materiais dentro do moinho. Grandes esferas têm menores valores de área total de superfície específica e oferecem menos resistência ao fluxo do material. As esferas pequenas têm uma área de superfície específica maior e são responsáveis pela maior parte da resistência (Figura 5.11). O uso de carga de bolas menores resulta num tempo de retenção mais longo para o moinho e em partículas mais finas, proporcionando um processamento (e carga circulante no separador) de menor produtividade, pois torna-se difícil ou impossível suportar maiores vazões de sólidos sem o risco de ocorrer a ultrapassagem ("by-pass") no equipamento.

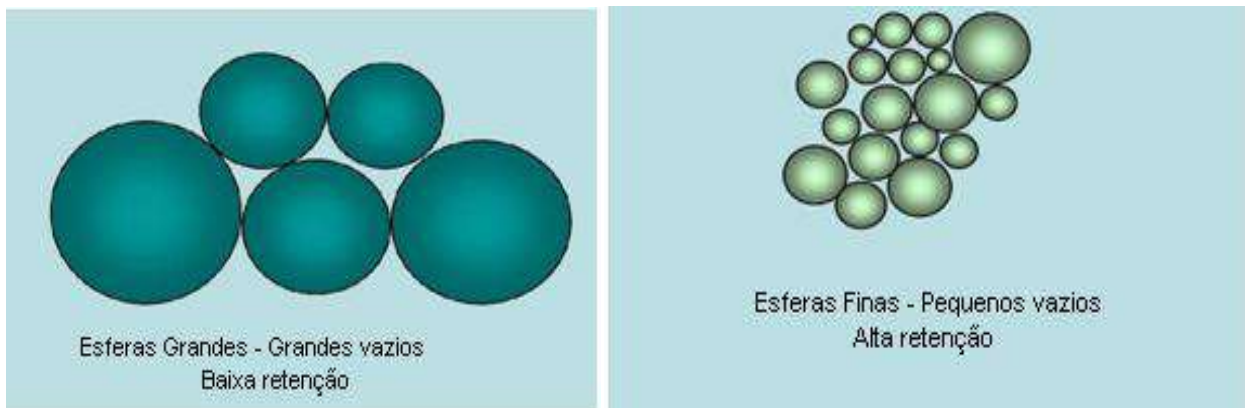


Figura 5.11 - (a) Bolas grandes e (b) bolas finas.
(Lafarge, 2008)

5.6.3 – Razão de preenchimento de material a moer

Outro fator relacionado com a passagem do fluxo de sólidos fragmentados dentro de um moinho cilíndrico é a razão de preenchimento do material, que pode afetar a produção, pois indica o grau de enchimento dos espaços vazios entre as bolas pelas partículas.

$$\text{Razão de preenchimento de material} = \frac{\text{Volume de pó no moinho}}{\text{Volume de vazios na carga}} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

É necessário otimizar essa relação para que não ocorra a moagem inter-partículas quando os espaços vazios são preenchidos corretamente (Figura 5.12). A colisão das bolas causa uma pressão de compressão momentânea elevada.

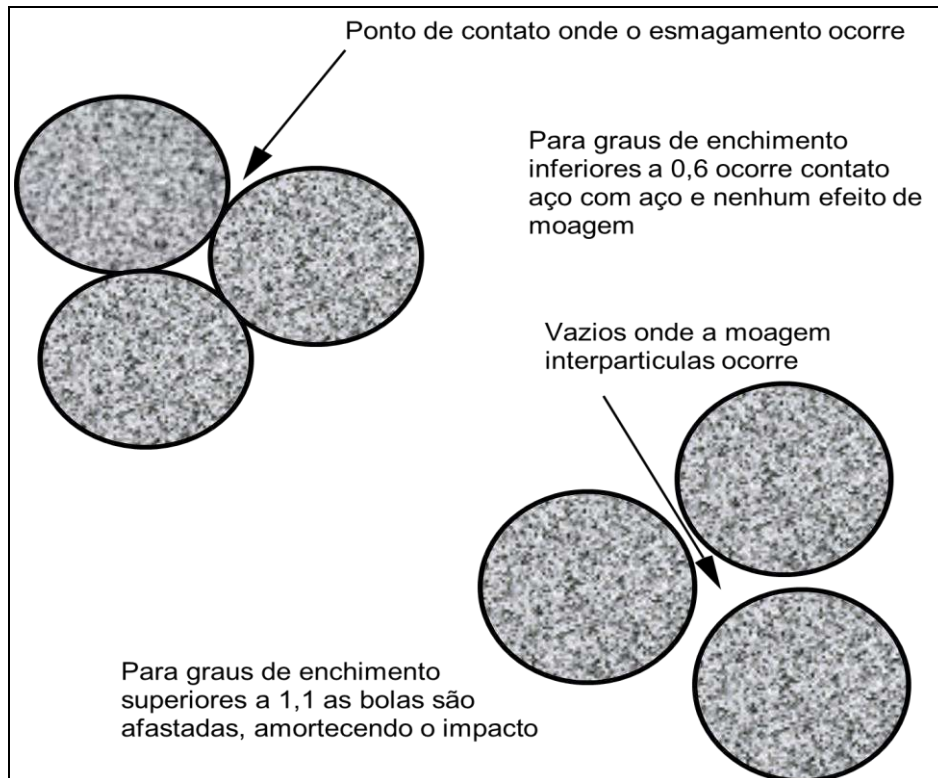


Figura 5.12 - Moagem inter-partículas.
(Lafarge, 2008)

A Figura seguinte compara a velocidade de quebra com a razão de preenchimento de material para diferentes volumes de cargas de corpos moedores. Pela Figura 5.13 pode-se observar que independentemente do volume de carga usado no moinho, os espaços vazios devem ser preenchidos entre 60% e 110% para maximizar a moagem (o pico parece ser entre 80 e 85%). Em baixas razões de preenchimento de material existe uma redução do contato entre os corpos moedores e o material a ser moído devido simplesmente à ausência de material nos espaços vazios reduzindo assim a velocidade de quebra.

Quando a quantidade de material é aumentada, os espaços de colisão entre os corpos moedores ficam cheios e com isso são obtidas altas velocidades de quebras. Um máximo é atingido quando todos os espaços vazios onde ocorrem as colisões entre os corpos moedores estão preenchidos com pó. Um aumento da quantidade de material após esse ponto de máximo reduzirá a velocidade de quebra, pois as colisões serão amortecidas devido à expansão da carga de material que não ocupará os espaços vazios, pois já estão saturados. O by-pass de material no moinho ocorre para razões de preenchimento acima de 1,1 como pode ser observado na Figura 5.13.

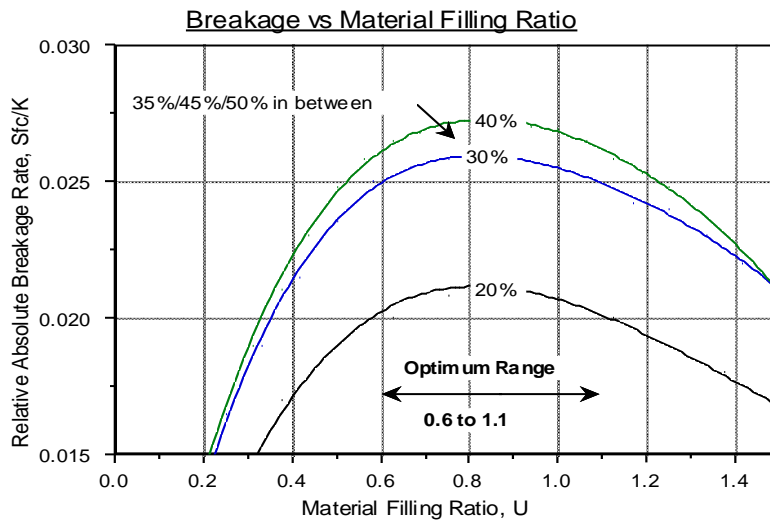


Figura 5.13 - Taxa de quebra contra razão de preenchimento.
(Lafarge, 2008).

5.7 - Mecanismo de cominuição num moinho vertical de rolos inclinados.

Grandes rolos inclinados rotativos e móveis que giram sobre sua periferia são pressionados por um sistema de pressão contra o sólido a ser moído sobre uma mesa moedora (Figura 5.14) realizando o trabalho de moagem que ocorre entre os rolos e a pista que percorrem.

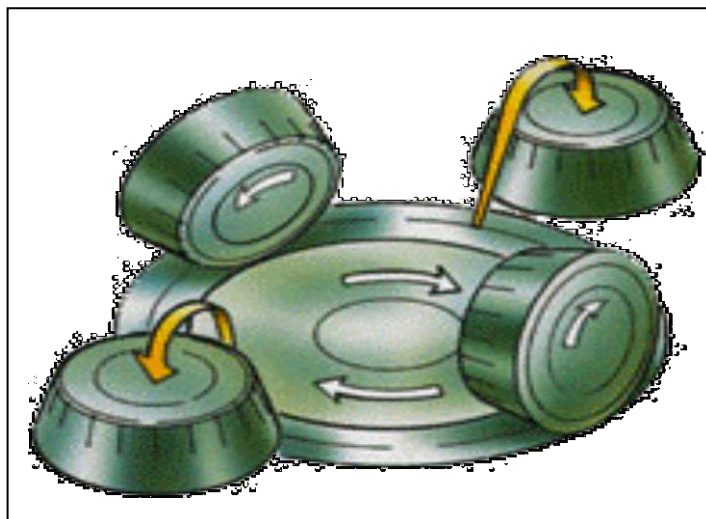


Figura 5.14 - Mesa moedora
(Lafarge,2008)

Embora existam tipos diferentes, todos os moinhos verticais de rolos inclinados operam de acordo com o mesmo princípio citado acima.

O dispositivo de redução de tamanho é composto por elementos de moagem localizados no topo de uma mesa rotativa. O material de alimentação é introduzido na parte central da mesa do moinho vertical de rolos e é forçado para a parte exterior do diâmetro da mesa pela ação da força centrífuga. O sólido é, então, comprimido e laminado sob os rolos moedores. Um módulo de rolo consiste em um rolo cilíndrico blindado, no eixo do rolo, no apoio de braço, no suporte assim como na distribuição da força hidráulica. Em conexão com a geometria da mesa plana de moagem, através desta suspensão de rolos é possível atingir uma abertura de moagem entre o rolo e a mesa de moagem (Weichinger, 2003).

5.7.1 – A operação industrial de um moinho de rolos verticais inclinados

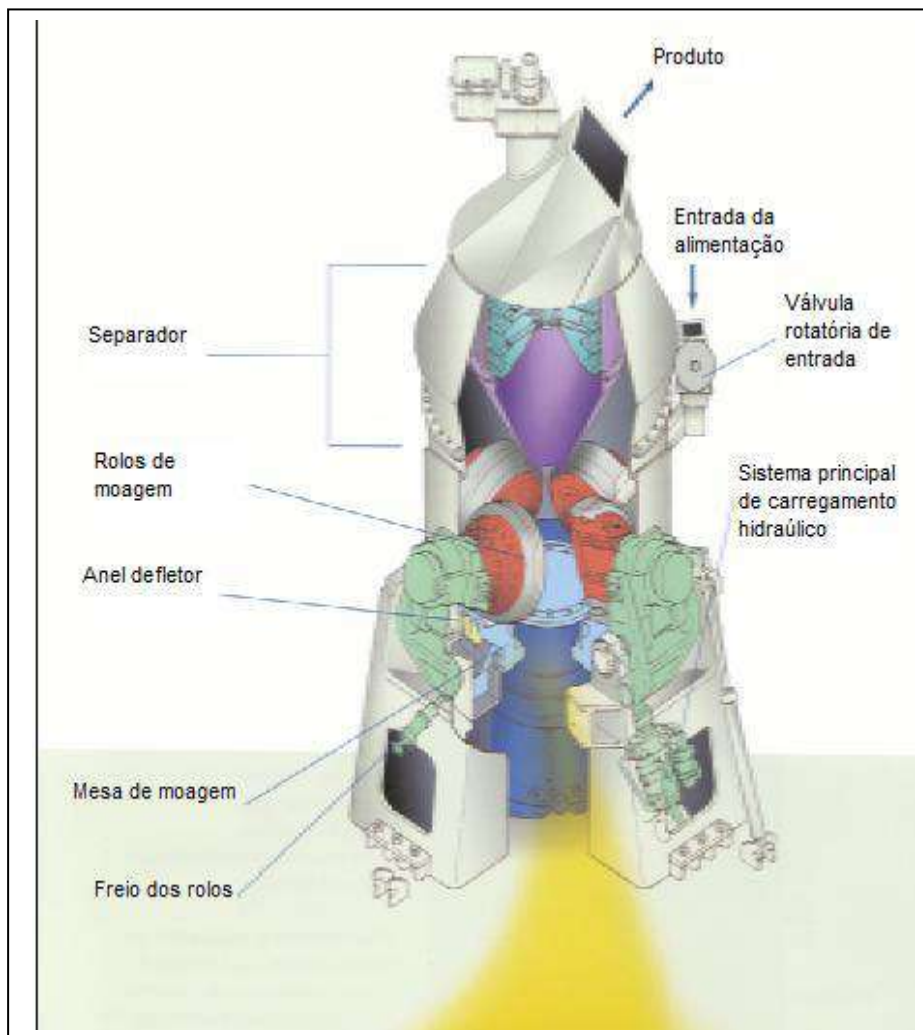


Figura 5.15 – Esquema de um moinho vertical de rolos inclinados da FLS-Smidth
(Weichinger, 2003)

O fluxo de ar através do moinho é gerado pelo seu ventilador que empurra os gases quentes para o fundo, onde são distribuídos uniformemente pelo anel defletor (pneumático) localizado em torno da circunferência da mesa trituradora. O anel defletor produz uma queda de pressão através do moinho, que, por sua vez, aumenta a velocidade do gás ao nível da mesa de moagem. Os gases quentes elevam-se dentro do corpo do moinho e entram no separador através das aletas de entrada (Weichinger, 2003).

As partículas a serem moídas entram através de uma válvula pneumática, sendo direcionadas ao centro da mesa trituradora pela calha de alimentação (Figura 5.15). A válvula pneumática da calha de alimentação é crucial na operação do moinho vertical de rolos para assegurar que velocidades e temperaturas sejam mantidas dentro do moinho. O material particulado é empurrado do centro da mesa rotatória e da parte inferior dos roletes pela força centrífuga sendo que um anel de contenção na beirada da mesa rotatória mantém um leito de moagem estável. Os finos escapam continuamente pelo topo do anel de contenção e para dentro do fluxo de ar ascendente, através do anel defletor, enquanto que a fração grossa cai imediatamente através dos defletores para dentro da câmara de distribuição de gás quente abaixo do anel defletor e da mesa de moagem. Raspadores conectados a parte de baixo da mesa rotatória, dentro da câmara, evacuam continuamente a fração grossa que veio do moinho através de outra válvula pneumática que controla a sua descarga (Weichinger, 2003).

A parte mais grossa da fra o fina cairá fora da suspensão   medida que a velocidade do gás diminua dentro da carcaça do moinho; ou   medida que o gás mudar bruscamente de dire o para dentro das aletas de entrada do separador. Esta fra o cairá de volta na mesa para posterior redu o de tamanho. A fra o fina será mantida entranhada no fluxo de ar ascendente e passará através das aletas de entrada para o separador. A Figura 5.16 apresenta o fluxo de material na mesa de moagem.

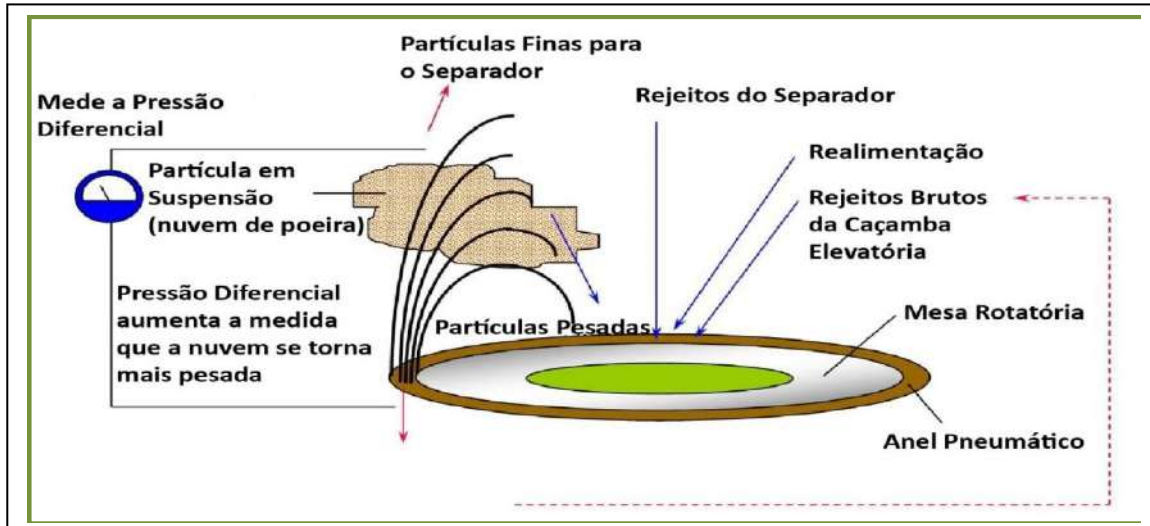


Figura 5.16 - Fluxo de material numa mesa moedora
(Lafarge, 2008)

5.7.2 – Efeitos da opera o de um moinho de rolos verticais inclinados

Estando sujeito a vibra es resultantes dos movimentos dos rolos moedores sobre as camadas de partículas existentes sobre a mesa moedora, três efeitos ou situa es diferentes foram identificados na opera o de um moinho vertical de rolos inclinados:

1  - Fragmenta o normal

  a condi o onde o material   alimentado uniformemente e o rolo passa sobre o leito de modo suave fazendo com que o produto fino (como também alguns mais grossos) caia por sobre a borda. Uma baixa vibra o indica equilíbrio geral entre alimenta o e velocidade representado na Figura 5.17.

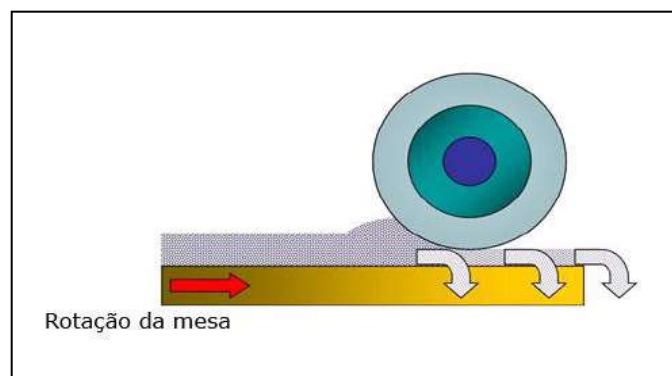


Figura 5.17 - Tritura o normal
(Lafarge, 2008)

2º - Mesa de moagem sobrecarregada

O rolete tenta avançar sobre a mesa, mas escorrega sobre ela, causando um movimento vertical de baixa frequência. Um movimento limpa-neve empurra o rolete, causando uma torção na carcaça do moinho quando ele retorna, causa uma vibração de torção de alta frequência (Figura 5.18). Assim que o movimento limpa-neve cessa, um leito mais profundo torna em geral o moinho mais silencioso, porém, demanda mais energia e reduz a eficiência. As possíveis causas para uma mesa sobrecarregada são: excesso de alimentação; alta circulação interna; trituração insuficiente.

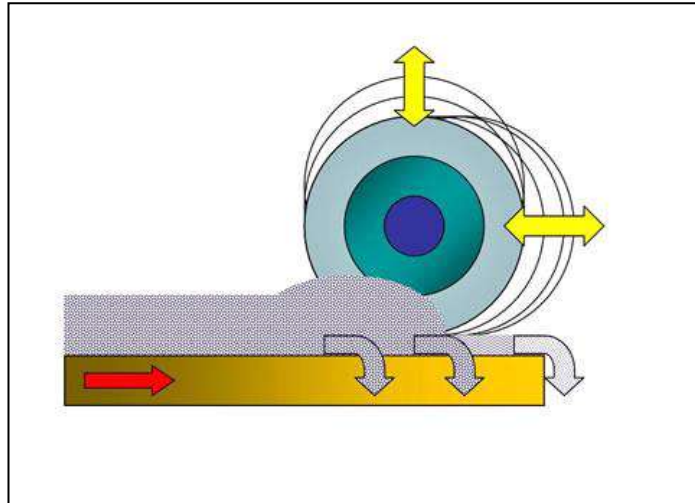


Figura 5.18 - Mesa de moagem sobrecarregada
(Lafarge, 2008)

3º - Mesa de moagem subcarregada ou subdosada

Pedaços grandes ou crostas no trilho, associados a leitos finos, causam altos picos de vibração. Os rolos levantam-se e retornam com pedaços grandes (quando quebram). Já que o rolo está triturando sob um ângulo estreito, a pressão é muito alta e sem apoio suficiente sob o rolo, muita energia é transmitida a todo o conjunto de moagem (Figura 5.19).

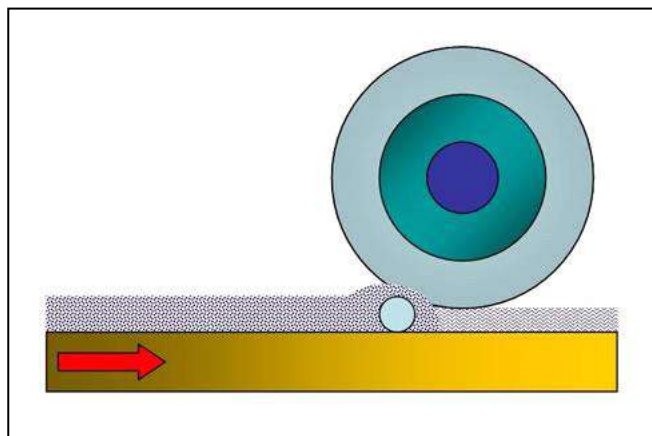


Figura 5.19 - Mesa de moagem subdosada
(Lafarge, 2008)

5.7.3 - Ângulo de pinçamento do rolo moedor

É a porção do rolo moedor inclinado que realiza a moagem (Figura 5.20).

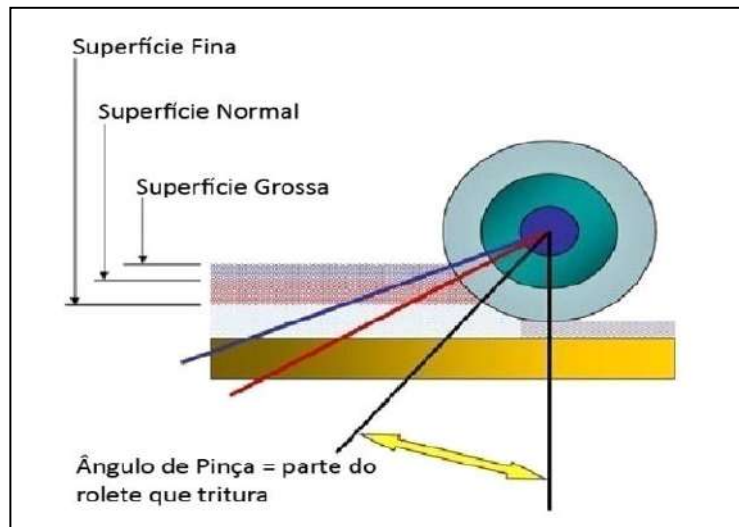


Figura 5.20 - Exemplos de ângulo de pinçamentos
(Lafarge, 2008)

5.7.4 - Leitos formados na moagem vertical com rolos inclinados

Alguns tipos de leitos de partículas podem ser formados pela ação dos rolos moedores:

1º - Leito denso - corresponde a um ângulo de pinçamento agudo que significa uma menor pressão de trituração ou uma reduzida eficiência de trituração. Essa redução da eficiência pode gerar um aumento na recirculação que por sua vez aumenta as incidências de vibrações.

2º - Leito raso - corresponde a um ângulo de pinçamento obtuso que significa uma alta pressão de trituração. Essa alta pressão pode gerar muita energia sob o rolo, o que leva a uma super trituração sendo muito sensível a vibração.

3º - Leito Instável - causado por alimentação irregular, tamanho irregular (finos), fluidez do material, baixo controle do gás e reciclagem em demasia. (Figura 5.21).

Quando o leito é raso demais, os rolos funcionam muito pesados. Quando o leito é denso demais, os rolos funcionam de forma muito arrastada e também não trituram bem. O meio termo é o ponto ideal; nem suave nem duro demais (Lafarge, 2008). No moinho vertical de rolos inclinados a espessura certa do leito corresponde à combinação correta entre alimentação e pressão hidráulica.

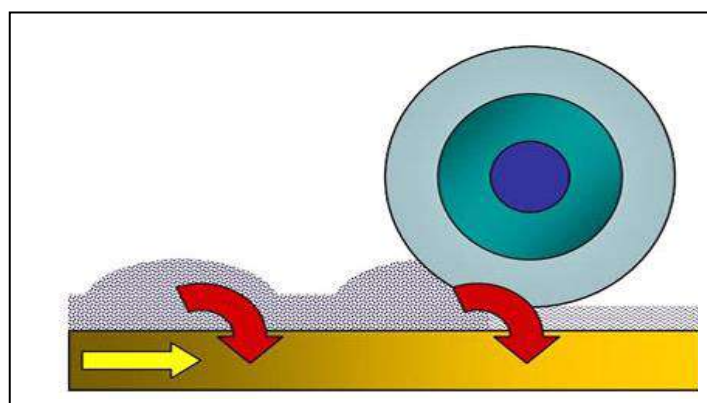


Figura 5.21 - Leito instável em moinhos de rolos
(Lafarge, 2008)

5.8 – Constatações do Capítulo 5

1ª - As curvas cinéticas são ferramentas de projeto e operação que complementam o uso dos modelos matemáticos para o cálculo de energia consumida, porque possibilitam determinar os tempos máximos de moagem de um sólido a fim de evitar os fenômenos de aglomeração de partículas finas por efeitos eletrostáticos e cobrimento dos corpos moedores ou do revestimento e paredes internas que afetarão a produtividade do equipamento.

2ª - A função de seleção representa a probabilidade de as partículas serem fragmentadas numa moagem.

3ª - A função de quebra representa a distribuição granulométrica das partículas provenientes da quebra primária de uma partícula maior (que pode ser referenciada a um tamanho menor de abertura de uma peneira), a qual geralmente independe do tamanho máximo das partículas, mas depende da relação entre os tamanhos do material original e do fragmentado.

4ª - A função de classificação representa a retenção de partículas maiores (ou grossas) no seio da massa e impede a sua passagem para o evento de quebra subsequente, sendo mais observado em moinhos de barras.

5ª - Os mecanismos de cominuição presentes num moinho de bolas podem ser isolados ou associados e dependem de ações fraturantes oriundas de impacto, compressão e abrasão.

6ª - Os esforços resultantes de impactos, compressão e abrasão num moinho de bolas associam-se à velocidade de rotação, à força centrífuga, ao perfil do revestimento interno, ao grau de enchimento e ao efeito da gravidade para produzir uma dinâmica de movimento interno dos corpos moedores que podem produzir efeitos de movimentação em cascata, catarata e centrífugo.

7ª - O movimento dos corpos moedores não determina necessariamente o processo de cominuição, mas é vital na determinação da potência de alimentação do moinho. O bom aproveitamento da energia para a cominuição de um material necessita que as condições de moagem sejam adaptadas ao material.

8ª - O desempenho de um moinho é definido pelo seu consumo de energia. No caso do moinho de bolas, parte da potência é utilizada para erguer o material a ser moído e a carga moedora e outra parte para manter o moinho girando.

9ª - O consumo de energia dos moinhos de bolas é relativamente alto para que possa girar e levantar a carga de bolas, sendo que parte dessa energia é desperdiçada com o choque entre esses corpos moedores, implicando no aproveitamento de cerca de 30% da energia total para a fragmentação, o que implica num desperdício de 70% do total consumido.

10ª - As tentativas de relacionar a energia consumida com a redução de tamanho da partícula deram origem a diversas leis matemáticas, porém nenhuma delas de caráter conclusivo.

11ª - A maior parte da energia consumida é devida às perdas nos equipamentos, e demonstra a estreiteza da aplicabilidade das chamadas "leis de cominuição".

12ª - Em geral, admite-se que a Teoria de Kick é válida para britagem, a Teoria de Bond é válida para moagem grossa e a Teoria de Rittinger é válida para moagem fina.

13ª - O transporte (e a passagem) de um material particulado num moinho de bolas sendo quase constantemente fraturado é um processo muito complexo que depende da sua rotação, da carga de bolas, da razão de preenchimento do sólido e da tiragem de ar.

14ª - O mecanismo de cominuição num moinho vertical de rolos baseia-se na força centrífuga e na ação de compressão que os corpos moedores exercem contra as partículas finas de sólidos sobre uma mesa moedora e/ou um anel ou cuba de retenção e esmagamento.

15ª - Três efeitos ou situações diferentes podem ocorrer na operação de um moinho vertical de rolos inclinados: fragmentação normal, mesa de moagem sobrecarregada ou subcarregada (subdosada).

16ª – Os tipos de leitos formados na moagem vertical com rolos inclinados podem ser: denso, raso e instável.

17ª – Existem tecnologias que são desenvolvidas em escala industrial mesmo que seja possível montar unidades piloto. Ao que parece, esse é o caso dos moinhos verticais de rolos em suas diferentes concepções.

5.9 – Referências do Capítulo 5

BERALDO, J. L. - **Moagem de minérios em moinhos tubulares** - Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1987.

LAFARGE - **Sistema de Moagem de Crus** – Curso de Certificação para Operador de Campo em arquivo MS-PowerPoint, Lafarge S.A, América do Norte, 2008.

LAFARGE - **Sistema de Moagem final** – Curso de Certificação para Operador de Campo, Lafarge S.A, América do Norte, 2005.

MAZZINGHY D. B. - **Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação** – Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2009.

NGK – **Cargas de material a ser moído, quantidade dos meios de moagem nos moinhos, moagem a seco, moagem via úmida, velocidade de rotação e Tabela de rotação (para moinhos de bolas)** – NGK – NTK Cerâmica Industrial, Cerâmica e Velas de Ignição NGK do Brasil S.A., in: Informações Técnicas, p. 124-125, Anuário Brasileiro de Cerâmica 1985, Associação Brasileira de Cerâmica, SP, 1985.

SÁNCHEZ, L.C.C.; MATSUSHITA, KOJI, PONS, F.C. – **Moagem e Moinhos** – FILK e S.A. Indústrias Votorantim, São Paulo, 1990.

SILVA, M. C. C. - **Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínqueres de cimento Portland** – Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PEMM, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, V. C. G. de – **Modelagem matemática e simulação do circuito de moagem do cimento** – Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Porto Alegre- RS, 2002.

WEICHINGER, M.; DAWES ,J.; DESCHARMES C - **Technical Agenda Vertical CementMill**, Diretoria de Performance, Lafarge S.A., França, 2003.

ZAKON, A. - **Reciclagem de Rejeitos Sólidos Industriais: Desenvolvimento de Clínquer para Cimento Portland em Escala de Laboratório a partir de Xisto Retornado do Processo Petrosix (Petrobrás)** - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Tese de Doutorado, Orientador: Prof. Dr. Pérsio de Souza Santos, 1991.

CAPÍTULO 6 -DIMENSIONAMENTO, PROJETO E SELEÇÃO DE MOINHOS INDUSTRIAIS

6.1 – Dimensionamento do tamanho de um moinho de bolas

O tamanho de um moinho cilíndrico ou tubular é expresso pelas dimensões do comprimento e do diâmetro. De uma forma geral, o diâmetro tem um valor padronizado pelos fabricantes enquanto que o comprimento varia de acordo com a aplicação para qual o moinho vai ser fabricado (Beraldo, 1987).

Para um moinho de bolas a relação L/D (comprimento/diâmetro) varia amplamente. Segundo Bond, para moinhos com alimentação grossa ($>1/2$ polegada), a relação L/D recomendada é de (0,7 a 1): 1, para moinho primário com alimentação mais fina ($< 1/2$ polegada), recomenda-se a relação L/D de (1 a 2):1. No caso de moagem fina, como em moagem de cimento, a relação L/D excede 3:1, nesse caso, é usual utilizar-se moinhos com mais de uma câmara (Beraldo, 1987).

Rowland (em 1974) recomenda em linhas gerais as relações L/D apresentadas na Tabela abaixo.

Tabela 6.1 - Tabela de relação L/D para diferentes condições de moagem
(Beraldo, 1987)

Ambiente de moagem	Alimentação (microns)	Diâmetro máximo das bolas (mm)	Relação L/D
Úmida	5.000 a 10.000	60 a 90	1:1 a 1,25:1
Úmida	900 a 4.000	40 a 50	1,25:1 a 1,75:1
Úmida/ Seca	Remoagem fina	20 a 30	1,5:1 a 2,5:1
Úmida/ Seca	Fina (circuito aberto)	20 a 50	2,0:1 a 3,0:1
Seca	5.000 a 10.000	60 a 90	1,3:1 a 2,0:1
Seca	900 a 4.000	40 a 50	1,5:1 a 2,0:1

Verifica-se que para moagem de materiais com granulometrias maiores é usado um moinho com relação L/D menor, destinado a proporcionar um gradiente adequado ao escoamento dos sólidos mais grosseiros. Quanto menor for a relação L/D, maior vai ser o percentual de carga circulante para moagens mais finas (Beraldo, 1987).

Um estudo do Centro Técnico da Lafarge (Paxton, 2010) que comparou o valor do consumo específico de energia e o rendimento dos moinhos para diversos volumes de cargas, mostrou que a relação ótima para o moinho de cimento é entre 2,5:1 e 3,0:1. Para moinhos com 2 câmaras, o comprimento do primeiro compartimento em relação ao comprimento total do moinho deve ser entre 35 - 45% para moinhos de farinha e de 30 a 35% para moinhos de cimento.

6.2 – Características construtivas para moinhos de bolas

6.2.1 – Calha de alimentação

Necessariamente, nos equipamentos alimentados com sólidos, sua calha de alimentação deve ser feita com material resistente ao desgaste, pois serve para direcionar as matérias-primas e os rejeitos provenientes do separador para dentro do primeiro compartimento do moinho.

Os moinhos dispõem de diferentes sistemas de alimentação para melhor atender aos requisitos de layout e de processo. Os mais usados são alimentação por **Scoop-feeder** (em forma de espiral, não necessita de bombas para elevar o material), **Spout-feeder** (em formas de tubos) e **drum-feeder** (alimentação por tambor). Numa calha de alimentação por tambor, o material passa pela calha e é despejado dentro do moinho (Figura 6.1).

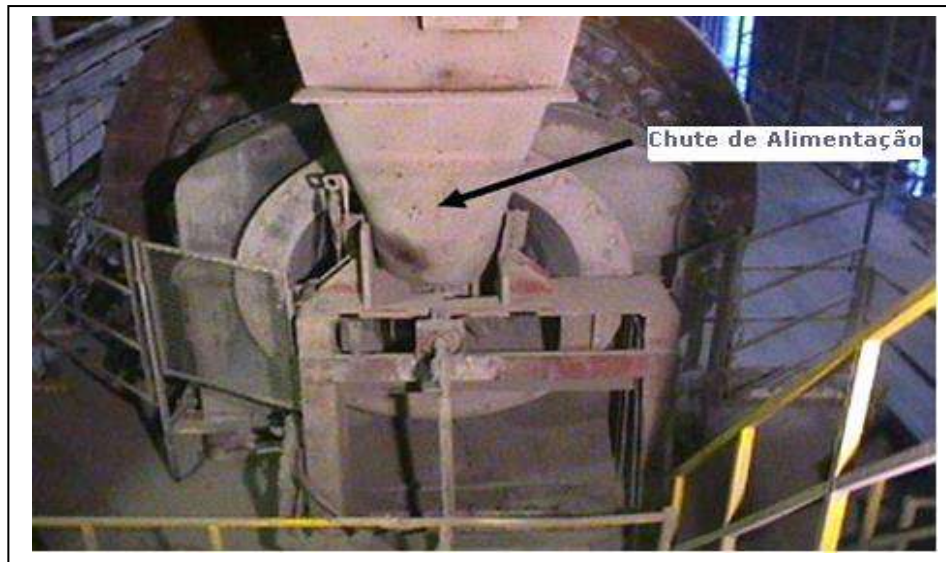


Figura 6.1 - Calha de alimentação por tambor
(Lafarge, 2008)

6.2.2 – Carcaça de um moinho de bolas

A carcaça (Figura 6.2) é um elemento estrutural do moinho de bolas que sustenta os componentes internos e normalmente é fabricada com chapas de “aço-carbono para caldeiras” com espessuras que variam de 1/100 a 1/75 do diâmetro do moinho. A carcaça dos moinhos sofre, no caso de moinhos grandes e/ou compridos, um tratamento térmico para alívio de tensões, após o qual é usinada de uma só vez (Beraldo, 1987).



Figura 6.2 - Carcaça de um moinho de bolas
(Lafarge, 2008)

A carcaça é furada para inserção de parafusos destinados a prender o revestimento interno. Os furos para instalação dos parafusos são feitos de acordo com 2 padrões mecânicos: Lorraine (americano) ou DIN (alemão) (Φ = diâmetro).

Lorraine Americano - $2\Phi(\text{ft.}) = n^\circ$ de furos para parafuso/ fila
18.8” de centro a centro.

DIN - $10\Phi(\text{m}) = n^\circ$ de furos para parafuso/ fila
31,4 cm de centro a centro

6.2.3 – Portas de acesso ao moinho de bolas

As portas de acesso permitem aos operadores e inspetores entrarem nos compartimentos do moinho para examinarem os revestimentos e o estado das cargas de corpos moedores, para atender aos fins de inspeção de qualidade da produção, manutenção e carregamento do equipamento. O entorno das portas, por projeto, é uma área mais espessa em alguns moinhos do que a carcaça padrão do moinho, para adaptar-se aos aumentos das tensões durante a operação.

6.2.4 – Revestimentos internos de um moinho de bolas

As funções operacionais dos revestimentos internos incluem as de caráter mecânico e de processamento. As funções mecânicas visam proteger a carcaça do moinho contra abrasão e danos derivados do processo de moagem. As funções de processo envolvem a ação dos revestimentos na otimização da suspensão e triagem da carga de esferas, dependendo de sua localização e projeto, para maximizar a produção.

Os revestimentos devem ser fabricados para que sejam: 1º - facilmente substituíveis; 2º - resistentes ao desgaste, e; 3º - fiquem presos individualmente à superfície interna da carcaça.

Tabela 6.2 - Materiais usados na fabricação de revestimentos
(Beraldo, 1987)

Material	Dureza BHN	Desgaste Relativo
A- Ferro fundido Cr-Mo	600-740	100-105
B- Ferro fundido alto cromo	550-650	110-115
C- Ferro fundido Ni-Cr	520-650	120-130
D- Aço martensístico Cr-Mo	450-555	135-145
E- Aço austenítico ao Mn 6-1	190-230	150-175
F- Aço perlíticos Cr-Mo	250-420	155-200
G- Aço austenítico ao Mn 12	180-220	200-300

Atualmente o material mais usado é o material F da Tabela 6.2, composto de aço com alto teor de cromo (3 a 12%), devido a seu baixo custo, o que diminui o preço final do equipamento.

Embora haja, literalmente, centenas de estilos de revestimentos diferentes para os moinhos utilizados atualmente, eles sempre se enquadram em uma dessas duas categorias:

- Revestimentos de suspensão;
- Revestimentos de classificação.

6.2.4.1 – Revestimentos de suspensão para moinhos de bolas

São projetados para agarrar a carga e aumentar a altura do ponto de liberação, de forma a melhorar o efeito de esmagamento dentro do moinho. O revestimento de suspensão é comumente encontrado em moinhos monocâmara, ou no primeiro compartimento de um moinho com duas câmaras.

À medida que o revestimento se desgasta, o ponto de liberação é reduzido e o resultado é uma energia de esmagamento menor. Isto pode afetar significativamente a taxa de produtividade do moinho. Para compensar esta perda de “energia de impacto” entre as rotações do moinho, é comum as fábricas de cimento Portland recarregarem os moinhos com bolas maiores. Fazendo-se isso, a perda de energia associada ao ponto de liberação mais baixo, é compensada pelo aumento da massa média das esferas.

Os revestimentos de suspensão podem ser dos tipos levantador e ondulado (Figura 6.3). Os revestimentos ondulados são indicados para moinhos de bolas de até 4m de diâmetros, para diâmetros maiores são indicados os revestimentos levantadores (Sanchez, 1990).

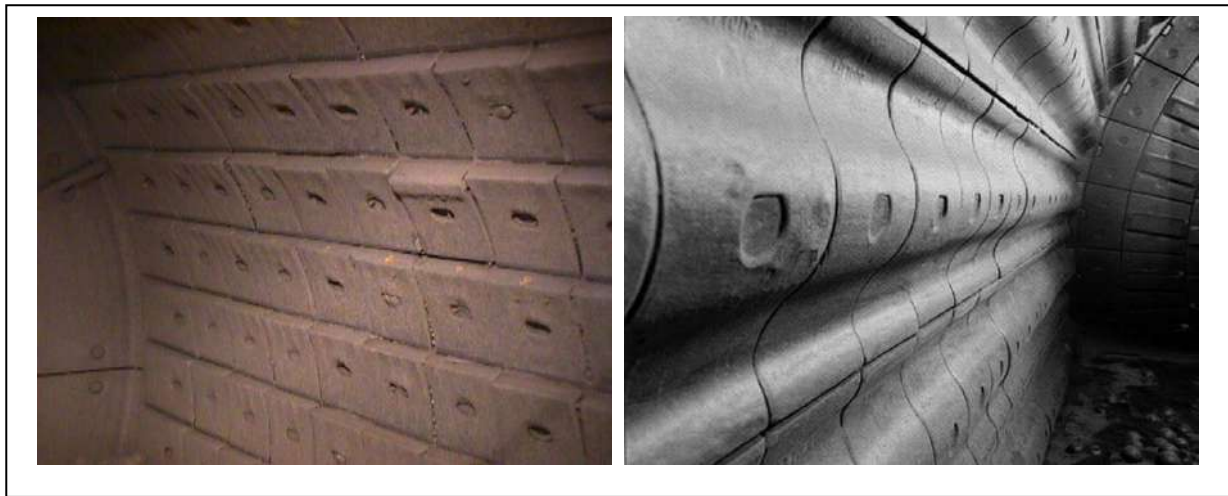


Figura 6.3 - Revestimentos internos de um moinho de bolas (a) tipo levantador b) ondulado (Lafarge, 2008)

Existem diferentes tipos de revestimentos ondulados (Figura 6.4). Em geral, revestimentos de ondas simples são recomendados em moagem “grossa” com bolas de grande diâmetro (> 60 mm) e têm espessura de 50 a 60 mm e ondas com altura de 60 a 75 mm. Para moinhos com bolas de pequeno diâmetro (< 60 mm), são usados revestimentos de onda dupla, com altura entre 1,5 - 2 vezes a espessura do revestimento (Beraldo, 1987).

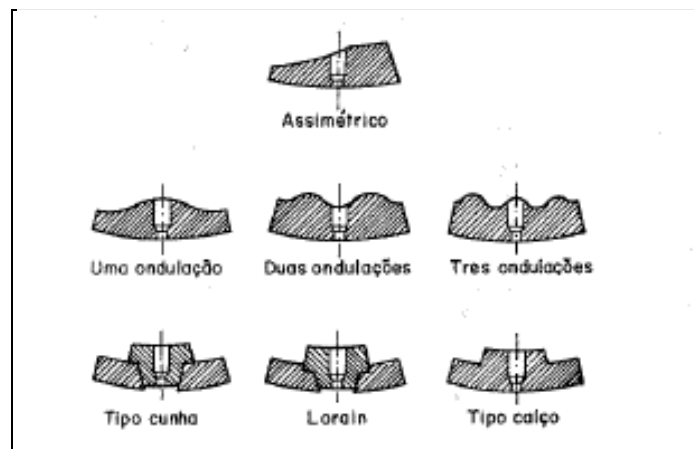


Figura 6.4– Tipos de revestimentos ondulados (Sanchez, 1990)

6.2.4.2 – Revestimentos de classificação para moinhos de bolas

O objetivo é igualar o tamanho das esferas ao tamanho das partículas ao longo do comprimento axial do moinho, ou seja, conforme o material se torna mais fino, desde a entrada até a saída do moinho, assim também acontece com a carga de esferas. São encontrados no segundo compartimento de moinhos com 2 câmaras ou na parte final do moinho monocâmara.

Os revestimentos classificadores também são chamados de autoclassificadores, pois classificam automaticamente as bolas maiores no início da câmara e as bolas menores na saída do moinho e apresentam um perfil longitudinal em rampa, ou seja, cada anel do revestimento é de seção transversal, com espessura menor para o lado da alimentação e maior para o lado da descarga. O anel seguinte

repete esse perfil, o que d  ao revestimento um aspecto de dente-de-serra (Figura 6.5), quando visto em corte longitudinal (Beraldo, 1987). Esse perfil com um declive cascadeia as esferas para frente, a uma distância proporcional   massa de esferas. Para moinhos maiores de 4,0 m de diâmetro, são usados revestimentos com 2 ou 3 inclina es de 7  a 20  (Figura 6.6).

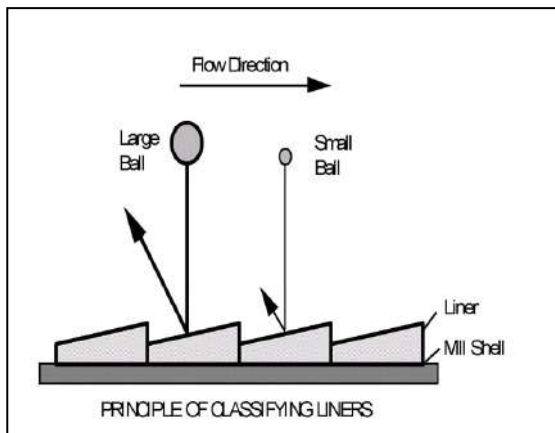


Figura 6.5 - a) Mecanismo de classifica o e (b) Revestimentos classificadores
(Lafarge, 2008)

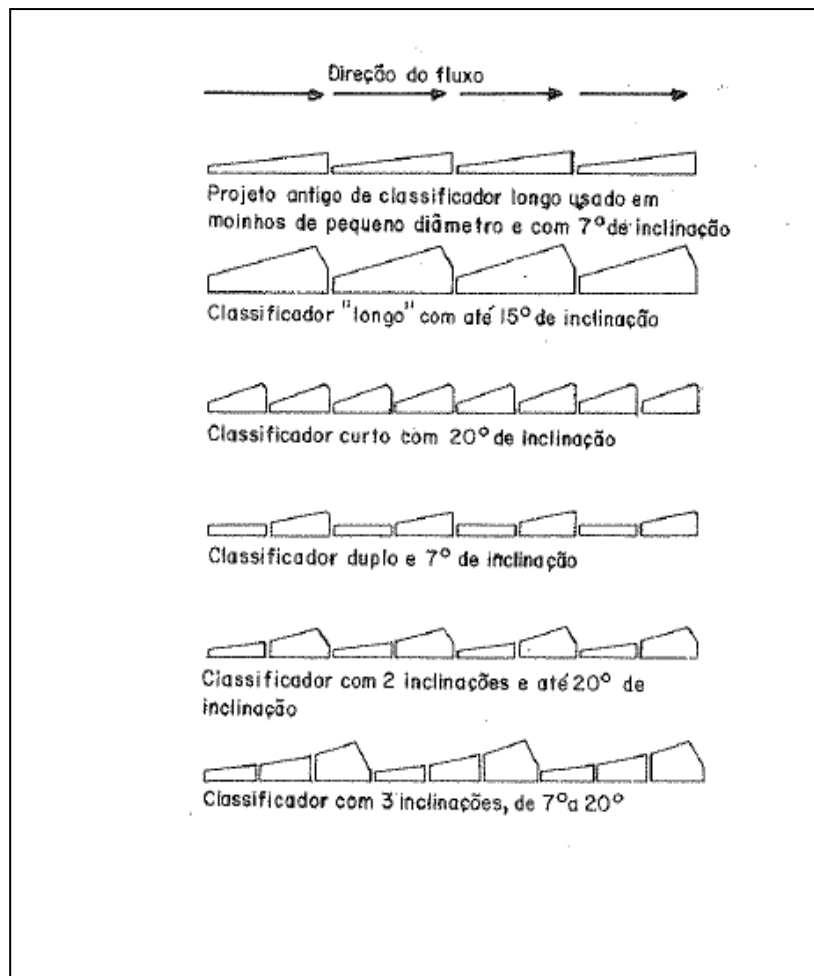


Figura 6.6 - Revestimentos classificadores.
(Sanchez, 1990)

6.2.5 – Grelhas dos moinhos de bolas

Para separar as cargas de bolas e o sólido moído, empregam-se grelhas entre as câmaras do moinho e na sua saída, que permitem regular o nível de material em cada câmara, e limitam a saída de material moído, mantendo um nível de enchimento adequado a cada processo e/ou situação. Assim não impedem a passagem do pó entre elas e permitem ao ar escoar através do moinho (Figura 6.7).

As placas de passagem das grelhas possuem fendas, com uma abertura que permite ao material moído passar, mas impede a passagem das bolas. A parte central das grelhas é chamada de anel de ventilação ou anel central, sendo a região por onde passa a maior parte do fluxo de ar, e deve ter o maior diâmetro possível, respeitando o nível de enchimento do moinho (Figura 6.8) (Lafarge, 2008).

O anel central também possui uma grelha, cujo objetivo é o de evitar a passagem de corpos moedores entre as câmaras, ou para fora do moinho junto com a matéria moída, no caso do segundo compartimento. Existem diversos modelos de grelhas. A escolha do modelo correto deve levar em consideração a perda de carga na passagem do ar.

A abertura das fendas no segundo compartimento deve ser mais larga no mínimo 2 mm do que no primeiro compartimento, para possibilitar a saída do moinho de qualquer tipo de material grosseiro que passe da 1ª para a 2ª câmara (Beraldo, 1987).

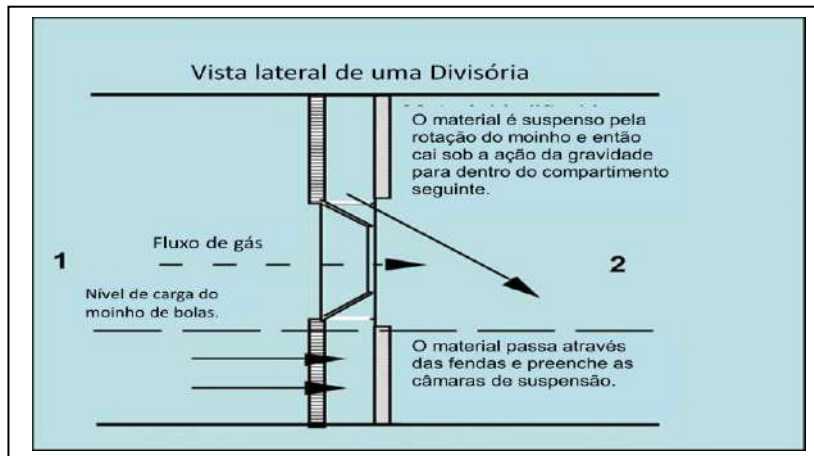


Figura 6.7 - Vista lateral esquemática de um diafragma
(Lafarge, 2008)

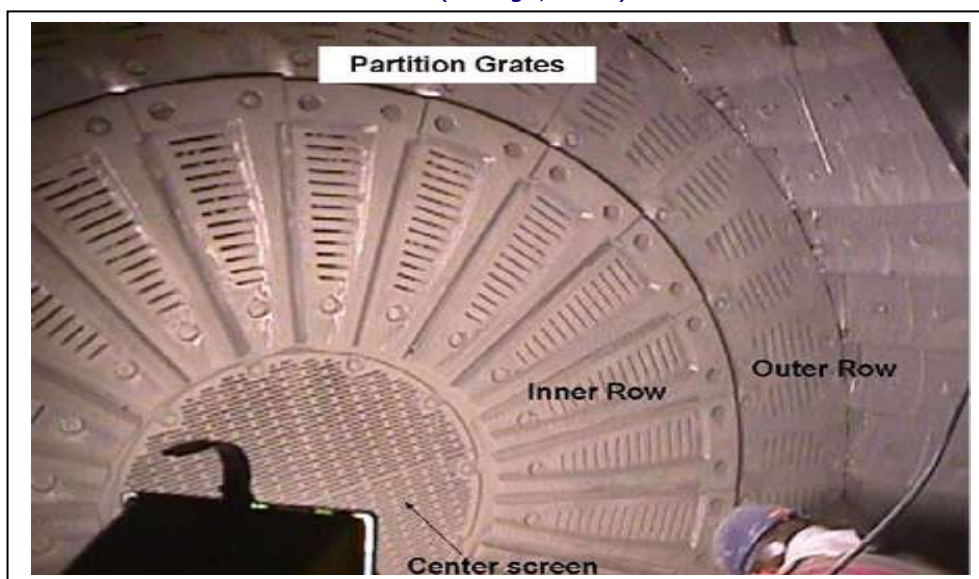


Figura 6.8 - Diafragma de um moinho de bolas
(Lafarge, 2008)

6.2.6 – Descarga de pó num moinho de bolas

Existem diferentes arranjos de descarga dos moinhos de bolas para atender às conveniências de aplicação. Os dois tipos principais são descarga por transbordo e descarga por diafragma (Figura 6.10).

6.2.6.1 – Descarga por transbordo

Esse tipo de moinho possui uma extremidade de descarga aberta. O material escoo através do munhão (Figura 6.9) em decorrência da inclinação da polpa existente entre as aberturas de alimentação e de descarga. Uma hélice reversa no revestimento do munhão de descarga retém as bolas no interior do moinho. Esse tipo é ideal para moagem fina porque não apresenta problemas de escoamento.

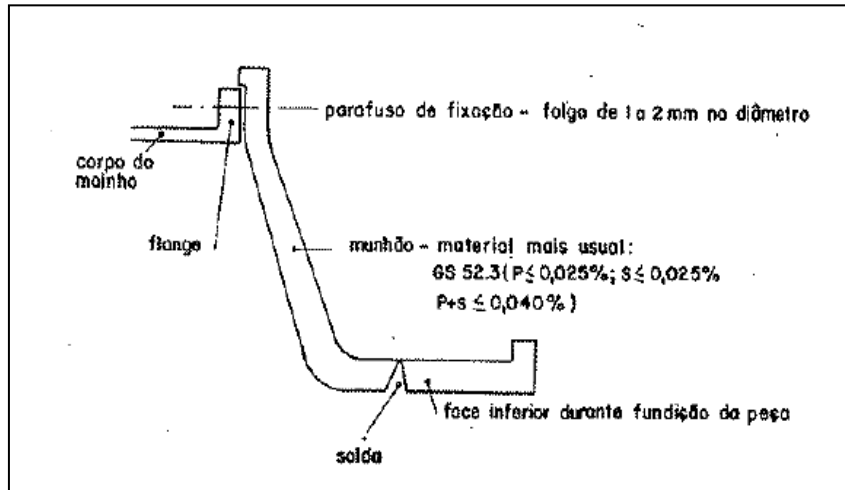


Figura 6.9 - Munhão de um moinho
(Sanchez, 1990)

6.2.6.2 – Descarga por diafragma

Na extremidade de descarga deste moinho, uma grelha ranhurada parcialmente ou em toda a extensão do diâmetro, munida de um conjunto elevador de descarga, transporta o material até a abertura da descarga pelo munhão. A grelha tem por finalidade reter bolas, fragmentos e material grosso. Uma inclinação criada entre a abertura de alimentação e as ranhuras de descarga facilita o escoamento de material.

O moinho com descarga por diafragma ou grelha é mais indicado para moinhos com alimentação mais grossa e que não se deseja obter um produto muito fino, pois o tempo de residência do material é menor. O moinho de diafragma tem potência 14,8% superior a dos moinhos tipo transbordo, sendo também o consumo de bolas maior no moinho de diafragma. O custo de manutenção desse tipo de moinho é maior principalmente devido a problemas de entupimento das grelhas do diafragma (Beraldo, 1987).

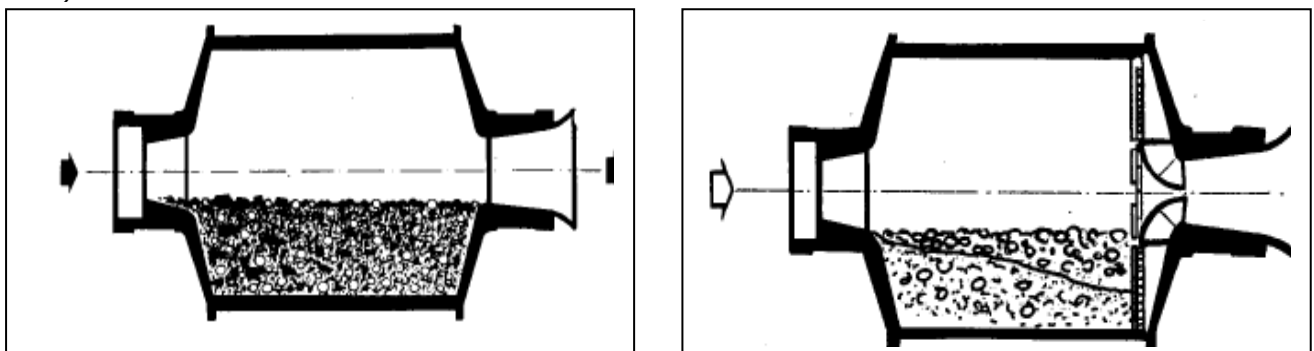


Figura 6.10 - a) Descarga por transbordo b) descarga por diafragma
(Beraldo,1987)

6.2.7 – Corpos moedores para moinhos de bolas

Os corpos moedores para moinho de bolas são comumente encontrados na forma de esferas, em aço forjado ou fundido (Tabela 6.3), com diâmetro nominal que varia entre 15 e 100 mm, e sua qualidade varia muito de acordo com o tratamento térmico recebido entre os diversos fornecedores.

Tabela 6.3 - Diferentes tipos de composições de corpos moedores
(Beraldo, 1987)

Tipo de aço	Forjados						Fundidos		
	SAE 1095	SAE 1060 (Modificado)	SAE 1045	SAE 52100	SAE 5165	Inox 440C	Cr/Ni	Baixo Cr	
COMPOSIÇÃO	C	1,01	0,61	0,46	1,01	0,65	1,05	3,11	2,80
	P	0,017	0,017	0,015	0,025	0,045	0,030	0,116	0,097
	S	0,040	0,051	0,025	0,015	0,029	0,027	0,116	0,112
	Si	0,25	0,08	0,19	0,27	0,37	0,34	0,53	0,37
	Cr	Traços	0,08	–	0,90	17,03	17,03	1,45	0,67
	Cu	0,07	0,36	–	–	–	–	0,27	0,31
	Mn	0,34	0,37	0,65	0,40	1,02	0,48	0,23	0,60
	Mo	0,05	0,05	–	–	–	0,20	0,07	–
	Ni	Traços	0,11	–	–	–	0,28	3,26	Traços
	Desgaste Seca g/24 h por 100 cm² superfície Úmida	Seca	0,000314	n.d.	0,000365		0,000181	n.d.	
Úmida		n.d.	0,00243	n.d.		n.d.	0,00181		0,00220

6.2.7.1 – Fabricação de bolas metálicas para moagem

As bolas de aço forjado são feitas com aço carbono aquecido até um estado plástico e, então, moldados sob pressão para formar as esferas. O produto acabado é então temperado para garantir uma melhor distribuição de dureza. Esse tipo de material é o mais barato que as bolas de aço fundido porém a taxa de desgaste é maior.

As bolas de aço fundido são oriundas de uma base de ferro para fundição branca com adição de 10 a 25% de cromo. O material é então fundido em moldes e depois temperado. Durante o tratamento com calor, o carbono combina com o cromo formando grânulos de carbeto de cromo que são extremamente duros e resistentes a abrasão.

Ambos os processos apresentam dificuldades de uniformização no tratamento para temperar as esferas maiores, resultando em miolos macios nestas esferas. A deformação dos miolos macios resulta em cones duplos que preenchem os espaços de carga entre as esferas e também resulta em pontas de aço que obstruem as divisórias e as grelhas de descarga (Figura 6.11). Tudo isso reduz a eficiência da moagem.

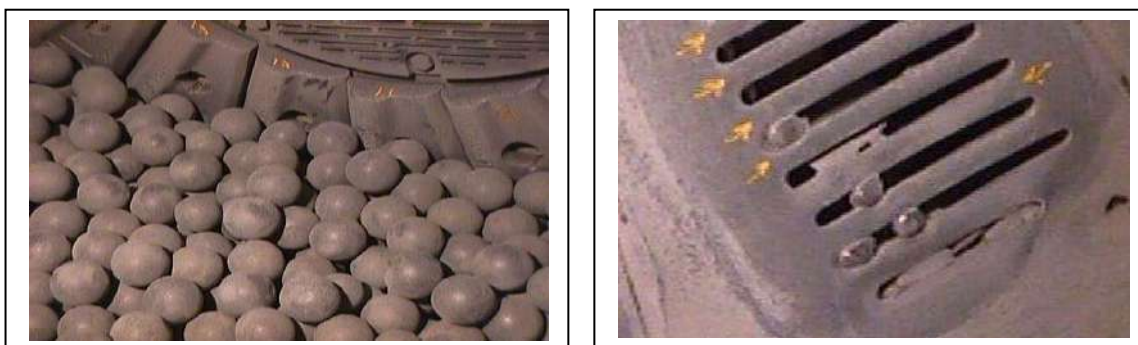


Figura 6.11 – (a) Corpos moedores (b) Entupimento de grelhas
(Lafarge, 2008)

6.2.7.2 – Determinação do tamanho de bolas para moagem

O tamanho máximo do corpo moedor deve ser o suficiente para quebrar as partículas maiores da alimentação: se for pequeno demais, não conseguirá fragmentá-las em conseqüência, provocando acúmulo de material grosso antes do diafragma, o qual passará em grandes quantidades para a próxima câmara. Se o tamanho nominal for grande demais, poderá provocar um desgaste elevado no revestimento e ao mesmo tempo uma queda na eficiência da moagem.

A fórmula de Bond é a mais conhecida para determinar o tamanho máximo das bolas, e sua forma simplificada é dada pela equação abaixo (Sanchez, 1990):

$$T_{\max} = k \sqrt{F} \sqrt[3]{\frac{\rho W_i}{C_s \sqrt{\phi_i}}} \quad (\text{Eq 6.1})$$

Onde: T_{\max} = tamanho máximo da bola em mm.

k = constante, que para bolas de aço é igual a 36.

F = tamanho da peneira onde 20% do material alentado ficam retidos a essa câmara em mm.

ρ = peso específico da alimentação, g/cm³.

W_i = Índice de moabilidade de Bond.

C_s = velocidade do moinho em%.

ϕ_i = diâmetro interno do moinho, em m.

Todos os tamanhos de bolas (ou corpos moedores) sofrem desgaste abrasivo, perdendo volume e massa durante a operação contínua. A carga em cada câmara deve ser composta de vários tamanhos de corpos moedores e possuir uma composição que deve ser mantida durante muito tempo. Para esta finalidade existe o que se chama "carga em equilíbrio". A justificativa base para cálculos deste tipo de cargas é que a camada a ser desgastada por unidade de tempo é independente do tamanho do corpo moedor. Isto também deve estar próximo da realidade, considerando as câmaras separadamente (Sanchez, 1990). A recarga com corpos moedores é feita com bolas grandes.

Num moinho de cimento com duas câmaras, existem duas cargas distintas de corpos moedores. A primeira câmara é suprida com bolas de grandes dimensões (entre 60 e 90 mm), gerando assim um maior espaço vazio entre os corpos moedores, tornando essa câmara um bom britador; A segunda câmara recebe bolas menores (entre 60 mm e 17 mm), com menores espaços vazios, pois nesta câmara o atrito faz o trabalho.

Tabela 6.4 - Especificações sobre diferentes tamanhos de bolas.
(Sanchez, 1990)

Diâmetro (mm)	Peso da bola (kg)	Nº de bolas por tonelada	Peso por m ³ (kg)	Superfície por tonelada de bolas (m ²)
100	4,115	243	4.550	7,6
90	2,994	334	4.590	8,5
80	2,107	474	4.620	9,5
70	1,410	709	4.640	11,0
60	0,889	1.125	4.660	12,7
50	0,514	1.946	4.708	15,2
40	0,263	3.802	4.760	19,0
30	0,111	9.009	4.850	25,0
20	0,003	30.303	—	37,5

6.3 – Parâmetros do dimensionamento das características operacionais do moinho de bolas

6.3.1 – Energia consumida para acionar as rotações do moinho cheio.

Diversas fórmulas têm sido utilizadas no dimensionamento de moinhos tubulares ou cilíndricos baseadas no consumo energético da moagem. Dessas, a mais utilizada e de uso amplamente difundido no mundo todo é a baseada na Lei de Bond do consumo de energia. O sucesso de dimensionamento de moinhos de acordo com a Lei de Bond é devido ao fato de dar resultados muito próximos do real nas condições normais de operação (Beraldo, 1987).

Bond relacionou o tamanho das partículas alimentadas e do produto com o consumo de energia e essa relação foi expressa por:

$$E = W_i f \left(\frac{100}{\sqrt{P}\sqrt{F}} \right) \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Onde: E = energia consumida, em kWh/t.

W_i = índice de Bond, em kWh/t.

P = tamanho da peneira em que passa 80% do produto, em microns.

F = tamanho da peneira em que passa 80% da alimentação, em microns.

f = fatores de correção.

Existem vários fatores de correção propostos para corrigir o desvio, porém esses fatores são empíricos e só são válidos para os casos em que foram propostos. Um exemplo é o fator de correção proposto pelo próprio Bond para o caso de moagem fina, na qual 80% do produto passam na peneira de abertura de 74 microns.

$$f = \frac{P+10,3}{1,145 P} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Com o valor de E pode-se estimar a potência requerida pelo moinho e através de gráficos de potência por relação L/D, dimensiona-se o moinho.

6.3.2 – Velocidade rotacional do moinho em rotações por minuto

Depois de projetar o moinho baseando-se na energia consumida e em sua capacidade de produção esperada, é necessário definir a velocidade ideal para gerar a dinâmica interna necessária. Para isso, precisa-se calcular uma velocidade operacional para definir a velocidade rotacional ideal. **Velocidade crítica do moinho** é a velocidade rotacional em que a força centrífuga supera a força da gravidade. A esta velocidade, as esferas não teriam mais o efeito catarata ou cascata e seriam impulsionadas para a periferia, permanecendo retidas sobre a superfície do interior dos revestimentos internos durante a volta completa (revolução) do moinho.

A ação do moinho nos corpos moedores pode ser visualizada na Figura seguinte, considerando-se uma única bola em moinho com revestimento liso. Inicialmente, a bola acompanha a rotação da parede do moinho, presa à mesma por meio da ação da força centrífuga (equação 6.4). Quando o peso da bola iguala o da força centrífuga, a bola deixa a parede e é arremessada por meio de uma curva parabólica e irá atingir a carga.

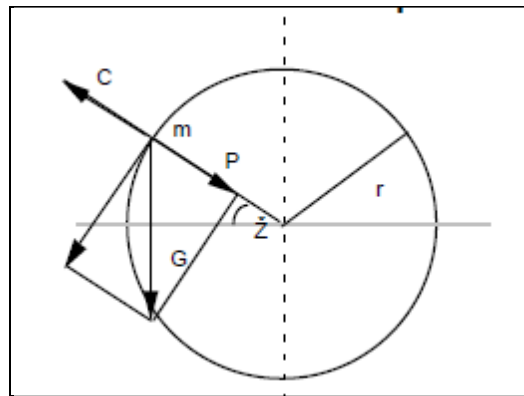


Figura 6.12 - Forças atuantes no corpo moedor
(Sanchez, 1990)

$$C = m\omega^2 r = \frac{G \omega^2 r}{g} \tag{Eq. 6.4}$$

Onde: C = força centrífuga

G = peso da bola

ω = Velocidade angular do tubo do moinho

g = gravidade

r = raio da bola

A velocidade crítica do moinho é aquela na qual a bola consegue atingir o ponto mais elevado do moinho sem se desprender da parede. A velocidade crítica é calculada igualando-se naquele ponto a força centrífuga ao peso da bola, o que se expressa pela equação abaixo.

$$n_c = \sqrt{\left(\frac{60^2 g}{4\pi^2 r}\right)} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \tag{Eq. 6.5}$$

Onde: n_c = velocidade crítica em rpm

D = diâmetro do moinho em m

A velocidade adequada (operacional) do moinho é dada em porcentagem da velocidade crítica ou seja, é a velocidade real do moinho em rpm dividido por n_c . Para triturar, o moinho precisa funcionar mais devagar do que sua velocidade crítica. Como regra, a maioria dos moinhos de bolas opera entre 60 e 85% de suas velocidades críticas (Beraldo, 1987). Isto permite uma seleção adequada de revestimentos e do meio de moagem já que vão interferir nos movimentos de cascatas e cataratas dos corpos moedores.

6.3.3 – Volume da carga específica de corpos moedores ou de enchimento

A carga específica ou grau de enchimento é o percentual de volume da câmara do moinho que está ocupada pelos corpos moedores, incluindo os vazios entre os mesmos e pode ser dada pela equação abaixo (Beraldo,1987).

$$q = \frac{100F}{GV} (\%) \tag{Eq. 6.6}$$

Sendo: F = carga de corpos moedores em t.

G = peso específico dos corpos moedores em t/m³.

V = volume do compartimento em m³.

q = Carga específica ou grau de enchimento.

Uma boa aproximação para calcular o volume de bolas é através da relação entre a altura h , que é a distância entre o centro do moinho e a superfície de carga, e o diâmetro (D).

$$q = 50 - 125 \frac{h}{D} (\%) \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Normalmente a carga de volume é calculada durante as inspeções no moinho. Para um consumo específico de energia ótima tem se observado que o grau de preenchimento deve ser entre 25 e 28% podendo chegar até 30% na segunda câmara de moinhos multicâmaras. No entanto, muitos operadores de moinhos preferem esferas de pesos superiores, porque a capacidade de moagem do moinho segue o grau de preenchimento dos corpos de moagem em uma função linear. Isso resulta num consumo específico de energia um pouco maior, e a produtividade do moinho também é beneficiada. Nesse caso os valores podem variar de 32 a 34% no primeiro compartimento e 34 a 36% no segundo compartimento (Lafarge, 2008)

6.3.4 – Resfriamento do moinho.

A injeção de água nos moinhos de cimento Portland tem como única finalidade resfriar os gases que atravessam o moinho, garantindo o resfriamento do produto até uma temperatura abaixo daquela em que, por exemplo, ocorre a desidratação da gipsita (~ 110 °C). No entanto, o operador do moinho deve tentar trabalhar com temperatura superior a 90 °C para evitar a condensação de água no circuito de moagem e ocasionar possíveis concreções.

O processo de injeção de água deve ser cuidadoso, pois os riscos para a qualidade do produto são consideráveis. A água deve ser pulverizada, sem formação de gotas e geralmente a vazão de água varia entre 1 e 3% da vazão do moinho.

6.4 – Características construtivas para moinhos verticais de rolos

O projeto geral de moinhos verticais não varia muito de um fabricante para outro. Esse tipo de equipamento é capaz de realizar as três fases do processo (moagem, secagem e classificação) diferindo dos moinhos de bolas que demandam um separador externo. Os projetos de moinhos de cru e moinhos de cimento diferem devido às propriedades do material de alimentação e às diferenças de finura. Assim, os moinhos de cru e carvão tendem a apresentar concepções mais simples do que os moinhos de cimento. As principais diferenças mecânicas relacionam-se ao sistema de carregamento de moagem. Os fornecedores oferecem as mesmas tecnologias de separação para moinhos verticais de rolos de cru e de cimento, com diferentes tamanhos de separadores, dependendo dos requisitos de projeto.

Os principais componentes ou subconjuntos de um moinho vertical de rolos são: carcaça, rolos moedores, mesa de moagem, sistema de acionamento, sistema de carregamento hidráulico, anel defletor (*Nozzle ring*), anel de barragem (*Dam ring*), e separador de frações de sólidos.

6.4.1 – A carcaça

Ao contrário do moinho de bolas, a carcaça do moinho vertical de rolos não está sujeita a qualquer esforço, pois não há movimentos na mesma e não há necessidade de revestimentos especiais. O fluxo de gás disponível (no caso da moagem da farinha, oriundo do forno de clínquer) na fábrica é decisivo para o dimensionamento da carcaça do moinho e do classificador. A quantidade e o tamanho dos rolos são calculados de acordo com o rendimento desejado, sendo influenciados por fatores como moabilidade, umidade e finura do material.

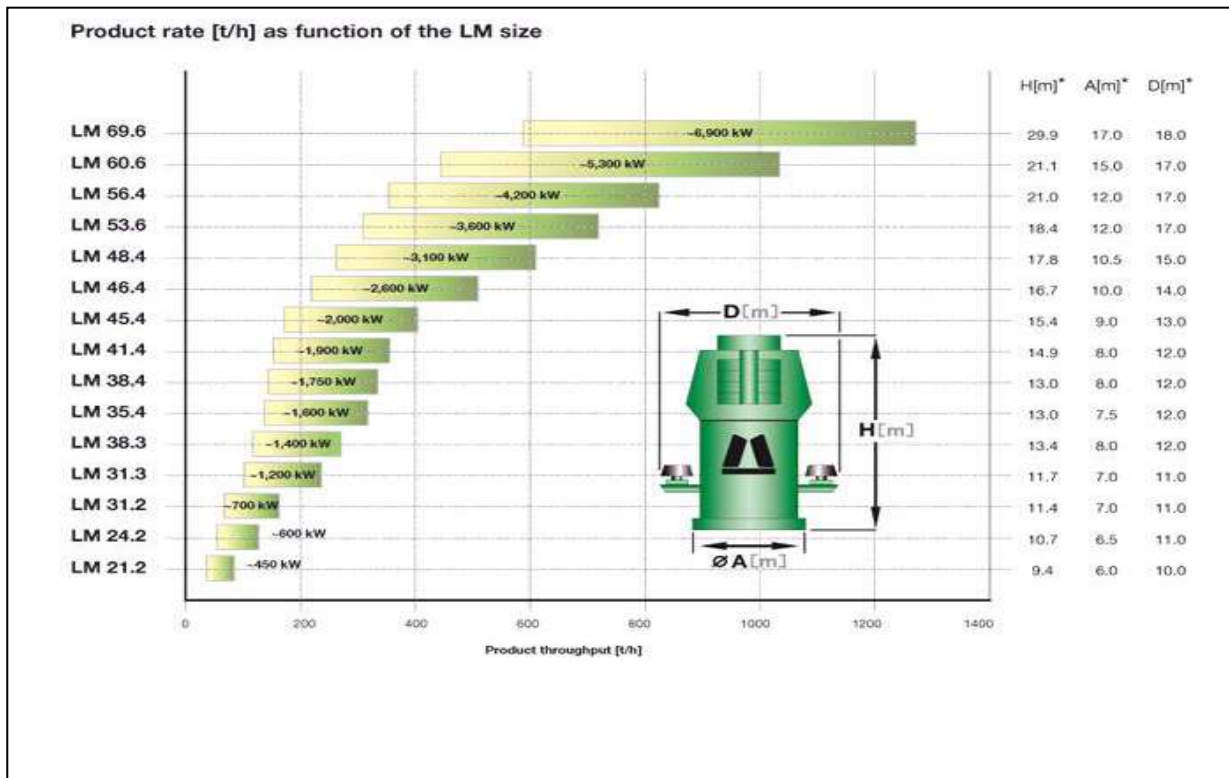


Figura 6.13 - Gráfico para determinar as dimensões desejadas do moinho vertical de rolos em função da produção mássica demandada.
(Loesche, 2011)

A coordenada x na Figura 6.13 indica quais produções mássicas podem ser geradas usando os respectivos moinhos. A largura dos campos é uma medida da distribuição granulométrica permitida. As dimensões H, A e D, por sua vez descrevem a altura dos moinhos com classificador, os diâmetros da base e o espaço total necessário, considerando uma área de serviço (para substituição de peças moagem). A Figura 6.14 mostra o dimensionamento de moinhos da FLS – Smidth e a Tabela 6.5 apresenta suas dimensões.

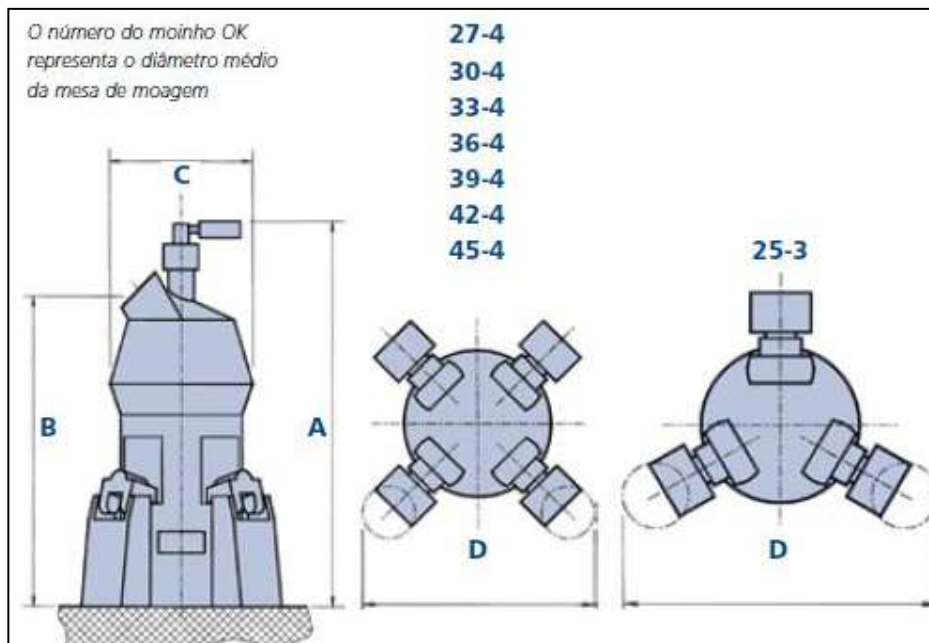


Figura 6.14 - Dimensionamento de um moinho vertical de rolos.
(FLS-Smidth, 2011)

Tabela 6.5 - Dimensões do moinho vertical de rolos
(FLS-Smidth, 2011)

Moinho OK	Tamanho	25-3	27-4	30-4	33-4	36-4	39-4	42-4	45-4
A	m	13,7	13,9	15,5	17,3	19,0	20,6	23,7	26,7
B	m	12,1	12,2	13,5	15,3	16,8	18,4	21,2	23,1
C	m	5,2	6,0	6,7	7,6	8,4	9,2	11,0	12,1
D	m	8,2	7,0	7,8	8,5	9,4	10,2	10,9	11,7

6.4.2 – Rolos de moagem vertical

Os rolos de moagem em um moinho vertical de rolos são montados estaticamente e tensionados hidraulicamente para gerar forças triturantes contra a mesa rotativa. Tais rolos variam bastante de um fabricante para outro. A forma do pneu, o número de rolos e o suporte dos rolos são os tópicos de comparação entre os fornecedores.

O método de dimensionamento de suportes dos rolos e eixos é sensível e relacionado ao risco técnico. Durante a operação, cargas dinâmicas são induzidas e conseqüentemente causam desgaste. Sendo assim, os projetos dos fornecedores devem ser validados com cálculos de estresses mecânicos.

Os corpos destes rolos são feitos de aço fundido ou são de estrutura soldada. No caso de uma estrutura soldada, as soldas devem percorrer todo o caminho. Os rolos devem ser protegidos por um revestimento periférico (pneu) feito de uma única peça ou em segmentos. Para evitar o desgaste maior desses rolos é preciso ter uma vedação entre o eixo do rolo de moagem e o seu eixo (Figura 6.15).



Figura 6.15 - Vedação do rolo
(FLS-Smidht, 2011)

A lubrificação também deve ser induzida pela circulação de óleo para diminuir o desgaste. Sob condições estáveis de operação do moinho, a temperatura dos rolos não deve ser inferior a 80°C. (Lafarge, 2003).

Numa fábrica, deseja-se ter uma mesa de moagem e rolos de longa duração, com pelo menos 1 ano de vida útil de operação confiável e impacto mínimo no desgaste do moinho para isso deve se usar revestimentos nessas peças. Além disso o revestimento dos rolos e das mesas deve ser uma superfície uniforme para garantir a transferência eficiente de forças de moagem para a matéria-prima.

O uso de revestimentos incorretos pode causar uma perda na fiabilidade devido a paradas de moinho para reparação/substituição. Além do que, o desgaste dos elementos de moagem aumenta a retenção do material sobre a mesa e tende a aumentar a potência do moinho projetada além de reduzir a eficiência devido à transmissão não uniforme da energia para as matérias-primas.

6.4.3 - Mesa de moagem do moinho vertical de rolos.

Os fabricantes sugerem o tamanho do diâmetro da mesa, basicamente de acordo com o tamanho do motor e a produção esperada (t/h). O fluxo de ar disponível também é importante por causa dos limites para a velocidade máxima de gás dentro do moinho e a elevação máxima de material possível e recirculação sobre a mesa. Testes em moinhos pilotos são feitos e os resultados extrapolados para moinhos industriais.

A mesa geralmente é feita de aço fundido em uma peça, porém um projeto de duas peças é possível, mas representa riscos operacionais mais elevados devido a tensões dentro da montagem. Em ambos os casos, a análise de tensões é necessária e este cálculo deve levar em conta a força de moagem, bem como a carga térmica. Foi afirmado pelos fornecedores que a tensão máxima é alcançada devido à carga térmica, e não devido à força de moagem. Portanto, há menos estresse esperado na moagem de cimento em comparação com a moagem de escórias e matérias-primas, onde temperaturas de até 650°C são introduzidas (Weichinger, 2003).

A grande maioria dos moinhos verticais possui as mesas em formato de uma taça. Alguns moinhos possuem, sob a mesa, um revestimento anti-térmico para melhorar a proteção do sistema de acionamento. Devido ao formato da mesa e o ponto de aplicação de carga dos rolos de moagem, as mesas têm grande tendência para sofrerem trincas. Os revestimentos da mesa de moagem e dos rolos são do tipo segmentado e, portanto, fáceis de trocar ao apresentarem desgaste. Para moinhos que moem materiais muito abrasivos como escória, o revestimento rígido é um meio interessante e viável de atingir uma alta capacidade do sistema de moagem, otimizando o processo de moagem e economizando custos de reforma.

O revestimento rígido (Figura 6.16) é uma alternativa econômica para a troca de peças desgastadas e é bastante adequado para peças de moagem em ferro fundido de alto cromo. Caso sejam do tipo segmentado, os revestimentos de desgaste poderão ser revestidos de forma rígida várias vezes ao longo do ciclo de vida (FLS-Smidth, 2011).



Figura 6.16 - Revestimento rígido
(FLS-Smidth, 2011)

Na grande maioria dos moinhos, o esforço axial exercido pelos rolos de moagem não são absorvidos pelos rolamentos montados no eixo de acionamento da mesa. Este esforço é absorvido por mancais de deslizamento que, normalmente, são parte integrante do redutor. Para os moinhos de rolos menores, não há a necessidade do uso de redutores com mancais de deslizamento para assentamento da mesa de moagem. O próprio rolamento da mesa de moagem suporta os esforços axiais oriundos da pressão dos rolos de moagem. Neste tamanho de moinhos, é possível o acionamento da mesa mediante o sistema de coroa-sem-fim, embora a eficiência mecânica deste tipo de acionamento seja baixa (Sanchez, 1990).

6.4.4 – Anel de Barragem de mesas de moagem (*Dam Ring*)

O anel de barragem aumenta a retenção de material sobre a mesa. Ele é ajustado durante o tempo de vida útil dos revestimentos da mesa para compensar o efeito do desgaste. O anel de barragem é usado para controlar a profundidade do leito a fim de impactar sobre a eficiência de moagem e a vibração do moinho.

A posição do anel de barragem na mesa afeta a altura necessária, ou seja, um anel de barragem com diâmetro menor criará um leito maior de material sob os rolos do que um da mesma altura colocado num anel com diâmetro maior. A altura do anel de barragem influencia a espessura do material do leito (Figura 6.17). Aumentar a altura do anel de barragem aumenta o tempo de retenção e a potência absorvida. Pode diminuir o nível de vibração, bem como o declive da distribuição de tamanho de partícula. Mas, devido à maior energia específica, um limite na produção pode ser alcançado já que a potência da mesa é limitada.

Uma comparação direta da altura do anel da barragem entre fornecedores não é possível devido aos diferentes projetos e diferentes finuras produzidas. Desenhos de mesas planas normalmente precisam de anéis de barragem maiores do que mesas inclinadas. A altura do anel de barragem é geralmente $< 4\%$ do diâmetro da mesa (Lafarge, 2007).

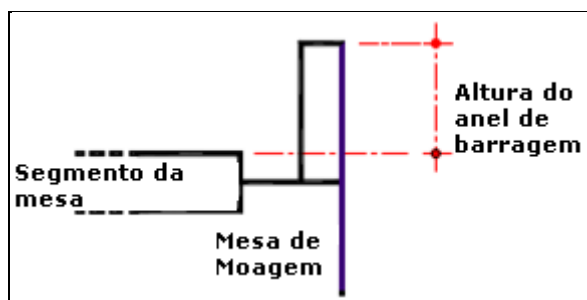


Figura 6.17 - Altura do anel de barragem da mesa de moagem
(Lafarge, 2010)

Na falta de um anel de barragem, pode-se ter um leito com excessiva profundidade, o que acarreta em uma moagem ineficiente e um alto consumo de energia, ou um leito com baixa profundidade, que pode causar vibrações fortes e uma alta circulação externa de carga. O desgaste irregular dos rolos, em algum momento, pode exigir um leito mais profundo do que o normal para evitar vibrações excessivas, que limitarão a possibilidade de otimizar o desempenho do moinho. A profundidade do leito ótima pode ser definida como a menor profundidade em que é possível manter o moinho sem vibrações.

Em uma fábrica da Lafarge na França, em 2003, foi feito um teste de redução da altura do anel de barragem para tentar diminuir o alto consumo de energia do moinho que estava limitando a produção. A altura do anel de barragem que inicialmente estava em 60 mm, foi reduzida primeiramente para 40 mm e depois para 30 mm. Os resultados do teste são demonstrados na Tabela abaixo.

Tabela 6.6 - Resultados do teste de redução da altura do anel
(Lafarge, 2003)

Altura do anel de barragem	mm	60	40	30
Pressão hidráulica	bar	145	127	115
Altura do leito de moagem	mm	75	61	60
Produção do moinho	t/h	140	160	160
Potência do moinho	kW	1485	1285	1200
Consumo específico do moinho	kWh/t	10,6	8,0	7,5

A expressão "pressão hidráulica" origina-se no sistema de transmissão hidráulica de esforços adotados por vários moinhos de rolos que resultarão na pressão operacional de esmagamento ou fragmenta o.

6.4.5 - Anel defletor de mesas de moagem (Nozzle Ring)

O anel defletor   um conjunto de placas tangencialmente inclinadas, bem como placas guias de ar (inclina o radial) para permitir uma pr -classifica o do leito fluidizado (Figura 6.18). Os objetivos do anel defletor são: criar um fluxo de gás de alta velocidade em torno da periferia do moinho e executar uma classifica o preliminar do material que cai sobre a borda da mesa. Um leito fluidizado   criado sobre a área do anel defletor e através do fluxo de gás as partículas grossas caem através dos bicos, as de tamanho médio voltam para a mesa e as partículas mais finas são elevadas para o separador dinâmico.



Figura 6.18 - Anel defletor de mesa de moagens
(Lafarge, 2007)

As velocidades de gás para o anel defletor variam, dependendo da capacidade do sistema de recircula o externo (Gupta, 2007):

25 – 60 m/s para recircula o de 50 – 100% da alimenta o fresca

≥70 m/s com nenhuma recircula o.

Um projeto ótimo do anel defletor produz velocidades apropriadas para o transporte do material, mas não tão altas que aumentem a taxa de desgaste dentro do moinho. A queda de pressão do anel defletor   normalmente 60-70% da queda de pressão total do moinho.

Normalmente   composto de p s com ângulo entre 40-60 , para ajudar na classifica o, juntando o material ao fluxo de gás. O bico também   inclinado 60  para projetar o material de volta para a mesa (Figura 6.19).

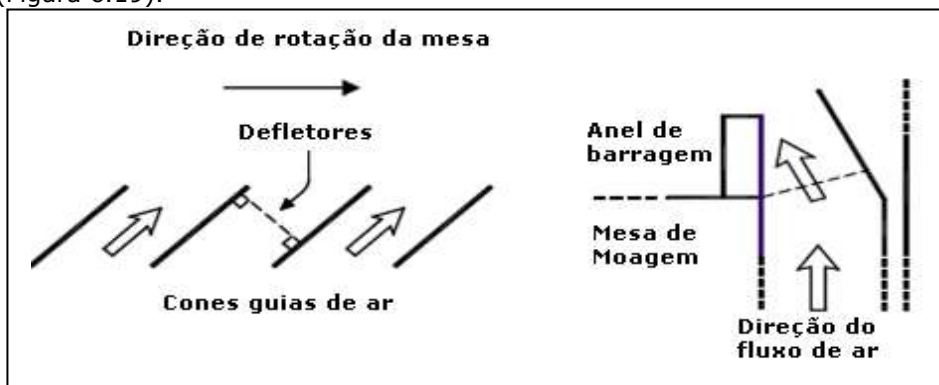


Figura 6.19 - Inclina o do anel defletor
(Lafarge, 2007)

A velocidade do anel defletor e a inclinação das pás do bico influenciam a recirculação externa e interna. O ajuste da área do anel defletor fornece uma alavanca para otimizar a circulação externa (ou minimizar os rejeitos se não tem recirculação externa), que é importante para a produção e o consumo de energia do sistema do moinho. Sistemas de recirculação externa são instalados em moinhos mais modernos com capacidade para 25-100% de alimentos frescos do moinho. Um nível máximo de recirculação externa de 50% é recomendado para manter uma operação estável do moinho. (Lafarge, 2003).

Caso ocorram problemas no anel defletor, acarretando em uma pré-separação insuficiente, pode acontecer a recirculação de material fino, a necessidade de uma velocidade de gás excessivamente alta para evitar altos índices de rejeitos e o bloqueio do anel defletor com pedras. Para limitar o desgaste do eixo de rolos, chapas (Figura 6.20) podem ser instaladas próximas a este setor de anel de ar sendo que, com o anel defletor coberto por placas, a velocidade do gás pode ser adaptada para as necessidades do processo. Outra solução é alterar o ângulo das placas inclinadas (90°).



Figura 6.20 - Instalação de chapas
(Lafarge, 2007)

6.4.6 – Separador ou classificador interno de tamanho de partículas do moinho vertical

O objetivo do separador é o ajustar/regular a finura do produto final. O tamanho do separador pode ser ajustado para a necessidade do processo independentemente do tamanho da mesa do moinho e do acionador. Hoje em dia, todos os fornecedores utilizam separadores de terceira geração sendo que para moinhos verticais de rolos que ainda estejam equipados com um separador estático, uma atualização para um classificador de terceira geração deverá permitir aumentar a produção dentro do intervalo de 10 a 20%.

A parte mais fina do material moído pré-separada no leito fluidizado é soprada para a área de separação por correntes de ar ($\sim 5\text{m/s}$ de velocidade vertical). O ar carregado de pó entra através das hélices de guia para a zona de separação, onde as partículas são aceleradas à velocidade do prato. Através da força centrífuga, partículas grossas caem dentro de um cone e voltam para o centro da mesa enquanto que as partículas mais finas são retiradas através da rotação do prato.

O layout do prato é semelhante para separadores de moinhos de bolas. Alguns dos pratos são oferecidos com lâminas inclinadas (30°) para reduzir a velocidade do disco. A velocidade da corrente de ar radial no disco varia no intervalo comum de 3-4 m/s (Gupta, 2003).

Um mau funcionamento do separador pode causar uma distribuição de fluxo de gás desigual afetando negativamente a distribuição granulométrica do produto final e a eficiência de separação do moinho, resultando em maior bypass do material e maior recirculação interna.

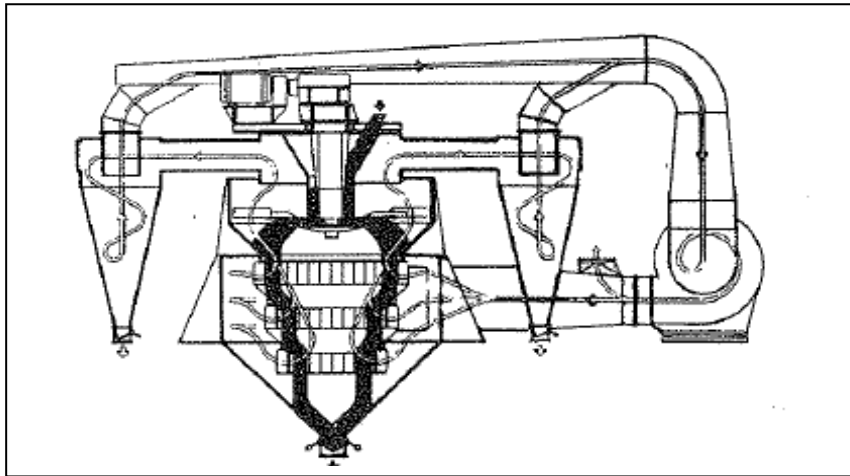


Figura 6.21 - Separador com recirculação externa.
(Sanchez, 1990)

A capacidade de projeto de recirculação externa (Figura 6.21) varia de acordo com o fornecedor entre 50-200%. Como mencionado antes, uma recirculação externa maior diminui a velocidade do anel defletor e, portanto, a perda de pressão no moinho. Os volumes reais variam entre 10 e 100%.

Recirculação externa é essencial para a moagem de escórias. A recirculação externa é normalmente reintroduzida diretamente para o centro da mesa, independentemente da alimentação de material novo úmido e frio para evitar problemas com entupimento.

6.4.7 - Detecção e separação de metais alimentados ao moinho.

A alimentação de material ao moinho necessita ser livre de peças de metais ou peças metálicas para evitar danos aos elementos de moagem. O funcionamento da detecção de metais (magnético e não magnético) deve minimizar ou evitar qualquer interrupção associada para o moinho. Para isso é necessário instalar um separador magnético e um detector de metais.

O separador magnético é montado acima da correia transportadora para remoção de peças grandes. Consiste de um eletroímã suspenso retangular com um sistema de autolimpeza. O sistema não modifica a taxa de transferência de material do circuito, pois apenas separa as peças magnéticas do transportador de carga e o ferro removido geralmente é retirado para uma posição de rejeição ou para uma pilha de rejeição (Figura 6.22).

O detector de metal é um dispositivo eletrônico para pedaços de metais magnéticos e não magnéticos presentes no interior da carga de produção. Detectam alumínio, cobre, aço inoxidável, ferro, etc., mas não indicam a presença de óxidos férricos como a magnetita e a hematita. Alguns sistemas possuem um ímã permanente, que precisa de limpeza periódica para evitar a interrupção do fluxo de materiais e a redução de sua eficiência de separação. A duração da ativação de mudança sobre a entrada deve ser cuidadosamente calculada, testada e controlada regularmente para certificar-se de que as peças metálicas são eliminadas, e para evitar um desvio demasiado longo, que poderia levar a uma falta de material na entrada do moinho e um aumento grande nas vibrações.

O ajuste adequado da sensibilidade de detecção é muito importante para a operação. Uma sensibilidade muito baixa põe em perigo os elementos internos do moinho. Uma sensibilidade muito alta causará alteração desnecessária ao longo da entrada. Um procedimento habitual para definir a sensibilidade consiste em selecionar um objeto metálico que corresponderá à menor peça de metal detectável (p.ex., uma porca colocada na base do leito do material sobre a correia transportadora) e ajustar o dispositivo com apenas a sensibilidade suficiente, enquanto a esteira vazia opera em velocidade normal. Partículas de óxido de ferro ou de escória granulada de alto forno podem ser problemáticas para o correto funcionamento do sistema detector de metais, tornando difícil obter a sensibilidade correta para pedaços de metais, sem falsas detecções. Uma técnica para limitar o efeito mascarador desses materiais consiste em remetê-los na correia transportadora em primeiro lugar para que eles sejam protegidos em certa medida pelo calcário e outros materiais.

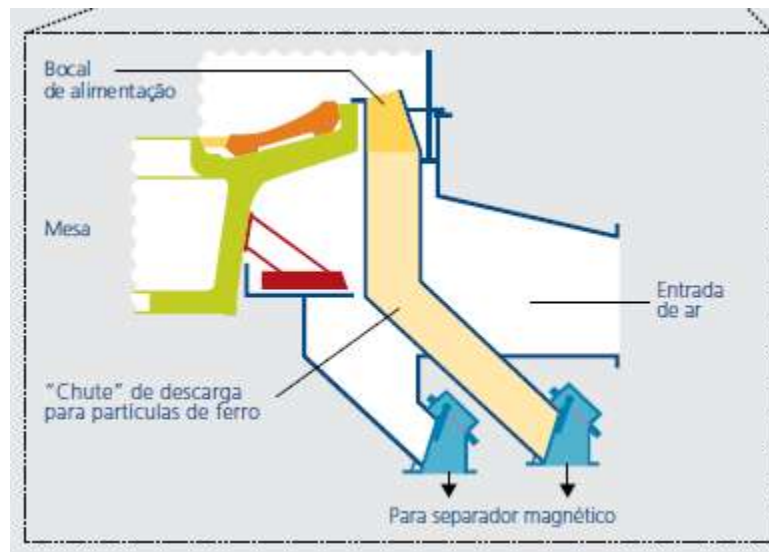


Figura 6.22 - Representação esquemática de um de separador magnético
(FLS-Smidth, 2011)

6.4.8 - Injeção de água

Na maior parte dos casos, a injeção de água é usada para resfriar o gás antes de sair do moinho de cru. Isso é necessário para o tratamento do gás a jusante do moinho e para condicionar os gases. Água também pode ser usada para ajudar a estabilizar o leito de moagem e manter um baixo nível de vibração e geralmente isso é aplicado diretamente para o material em cima da mesa, imediatamente antes de transmiti-la sob os cilindros de moagem. A água tem o efeito de estabilizar o material pulverulento fino.

A adição excessiva de água para a mesa pode resultar em maior desgaste, choque térmico dos elementos de moagem e bloqueio de um ou mais tubos acima do anel defletor.

6.4.9 - Sistema de carregamento hidráulico

O sistema hidráulico é usado para posicionar e tensionar os rolos, de modo a criar a força de trituração adequada contra a mesa rotativa. As vibrações desse tipo de moinho devem estar no nível mais baixo possível, conseqüentemente o sistema de carregamento hidráulico tem que incluir acumuladores, que atuam como amortecedores, para limitar o efeito de fortes impactos entre os rolos e as partículas duras e grossas e para manter a estabilidade do leito do material. Esses acumuladores devem ser posicionados tão próximo quanto possível para os macacos hidráulicos exercerem a maior eficiência. No caso de um projeto com 4 rolos, 2 cilindros opostos estão ligados a um sistema hidráulico. Devido ao princípio da carga hidráulica deste tipo de moinho vertical, é possível operar o moinho com um número reduzido de cilindros (dois em vez de quatro). A saída restante ainda é 70% da produção nominal com 4 rolos. Esta é uma vantagem eficaz quanto à capacidade do moinho.

A pressão hidráulica deve corresponder à carga de material no moinho e normalmente varia de fornecedor para fornecedor por causa das diferentes concepções de aplicação da força e também depende do tamanho e do número de rolos. Valores típicos de operação para taxa de produção nominal (Gupta, 2003):

- o Polysius : 130 – 150 bar
- o Loesche : 80 – 90 bar
- o Pfeiffer : 120 – 150 bar
- o FLS: 110 – 120 bar

Quanto maior o volume de nitrogênio nos acumuladores mais suave é a mola sendo que a suavidade da mola é geralmente expressa tanto como a pressão de nitrogênio como a porcentagem da pressão de trabalho. Normalmente fornecedores recomendam pressão de nitrogênio no intervalo de 50% - 75% da pressão de trabalho.

Uma pressão hidráulica insuficiente para a carga de moinho pode resultar em alta carga circulante e alta perda de pressão com potencial transbordamento do moinho. Já uma excessiva pressão hidráulica para a carga pode resultar em uma diminuição do leito e um aumento de vibração e de desgaste. Uma mola muito dura (baixa pressão nitrogênio) resultará em uma operação mais dura do moinho enquanto que uma mola muito mole (pressão de nitrogênio alta) vai levar a um excesso de amortecimento e movimentação dos rolos hidráulicos, afetando negativamente a eficiência de moagem.

6.5 – Dimensionamento dos parâmetros operacionais de um moinho vertical de rolos

6.5.1 – Alimentação para um moinho vertical de rolos

A alimentação de um moinho vertical de rolos normalmente é composta por uma ampla distribuição de tamanhos de partículas. E o maior tamanho de partículas deve ter no máximo 3 a 4% do diâmetro do rolo. Uma distribuição típica é:

100% passante na peneira de 100 mm, 95% passante na peneira de 60 mm e no máximo, 10% passando na peneira de 1 mm.

O tamanho da partícula na alimentação do moinho e sua distribuição granulométrica atuam sobre o desempenho de um moinho vertical. Um tamanho de partícula e/ou distribuição anormal pode aumentar o nível de vibração e desestabilizar o moinho. Uma alimentação de partículas grossas reduz a taxa de produção do moinho e produz picos periódicos de vibração, aumentando os riscos de danos aos componentes do moinho. Partículas muito finas na alimentação ou na recirculação do separador podem causar o escorregamento dos rolos de moagem afetando a estabilidade do leito de moagem.

6.5.2 - Pressão específica do rolo sobre as partículas

O nível de pressão específica varia por fornecedor e representa a força total aplicada dividida por área projetada dos rolos (equação 6.11). Os números não representam a pressão real no leito de material, nem a pressão máxima atingida normalmente do lado de fora do leito do material. As pressões são muito mais elevadas. A força é composta pelo peso do equipamento (rolo + cabeçote) mais a pressão aplicada pelos cilindros hidráulicos. O peso dos rolos constitui apenas uma pequena parte da força total (10 a 20%).

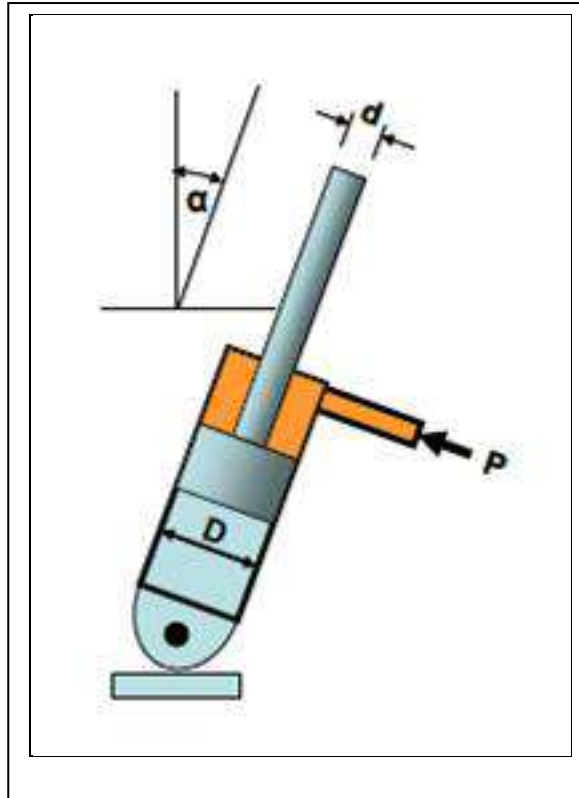


Figura 6.23 - Forças aplicadas sobre as partículas num moinho vertical de rolos
(Lafarge, 2010)

$$\text{Carga estática em kN: } L_s = W g \quad (\text{Eq. 6.8})$$

$$\text{Carga Dinâmica em kN: } L_d = 100 P N \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cos \alpha \quad (\text{Eq. 6.9})$$

$$\text{Força total aplicada em kN: } L_t = L_s + L_d \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Onde: W = peso total do cilindro incluindo transportadoras (t).

P = pressão de moagem (bar).

N = números de cilindros hidráulicos.

D = diâmetro do cilindro.

d = diâmetro do pistão.

α = ângulo de inclinação do cilindro em relação ao eixo vertical.

$$\text{Pressão específica aplicada em kN/m}^2: L_{sl} = \frac{L_s}{A_r} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

onde A_r é a área projetada da superfície do rolo.

Tabela 6.7 - Valores de pressão específica do rolo sobre as partículas em kN/m²
(Lafarge, 2003)

Fabricantes	Loesche	FLS	Polysius	Pfeifer
Nominal	800	1200	600	2000
Dados da planta (Valor min.)	500	1107	751	1818
Dados da planta (Valor max)	808	1196		

O pico de pressão é alcançado onde a abrasão mais elevada é observada em rolos e sobre os revestimentos da mesa. Dependendo do material a ser moído, o desgaste mais elevado é observado principalmente na borda externa ou no mínimo na direção externa do centro do rolo.

O nível de pressão depende de: O material a ser moído; A estabilidade do leito (finura); A espessura do leito (altura do anel de barragem); A velocidade da mesa; As dimensões dos rolos e o ângulo de pinçamento; O desgaste dos elementos de moagem; As medidas para estabilizar o leito (injeção de água e aditivos de moagem).

A potência absorvida no acionador principal aumenta proporcionalmente a pressão aplicada. Portanto o limite de pressão é dado pela potência do moinho. Um limite mais mecânico é dado pelo nível de vibração, que geralmente depende da estabilidade do leito do material. A percentagem de finos aumenta proporcionalmente com a pressão, logo uma pressão específica alta favorece a criação de distribuições planas de tamanho de grãos.

6.5.3 - Velocidade da mesa moedora de um moinho vertical de rolos

A velocidade da mesa em um moinho vertical de rolos é geralmente constante e definida na fase de projeto pelo fornecedor. Durante a operação industrial, possíveis alterações na moabilidade dos materiais são controladas variando a pressão de moagem sendo que essa é normalmente limitada pelo nível máximo permitido de vibração da máquina para evitar danos mecânicos. Uma velocidade maior significa uma baixa pressão e vice-versa.

Como os índices de trabalho HGI ou Bond não são suficientemente representativos das características da moagem em um moinho vertical, um teste de moagem em um moinho-piloto com a finura desejada é usado para determinar a potência absorvida de moagem e a velocidade ótima da mesa.

Uma moagem mais fina requer uma velocidade mais baixa, por isso os moinhos verticais para cimento são mais lentos que os moinhos de matérias-primas. A velocidade normalmente é calculada com a fórmula:

$$N_c = \frac{C}{\sqrt{D}} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

Onde: N_c = Velocidade crítica em rpm.

D = diâmetro da mesa em m.

C = é um fator de velocidade específico para cada projeto de moinho.

O fator de velocidade "C" é definido de acordo com a experiência dos fornecedores e o teste semi industrial. Na Tabela 6.8 a seguir são comparados os valores de C:

Tabela 6.8 - Fator C de velocidade da mesa moedora de um moinho vertical de rolos
(Gupta, 2003)

Fator C	Loesche	FLS	Polysius	Pfeifer
Min	52.1	52.6	Variável	46.4
Max	54.7	52.9	52.4	47.1

Cada moinho, independentemente do seu tamanho, é projetado para uma determinada aceleração na borda da mesa. Isso significa que uma mesa maior tem que girar mais lentamente do que uma menor, para fornecer a mesma aceleração, de acordo com a equação: $D \times V^2(\text{rpm}) = \text{constante}$, onde D é o diâmetro da mesa e V a velocidade.

Assim, quanto menor o diâmetro da mesa, mais rápido o moinho está operando. É preciso ter cuidado porque mesa com velocidade alta pode afetar negativamente a taxa de desgaste e pode fazer um leito um pouco mais difícil para estabilizar.

A Tabela abaixo mostra um quadro com informações sobre as velocidades das mesas dos moinhos de diversos fabricantes.

Tabela 6.9 - Informações sobre diferentes tipos de mesa
(Lafarge, 2007)

		Loesche	FLS	Polysius	Pfeifer
Diâmetro	min (mm)	4600	3600	5260	2500
	max (mm)	5600	4800	5260	4250
Velocidade da borda da mesa	min (m/s)	6.1	5.2	5.1	3.9
	max (m/s)	6.5	6.0	5.1	5.0
Velocidade da pista do rolo	min (m/s)	5.3	4.3	4.4	3.4
	max (m/s)	5.6	4.9	4.4	4.4
Aceleração	min (m/s ²)	14.9	15.1	9.9	11.8
	max (m/s ²)	16.4	15.4	9.9	12.2

Velocidades típicas de alguns fornecedores em relação a velocidades críticas:

Polysius – 81%,

FIS e Loesche – 84%.

Pfeifer - 70%.

6.6.4 - Consumo de energia de um moinho vertical de rolos

A potência do moinho é proporcional à pressão específica, à área projetada dos rolos, à velocidade real dos rolos e a um fator de atrito. A velocidade real do rolo coincide com a velocidade circunferencial da pista. O fator de atrito depende do material a ser moído e o ajuste do moinho incluindo aditivos de moagem, a injeção de água e altura de anel de barragem. O valor pode ser medido através de testes em planta piloto.

A energia para moagem do leito de material consome menos 50% se comparado com um moinho de bolas. Porém essa diferença é menor devido à grande energia consumida pela alta ventilação (3 m³/kg) e devido também à perda de pressão causada por velocidades significativas no anel defletor para criar o leito fluidizado em torno da mesa de moagem e para suportar a alta recirculação interna. Existem algumas intenções para reduzir o circuito interno e favorecer a recirculação externa por transporte mecânico.

Um valor típico para o consumo de energia específica para o acionador do moinho está entre 18 e 25 kWh/t. Já o consumo de ventilação, normalmente é menor que 7 kWh/t.

6.6 - Vantagens do moinho vertical de rolos.

Desde o início da produção industrial do cimento, a moagem final tem ocorrido em moinhos de bolas ou de barras cilíndricas horizontais. Essa situação não mudou durante aproximadamente 150 anos, mesmo com a eficiência dos moinhos de bolas sendo baixa. A necessidade de economizar energia na operação incentivou o emprego dos moinhos verticais, energeticamente mais eficientes do que os moinhos de bolas.

Os moinhos verticais foram usados primeiramente na indústria de cimento nos anos 50 do século passado quando as torres de pré-aquecimento e as ligas de aço altamente resistentes surgiram no cenário tecnológico e destinavam-se a moer a farinha e carvão (Weichinger, 2003).

Na década de 80, o sistema de moagem com alta pressão foi introduzido pela empresa KHD, seguida por outros fornecedores, empregando rolos compressores. Com o passar do tempo, constataram que esse tipo de moinho apresentava uma velocidade de desgaste muito grande, além de problemas com altas velocidades de carga circulante. E a solução implantada foi adotar esse tipo de equipamento numa etapa de pré-moagem antes da cominuição num moinho de bolas. Em seguida, iniciou-se o uso de moinhos verticais para matérias-primas. Desde então, apesar do desgaste elevado, além da finura conseguida e a distribuição de tamanho de partículas não serem adequadas para a maioria de aplicações foi possível efetuar os acertos necessários para a utilização na moagem final (Weichinger, 2003).

No Brasil quase todas as fábricas de cimento Portland usam moinho de bolas para a cominuição da farinha crua e do cimento, porém todos os principais grupos cimenteiros já têm projetos de modernização que incluem a instalação de moinhos verticais. Segundo Isidro Sanchez (1990), o consumo de energia para a moagem é relativamente baixo, mas o consumo de energia para o transporte pneumático do produto fino é alto. O consumo total de energia é de 10 a 20% mais baixo do que no moinho de bolas, dependendo da moabilidade e do teor de umidade do material no cru.

Para reduzir o consumo de energia do transporte pneumático do pó produzido, alguns fabricantes têm optado pela instalação de um elevador de caneca para retirar uma parte do material da mesa, que corresponde a quase 50% do material alimentado. Segundo Marko Silva (2007), os moinhos verticais requerem elevadas vazões de gás para o transporte interno do material, de modo que o consumo específico de energia do seu ventilador situa-se próximo do consumo de energia do moinho.

Os moinhos verticais de cimento podem moer diversos tipos diferentes de produtos (escória misturada e cimento Portland puro CPI) mudando rapidamente entre eles. Segundo experiências nas plantas da Lafarge no Japão e na Grécia e os resultados do laboratório do Centro Técnico da Lafarge, os moinhos verticais de rolos inclinados podem produzir cimentos Portland com características de desempenho similares aos moídos em moinhos convencionais de bolas (Tabela 6.10). A Tabela 6.11 apresenta um quadro comparativo com as vantagens e desvantagens dos dois tipos de moinhos.

Tabela 6.10 – Ensaios de desempenho de cimento Portland tipo CP I em moinhos de bolas e vertical com rolos inclinados
(Lafarge, 2003)

	Moinho de Bolas	Moinho Vertical de Rolos Inclinados
Ensaio de pega do cimento		
% água	27	27
Tempo inicial de pega (min)	180	142
Tempo final de pega (min)	223	193
Ensaio de Resistência mecânica		
1 dia (MPa)	12,9	14,7
2 dias (MPa)	23,5	24,6
7 dias (MPa)	44,8	43,6
28 dias (MPa)	55,1	56,4

Tabela 6.11 - Comparação entre moinho de bolas e moinho vertical
(Sanchez, 1990; Marco Silva, 2007)

VANTAGENS DO MOINHO VERTICAL	DESVANTAGENS DO MOINHO VERTICAL
<ul style="list-style-type: none"> - adequado para moer sólidos moles ou meio duros; - aceita alimentação com tamanho de partículas até 100 mm; - apresenta tempos de residência reduzidos; - aceita elevada vazão de gases; - elevada capacidade de secagem para sólidos com até 20% de umidade; - apresenta baixo consumo específico de energia em casos de alta umidade e maior capacidade de secagem e alimentação com partículas de 50 a 100 mm; - partículas de grande tamanho na alimentação e alto teor de umidade devem ser moídos, usando gases frios - baixo consumo de energia elétrica - baixo nível de ruídos (poluição sonora); - corresponde a uma instalação compacta (de menor porte); - demanda um controle simples da alimentação, baseado na redução de pressão através do leito de material. 	<ul style="list-style-type: none"> - é muito vulnerável/inadequado para materiais abrasivos ou ricos em sílica, que causam alto desgaste nos rolos e na mesa moedora; - demanda manutenção mais apurada que em moinho de bolas; - é vulnerável a uma alimentação de matérias-primas com diferentes valores de moabilidades - demanda pessoal de manutenção bem treinado; - sua produtividade varia com o desgaste do revestimento dos rolos e da mesa; - é vulnerável à entrada de grandes quantidades de "ar falso" através do alimentador, pois pode gerar um aumento do despoeiramento diminuindo a eficiência de moagem.
VANTAGENS DO MOINHO DE BOLAS	DESVANTAGENS DO MOINHO DE BOLAS
<p>Mais adequado para materiais com moabilidade variável. Manutenção simples. Menos sensível a materiais abrasivos. Máquina completamente confiável</p>	<p>Consumo específico de energia elevado. Elevado nível de barulho. Baixa capacidade de secagem. Elevado tempo de resposta. Tamanho máximo de alimentação 30mm Sistema de controle complicado Requer mais espaço que o moinho vertical.</p>

6.7 – Características construtivas e de desempenho de moinhos de rolos inclinados comerciais

6.7.1 – Moinho vertical de rolos inclinados QUADROPOL da Polysius

A nova geração de moinho de rolos da Polysius tem como principais características de desempenho o alto rendimento e a potência de acionamento combinado com um equipamento que requer um espaço pequeno para construção e com alta capacidade (Figura 6.24).

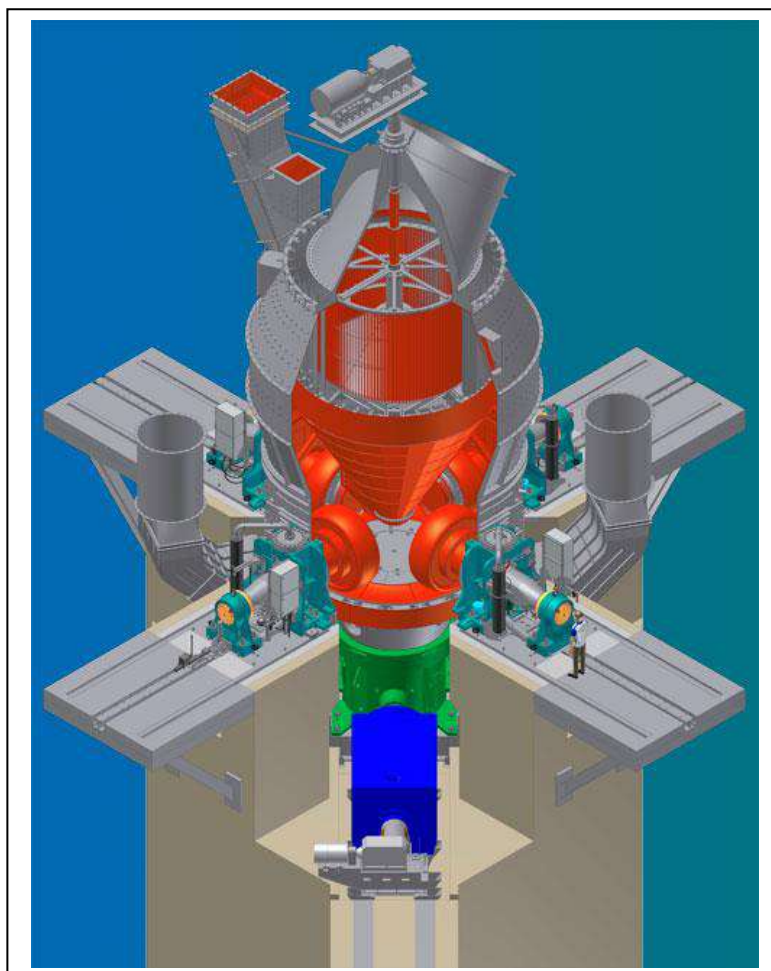


Figura 6.24 - QUADROPOL
(Polysius, 2011)

O QUADROPOL possui 4 cilindros moedores, cujos conjuntos de rolamento são protegidos da poeira e das altas temperaturas, tornando o moinho particularmente apropriado para a operação contínua. A geometria convexa do rolo de moagem tem uma excelente resistência ao desgaste proeminente. O desenho simétrico dos rolos permite que as peças de desgaste tenham seu uso otimizado.

O moinho da Polysius é projetado para potências de até e acima de 12 MW garantindo a alta capacidade da planta. Com a sua comutação automática de 4 a 2 rolos em operação, o moinho fornece a flexibilidade elevada de ajuste dentro de uma escala de aproximadamente 30 a 100% para a adaptação às mudanças na exigência do cru.

Além disso, o moinho tem um conceito fácil de manutenção. Por exemplo, os dois rolos de moagem opostos podem ser balanceados hidráulicamente fora da carcaça do moinho e as duas unidades do rolo restantes no moinho continuam, então, o processo de moagem. Este moinho da Polysius cumpre assim os pré-requisitos para "a operação em linha" na fábrica de cimento com um fluxo de material praticamente ininterrupto do moinho de cru ao forno.

A alta capacidade da instalação de moagem tem dois resultados positivos: permite o uso de um moinho menor e, desde que a fábrica esteja equipada com matérias-primas adequadas e sistemas de análise da farinha crua, permite que os silos de mistura e armazenamento sejam rebaixados.

O moinho de rolos QUADROPOL integra três operações de trabalho em uma única unidade: secagem, moagem e separação. O material moído se espalha sobre a borda da mesa de moagem e é arrastado pela corrente de gás quente oriunda do anel defletor. O fluxo de gás seca o material e o carrega totalmente ou em parte, ao separador de alta eficiência.

A fração não arrastada de pó pelo fluxo de gás quente é retornada ao moinho através do circuito externo com elevador de canecas. O material fino é carregado no fluxo de gás e coletado nos ciclones e/ou no filtro de coleta de pó.

Mesmo o gás de exaustão em baixas temperaturas pode ser usado para o processo combinado de moagem e secagem, permitindo a secagem sem problemas de matérias-primas com índices de umidade de até 20%.

A Figura 6.25 apresenta o interior de um moinho vertical de rolos QUADROPOL.



Figura 6.25 - Interior de um moinho vertical de rolos QUADROPOL
(Polysius, 2011)

6.7.2 – Moinho vertical de rolos inclinados Gebr. Pfeifer

Para a Pfeifer, as indústrias de cimento buscam maiores capacidades de sistemas de moagem individuais. Sendo assim a capacidade do moinho, bem como a otimização dos conceitos de manutenção estão ganhando ainda mais importância na hora de se escolher um moinho. O moinho vertical de rolos MVR Gebr. Pfeiffer para a moagem de matéria prima para cimento, clínquer ou aditivos tem uma capacidade instalada de moagem de até 12 mil kW. O desenho modular do moinho com 4 a 6 rolos permite manter o funcionamento mesmo em caso de falha de um módulo de rolo. Isso porque o moinho tem um sistema de até seis unidades de disco de igual tração na ordem de grandeza de 2.000 kW cada. Com isso este moinho também pode ser operado durante a manutenção de um módulo. Isto irá reduzir significativamente o tempo de paradas não planejadas, mesmo em caso de falha de componentes principais.

O moinho de rolo MVR Gebr. Pfeiffer apresenta (Figura 6.26)

- De 4 a 6 rolos de moagem com geometria de peças cilíndricas
- Mesa plana de moagem cujo diâmetro externo em mm resulta no nome do moinho
- Canal condutor de gás com um anel impulsor e separador.

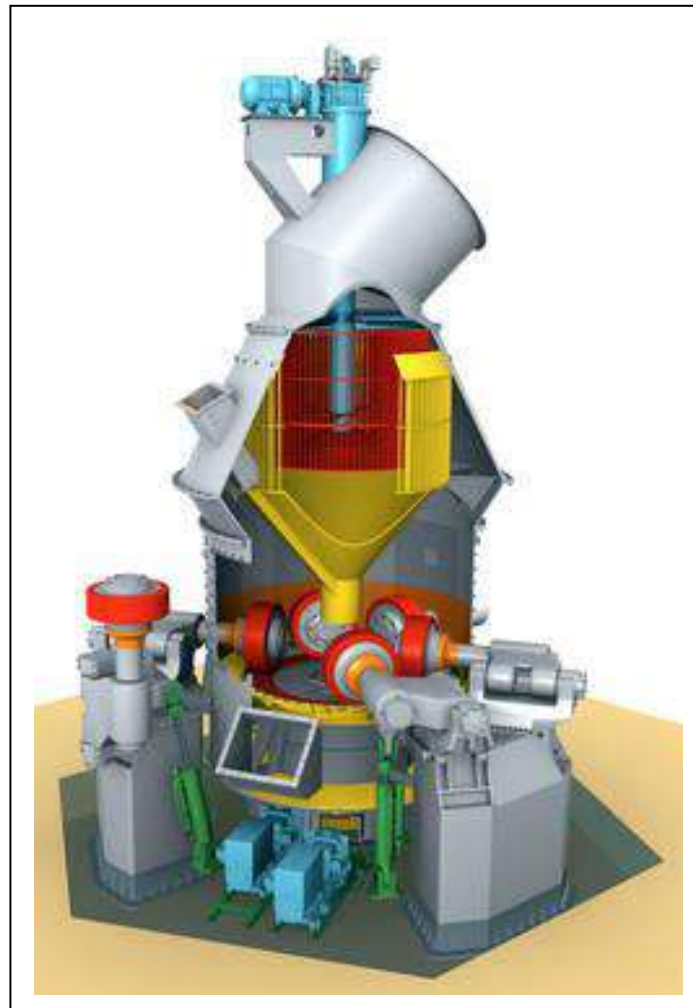


Figura 6.26 - Moinho MVR da Gebr. Pfeiffer
(Gebr. Pfeiffer, 2011)

Um módulo consiste em um rolo cilíndrico blindado, no eixo de rotação, no apoio de braço, no suporte assim como na distribuição da força hidráulica. Com a geometria da mesa plana de moagem, através desta suspensão de rolos é possível atingir uma abertura de moagem paralela entre o rolo e a mesa de moagem, o qual tem uma influência positiva no caso de rolos guiados, na estabilidade do movimento e na energia consumida no leito de moagem. Dois módulos de rolos vizinhos estão conectados a fundação mediante suportes duplos. Este conceito amplia as distâncias entre os suportes, os quais favorecem a acessibilidade geral e o planejamento das instalações em relação aos condutores de gás quente a favor da circulação de material externo assim como das unidades de energia auxiliar.

- Uma planta produz com o moinho vertical de rolos 1800 da Gebr, Pfeifer cerca de 15 t/h de ligante com um teor de clínquer de cimento de cerca de 60% e uma superfície específica de 6.000 cm²/g.

- Para a secagem e moagem da matéria-prima de cimento, um MVR-R 3750 opera com uma propulsão principal do moinho de 1600 kW. O rendimento dependendo da matéria-prima utilizada é de 130 t/h até 170 t/h. Com um tempo de funcionamento até o momento de 6.000 h de serviço, a taxa de desgaste específica das peças de desgaste, da mesa e dos rolos é de 1,3 g/t.

Um moinho vertical de rolos da Gebr. Pfeifer pode moer misturas de cimento de diferentes qualidades com um teor de clínquer de até 90% e um teor de escória de até 65% na produção de cimento com graus de finura de 4000 - 4800 cm²/g. Com um MultiDrive, este moinho vem com 6 unidades individuais, cada uma de 1920 kW. Este conceito de condução inovador terá uma potência disponível total de 11.500 kW, o que é impossível de ser implementado com sistemas de acionamento convencionais de moinhos de rolo vertical. As unidades individuais serão sincronizadas por conversores de frequência, que também irão permitir que a velocidade seja adaptada às qualidades de produtos.

6.7.3 – Moinho vertical de rolos inclinados Loesche.

A moagem de clínquer e escória granulada de alto forno em moinhos verticais de rolos é uma tecnologia introduzida pela Loesche, a qual destaca as seguintes características e vantagens tecnológicas dos seus moinhos de cru:

- Baixo consumo de energia específica.
- Resposta rápida às flutuações da qualidade das matérias-primas.
- Rápido reajuste para diferentes qualidades do produto.
- Uso de gases de exaustão do forno para a secagem interna e meio de transporte para o produto final.
- Baixa perda de pressão.
- Mínima emissão sonora.

As figuras 6.27 e 6.28 apresentam uma vista externa do moinho vertical de rolos da Loesche e a mesa moedora do moinho respectivamente.

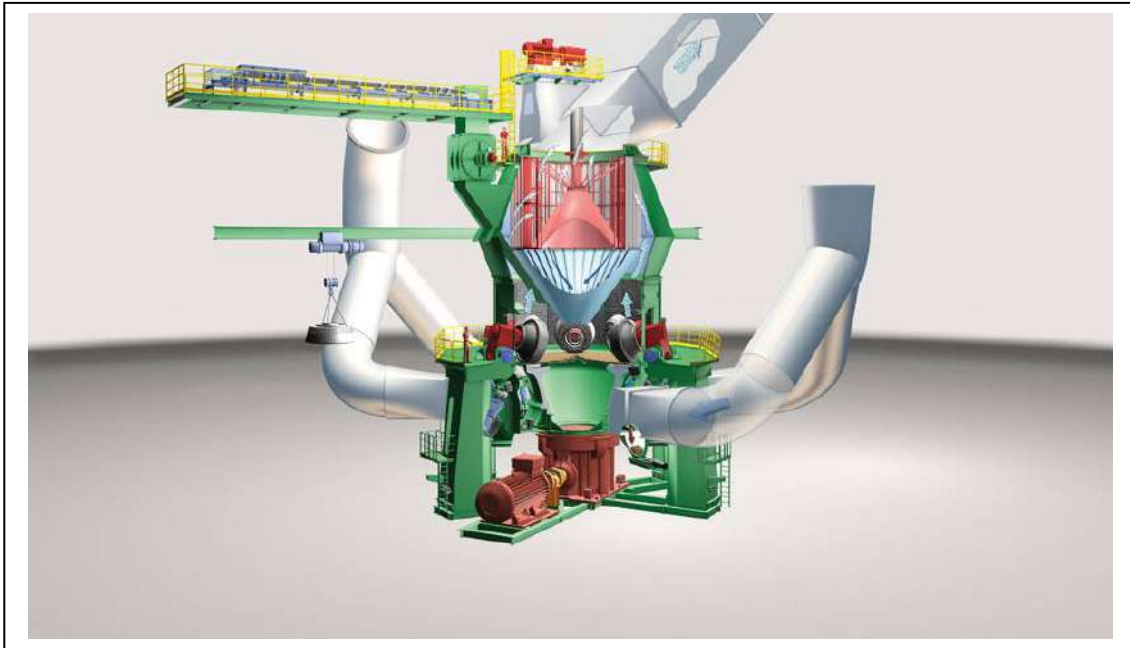


Figura 6.27 - Moinho vertical de rolos.
(Loesche, 2011)



Figura 6.28 - Mesa de moagem de um moinho vertical de rolos inclinados
(Loesche, 2011)

6.8 – Etapas genéricas de seleção e dimensionamento de um moinho para indústrias cimenteiras

O procedimento usual para o cálculo de moinhos destinado a indústrias cimenteiras incorpora a realização prévia de ensaios laboratoriais de moagem, aplicando seus resultados a equações e fórmulas empíricas desenvolvidas por engenheiros de processo e de projeto desses equipamentos, e que resultaram, também, dos dados da sua operação industrial (Sanchez, 1990).

As possíveis etapas genéricas para selecionar e dimensionar moinhos industriais para indústrias de cimentos incluem as seguintes atividades de projeto (algumas aplicáveis a outras tecnologias):

- 1º - Executar ensaios analíticos para obter dados das propriedades dos sólidos, a saber: dureza, moabilidade, porosidade, umidade, densidade, massa específica e composição química e mineralógica;
- 2º - Executar ensaios analíticos complementares sobre as amostras das matérias-primas, clínquer e adições finais referentes a superfície específica, quantidade de gesso, comportamento da pega, resistência do cimento, faixa de tamanho de partículas necessária para tratamento posterior.
- 3º - Reunir dados descritivos e tecnológicos sobre os possíveis tipos de moinhos e respectivos sistemas de moagem, separação e recuperação de partículas e instalações complementares tais como: corpos moedores e mecanismos de cominuição, capacidade e dimensões do moinho, geometria da carcaça e dos internos, equipamentos de transporte das matérias-primas e produtos, e demandas de utilidades (energia elétrica, ar comprimido, sistemas de aquecimento/resfriamento, lubrificação, etc.).
- 4º - Selecionar e dimensionar o modelo cabível.

6.8.1 - Etapas do dimensionamento de um moinho de bolas para fábricas de cimentos Portland

Os procedimentos delineados abaixo dependem do fornecimento de Tabelas, gráficos, equações e fórmulas de cálculos dos fabricantes dos tipos e modelos visados:

- 1º - Definir os dispositivos de alimentação e descarga do moinho, o número de câmaras, de arraste de partículas e a tiragem do ar;
- 2º - Aplicar o valor médio (ou típico) de moabilidade do ensaio laboratorial correspondente na equação de Bond (Eq. 5.2) (incorporando os fatores de correção associados) para calcular o consumo específico de energia do moinho para um determinado sólido;
- 3º - Através de equações ou fórmulas empíricas esse valor resultante da escala de bancada pode ser convertido para uso no dimensionamento de moinhos industriais;
- 4º - Usar equações e dados Tabelados fornecidos pelos fabricantes, ou em literatura especializada, para associar o consumo específico de energia de moagem para um determinado sólido com o diâmetro nominal para o moinho selecionado.
- 5º - Calcular o comprimento do moinho através dos dados das relações L/D fornecidas pelos fabricantes do equipamento ou através da literatura especializada.
- 6º - Calcular a velocidade crítica do moinho (através da equação 5.5) e sua velocidade de operação.
- 7º - Selecionar o tipo de revestimento interno (suspensão ou classificação) conforme o número de câmaras do moinho e os tipos de grelhas.
- 8º - Calcular os tamanhos nominais e a distribuição dos corpos moedores ao longo do moinho para o produto desejado e o tipo de revestimento escolhido e, também, as características do moinho.
- 9º - Selecionar o separador de partículas, construir curvas de separação e recuperação, e calcular a carga circulante.
- 10º - Definir e calcular a velocidade de alimentação dos sólidos ao moinho, seu grau de enchimento, aditivos de moagem, temperatura interna para operar o moinho.

6.8.2 - Etapas do dimensionamento de um moinho vertical de rolos para indústrias cimenteiras

Os procedimentos delineados abaixo para moinhos verticais de rolos também dependem do fornecimento de Tabelas, gráficos, equações e fórmulas de cálculos dos respectivos fabricantes:

1º - Selecionar o modelo e suas respectivas capacidades de produção compatíveis com a produção fabril desejada e a demanda de energia através de dados Tabelados fornecidos pelos fabricantes. Um exemplo é a Tabela 5.14 que apresenta as dimensões para um moinho vertical de rolos em função da produção mássica desejada.

2º - Determinar a quantidade e as dimensões dos rolos de acordo com o rendimento desejado, a moabilidade, a distribuição granulométrica e a umidade dos materiais a serem moídos.

3º - Determinar a capacidade e dimensões do separador interno e a possibilidade de colocar um sistema adicional para separação externa.

4º - Estabelecer a pressão hidráulica do sistema de carregamento sobre os rolos de prensagem.

5º - Calcular a velocidade rotacional da mesa moedora, a velocidade de alimentação dos sólidos aos moinhos, a altura ideal do anel de barragem, a velocidade do gás no anel defletor, a pressão específica de moagem sobre o material a ser moído.

6.9 – Constatações do Capítulo 6

1ª – No moinho vertical de rolos, o consumo de energia para a moagem é relativamente baixo, mas o consumo de energia para o transporte pneumático do produto fino é alto.

2ª – O consumo total de energia num moinho vertical de rolos é de 10 a 20% mais baixo do que no moinho de bolas, dependendo da moabilidade e do teor de umidade do material no cru.

3ª – O tamanho de um moinho cilíndrico ou tubular é expresso pelas dimensões do comprimento e do diâmetro. De uma forma geral, o diâmetro tem um valor padronizado pelos fabricantes enquanto que o comprimento varia de acordo com a aplicação para qual o moinho vai ser fabricado.

4ª – O projeto de um moinho cilíndrico de bolas inclui definir o número de câmaras de moagem, selecionar a calha de alimentação, sua carcaça, revestimento interno, portas de acesso, injeção de ar, grelhas de separação de cargas e bolas, diafragmas e sistemas de resfriamento e descarga do produto.

5ª – Os moinhos de bolas possibilitam secar o material moído e são associados a separadores externos para reciclar o material grosso, ao passo que o moinho vertical rolos executa 3 (três) operações num único equipamento: secagem, moagem e separação.

6ª – Os projetos de moinhos de cru e moinhos de cimento diferem devido às propriedades do material de alimentação e as diferenças de finura.

7ª – Os fornecedores oferecem as mesmas tecnologias de separação para moinhos verticais de rolos de cru e de cimento, com diferentes tamanhos de separadores, dependendo dos requisitos de projeto.

8ª – Os principais componentes ou subconjuntos de um moinho vertical de rolos são: carcaça, rolos moedores, mesa de moagem, sistema de acionamento, sistema de carregamento hidráulico, anel defletor (*Nozzle ring*), anel de barragem (*Dam ring*), sistema de injeção de água e separador de frações de sólidos.

9ª – A alimentação de material do moinho necessita ser livre de peças metálicas para evitar danos aos elementos de moagem, sendo necessário instalar um separador magnético e um detector de metais.

10ª - O sistema hidráulico é usado para posicionar e tensionar os rolos, de modo a criar a força de trituração adequada contra a mesa rotativa. As vibrações do moinho vertical de rolos devem ser mínimas e o sistema de carregamento hidráulico tem que incluir acumuladores, que atuam como amortecedores, para limitar o efeito de fortes impactos entre os rolos e as partículas duras e grossas e para manter a estabilidade do leito do material.

11ª - A desvantagem do moinho vertical de rolos é que esses equipamentos são mais suscetíveis a gerar problemas com a alimentação de partículas finas e/ou com diferentes moabilidades.

12ª - A alimentação de um moinho vertical de rolos normalmente é composta por uma ampla distribuição de tamanhos de partículas. E o maior tamanho de partículas deve ter no máximo 3 a 4% do diâmetro do rolo.

13ª - Para reduzir o consumo de energia do transporte pneumático do pó produzido, alguns fabricantes têm optado pela instalação de um elevador de caneca para retirar uma parte do material da mesa, que corresponde a quase 50% do material alimentado.

14ª - Segundo experiências nas plantas da Lafarge no Japão e na Grécia e os resultados do laboratório do Centro Técnico da Lafarge, os moinhos verticais de rolos inclinados podem produzir cimentos Portland com características de desempenho similares aos moídos em moinhos convencionais de bolas.

15ª - O procedimento usual para o cálculo de moinhos destinado a indústrias cimenteiras incorpora a realização prévia de ensaios laboratoriais de moagem, aplicando seus resultados a equações e fórmulas empíricas desenvolvidas por engenheiros de processo e de projeto desses equipamentos, e que resultaram, também, dos dados da sua operação industrial.

16ª - As possíveis etapas genéricas para selecionar e dimensionar moinhos industriais para indústrias de cimentos incluem:

1º - Executar ensaios analíticos para obter dados das propriedades dos sólidos, a saber: dureza, moabilidade, porosidade, umidade, densidade, massa específica e composição química e mineralógica;

2º - Executar ensaios analíticos complementares sobre as amostras das matérias-primas, clínquer e adições finais referentes a superfície específica, quantidade de gesso, comportamento da pega, resistência do cimento, faixa de tamanho de partículas necessária para tratamento posterior.

3º - Reunir dados descritivos e tecnológicos sobre os possíveis tipos de moinhos e respectivos sistemas de moagem, separação e recuperação de partículas e instalações complementares tais como: corpos moedores e mecanismos de cominuição, capacidade e dimensões do moinho, geometria da carcaça e dos internos, equipamentos de transporte das matérias-primas e produtos, e demandas de utilidades (energia elétrica, ar comprimido, sistemas de aquecimento/resfriamento, lubrificação, etc.).

4º - Selecionar e dimensionar o modelo cabível.

17ª - Diversas fórmulas têm sido utilizadas no dimensionamento de moinhos tubulares ou cilíndricos baseadas no consumo energético da moagem. Dessas, a mais utilizada e de uso amplamente difundido no mundo todo é a baseada na Lei de Bond do consumo de energia. O sucesso de dimensionamento de moinhos de acordo com a Lei de Bond é devido ao fato de dar resultados muito próximos do real nas condições normais de operação

6.10 – Referências do Capítulo 6

BERALDO, J. L. - **Moagem de minérios em moinhos tubulares** - Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1987.

FLS-SMIDTH - **Moinho Vertical de Rolos OK** - Catálogo, FLS-Smidth - Disponível em <www.flsmidth.com>. Acessado em 21 de dezembro de 2011.

GEBR. PFEIFER - **The new PFEIFFER roller mill MVR: reliable grinding technology for high throughput rates** - Disponível em <www.gpse.de/home/die-neue-pfeiffer-mvr-walzenschuesse-lmuehle.html>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

GUPTA, D.; BRANDT, B.; STOIBER, W. - **Technical Agenda Vertical Raw Mill, Lafarge Cement**- Diretoria de Performance, Lafarge S.A., França, 2007.

LAFARGE - **Sistema de Moagem de Crus** - Curso de Certificação para Operador de Campo em arquivo MS-PowerPoint, Lafarge S.A, América do Norte, 2008.

LAFARGE - **Sistema de Moagem final** - Curso de Certificação para Operador de Campo, Lafarge S.A, América do Norte, 2005.

LOESCHE - **Loesche technological features for your success, Loesche** - Disponível em <www.loesche.com/en/home/products/dry-grinding-plants/cement-raw-materials/>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

LOESCHE - **Cement and blast furnace slag - Plant Sizes** - Loesche - Disponível em <www.loesche.com/en/home/products/dry-grinding-plants/cement-und-blast-furnace-slag/cement-und-blast-furnance-slag.html>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

PAXTON C.; DENIZEAU, J. - **Cement Process Engineering Vade-Mecum** - Lafarge S.A. França, 2010.

POLYSIUS - **Quadropol Roller Mill** - Catálogo, Polysius. Disponível em <www.polysius.com/en/cement/raw-material-preparation/grindingdrying>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

POLYSIUS - **Polysius Roller Mills For grinding** - Catálogo, Polysius. Disponível em <www.polysius.com/en/cement/raw-material-preparation/grindingdrying/>. Acessado em 20 de dezembro de 2011.

ROWLAND, C.A.; KJOS, D.M. **Rod and ball mills, Mineral Processing Plant Design** (Mular e Bapphu, Eds.), AIME, Nova York, 1974.

SÁNCHEZ, L.C.C.; MATSUSHITA, KOJI, PONS, F.C. - **Moagem e Moinhos** - FILK e S.A. Indústrias Votorantim, São Paulo, 1990.

SILVA, M. C. C. - **Relações entre microestrutura, composição, resistência à ruptura e moabilidade de clínques de cimento Portland** - Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - PEMM, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia - COPPE, - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WEICHINGER, M.; DAWES, J.; DESCHARMES C - **Technical Agenda Vertical CementMill**, Diretoria de Performance, Lafarge S.A., França, 2003.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.

1ª - O desafio permanente das fábricas de cimento Portland consiste em adotar rotas tecnológicas sustentáveis perante as crises energéticas e aumentar da sua produtividade.

2ª - Para reduzir o gasto com combustíveis naturais, as indústrias cimenteiras adotaram o coprocessamento de resíduos industriais e urbanos, resolvendo, também, um problema da destinação de substâncias perigosas ou danosas ao meio ambiente, pois o forno de clínquerização destrói totalmente vários rejeitos orgânicos e incorpora as cinzas de natureza inorgânica no clínquer.

3ª - Britadores e moinhos apresentam baixo rendimento em relação ao consumo de energia para sua operação e induzem seus fabricantes a desenvolverem novas concepções e tecnologias de fragmentação.

4ª - O desempenho de um moinho é caracterizado pelo seu consumo de energia.

5ª - Sendo desconhecida a existência de algum tipo de ensaio laboratorial específico para as finalidades de moagem com rolos ao invés de bolas, é possível adotar em outros moinhos industriais os valores obtidos nos procedimentos preconizados por Bond e Hardgrove para indicar a moabilidade.

6ª - Entretanto, existe no mercado um moinho laboratorial com um rolo vertical numa pequena cuba similar a um Moinho Raymond, mas, aparentemente, inexistente um procedimento padronizado para embasar o projeto deste tipo de moinho vertical de rolos, que seja aplicável aos sólidos naturais e sintéticos.

7ª - A moagem de farinha, combustível e cimento consome 30 a 40% da energia total de uma fábrica.

8ª - O moinho de bolas é o mais usado, porém, vem sendo substituído pelo moinho vertical de rolos.

9ª - A matéria-prima que mais influencia a moabilidade da farinha é o calcário.

10ª - O clínquer é o componente que mais influencia no processo de cominuição do cimento Portland.

11ª - A etapa de clínquerização (incluindo o resfriamento) é a etapa do processo que mais influencia no consumo de energia da moagem de cimento por ser decisiva na formação do clínquer.

12ª - A energia gasta na moagem das partículas é uma parcela pequena da energia total consumida, pois, no caso do moinho de bolas, parte da potência é utilizada para erguer o material a ser moído e a carga moedora e outra parte, para manter o equipamento girando.

13ª - O consumo de energia dos moinhos de bolas é relativamente alto, pois serve para girar e levantar a carga de bolas, e parte dessa energia é desperdiçada com o choque entre esses corpos moedores, implicando no aproveitamento de cerca de 30% da energia total para a fragmentação, e resulta um desperdício de 70% do total.

14ª - Os mecanismos de cominuição presentes num moinho de bolas podem ser isolados ou associados e dependem de ações fraturantes oriundas de impacto, compressão e abrasão.

15ª - O mecanismo de cominuição num moinho vertical de rolos baseia-se na força centrífuga e na ação de compressão que os corpos moedores exercem contra as partículas finas de sólidos sobre uma mesa moedora e/ou um anel ou cuba de retenção e esmagamento.

16ª - Os moinhos de bolas secam o material moído para separação externa e reciclagem do material grosso, e o moinho vertical de rolos executa três operações: secagem, moagem e separação.

17ª - A experiência tecnológica acumulada pela Lafarge revela que os moinhos verticais de rolos inclinados podem produzir cimentos Portland com características de desempenho similares aos obtidos em moinhos convencionais de bolas.

18ª - O procedimento usual para o cálculo de moinhos destinado a indústrias cimenteiras incorpora a realização prévia de ensaios laboratoriais de moagem, aplicando seus resultados a equações e fórmulas empíricas desenvolvidas por engenheiros de processo e de projeto desses equipamentos, e que resultaram, também, dos dados da sua operação industrial.