

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. MINÉRIO DE FERRO

O minério de ferro é o componente principal da produção mundial de ferro e aço, sendo que basicamente todo o minério de ferro produzido no mundo é consumido na fabricação de aço (>97%). O remanescente é destinado às indústrias de cimento, química, etc.<sup>(6)</sup>

A mineração de ferro vem experimentando uma expansão substancial nos últimos anos, fruto do consumo de aço nos países asiáticos, em particular na China.

Inúmeros minerais têm ferro como componente de interesse, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NH}_2\text{O}$ ), goethita ( $\text{FeO}/\text{OH}$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). Os principais depósitos viáveis economicamente para exploração são formados por minérios hematíticos e magnetíticos.

Entre todos estes tipos de minério, a hematita, que constitui a maioria dos minérios brasileiros, é o mais importante em função da sua relativa abundância e alto teor de ferro. No Brasil, a hematita ocorre em grandes massas compactas ou friáveis de elevado teor de ferro ou como rocha metamórfica laminada em camadas alternadas com quartzo denominada itabirito e que pode atingir até 69% de ferro.<sup>(7)</sup>

Analisando os dois principais minerais, a hematita tem 69,94% de ferro, é um mineral paramagnético, isto é, fracamente atraído pelo campo magnético e possui estrutura cristalina hexagonal compacta (HC), já a magnetita difere, principalmente, por possuir 72,36% de ferro, é um mineral ferromagnético, isto é, fortemente atraído pelo campo magnético e com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) de espínélio invertido. A seguir, a **Tabela 1** apresenta as principais características destes dois minerais.

**Tabela 1** – Características da hematita vs magnetita

CARACTERÍSTICAS	HEMATITA	MAGNETITA
Formula Química	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (FeO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Susceptibilidade Magnética	Paramagnético	Ferromagnético
Estrutura Cristalina	HC	CFC, espinélio invertido
Escala de Dureza (mohs)	5,5 – 6,5	5,5 – 6,5
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	4,9 – 5,3	5,17 – 5,18
% Fe (máx)	69,94	72,36

A exploração (aproveitamento econômico) do minério da jazida faz-se por meio das operações de lavra, encaminhando-se o produto bruto (*Run Of Mine* - ROM), para o beneficiamento, onde é submetido a uma série de operações de fragmentação, classificação por tamanhos, concentração, desaguamento etc., visando adequá-lo químico-físico-metalurgicamente ao atendimento das exigências dos processos siderúrgicos.

Um aspecto muito importante para caracterizar os produtos minerais que saem da usina de tratamento é a sua distribuição granulométrica. Durante o desmonte, a lavra, a fragmentação e o manuseio, muitos finos são gerados, os quais são inadequados ao uso direto nos reatores de redução (alto-forno e módulo de redução direta), sendo aglomerados previamente, em plantas de sinterização ou pelletização. De um modo geral, os produtos de minerais de ferro, em função da granulometria, podem ser classificados em granulado (*lump*), fino para sinterização (*sinter feed*) e fino para pelletização (*pellet feed*). A faixa de tamanho do granulado é de 6,3 a 31,7 mm; a do *sinter feed*, de 0,15 a 6,3 mm; e a do *pellet feed*, abaixo de 0,15 mm.

A **Figura 1** apresenta desenho esquemático desde a mineração de minério de ferro até a produção de aço.

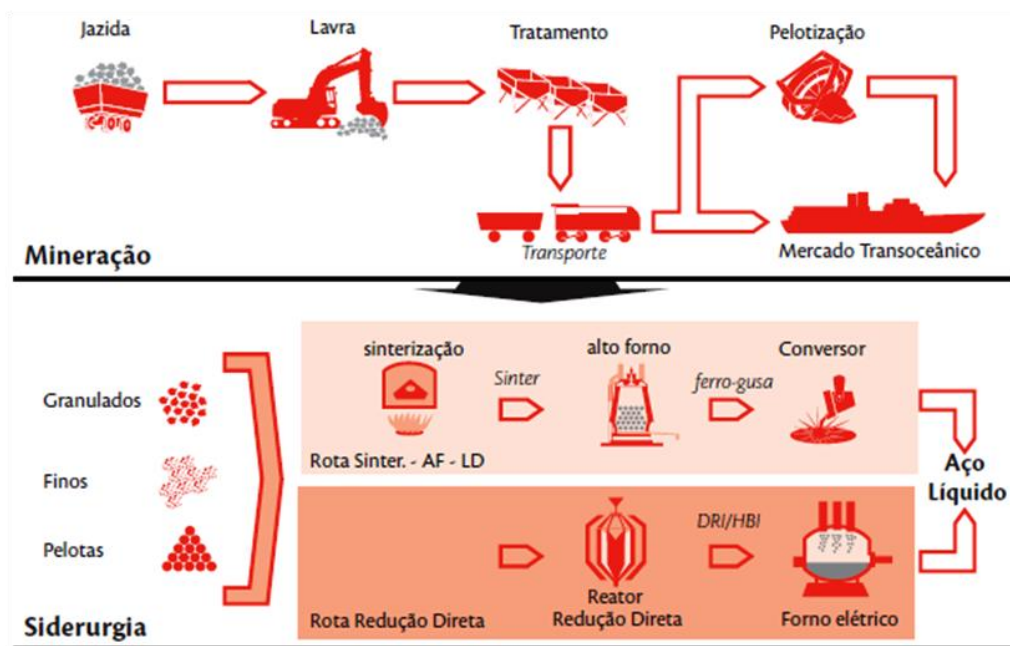


Figura 1 – Mineração de ferro e siderurgia<sup>(6)</sup>

### 3.1.1. Cenário Internacional

O minério de ferro é explorado em cerca de 50 países<sup>(8)</sup>. Os cinco maiores países produtores são Austrália, Brasil, China, Índia e Rússia, respondendo por cerca de 80% da produção mundial total. Quanto às reservas globais de minério de ferro, a maior parte está concentrada em cinco países: Brasil, Austrália, Rússia, Ucrânia e China, que respondem em conjunto por 70% do total de reservas em ferro contido. A Tabela 2 apresenta dados de produção<sup>(4)</sup> e reservas<sup>(3)</sup> dos principais países, destacando Brasil, Austrália e Rússia, que apresentam grandes reservas de minério com elevado teor de ferro contido.

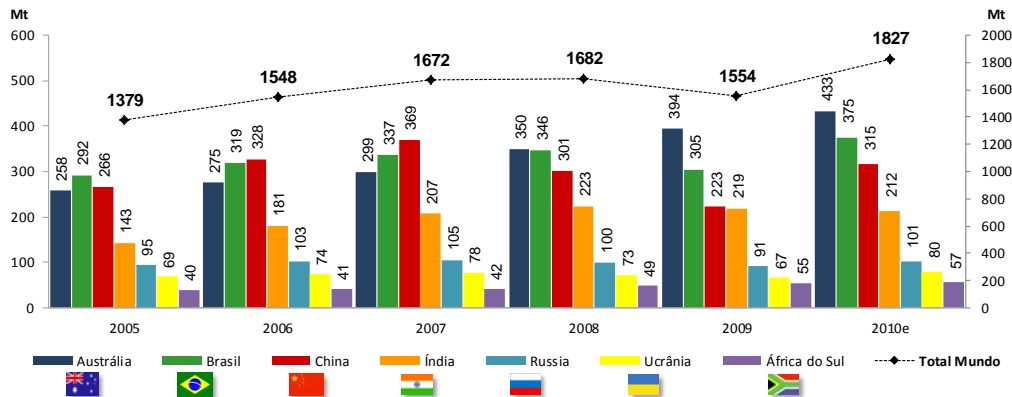
Tabela 2 – Produção e reservas de minério de ferro por país<sup>(3,4)</sup>

Unid.: Milhões de toneladas métricas

País	Tamanho Reserva	Qualidade Min. Fe	Produção			Reservas		Qualidade ROM (% Fe)
			2008	2009	2010	Mín. Cru	Fe cont.	
China	▲	▼	301	223	315	23,000	7,200	≤ 30%
Brasil	▲	▲	346	305	375	29,000	16,000	55% - 65%
Austrália	▲	▲	350	394	433	24,000	15,000	55% - 65%
Índia	▼	▲	223	219	212	7,000	4,500	55% - 65%
Rússia	▲	▲	100	91	101	25,000	14,000	55% - 65%
Ucrânia	▲	▼	73	67	80	30,000	9,000	≤ 30%
África do Sul	▼	▲	49	55	57	1,000	650	55% - 65%
TOTAL MUNDO			1.682	1.554	1.827	~180,000	~87,000	-

Fonte: UNCTAD, Julho de 2011; e USGS – Mineral Commodity Summaries, 2011.

A **Figura 2** apresenta a evolução da produção mundial de concentrado minério de ferro dos principais produtores mundiais no período de 2005 a 2010.



**Figura 2** – Evolução da produção mundial de minério de ferro (concentrado)<sup>(4)</sup>

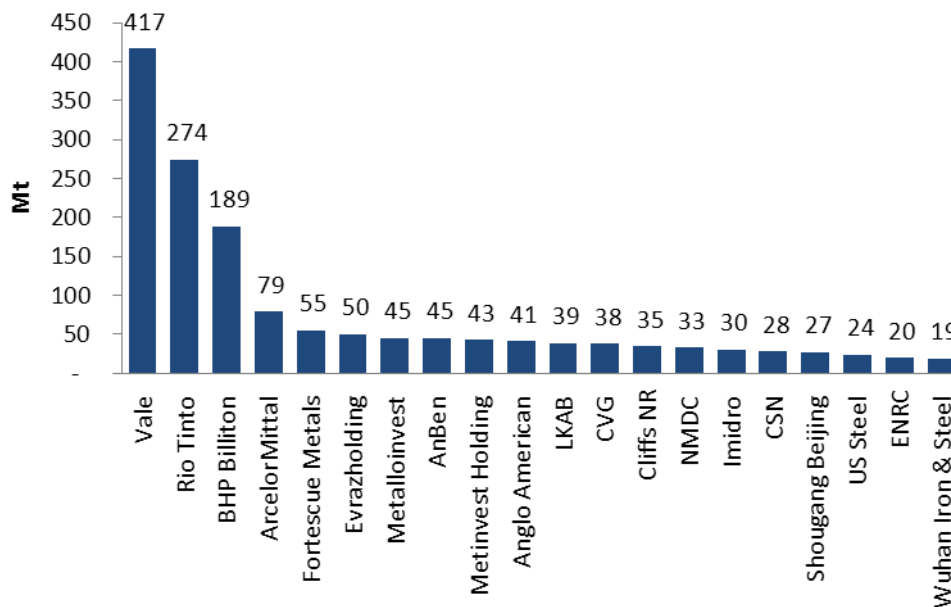
O *ranking* das 10 maiores empresas produtoras de minério de ferro do mundo (em 2010) pode ser observado na **Tabela 3**, destacando-se a Vale, Rio Tinto e BHP Billiton. Estes três produtores responderam por 35% da produção global de minério de ferro em 2010, mostrando o alto grau de concentração da oferta.

**Tabela 3** – Ranking das 10 maiores empresas produtoras mundiais de minério de ferro (2010)<sup>(4)</sup>

POSIÇÃO	COMPANHIA	PAÍS	Produção Mundial (%)
1º	Vale	Brasil	16,9%
2º	Rio Tinto	Reino Unido	9,9%
3º	BHP Billiton	Austrália	8,2%
4º	Estado da Índia*	Índia	3,1%
5º	ArcelorMittal	Luxemburgo	2,7%
6º	Anglo American	Reino Unido	2,4%
7º	Fortescue Metal Group	Austrália	2,1%
8º	Cliffs Natural Resources	EUA	2,0%
9º	Metalloinvest	Rússia	2,0%
10º	System Capital Management	Ucrânia	1,7%
<b>Total (10 maiores empresas produtoras)</b>			<b>51,0%</b>

\*Estado da Índia inclui SAIL e NMDC.

Em relação à capacidade de produção de minério de ferro, as três maiores mineradoras detêm mais que 40% da capacidade mundial atual que é de aproximadamente 2,2 bilhões de toneladas. A **Figura 3** apresenta a capacidade (em Mt) das principais mineradoras de minério de ferro.



**Figura 3** – Capacidade de produção de minério de ferro por empresa (2010)<sup>(9)</sup>

Austrália e Brasil são os dois maiores exportadores de minério de ferro. Em conjunto, responderam por aproximadamente 66% do mercado mundial em 2009 (955 Mt), como mostrado na **Tabela 4**. Em geral, a Austrália abastece o mercado asiático, enquanto o Brasil abastece os mercados da Ásia e da Europa Ocidental.

**Tabela 4** – Evolução da importação e exportação de minério de ferro por país<sup>(8)</sup>

Unid.: Milhões de toneladas métricas

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010e	2011e	2012e	2013e	2014e
<b>IMPORTAÇÃO</b>											
China	208	275	326	383	444	628	634	685	738	776	815
Japão	135	132	134	139	140	105	122	135	141	142	144
Coreia do Sul	44	44	44	46	50	44	53	57	60	63	65
Alemanha	46	42	45	46	45	29	43	ND	ND	ND	ND
França	21	20	20	20	18	10	18	ND	ND	ND	ND
<b>EXPORTAÇÃO</b>											
Austrália	221	239	247	267	309	363	397	422	486	523	540
Brasil	201	223	248	274	274	266	305	370	399	427	444
Índia	63	81	89	94	106	115	94	87	81	74	66
África do Sul	25	27	26	30	33	45	41	44	48	51	54
Canadá	23	28	28	28	28	31	29	28	27	27	28
<b>TOTAL</b>	<b>646</b>	<b>717</b>	<b>763</b>	<b>823</b>	<b>889</b>	<b>955</b>	<b>1.019</b>	<b>1.103</b>	<b>1.186</b>	<b>1.244</b>	<b>1.284</b>
<b>Comércio Transoceânico</b>	<b>646</b>	<b>717</b>	<b>763</b>	<b>823</b>	<b>889</b>	<b>955</b>	<b>1.019</b>	<b>1.103</b>	<b>1.186</b>	<b>1.244</b>	<b>1.284</b>

Fonte: UNCTAD e ABARE; ND - não disponível

Verifica-se a degradação das reservas e da produção de minério granulado, tanto em volume, quanto em qualidade. Em 1983, a produção mundial de granulado foi de 108 milhões de toneladas, o equivalente a 45% do mercado transoceânico e a 25% da produção total de minério de ferro. Em 2000, a despeito do crescimento considerável da produção global de minério de ferro, a quantidade de granulado já havia retraído para 77 milhões, passando a representar apenas 19% do mercado transoceânico e 8% da produção global do minério.<sup>(6)</sup>

Quanto à qualidade, constata-se uma redução progressiva na resistência mecânica (dos granulados) e nas características químicas dos minérios disponíveis no mercado, isto é, queda no teor de Fe no ROM das operações existentes e nos novos projetos, aliado a um aumento de elementos deletérios (alumina e fósforo) e aumento das etapas de beneficiamento, o que acarreta um maior *opex* das plantas de beneficiamento.

Quando se analisam os novos projetos de empresas estabelecidas e de potenciais entrantes na mineração mundial de ferro, verifica-se que vários empreendimentos tendem a gerar um volume crescente de *pellet feed*, sendo que, em alguns casos, este tipo de minério responderá pela totalidade da futura produção. Nessas condições, os custos operacionais deverão aumentar, devido a maior intensidade de investimento específico e maior complexidade das operações de mineração e beneficiamento.

Fazendo referência a demanda, a maior parte da produção mundial de minério de ferro é vendida no mercado transoceânico. Os volumes das transações neste mercado cresceram de 507 Mt em 2000 para 955 Mt em 2009, impulsionados, principalmente, pela China (importações cresceram de 70 Mt em 2000 para 628 Mt em 2009), responsável por quase todo o aumento de volume de minério de ferro no mercado transoceânico desde 2000. As importações chinesas responderam por aproximadamente 60% do seu consumo total em 2009. Isso foi resultado principalmente do sólido crescimento da demanda interna combinado à limitação da oferta interna.<sup>(6)</sup>

Espera-se que a China continue a impulsionar o mercado transoceânico de minério de ferro no curto e médio prazo, devido seu processo de industrialização e urbanização. De acordo com a ABARE (como mostrado na **Tabela 4**), as importações totais de minério de ferro da China chegarão a 815 Mt em 2014, respondendo por aproximadamente 63% do comércio transoceânico mundial.

### **3.1.2. Cenário Nacional**

A indústria de minério de ferro brasileiro é sem dúvida uma das mais competitivas do mundo, devido a fatores como a abundância de recursos e reservas de minério de ferro de média a alta qualidade, a atual infraestrutura industrial e de logística, a tecnologia inovadora de produção, os recursos humanos qualificados, características de uma indústria de mineração tradicional e bem estabelecida.

O Brasil possui a maior reserva de minério de ferro do mundo em ferro contido. E, considerando os contaminantes, as reservas brasileiras situam-se em lugar de absoluto destaque, configurando-se mundialmente como as mais puras.

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM), até o final de 2010, as reservas de minério de ferro total no Brasil atingiram 73,6 bilhões de toneladas, dos quais 17,4 mil toneladas foram classificadas como medidas, 11,5 mil milhões de toneladas as reservas indicadas, enquanto 44,7 milhões t foram inferidas.

Quanto ao tipo de minério de ferro no Brasil, existem predominantemente dois tipos: a hematita (inclui hematita – jaspelite de Corumbá / MT) e itabirito. Deve-se ressaltar que grande parte da hematita de Minas Gerais já foi extraída, posicionando-se o itabirito como a principal fonte de fornecimento de minério de ferro.

Com base nos dados estatísticos consolidados dos relatórios anuais das empresas de mineração e de outras fontes pesquisadas, a Vale tem um total de reservas de minério de ferro de 14,3 bilhões de t e 36 bilhões de t de recursos. As outras empresas brasileiras de mineração de ferro possuem em conjunto recursos totais de 34 bilhões de toneladas. Estes dados de reservas e recursos por empresa são detalhados na **Tabela 5**.

**Tabela 5 – Recursos & reservas de minério de ferro brasileiro<sup>(5)</sup>**

VALE (minas)	TOTAL RECURSOS 2010	RESERVAS 2010	
	(Mt)	(Mt)	Teor (% Fe)
Mina 05 e Tamandua (MCR)		294,0	63,0
Urucum		32,8	62,2
<b>VALE - SISTEMA CORUMBÁ</b>	<b>1.000,0</b>	<b>326,8</b>	<b>62,9</b>
Serra Norte		2.976,6	66,7
S11 (Serra Sul)		4.239,6	66,8
SL1 (Serra Leste)		60,9	66,2
<b>VALE - SISTEMA NORTE</b>	<b>16.700,0</b>	<b>7.277,1</b>	<b>66,7</b>
Complexo de Itabirito		1.336,1	48,5
Complexo de Vargem Grande		1.687,0	50,5
Complexo de Paraopeba		137,2	64,5
<b>VALE - SISTEMA SUL</b>	<b>5.300,0</b>	<b>3.160,3</b>	<b>50,3</b>
Complexo de Itabira		767,3	53,7
Complexo Minas Centrais		1.390,2	52,8
complexo de Mariana		1.333,4	46,8
<b>VALE - SISTEMA SUDESTE</b>	<b>13.000,0</b>	<b>3.490,9</b>	<b>50,7</b>
<b>VALE TOTAL</b>	<b>36.000,0</b>	<b>14.255,1</b>	<b>59,1</b>

EMPRESAS	TOTAL RECURSOS 2010
	(Mt)
ANGLO FERROUS	4.091
ARCELOR MITTAL	150
BAMIN	460
CSN	8.400
FERROUS RESOURCES	2.541
GERDAU	1.800
HERCULANO	60
ITAMINAS	860
MHAG MINING	3.500
MINERAL DO BRASIL	60
MINERITA	120
MMX	1.329
MPP	200
NAMISA	1.451
SAM	2.500
SAMARCO	4.700
USIMINAS	1.000
V & M	100
VETORIAL	360
OUTRAS	3.978,6
<b>TOTAL</b>	<b>33.682,4</b>

Os depósitos e ocorrências significantes de minério de ferro no Brasil estão concentrados e distribuídos entre as seguintes províncias e distritos minerais<sup>(5)</sup>:

- **Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais** – Esta é a província mais importante minério de ferro no país. Ele está localizado no estado de Minas Gerais (MG) e atualmente produz cerca de 260 milhões de toneladas de minério de ferro por ano;
- **Província Mineral de Carajás** – Até agora, a maior província mineral do Brasil, localizadas no Estado do Pará (PA), com depósitos de minério de ferro, com cerca de 18 bilhões de toneladas de minério de hematita com teores superiores a 66% de ferro. Além do minério de ferro, a província tem depósitos significativos de cobre, ouro, níquel e manganês;
- **Distrito Mineral de Corumbá**– Localizada no estado do Mato Grosso do Sul (MS), 30 km de comprimento de mineralização, onde a formação de ferro-manganês atinge uma espessura de até 300

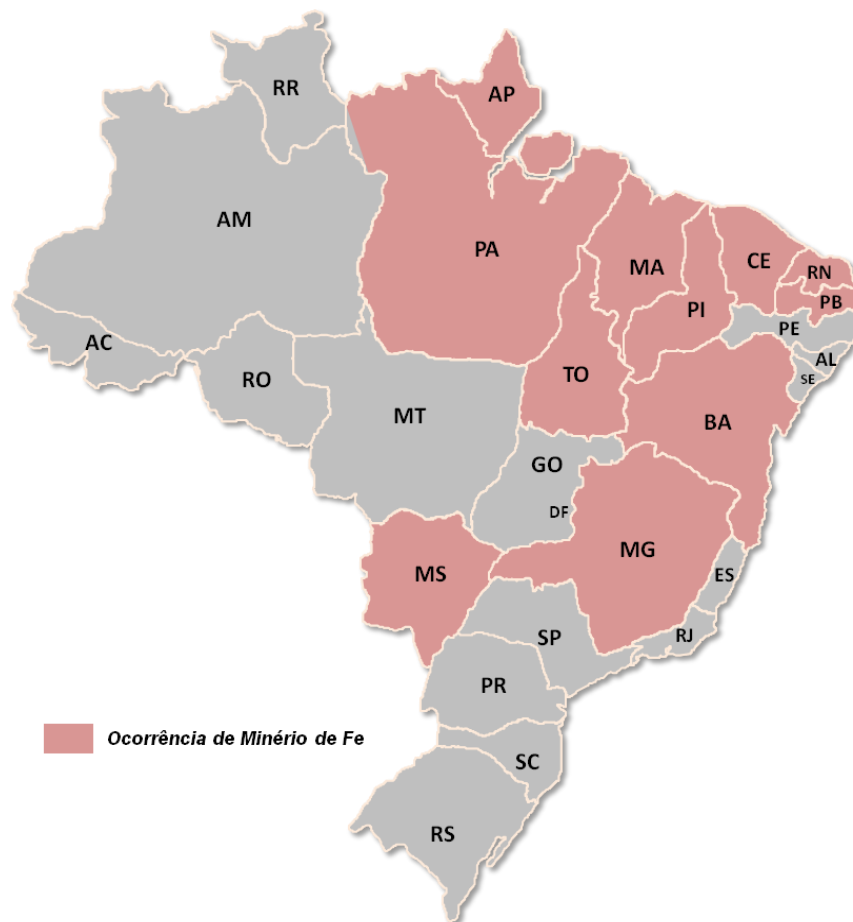


metros. Reservas são estimadas para atingir mais de 890 milhões de toneladas, com 63% de Fe;

- **Distrito Bahia** – Localizado na porção norte, centro e sudoeste do Estado da Bahia (BA), compreendendo várias ocorrências mineralizadas em ferro, ao longo de uma direção com mais de 130 km de extensão;
- **Depósitos de Serro / Morro do Pilar** – Os depósitos estão localizados no estado de Minas Gerais e têm um potencial de mais de 2 bilhões de toneladas de itabiritos friáveis. A maioria das áreas é de propriedade da Vale, Anglo Ferrous e Terra Ativa. É provável que se torne a próxima região de produção de minério de ferro no estado de Minas Gerais, substituindo parcialmente as operações de mineração na região de Itabira e de outras regiões produtoras no Quadrilátero Ferrífero;
- **Depósito de Porteirinha** – Área localizada no norte de Minas Gerais (MG), com um potencial de mais de 5 bilhões de toneladas de itabiritos friáveis, a maioria das áreas é de propriedade da Vale, SAM (Americana Sul Mineração) e GME4. É uma área que pode ser explorada em um futuro próximo, quando a queda na produção de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero tornar-se mais crítica;
- **Depósito do Amapá** – Este depósito está localizado no estado do Amapá e tem reservas de cerca de 400 milhões de toneladas de minério de ferro, com um teor médio de 60% de Fe. O depósito é controlada por uma *joint-venture* da Anglo American e Cliffs;
- **Depósito de Jurucutu** – Depósito em trabalhos de exploração. Encontra-se principalmente no estado do Rio Grande do Norte (RN), com uma pequena porção da Paraíba (PB). A mina de Bonito iniciou suas operações em 2005, com uma pequena e descontínua produção de minério de ferro;
- **Ocorrências no Tocantins** – Ocorrências em trabalhos de exploração. Estão concentradas nas regiões norte, centro e sul do estado do Tocantins;
- **Ocorrências no Ceará** – Ocorrências em trabalho de exploração. Estão distribuídas nas regiões norte e central do estado do Ceará;

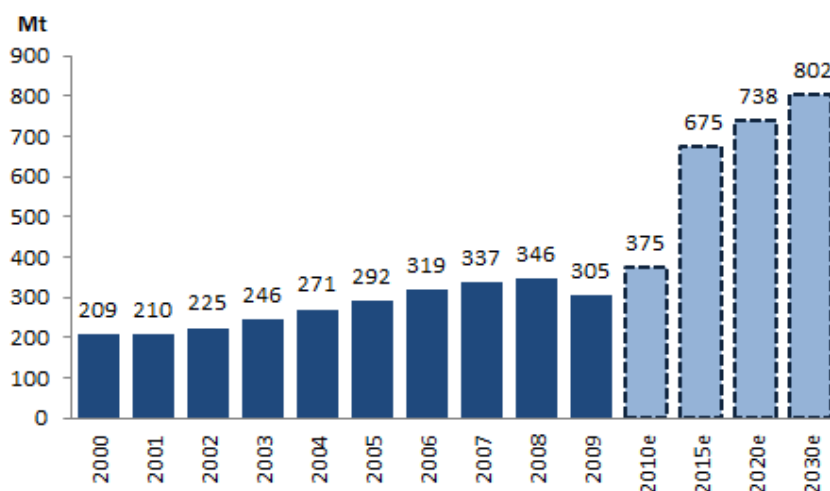
- **Ocorrências em Bodoquena (MS)** – Ocorrências em obras de exploração. Concentram-se principalmente na parte sul da Serra da Bodoquena na região central do estado de Mato Grosso do Sul.
- **Ocorrências no Piauí** – Ocorrências em trabalho de exploração. As áreas são conhecidas como Projeto Planalto propriedade da GME4. Estão distribuídas na parte sul do estado do Piauí;
- **Ocorrências no Maranhão** – Ocorrências em trabalhos de exploração. As áreas estão fechadas para Tiracambú Ridge de propriedade da Companhia Fergumar. Elas estão distribuídas na parte oeste do estado do Maranhão;

A **Figura 4** apresenta os estados brasileiros onde há ocorrências de minério de ferro.



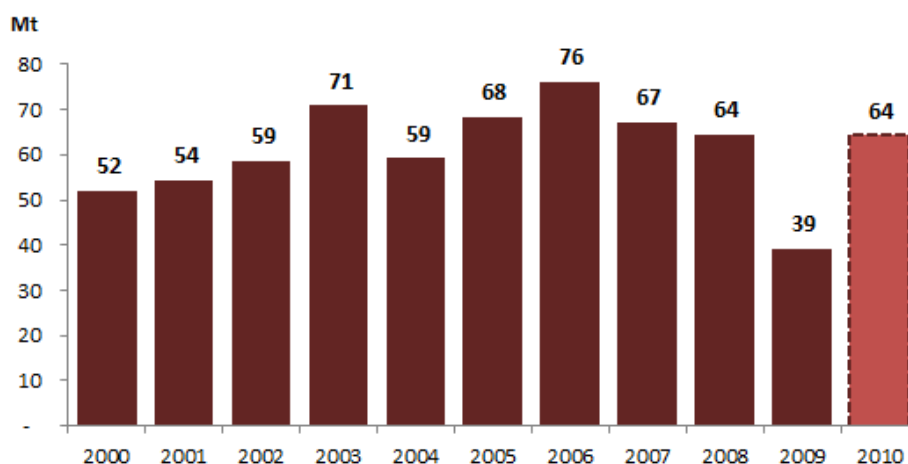
**Figura 4** – Ocorrências de minério de ferro no Brasil<sup>(5)</sup>

Finalmente, em 2010, a produção de minério de ferro brasileiro foi estimada em 375 milhões de toneladas e espera-se que em 2030 a produção atinja 800 Mt <sup>(5)</sup>. A **Figura 5** mostra a evolução da produção nacional de minério de ferro<sup>(4)</sup> e estimativas de produção <sup>(5)</sup> com grande incremento da produção para os próximos anos.



**Figura 5** – Evolução da produção de minério de ferro no Brasil<sup>(4,5)</sup>

Com referência a demanda brasileira, a **Figura 6** apresenta a evolução anual do consumo aparente brasileiro de minério de ferro. O consumo aparente nacional atingiu máxima em 2006 com 76 milhões de toneladas. Com a crise financeira mundial, o consumo aparente em 2009 reduziu para cerca de 39 milhões de toneladas, retornando em 2010 ao nível de consumo atingido em 2008 (64 Mt). Com as boas perspectivas econômicas e anúncios de grandes projetos siderúrgicos no país, é esperado a continuidade do aumento do consumo aparente nacional nos próximos anos <sup>(10)</sup>.



**Figura 6** – Evolução do consumo aparente de minério de ferro no Brasil<sup>(4,11)</sup>

### 3.1.2.1. Pelotas

Atualmente, o Brasil possui um total de 13 plantas de pelotização de minério de ferro, com capacidade anual instalada de 67,9 Mt. A **Tabela 6** apresenta a listagem com as plantas em operação e sua respectiva, localização e capacidade de produção de pelotas.

**Tabela 6** – Capacidade atual de produção de pelotas<sup>(5)</sup>

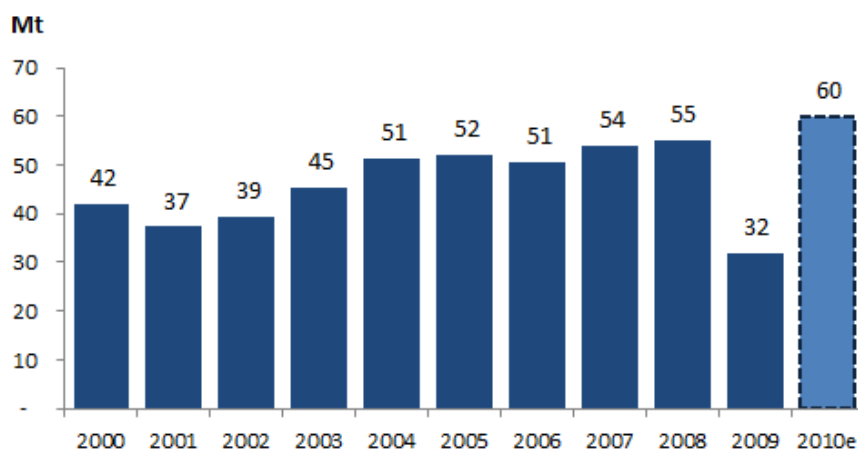
	PELOTIZADORAS	LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE DE PRODUÇÃO (Mt/a)	
<b>EM OPERAÇÃO</b>	<b>VALE – Sistema Tubarão</b>		<b>28,0</b>	
	✓ <i>TUBARÃO 1</i>	Porto de Tubarão (ES)	2,5	
	✓ <i>TUBARÃO 2</i>	Porto de Tubarão (ES)	2,7	
	✓ <i>ITABRASCO</i>	Porto de Tubarão (ES)	4,2	
	✓ <i>HISPANOBRÁS</i>	Porto de Tubarão (ES)	4,2	
	✓ <i>NIBRASCO 1</i>	Porto de Tubarão (ES)	4,8	
	✓ <i>NIBRASCO 2</i>	Porto de Tubarão (ES)	4,8	
	✓ <i>KOBRASCO</i>	Porto de Tubarão (ES)	4,8	
	<b>VALE – São Luis</b>	<b>Ponta da Madeira (MA)</b>	<b>7,0</b>	
	<b>VALE – Fábrica (ex-Ferteco)</b>	<b>Congonhas (MG)</b>	<b>4,4</b>	
	<b>VALE – Itabiritos</b>	<b>Nova Lima (MG)</b>	<b>7,0</b>	
	<b>SISTEMA SAMARCO (3 unidades)</b> (JV – 50% Vale / 50% BHP)	<b>Porto de Ubú (ES)</b>	<b>21,5</b>	
	<b>TOTAL (em operação)</b>			<b>67,9</b>

Diante dos novos projetos anunciados, é estimado que a capacidade de produção de pelotas seja acrescida em 43,5 milhões de toneladas até 2015. A **Tabela 7** apresenta a localização, a capacidade de produção e o ano de *start up* dos seis projetos de plantas de pelotização anunciados.

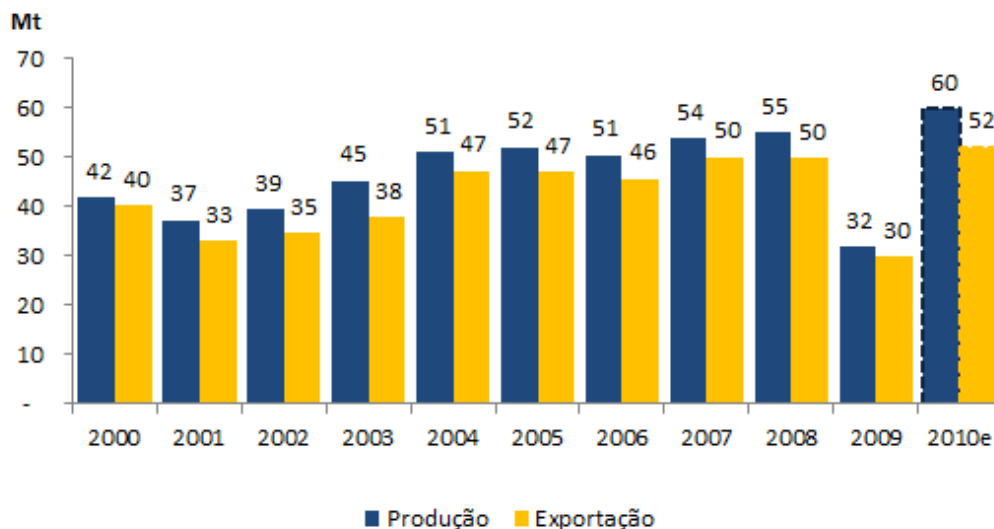
**Tabela 7** – Capacidade adicional de produção de pelotas (até 2015)<sup>(5)</sup>

PELOTIZADORAS		LOCALIZAÇÃO	CAPACIDADE DE PRODUÇÃO (Mt/a)	START UP
PROJETOS ANUNCIADOS	<b>VALE – Tubarão VIII</b>	Porto de Tubarão (ES)	7,5	2ºSem 2012
	<b>SISTEMA SAMARCO</b> (JV – 50% Vale / 50% BHP)	Porto de Tubarão (ES)	8,5	Final 2013
	<b>FERROUS</b> (1º Fase)	Porto Presidente Kennedy (ES)	7,0	Em estudo
	<b>NAMISA</b> (JV 60%CSN / 40%Consórcio Japonês)	Congonhas do Campo (MG)	6,0	2014
	<b>USIMINAS</b>	(a definir)	7,5	Em estudo
	<b>ANGLO FERROUS</b> (Projeto Minas – Rio)	Porto de Açu (RJ)	7,0	2013
	<b>Capacidade de Produção Adicional</b>			<b>43,5</b>

A produção brasileira de pelotas em 2010 foi estimada<sup>(5)</sup> em 60 Mt, alcançando nível recorde, ultrapassando o recorde anterior de 55 Mt em 2008. A **Figura 7** mostra a evolução (de 2000 a 2010) da produção nacional de pelotas de minério de ferro.

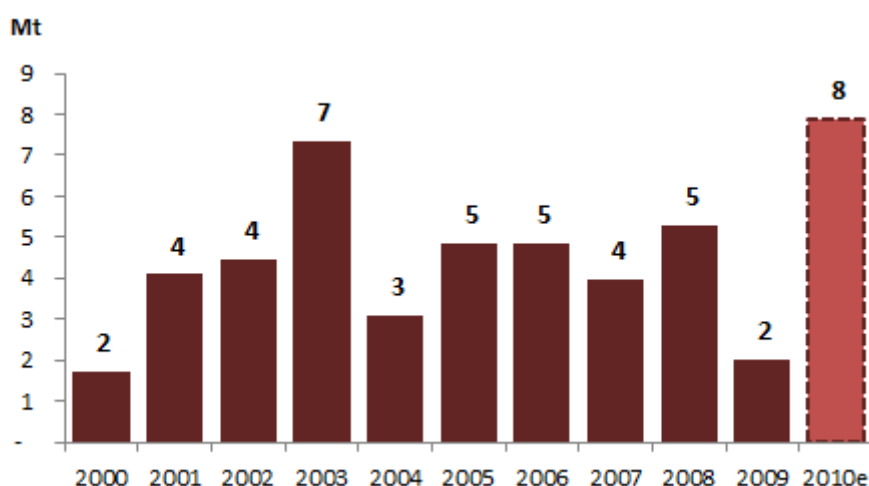
**Figura 7** – Evolução da produção de pelotas no Brasil<sup>(1,4,5)</sup>

Analisando as exportações de pelotas nos últimos anos, verifica-se que mais de 80% da produção nacional de pelotas é destinada ao mercado externo. A **Figura 8** apresenta a evolução das exportações comparando com a produção de pelotas.



**Figura 8** – Produção e exportação de pelotas no Brasil<sup>(1, 4, 5,11)</sup>

Historicamente, o Brasil não possui significativas importações de pelotas. Quanto ao consumo aparente (= produção + importação – exportação), a **Figura 9** apresenta uma evolução do consumo aparente de pelotas no Brasil. Em 2010, é estimado que o consumo aparente brasileiro de pelotas alcance nível recorde com 8 Mt.



**Figura 9** – Evolução do consumo aparente de pelotas no Brasil<sup>(1, 5)</sup>

### 3.2. BENEFICIAMENTO MINERAL

O Tratamento ou Beneficiamento de minérios consiste de operações visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem modificar a identidade química ou física dos minerais<sup>(12)</sup>.

Define-se mineral como todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é uma assembleia de minerais constituída por um ou mais minerais de interesse e a ganga (mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério)<sup>(12)</sup>.

As operações de concentração baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral de interesse e a ganga. Entre estas propriedades se destacam: densidade, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade e forma.

Na concentração de um minério, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica, para isso, o minério é submetido a uma operação de redução do tamanho (cominuição) que pode variar de centímetros até micrometros. Uma vez feita à etapa de cominuição, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos às operações de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito.

O minério é explotado da jazida por meio de operações de lavra (a céu aberto ou subterrânea) na mina. O produto da mina, o minério lavrado, é frequentemente chamado de ROM (*run-of-mine*), que vem a ser a alimentação da usina de beneficiamento.

O tratamento de minérios, apesar de ser essencialmente técnico em suas aplicações práticas, não pode desprezar o conceito econômico, ao concentrar o minério próximo à mina evita se gastos com o transporte de ganga.

É impossível, na prática, obter uma separação completa dos constituintes minerais. Sabe-se, como regra geral, que quanto maior o teor dos concentrados, maiores são as perdas, ou seja, mais baixas são as recuperações. Como a obtenção de teores mais altos e melhores recuperações normalmente implicam num aumento do custo do tratamento, para obtenção de maiores lucros esses dois itens devem ser devidamente balanceados.

Hoje, o aproveitamento dos recursos minerais deve estar comprometido com os requisitos do conceito de desenvolvimento sustentável (satisfazer as necessidades do presente sem prejudicar as futuras gerações); isso implica, entre outros fatores, no aproveitamento racional dos recursos naturais, preservando-se o meio ambiente <sup>(12)</sup>.

### 3.2.1. Amostragem

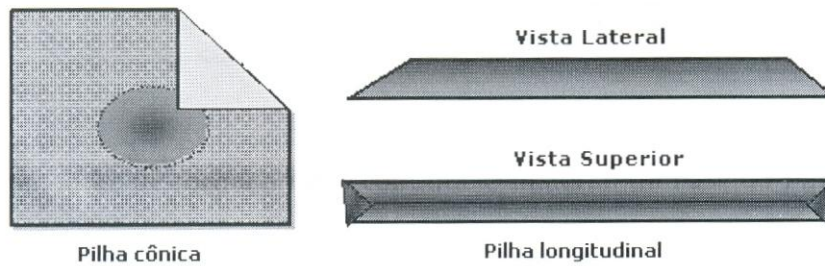
A amostragem é o conjunto de operações destinadas à obtenção de uma amostra representativa de uma dada população ou universo. Uma amostra é considerada representativa quando as propriedades do universo (teor dos diversos elementos, constituintes mineralógicos, massa específica, distribuição granulométrica, etc.), estimadas com base nessa amostra, inserem uma variabilidade estatisticamente aceitável <sup>(13)</sup>.

A homogeneização da amostra primária tem por objetivo obter uma distribuição mais uniforme dos constituintes, permitindo assim o quarteamento em frações de menor massa. Os métodos de homogeneização mais utilizados são as pilhas, na forma de tronco de cone ou longitudinais.

Para construção de uma pilha tronco de cone, o material é colocado sobre uma lona quadrada. Os vértices do quadrado são levados, alternadamente, de forma a fazer com que o material da base da pilha de um dos lados seja alocado no topo da pilha, em cada passada. Na **Figura 10** tem-se uma representação esquemática da construção de uma pilha cônica. Depois de algumas repetições desta atividade, a pilha é considerada homogênea. Este processo pode também ser realizado utilizando duas espátulas triangulares, com as quais se toma a base da pilha em lados opostos revolvendo-a para o centro.

A construção das pilhas longitudinais é realizada distribuindo-se o material, longitudinalmente, em uma bancada, mediante sucessivas passagens. Construídas a pilha, as extremidades devem ser retomadas e novamente espalhadas sobre seu centro. A pilha formada tem a seção em tronco de pirâmide (**Figura 10**).





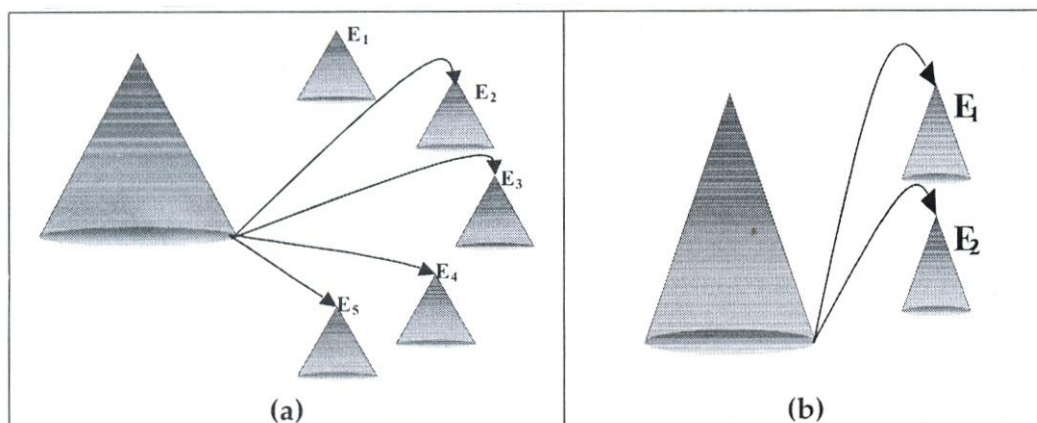
**Figura 10** – Representação esquemática da construção de pilhas cônica e longitudinal<sup>(13)</sup>

### Quarteamento

Após a homogeneização, tem-se a etapa de quarteamento com o objetivo de reduzir a massa a ser manuseada e preparar as alíquotas para análises, como por exemplo: granulométrica, química, mineralógica e peso específico. Estas operações são realizadas a seco e podem ser manuais ou utilizando equipamentos de concepção simples, mas de grande importância na obtenção de amostras finais, com características similares do ponto de vista estatístico. A seguir estão sucintamente descritos os principais métodos utilizados no quarteamento de amostras de minério.

### Pazada Fracionada

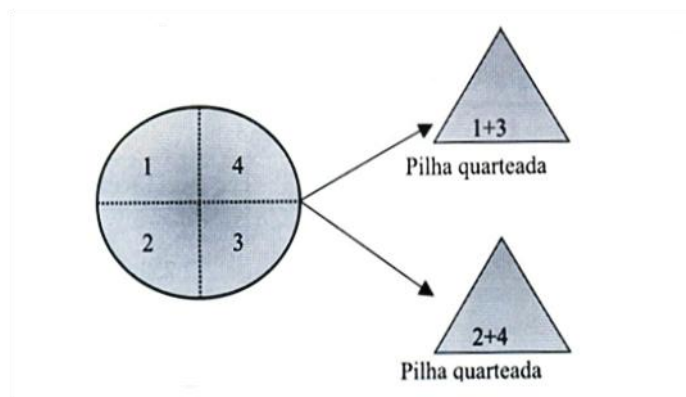
A pazada fracionada de ordem P é uma generalização da pazada alternada (**Figura 11**), a qual consiste em retomar um lote de material com uma pá (manual ou mecânica) e colocar a primeira pazada no topo de E1, a segunda no topo de E2, a terceira em E1 e assim sucessivamente. Obtêm-se duas frações gêmeas em E1 e E2 <sup>(13)</sup>.



**Figura 11** – Quarteamento da amostra em (a) pazada fracionada e em (b) pazada alternada<sup>(13)</sup>

### Pilhas Cônicas

Este método consiste em homogeneizar o material cuidadosamente e formar uma pilha cônica, onde a segregação deve ser simétrica em relação ao vértice do cone. Depois de feito o cone, o vértice é achatado para facilitar a divisão, e divide-se o material em quatro porções, segundo dois planos verticais que se cruzam no eixo geométrico do cone. Duas frações, em diagonal, são reunidas e as outras duas rejeitadas, conforme representado na **Figura 12**. Se for preciso uma amostra menor, repete-se o processo <sup>(13)</sup>.

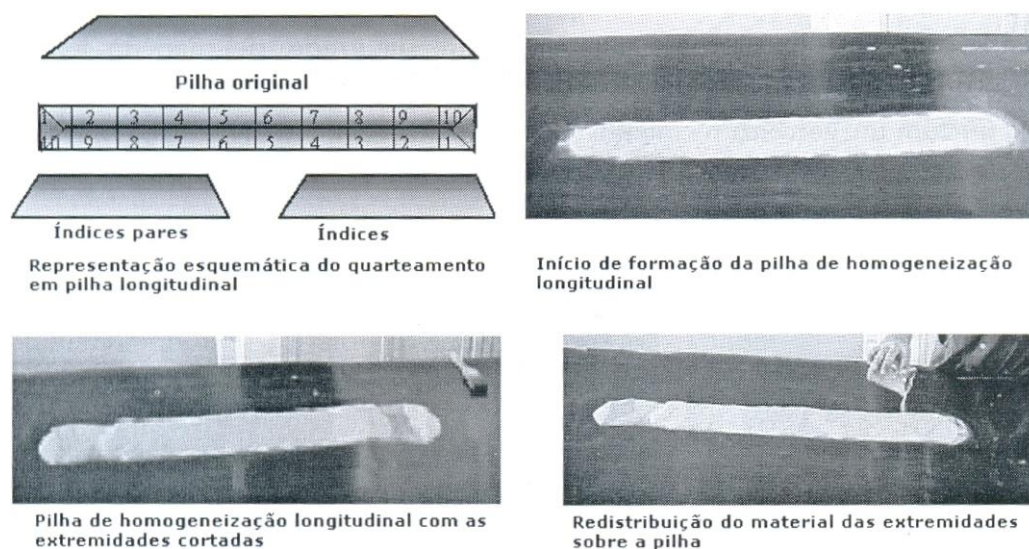


**Figura 12** – Representação esquemática do quarteamento em pilha cônica<sup>(13)</sup>

### Pilhas Longitudinais

As pilhas longitudinais são formadas tomando-se o material e distribuindo-o ao longo de uma linha sobre o chão ou lona. Para construção da pilha, a primeira fração do minério é distribuída da esquerda para a direita, a segunda, da direita para a esquerda sobre a primeira e assim sucessivamente. A quantidade de minério em cada fração, tomada no lote inicial, deve ser suficiente para distribuí-la ao longo de toda a pilha, com velocidade constante. O material constituinte das extremidades deve ser retomado, sendo distribuído novamente ao longo da pilha.

A pilha formada deverá ser dividida em segmentos, utilizando-se a largura da pá como medida, os quais devem ser numerados como mostrado na **Figura 13**. O quarteamento é feito formando-se duas novas pilhas com as seções alternadas. A primeira tomando-se as porções de índices pares e a outra, as de índices ímpares. Caso seja necessário, repete-se a operação com uma das pilhas.

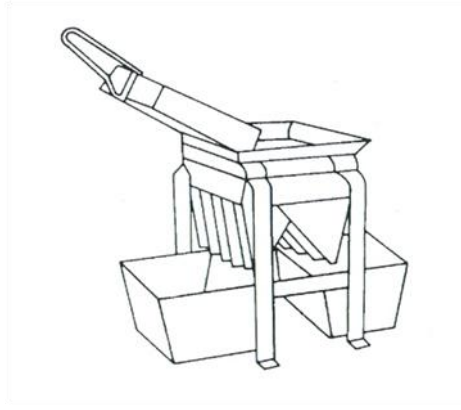


**Figura 13** – Representação esquemática do quarteamento e etapas de preparação da pilha de homogeneização longitudinal<sup>(13)</sup>

#### Quarteador Tipo Jones

Esse equipamento é constituído por uma série de calhas inclinadas (inclinação  $>45^{\circ}$ ) montadas, alternadamente, para um lado ou para o outro. Abaixo do término dessas canaletas, são colocadas as caixas para recolhimento do material, uma ao lado esquerdo e outra ao lado direito. O número de calhas deve ser par e estas devem ter a mesma largura, sendo, no mínimo, três vezes o tamanho da maior partícula do lote a ser quarteado. Quanto maior o número de calhas, maior será a representatividade das amostras obtidas <sup>(13)</sup>.

O procedimento prático para a utilização do quarteador tipo Jones inclui a homogeneização inicial do lote e a distribuição do minério na calha central do divisor. O operador deverá colocar a amostra a ser quarteada, que deverá estar praticamente seca, na posição central da grade, de maneira lenta e contínua, para evitar a obstrução das calhas e a emissão de partículas. Isso pode ser executado com uma pá cuja dimensão seja a mesma da seção longitudinal do quarteador ou com um terceiro recipiente coletor da amostra. Para obtenção de amostras de menor massa, repetir a operação com o material contido em um dos recipientes coletores. A **Figura 14** apresenta um quarteador Jones.

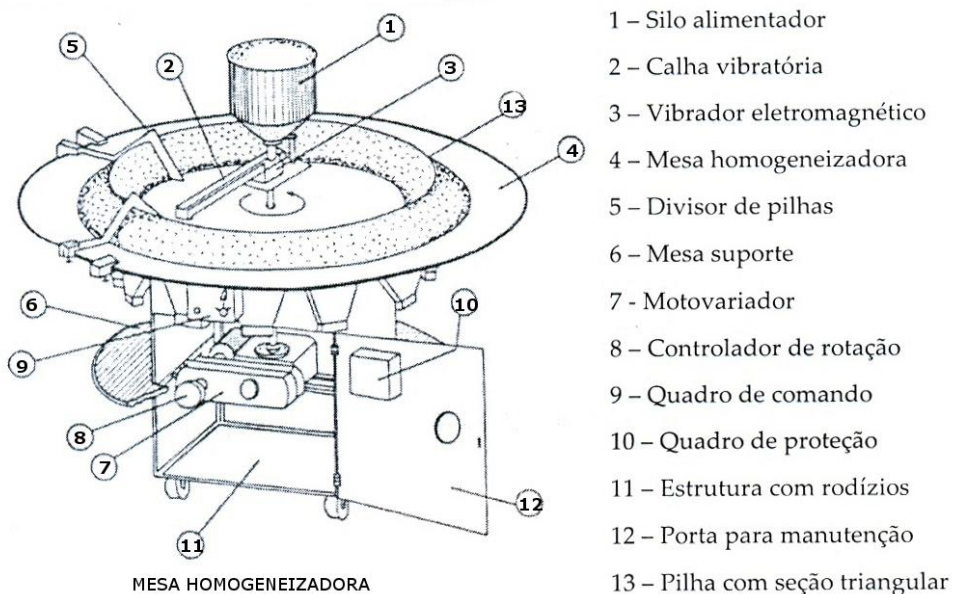


**Figura 14** – Quarteador Jones<sup>(12)</sup>

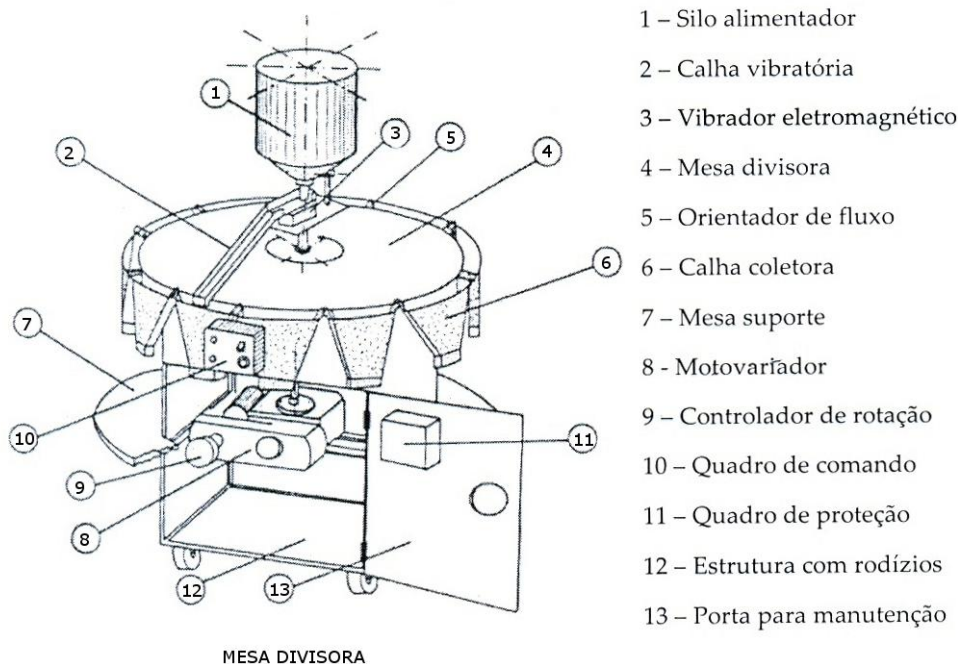
### Mesa Homogeneizadora / Divisora

Este equipamento consiste de uma calha vibratória, com vazão e altura de descarga variáveis, que descreve uma trajetória circular sobre uma mesa, sendo esta alimentada por um silo e acionada por um motovariador. A amostra alimentada no silo deve estar seca<sup>(13)</sup>.

A mesa homogeneizadora (**Figura 15**) e divisora (**Figura 16**) proporciona a formação de uma pilha circular, com seção triangular, que pode ser quarteada utilizando um dispositivo constituído de dois interceptores triangulares, articulados e reguláveis pelo deslizamento de seu suporte em um aro graduado. Esse aro pode ser colocado em qualquer posição da mesa.



**Figura 15** – Mesa homogeneizadora<sup>(13)</sup>



**Figura 16** – Mesa divisora<sup>(13)</sup>

### 3.2.2. Cominuição

A operação de cominuição, no campo de beneficiamento de minérios, agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido, de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor, objetivando no caso de um material heterogêneo liberar os minerais de interesse dos minerais de ganga, ou no caso de um mineral homogêneo, reduzir até à dimensão requerida pela utilização<sup>(12)</sup>.

Esta operação, responsável pela maior parte da energia gasta no processamento de minérios<sup>(14)</sup>, compreende diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a mina, até sua adequação ao processo industrial subsequente.

Na etapa de lavra, o desmonte do minério ou rocha, com o auxílio de explosivo pode ser visto como um primeiro estágio de fragmentação, onde são produzidos blocos volumosos, mas de um tamanho que permite alimentar os equipamentos de britagem.

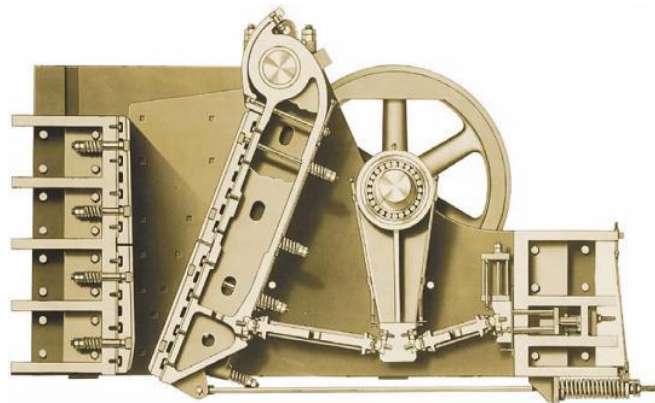
A britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, mas como existe uma série de tipos de equipamentos, esta operação deve ser repetida diversas vezes, mudando-se o equipamento, até se obter um material

adequado para a moagem. A seguir, uma breve descrição dos principais equipamentos de britagem.

### **Britador de Mandíbulas**

É o equipamento utilizado para fazer a britagem primária em blocos de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho na alimentação.

Compõe-se basicamente de uma mandíbula fixa, e uma móvel ligada ao excêntrico (esta ligação pode ser feita direta ou indireta), que fornece o movimento de aproximação e afastamento entre elas (**Figura 17**). Desta maneira o bloco alimentado na boca do britador vai descendo entre as mandíbulas enquanto recebe o impacto responsável pela fragmentação <sup>(12)</sup>.



**Figura 17** – Britador de mandíbulas de dois eixos<sup>(15)</sup>

### **Britador Giratório**

É o equipamento de britagem primária utilizado quando existe uma grande quantidade de material a ser fragmentado, sendo mais operacional do que o britador de mandíbula, pois pode ser alimentado por qualquer lado, indistintamente, além de permitir uma pequena armazenagem no seu topo.

O princípio de funcionamento do britador giratório consta do movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida. Este movimento circular (85 a 150 RPM) faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao britador uma grande capacidade de operação <sup>(12)</sup>.

### Britador de Impacto

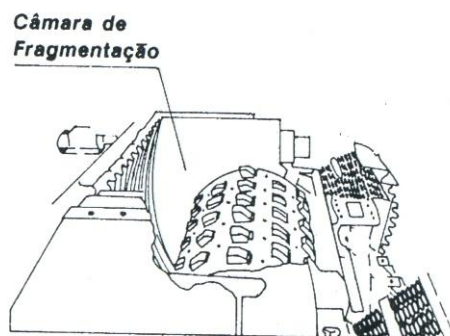
Neste tipo de britador, a fragmentação é feita por impacto ao invés de compressão. Por meio do movimento das barras (500 até 3.000 RPM), parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação <sup>(12)</sup>. A **Figura 18** apresenta um britador de impacto.



**Figura 18** – Britador de impacto<sup>(15)</sup>

### Britador de Rolo Dentado

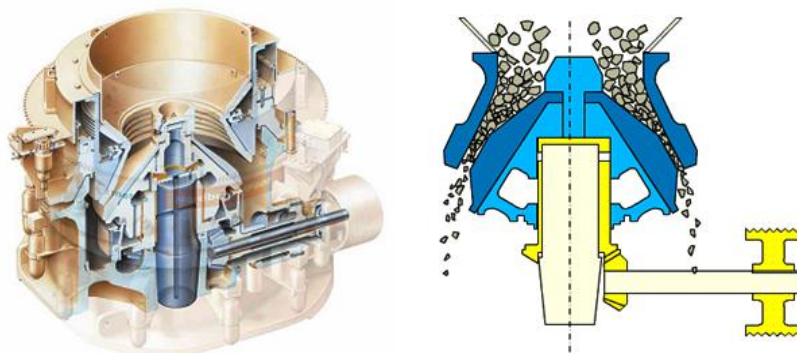
Consiste basicamente de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa. O movimento giratório do rolo provoca a compressão e cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara <sup>(12)</sup>. A **Figura 19** apresenta uma ilustração de um britador de rolo dentado.



**Figura 19** – Britador de rolo dentado<sup>(12)</sup>

### Britador Cônico

O britador cônico, apresentado na **Figura 20**, possui o mesmo princípio de operação do britador giratório. Contrariamente ao que ocorre no britador giratório, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nesta região. No britador giratório a descarga se dá pela ação da gravidade, enquanto que no cônico, a descarga é condicionada ao movimento do cone. O movimento vertical do cone, para cima e para baixo, controla a abertura de saída, para tal, utilizam-se dispositivos hidráulicos <sup>(12)</sup>.

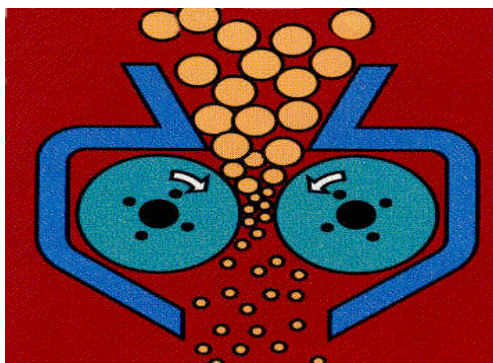


**Figura 20** – Britador cônico

### Britador de Rolos

Este equipamento consta de dois rolos de aço girando à mesma velocidade, em sentidos contrários, guardando entre si uma distância definida, conforme ilustrado na **Figura 21**. São destinados a materiais friáveis ou de fácil fragmentação <sup>(12)</sup>.

A alimentação é feita, lançando-se os blocos de minério entre os rolos cujo movimento faz com que os mesmos sejam forçados a passar pela distância fixada previamente por parafusos de ajuste. Esta ação promove a fragmentação dos blocos.



**Figura 21** – Britador de rolos



A moagem é a operação de fragmentação fina obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial (pelotização, lixiviação, combustão, etc.). Os equipamentos mais empregados na moagem são: moinhos cilíndricos (barras, bolas ou seixos), moinho de martelos entre outros.

### **Moinhos Cilíndricos**

Estes moinhos são constituídos de uma carcaça cilíndrica de ferro, revestida internamente com placas de aço ou borracha, que gira sobre mancais e contém no interior uma carga solta de barras ou bolas de ferro ou aço <sup>(12)</sup>.

A velocidade, o fator de enchimento (isto é, o volume ocupado pelas bolas em relação ao volume do moinho) e mais outros fatores determinam o regime de operação do moinho. Tem-se então, dois regimes no moinho: catarata e cascata.

Na moagem em catarata, a velocidade do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada e elas caem sobre as outras bolas e sobre a polpa causando fragmentação por impacto. Deve-se usar bolas maiores para aumentar ainda mais a energia do meio moedor e baixo fator de enchimento (menos bolas). Este regime é adequado para fragmentação de material mais grosso e para evitar a produção de finos <sup>(12)</sup>.

Na moagem em cascata, a velocidade baixa do moinho e o alto fator de enchimento faz com que as bolas ao alcançarem certa altura rolem sobre as outras não havendo quase impacto e a moagem se dá por abrasão e atrito. Deve-se usar bolas de diâmetros menores. Este regime é adequado para obtenção de um produto final com granulometria fina <sup>(12)</sup>.

### **Moinho de Barras**

São moinhos cilíndricos, que utilizam barras como meio moedor, e podem ser considerados máquinas de britagem fina ou de moagem grossa <sup>(12)</sup>.

### **Moinhos de Bolas**

Os estágios finais de fragmentação são realizados em moinhos cilíndricos, usando bolas como meio moedor. Como as bolas têm maior área superficial por unidade de peso do que as barras, são mais adequadas à moagem fina <sup>(12)</sup>.

### 3.2.3. Índice de Trabalho

#### 3.2.3.1. Índice de Trabalho para Moagem

O índice de trabalho para moagem (BWI), formulado por Bond, corresponde à energia total expressa em kWh por tonelada curta (907 kg), necessária para reduzir o minério, desde um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 106  $\mu\text{m}$  <sup>(12)</sup>. O BWI corresponde à resistência do minério à moagem e, com esse parâmetro, torna-se possível calcular a energia (kWh/t) necessária para moer o minério a uma determinada granulometria, além de ser um parâmetro importante para o dimensionamento de moinhos de bolas <sup>(16)</sup>.

A seguir a expressão matemática da lei de Bond:

$$BWI = \frac{44,5}{Am^{0,23}GBP^{0,82} \left( \frac{10}{P} - \frac{10}{F} \right)}$$

Onde:

- BWI* índice de trabalho para moagem (kWh/ tonelada curta)
- Am* abertura da malha – teste ou do circuito fechado ( $\mu\text{m}$ )
- GBP* é uma variação definidora da moabilidade do minério para a malha – teste e controladora do término do teste (g/revolução)
- P* abertura da peneira, em micrometros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa do produto
- F* abertura da peneira, em micrometros ( $\mu\text{m}$ ), através da qual passam 80% da massa da alimentação.

Os ensaios para determinação do BWI, em laboratório, obedecem à norma ABNT – NBR 11376, utilizando um moinho padrão (**Figura 22**), com diâmetro e comprimento iguais a 12 polegadas, 70 rpm, 285 bolas de aço (peso de 20,125 kg e massa específica de 7,83 g/cm<sup>3</sup>) distribuídas conforme **Tabela 8**. A moagem é realizada a seco, em circuito fechado, com carga circulante de 250%, quando a operação atinge o seu estado de equilíbrio <sup>(17)</sup>.

**Tabela 8** – Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora<sup>(17)</sup>

Número de Bolas	Diâmetro (mm)
43	36,5
67	30,2
10	25,4
71	19,1
94	15,9

**Figura 22** – Moinho para testes de índice de trabalho de Bond para moagem

### 3.2.3.2. Índice de Britabilidade

Também formulado por Bond, é utilizado para cálculos de energia necessária para britagem. São necessários para o teste 20 pedaços representativos de minério, passantes em uma malha quadrada de 76 mm e retidos em malha quadrada de 50 mm. Estes pedaços são então quebrados pelo impacto de dois pêndulos. A energia imprimida é aumentada até que ocorra a quebra. A energia necessária ( $E_b$ ) é relacionada a uma constante do equipamento e ao ângulo de queda dos pêndulos através da relação<sup>(18)</sup>:

$$E_b = \frac{K}{2} (1 - \cos \theta)$$

O índice de britabilidade de Bond (CWI em kWh/t) é então calculado através da seguinte fórmula desenvolvida experimentalmente por Bond:

$$CWI = 2,59 \frac{Eb}{\frac{t}{(d * 1,1)}}$$

Onde:

Eb energia necessária para quebrar uma determinada partícula

K constante do equipamento

Θ ângulo de queda do pêndulo

t espessura média do minério

d densidade relativa da determinada partícula

### 3.2.4. Classificação e Peneiramento

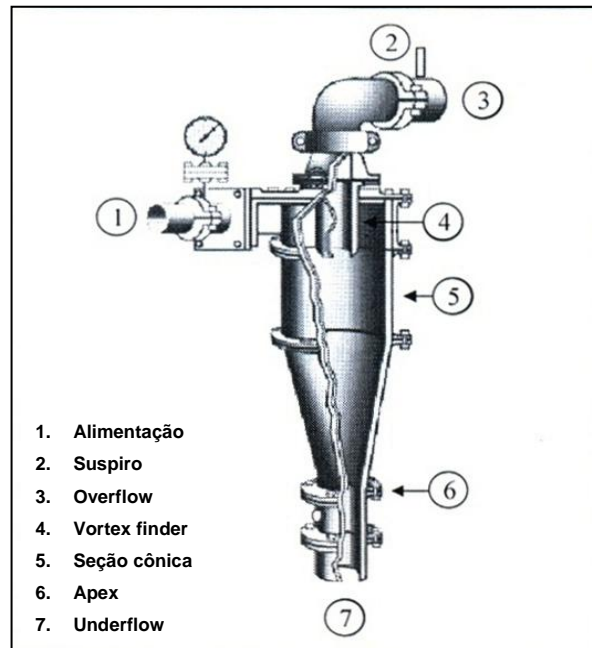
A classificação e o peneiramento têm com objetivo comum, a separação de um material em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos distintos.

No peneiramento, existe uma separação, segundo o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação, a separação é realizada tomando-se como base a velocidade que os grãos atravessam um meio fluido (normalmente água).

#### Hidrociclones

O princípio básico de separação empregado nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga <sup>(12)</sup>. Por ser um equipamento versátil, de controle operacional relativamente simples, de capacidade elevada em relação ao volume e à área ocupada e custo de investimento pequeno possui vasta aplicação na área de processamento mineral, como por exemplo, em circuitos fechados de moagem e na deslamagem de minérios.

Os hidrociclones são alimentados com polpa de minério, resultando como produtos o *underflow* e o *overflow*. O primeiro contém maior parte das partículas grossas que foram alimentadas e o segundo engloba a maioria das partículas finas, que foram classificadas.



**Figura 23** – Partes de um hidrociclone<sup>(12)</sup>

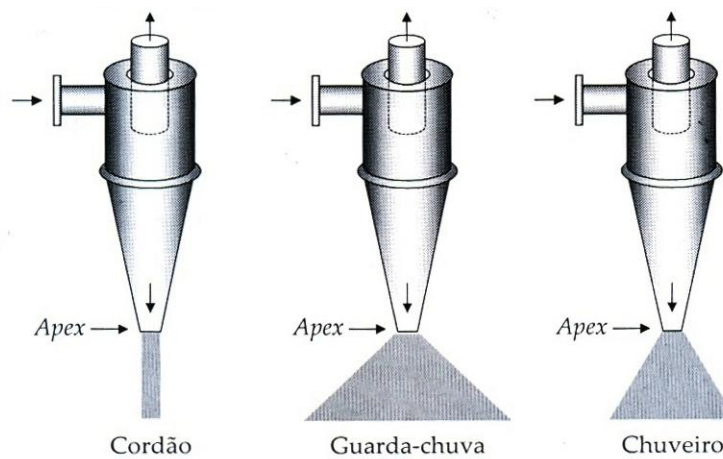
Um hidrociclone, conforme ilustrado na **Figura 23**, consiste basicamente de uma parte cilíndrica seguida de uma parte cônica que possui, em seu vértice, uma abertura, denominada *apex*, pela qual descarrega o *underflow*. A alimentação é introduzida tangencialmente à seção cilíndrica em que há um tubo coaxial denominado *vortex finder*, pelo qual é descarregado o *overflow*<sup>(12)</sup>.

Devido à geometria do hidrociclone, a polpa injetada produz um movimento rotacional, onde as partículas de diâmetro maiores tendem a ocupar as regiões mais próximas a parede, e as partículas de diâmetros menores são deslocadas para a região central<sup>(19)</sup>.

Os principais parâmetros que influenciam a capacidade e o diâmetro de corte ( $d_{50}$ ), isto é, o tamanho de partícula com igual probabilidade de ir para o *underflow* ou *overflow* nos hidrociclones são<sup>(20)</sup>:

- **Diâmetro do hidrociclone** – define a capacidade e o diâmetro de corte dos hidrociclones. Quanto maior o diâmetro do hidrociclone, maior será a capacidade e o diâmetro de corte.
- **Diâmetro *vortex finder*** – ajusta a capacidade e o diâmetro de corte. O diâmetro máximo é limitado pela possibilidade do material ir diretamente para o *overflow*. A altura deve ser suficiente para ultrapassar o ponto inferior da abertura de entrada, evitando assim a passagem direta das partículas ao *overflow*, sem sofrer classificação.

- **Área do injetor (*inlet*)** – determina a velocidade de entrada e, conseqüentemente, a velocidade tangencial, que também varia com o raio da seção cilíndrica. Implica em variações na capacidade do hidrociclone e na redução da pressão.
- **Diâmetro do *apex*** – dependendo do tipo de descarga do *apex*, pode-se avaliar as condições de operação do hidrociclone. A **Figura 24** mostra os três tipos de descarga. Descarga em cordão – diâmetro do *apex* é insuficiente. Com isso, partículas grossas dirigem-se para o overflow. Descarga chuva (ou cone) – operação normal. Descarga guarda-chuva – é característica de um *apex* muito aberto. As partículas finas dirigem-se para o *underflow*.



**Figura 24** – Três formas de descarga do underflow do hidrociclone<sup>(13)</sup>

Além dos parâmetros do equipamento existem as variáveis operacionais que exercem influência na classificação por hidrociclones<sup>(13)</sup>, as principais são:

- Concentração de sólido na alimentação;
- Distribuição granulométrica do minério;
- Formas das partículas na alimentação;
- Pressão de alimentação; e
- Viscosidade e densidade da polpa.

### Peneiramento

Para o peneiramento é utilizado uma superfície com inúmeras aberturas de mesmo tamanho. Pode ser realizado a seco ou a úmido, normalmente no caso de partículas mais finas o peneiramento é realizado via úmido.

A eficiência do peneiramento é a determinada pelo grau de perfeição da separação do material em frações de tamanho maiores ou menores ao tamanho da abertura da peneira, ou seja, a relação entre a quantidade de partículas mais finas que a abertura da tela de peneiramento e que passam por ela e a quantidade delas presentes na alimentação.

A determinação das faixas de tamanho das partículas é feita por meio de uma série de aberturas de peneiras que mantém entre si uma relação constante. A primeira escala granulométrica foi proposta por Rittinger, Alemanha, e obedeceu à seguinte equação <sup>(12)</sup>:

$$a_n = a_0 r^n$$

Onde:

$a_n$  = abertura de ordem  $n$ ;

$a_0$  = abertura de referência ( $a_0 = 1$  mm)

$r$  = razão de escala ( $r = \sqrt[4]{2} := 1,414$ )

Posteriormente, a U.S. Tyler Company alterou a escala de Rittinger, tomando como abertura de referência ( $a_0$ ) 74  $\mu$ m. Esta escala tornou-se de uso geral em todo o mundo <sup>(12)</sup>.

Uma segunda escala foi sugerida por Richards, Estados Unidos, que seguiu a mesma equação de Rittinger, sendo que adotou como razão de escala  $r = \sqrt[4]{2} := 1,19$ . Esta escala foi tomada como padrão pelo Governo Americano <sup>(13)</sup>.

As aberturas das peneiras para as duas escalas (Tyler e Richards) foram relacionadas ao número de malhas (mesh) que representa o número de aberturas de uma mesma dimensão contido num comprimento de 25,4 mm. A seguir, a **Tabela 9** apresenta a correspondência entre as duas escalas e seu valor de abertura em mm.

**Tabela 9** – Correlação das escalas Tyler, Richards e a abertura da peneira<sup>(21)</sup>

<b>Tyler</b>	<b>Richards</b>	<b>Abertura Peneira (mm)</b>
2 ½	-	8,00
3	-	6,73
3 ½	3 ½	5,66
4	4	4,76
5	5	4,00
6	6	3,36
7	7	2,83
8	8	2,38
9	10	2,00
10	12	1,68
12	14	1,41
14	16	1,19
16	18	1,00
20	20	0,841
24	25	0,710
28	30	0,595
32	35	0,500
35	40	0,420
42	45	0,354
48	50	0,297
60	60	0,250
65	70	0,210
80	80	0,177
100	100	0,149
115	120	0,125
150	140	0,105
170	170	0,088
200	200	0,074
250	230	0,063
270	270	0,053
325	325	0,044
400	400	0,037



Os fatores que afetam o desempenho das peneiras <sup>(15)</sup> são:

- Taxa de alimentação;
- Tempo de peneiramento;
- Natureza do material peneirado (densidade, umidade, forma das partículas, presença de materiais argilosos, distribuição granulométrica, etc.);
- Movimentação da peneira;
- Inclinação; e
- Material da peneira (fios metálicos, borracha, poliuretano, etc.),

Os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser classificados divididos em três tipos:

- Grelhas – constituídas por barras metálicas dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular entre si;
- Crivos – formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensão determinada;
- Telas – constituídas, geralmente, por fios metálicos trançados geralmente em duas direções ortogonais, de forma a deixarem entre si "malhas" ou "aberturas" de dimensões determinadas, podendo estas serem quadradas ou retangulares, Existem hoje telas sintéticas para peneiras, tanto em borracha quanto em poliuretano (maior precisão de separação, maior vida útil e maior produção),

Esses equipamentos podem ser classificados de acordo com o seu movimento, em duas categorias:

- Fixas - a única força atuante é à força de gravidade e por isso esses equipamentos possuem superfície inclinada, Como exemplos têm as grelhas fixas e as peneiras DSM,
- Móveis – Além da força gravitacional existem movimentos que ajudam no peneiramento, São grelhas rotativas, peneiras rotativas, peneiras recíprocas e peneiras vibratórias,

### 3.2.5. Concentração Gravítica

A concentração gravítica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas.

Os principais mecanismos atuantes no processo de concentração gravítica<sup>(12, 19)</sup> são os seguintes:

- Aceleração diferencial;
- Sedimentação retardada;
- Velocidade diferencial em escoamento laminar;
- Consolidação intersticial;
- Ação de forças cisalhantes.

O critério de concentração (CC) é usado em uma primeira aproximação e fornece uma ideia da facilidade de se obter uma separação entre minerais por meio de processos gravíticos, desconsiderando o fator de forma das partículas minerais<sup>(22)</sup>.

$$CC = \frac{(\rho_p - 1)}{(\rho_l - 1)}$$

Onde:  $\rho_p$  e  $\rho_l$  são as densidades dos minerais pesado e leve, respectivamente, considerando a densidade da água igual a 1,0.

A **Tabela 10** mostra a relação entre o critério de concentração e a facilidade de se fazer uma separação gravítica.

**Tabela 10** – Critério de concentração e separação gravítica<sup>(22)</sup>

CC	Significado
>2,5	Separação eficiente até 74 $\mu\text{m}$
2,5 – 1,75	Separação eficiente até 147 $\mu\text{m}$
1,75 – 1,50	Separação possível até 1,4 mm, porém difícil.
1,70 – 1,20	Separação possível até 6 mm, porém difícil.

Para incluir o efeito das formas das partículas a serem separadas, o critério de concentração deve ser multiplicado por um fator de razão de forma (FRF). Este fator é o quociente entre os fatores de sedimentação (FS) dos minerais pesados (p) e leves (l). O fator de sedimentação para um mineral é definido como a razão das velocidades terminais (v) de duas partículas do

mesmo mineral, de mesmo tamanho, mas de formas diferentes; a primeira partícula sendo aquela para a qual se deseja calcular o fator de sedimentação (FS), e a segunda partícula uma esfera.

As equações abaixo redefinem o critério de concentração (CC), considerando a forma das partículas.

$$CC = \frac{\rho_p - 1}{\rho_l - 1} \cdot FRR$$

$$FRR = \frac{FS_p}{FS_l}$$

$$FS_p = \frac{v_p}{v_{p(esf.)}}, \quad FS_l = \frac{v_l}{v_{l(esf.)}}$$

### Mesa Oscilatória

A mesa oscilatória típica consiste de um deque de madeira revestido com material com alto coeficiente de fricção (borracha ou plástico), parcialmente coberto com ressaltos, inclinado e sujeito a um movimento assimétrico na direção dos ressaltos, por meio de um mecanismo que provoca um aumento da velocidade no sentido de descarga do concentrado e uma reversão súbita no sentido contrário, diminuindo suavemente a velocidade no final do curso <sup>(12)</sup>.

Os mecanismos de separação atuantes na mesa oscilatória podem ser mais bem compreendidos se considerarmos separadamente a região da mesa com *riffles* e a região lisa. Naquela, as partículas minerais, alimentadas transversalmente aos *riffles*, sofrem o efeito do movimento assimétrico da mesa, resultando em um deslocamento das partículas para frente; as pequenas e pesadas deslocando-se mais que as grossas e leves. Nos espaços entre os *riffles*, as partículas estratificam-se devido à dilatação causada pelo movimento assimétrico da mesa e pela turbulência da polpa através dos *riffles*, comportando-se este leito entre os *riffles* como se fosse um jig em miniatura – com sedimentação retardada e consolidação intersticial (improvável a aceleração diferencial) – fazendo com que os minerais pesados e pequenos fiquem mais próximos à superfície que os grandes e leves.

Ao final da separação, são obtidos três produtos usualmente conhecidos como: pesados (em geral o concentrado), mistos e leves (usualmente o rejeito). Quando os grãos mistos coletados estão liberados, recomenda-se a sua recirculação. Caso contrário, procede-se a sua remoagem seguida do

reprocessamento, ainda na mesa, desde que os limites granulométricos de operação da mesa permitam. Desse modo, fica assegurada maior recuperação ao processo de separação.

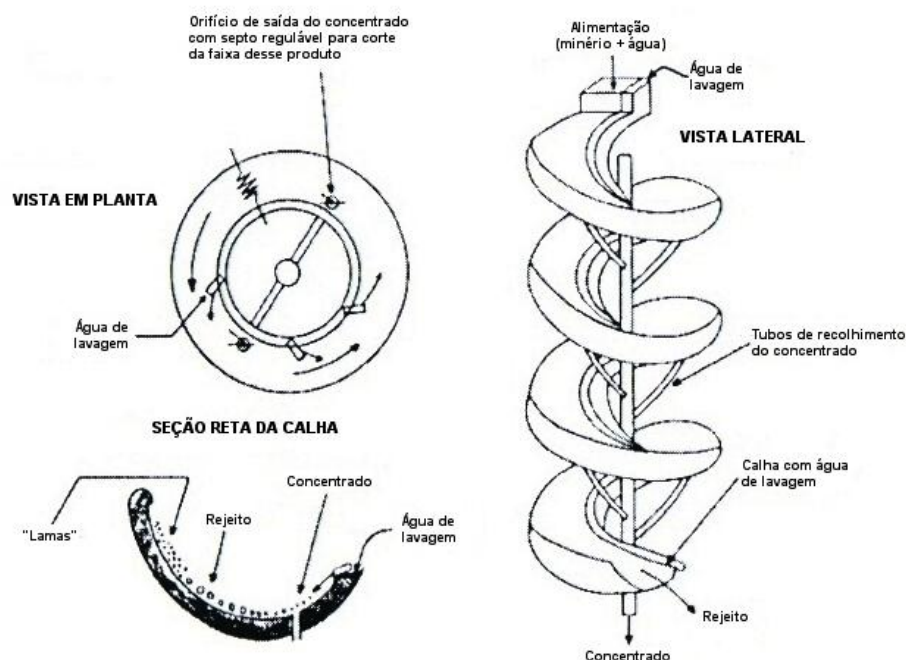
De modo geral, a mesa oscilatória é considerada o equipamento mais eficiente para o tratamento de minérios com granulometria fina. Sua limitação é a baixa capacidade de processamento (< 2 t/h). A operação da mesa é um processo empírico e depende da natureza do minério e da complexidade do circuito. Portanto, a experiência e habilidade do operador são fundamentais para o êxito do processo. A seguir, segue uma descrição de alguns fatores que influenciam o processo de concentração <sup>(13)</sup>.

- **Quantidade de finos** – o excesso da fração fina provoca aumento da viscosidade da polpa, reduzindo, de forma significativa, a eficiência do processo. Por isso, é aconselhável o descarte da fração abaixo de 37 µm.
- **Taxa de alimentação** – o ideal seria a formação de uma monocamada na superfície da mesa. Entretanto, a prática revela a formação de um leito estratificado de partículas sobre a superfície da mesa, conferindo ao equipamento maior capacidade sem perda da sua eficiência. A otimização da taxa (kg/h) de alimentação é realizada durante o teste e depende, entre outros fatores, da habilidade e experiência do operador.
- **Razão sólido / líquido da polpa** – deve permanecer constante, e a água de lavagem deve favorecer a formação de uma lâmina de água sem turbulência sobre a superfície da mesa, bem como manter constante o balanço entre as correntes mesa abaixo e aquela transversal ao equipamento.
- **Amplitude e a velocidade de pulsação** – são variáveis independentes. Quando se alimenta minério com granulometria grossa, exige-se maior amplitude na pulsação com menor velocidade; a situação oposta é utilizada para minérios com granulometria fina. Quando há pouca diferença de densidade, entre os minerais pesados e leves, em torno de 1 ou menos, recomenda-se a operação com menor amplitude. Os equipamentos mais avançados permitem a operação com maior velocidade, resultando em maior mobilidade das partículas sobre a mesa, maior capacidade (kg/h) e aumento da eficiência da separação.

- **Inclinação do deque** – deve ser ajustada pelo operador, de modo a obter boa distribuição do minério sobre a mesa. Entretanto, o seu aumento excessivo provoca maior descarga de minérios na área de coleta do rejeito, bem como baixa a eficiência do processo.

### Espirais Concentradoras

O concentrador espiral é construído na forma de um canal helicoidal de seção transversal semicircular, conforme apresentado na **Figura 25**. Muito embora sejam comercializadas espirais com características diferentes (diâmetro e passo da espiral, perfil do canal e modo de remoção do concentrado) conforme o fabricante e o fim a que se destinam, os mecanismos de separação atuantes são similares <sup>(12)</sup>.



**Figura 25** – Esquema de uma espiral (Humphreys)

Quando a espiral é alimentada, a velocidade da polpa varia de zero na superfície do canal até um valor máximo na interface com o ar, devido ao escoamento laminar. Ocorre também uma estratificação no plano vertical, usualmente creditada à combinação de sedimentação retardada e consolidação intersticial, sendo também provável que haja a ação de esforços cisalhantes. O resultado final é que no plano vertical, os minerais pesados estratificam-se na superfície do canal, com baixa velocidade, e os minerais leves tendem a estratificar-se na parte superior do fluxo, nas regiões de maiores velocidades. A

trajetória helicoidal causa também um gradiente radial de velocidade no plano horizontal, que tem um efeito menor na trajetória dos minerais pesados e substancial na dos minerais leves. Estes, devido à força centrífuga, tendem a uma trajetória mais externa <sup>(12)</sup>.

A resultante desses mecanismos é a possibilidade de se remover os minerais pesados por meio de algumas aberturas reguláveis existentes na parte interna do canal – como é o caso da maioria das espirais, inclusive a tradicional espiral de Humphreys – ou por meio de cortadores no final do canal. Uma característica comum a muitas espirais tradicionais é a introdução de água de lavagem após cada abertura de remoção do pesado, com o fim de limpar a película de minerais pesados dos minerais leves finos e também manter a diluição da polpa. Essa água, ao sair sob pressão, centrifuga os minerais leves para a parte periférica do espiral, favorecendo o processo de separação.

Nos dias atuais, a espiral concentradora substitui, com sucesso, a mesa oscilatória na maior parte das aplicações industriais. A razão disso está ligada aos seguintes fatores:

- A espiral não possui partes móveis, entretanto, baixos custos de capital e manutenção;
- A sua construção, com materiais leves e duráveis, facilita o manejo do equipamento e demanda pequenos espaços para instalações.

A capacidade de uma espiral simples é normalmente de 2 t/h, semelhante à mesa oscilatória, mas ocupando uma área muito menor. Para que ocorra a separação ideal, é necessário que a diferença entre as densidades do mineral valioso e da ganga seja igual ou superior 1,0 <sup>(19)</sup>.

As variáveis operacionais mais significativas do processo são a taxa de alimentação e a percentagem de sólidos na polpa de alimentação, dentre outras. As espirais concentradoras trabalham com minérios, cuja faixa varia desde 3,0 mm até 37  $\mu$ m. Os melhores resultados são obtidos na faixa granulométrica de 1,0 mm a 74  $\mu$ m. Entretanto, para faixa muito ampla recomenda-se a operação em duas ou mais faixas, como no caso dos minérios de ferro. Este procedimento melhora, significativamente, o desempenho do equipamento. De modo análogo, aconselha-se a remoção da fração argilosa, quando essa ocorre no minério <sup>(23)</sup>.

### 3.2.6. Separação Magnética

A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os materiais ou minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético (ferromagnéticos – atraídos fortemente e os paramagnéticos – atraídos fracamente) e os que são repelidos por ele (diamagnéticos).

Dentre os dois principais minerais de ferro, classifica-se a magnetita como um mineral ferromagnético, fortemente atraído por um ímã comum, e a hematita como um paramagnético, fracamente atraído.

A separação magnética pode ser feita tanto a seco como a úmido. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e o a úmido para aquelas mais finas. Industrialmente, são conhecidos separadores magnéticos que operam com um campo de até 6 T, sendo 1 T (Tesla) igual  $10^4$  G (Gauss) e, que, representa  $1 \text{ NA}^{-1}\text{m}^{-1}$  <sup>(12)</sup>

Há uma grande variedade de separadores magnéticos, que podem ser classificados, de acordo com o uso, em dois grandes grupos, separadores a seco e a úmido. Os quais podem ser subdivididos de acordo com as características do campo de indução, separadores de baixa e alta intensidade. A forma dos elementos que executam o trabalho de separação no equipamento exerce influência significativa sobre a classificação dos separadores. Assim são denominados separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel e outros.

#### **Separadores de Ímãs Permanentes**

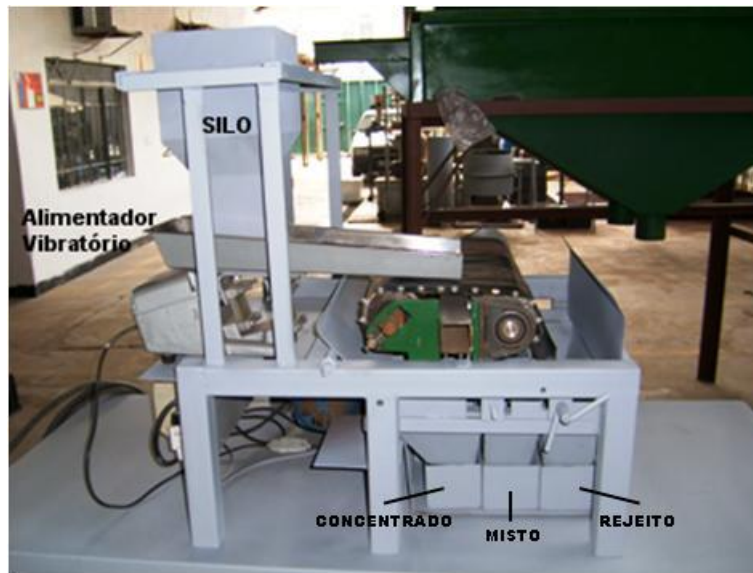
Há mais de uma década existem no mercado, equipamentos construídos com ímãs permanentes, capazes de produzir campos com intensidade acima de 1 T, isto é, o surgimento dos ímãs de terras-raras. Uma evolução nos ímãs permanentes que antes possuíam intensidade de campo magnético bem inferior.

Estes equipamentos com ímãs de terras-raras possuem vantagens significativas em relação aos modelos convencionais com eletroímãs, dentre elas destacam-se <sup>(13)</sup>:

- Não há necessidade de corrente elétrica e nem dos dispositivos para resfriamento de bobinas;
- Os campos magnéticos obtidos por meio desses equipamentos são estáveis e situam-se na faixa acima de 1 T;

- Os equipamentos são compactos e de fácil operação;
- O consumo de energia é excessivamente baixo, comparado ao dos equipamentos com eletroímãs.

Como desvantagem tem-se a pouca flexibilidade para variar a intensidade de campo, além de serem sensíveis à variação da temperatura. A **Figura 26** apresenta uma fotografia de um separador magnético de ímãs de terras-raras.



**Figura 26** – Separador magnético de ímãs de terras-raras

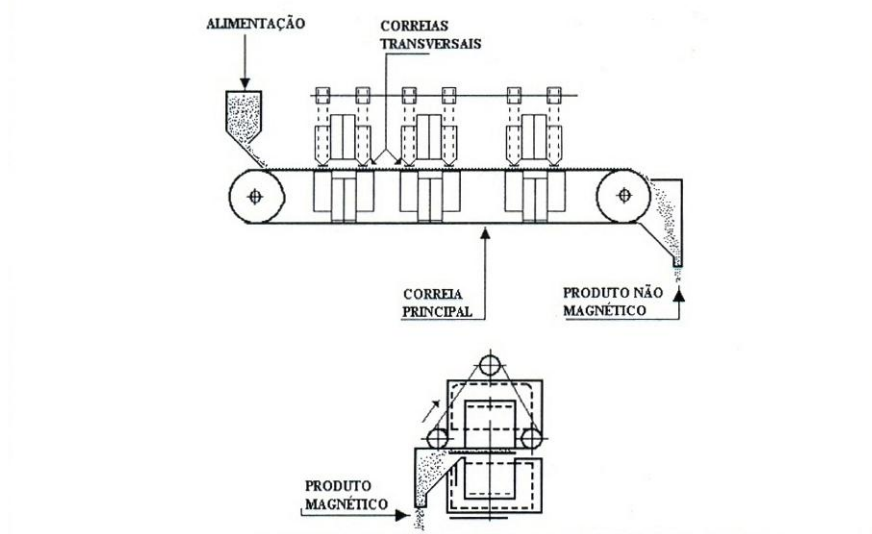
### **Separadores de Correias Cruzadas**

O separador consiste de um transportador de correia plana (correia principal), que passa entre os polos paralelos de dois eletroímãs, e outro transportador de correia plana, perpendicular à principal (correia secundária). A correia secundária passa sobre a superfície do polo superior com a área menor em relação a do polo inferior, proporcionando a convergência do campo. Entre as duas superfícies existe também um vão livre, separando as duas correias por uma distância da ordem de 10 mm, na região de maior intensidade de campo, por onde passa o material <sup>(24)</sup>.

O equipamento, que opera a seco com intensidade de campo até 1 T, possui um índice elevado de seletividade, e sua faixa granulométrica de aplicação está compreendida entre 1,65 mm e 104  $\mu\text{m}$  <sup>(24)</sup>. Dentre os vários modelos disponibilizados no mercado, existem desde os simples, apenas com um estágio, até os equipamentos com estágios múltiplos, ou seja, que permitem vários estágios de separação em um mesmo equipamento. A **Figura 27** ilustra o



desenho esquemático de um separador magnético de correias cruzadas de três estágios.

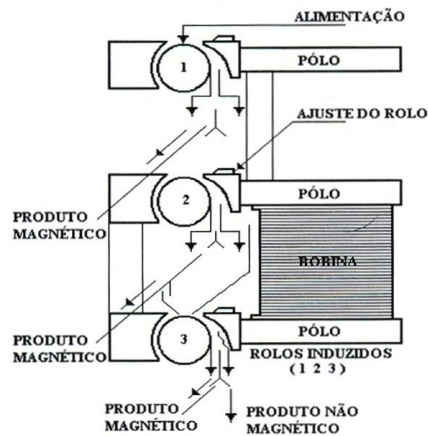


**Figura 27** – Separador magnético de correias cruzadas de três estágios<sup>(13)</sup>

### Separadores de Rolos Induzidos

No separador de rolos induzidos, o fluxo de partículas, alimentado a seco no topo do separador, deve ser bem centralizado por meio de um alimentador vibratório. As partículas passam pelo vão livre (*gap*), distância entre o eletroímã e o polo, e são desviadas da sua rota normal pela ação do campo magnético. Obtém-se então uma fração magnética e outra não magnética. As partículas magnéticas são atraídas pelo rotor e coletadas como primeiro produto magnético. A fração não atraída pelo primeiro rotor segue para o segundo rotor do separador e assim sucessivamente para o rotor seguinte com maior intensidade de campo.

A **Figura 28** apresenta um diagrama ilustrativo de um separador de rolos induzidos com três estágios de separação.



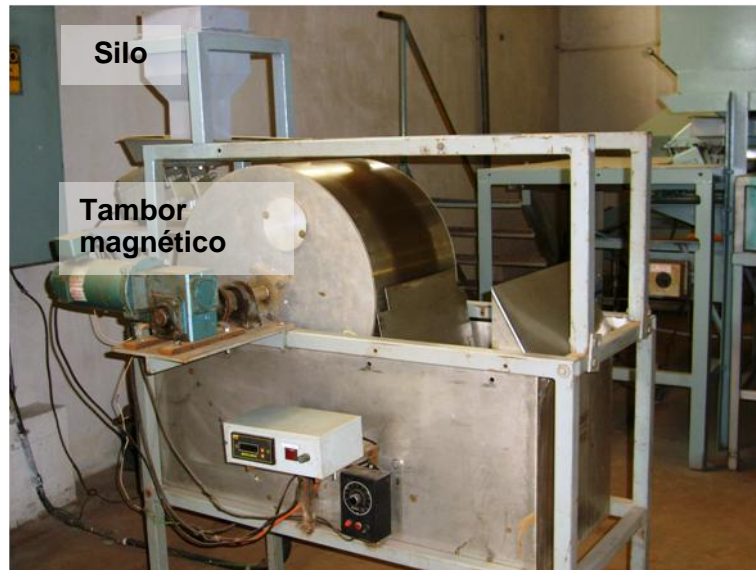
**Figura 28** – Separador de rolos induzidos com três estágios de separação<sup>(13)</sup>

A capacidade de alimentação varia caso a caso e é expressa em kg/h.m de largura do rotor, que, nas operações industriais, situa-se entre 2.000 e 3.000 kg/h.m <sup>(13)</sup>. A seletividade do processo é obtida por meio dos ajustes da velocidade do rotor e do fluxo magnético na região de separação, além do posicionamento dos defletores de fluxo.

#### **Separador de Tambor de Baixa Intensidade**

Esses separadores são utilizados na separação de minerais ferromagnéticos, desde que as intensidades de campo desses equipamentos atinjam valores de até 0,2 T <sup>(13)</sup>.

A operação consiste em introduzir a polpa de minério no tambor rotativo, por meio de um alimentador. As partículas magnéticas aderem ao tambor rotativo, no qual se encontra instalado o ímã, que pode ser permanente ou eletroímã. As partículas magnéticas são descartadas do circuito como produto magnético.



**Figura 29** – Separador magnético de tambor

### **Separador Magnético a Úmido de Alta Intensidade**

O campo magnético do separador é produzido por eletroímãs, entre outras, a função de promover um elevado campo magnético por onde passa o minério, cujas partículas paramagnéticas são capturadas nas próprias matrizes, por ação do campo magnético. As partículas capturadas na matriz são lavadas por um fluxo de água com baixa pressão. Nessa operação de lavagem coleta-se a fração magnética <sup>(13)</sup>. A Figura 30 apresenta uma fotografia de um separador magnético a úmido de alta intensidade da fabricante Gaustec.



**Figura 30** – Separador magnético a úmido de alta intensidade (WHIMS) da Gaustec

### 3.2.7. Flotação

É uma separação feita em uma suspensão em água (polpa). A diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas se prenderem (ou prenderem a si) a bolhas de gás (geralmente ar). Se uma partícula consegue capturar um número suficiente de bolhas, a densidade do conjunto partícula-bolhas tornar-se menor que a do fluido, e o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado numa espuma, enquanto que as partículas das demais espécies minerais mantêm inalterada a sua rota <sup>(12)</sup>.

No caso de minérios de ferro, a técnica utilizada usualmente é a flotação reversa – consiste em flotar o mineral de ganga, quartzo, e deprimir o mineral de interesse, hematita ou magnetita. Isto devido a grande quantidade de minerais de ferro, além de possuir maior densidade.

#### **Hidrofobicidade**

É a propriedade de determinadas espécies minerais capturarem bolhas de ar no seio da polpa. Exprime a tendência de essa espécie mineral ter maior afinidade pela fase gasosa que pela fase líquida. O comportamento hidrofílico das espécies minerais pode ser alterado pela introdução de substâncias adequadas no sistema. É possível introduzir uma hidrofobicidade seletiva, isto é, quando estão presentes duas espécies minerais, induzir a hidrofobicidade em apenas uma delas, mantendo a hidrofílica <sup>(19)</sup>.

A substância capaz de adsorver-se à superfície do mineral e torná-la hidrofóbica é denominada coletor e o mecanismo de adsorção e geração de hidrofobicidade é denominada coleta.

Para que o reagente possa atuar na superfície da partícula mineral, coletando-a, ativando-a ou deprimindo-a, é necessário que se dê um tempo para que as partículas minerais e as moléculas de reagentes tenham chance de se contatarem. Esta operação é denominada de condicionamento.

#### **Modulação de Coleta**

Podem se adicionar substâncias auxiliares, que modificam a ação do coletor, ou por razões de economia industrial (diminuir o consumo de coletor, acertar as condições de acidez ou alcalinidade, de modo a diminuir a corrosão dos equipamentos, diminuir o consumo de água, etc.) e também para gerar uma espuma estável e adequada <sup>(12)</sup>. Essas substâncias são denominadas de:

- **Depressores** – deprime a ação do coletor nas partículas indesejadas.
- **Ativadores** – Ativa seletivamente a superfície da espécie mineral desejada, tornando-a atrativa para o coletor.
- **Sequestradores** – Precipitam íons presentes na polpa oriundos da dissolução de determinadas espécies minerais ( $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ), que exercem uma ação depressora indesejável.
- **Espumantes** – reagentes tensoativos usados para gerar uma espuma estável, consistente e adequada às finalidades do processo.
- **Reguladores** – reagentes utilizados para ajustar o pH, que é uma das variáveis mais importantes que afetam a coleta.

Para que o reagente possa atuar na superfície da partícula mineral, coletando-a, ativando-a ou deprimindo-a, é necessário que se dê um tempo para que as partículas minerais e as moléculas de reagentes tenham chance de se contatarem. Esta operação é denominada de condicionamento <sup>(12)</sup>.

#### **Circuito de Flotação**

Genericamente, executa-se uma primeira flotação, chamada *rougher*, onde se obtém um concentrado pobre e um rejeito que ainda contém teores dos minerais úteis. O concentrado é re-lavado numa segunda flotação, denominada *cleaner*, onde é produzido um concentrado final e um rejeito de teor elevado. O rejeito *rougher* é repassado numa outra flotação, chamada *scavenger*, onde se obtém um rejeito muito pobre (rejeito final) e um concentrado que reúne os minerais úteis que estavam no rejeito *rougher*, mas que é pobre para ser considerado produto final. Tanto o rejeito *cleaner* como o concentrado *scavenger* ainda contêm minerais úteis e por isso são retornados à célula *rougher*.

O concentrado de uma flotação depende do sucesso de uma série de eventos independentes:

- A partícula deve entrar em contato com o coletor;
- O coletor deve adsorver sobre a superfície da partícula;
- A partícula coletada deve colidir com um número de bolhas de ar suficiente para torná-la leve a ponto de flutuar;
- A partícula não pode desprender-se das bolhas durante o percurso ascendente;

- A partícula deve permanecer dentro da espuma e escorrer para a calha de concentrado.

Por isso é necessário utilizar um banco de células, de modo a aumentar a probabilidade de todos esses eventos independentes ocorrerem com sucesso.

### **3.3. PELOTIZAÇÃO**

A Pelotização é um processo de aglomeração de finos de minério de ferro (pellet feed). O processo combina aglomeração e tratamento térmico (1200 – 1350 °C) para converter o minério bruto em pelotas com características adequadas para uso no alto forno ou na redução direta. As esferas produzidas, normalmente, possuem tamanhos variando de 8 a 18 mm de diâmetro <sup>(25)</sup>.

As pelotas constituem-se um material mais resistente ao manuseio que o granulado e o sinter. Outra vantagem é apresentar alto nível de qualidade químico-físico-metalúrgica. Por ajustes no processo produtivo, é possível produzi-las com ampla variedade de composição química, variando-se, por exemplo: os teores de sílica e de alumina, ganga básica (óxido de cálcio + óxido de magnésio) e elementos deletérios (fósforo, enxofre, vanádio, titânio, chumbo e cloro). Embora as pelotizações possam se localizar dentro de complexos siderúrgicos, usualmente elas se situam fora do ambiente das siderúrgicas. Como os investimentos em plantas de pelotização são de grande monta, as mineradoras têm assumido essa atividade e dominado o mercado mundial de pelotas <sup>(6)</sup>.

A pelota é um produto de alta resistência mecânica, com maior teor de ferro do que os sínteres. A pelotização é um processo mais complexo do que a sinterização para o aproveitamento de finos. Embora possa ser usada em altos-fornos, a pelota é a matéria-prima preferencial dos processos de redução direta <sup>(6)</sup>, gerando pré-reduzido (DRI e/ou HBI), posteriormente transformado em aço nos fornos elétricos a arco.

Há tendência de aumento dos finos nas lavras de minérios de ferro, o que tende a estimular a produção de pelotas. Tal processo tende a ser reforçado pelas restrições à ampliação das atividades de sinterização, em face da produção de dioxinas.

Os aglomerantes são utilizados para possibilitar a formação de pelotas cruas com resistência física suficiente para resistir ao trajeto pelotamento – forno e evitar a ocorrência de choque térmico. Pode-se classificar os aglomerantes <sup>(25)</sup>

em dois tipos: os inorgânicos (bentonita e cal hidratada) e os orgânicos (CMC, HEC e Poliacrilamida). Eles atuam através da formação de pontes de sais durante a secagem e aquecimento das pelotas.

A bentonita é o principal aglomerante utilizado no processo de pelotização de minério de ferro. Consiste de um material argiloso, tendo como principal mineral a montmorilonita (60 a 80%), além de pequenas quantidades de quartzo, mica, feldspato e caulim. Como desvantagem no uso, tem-se a incorporação de ganga ácida às pelotas (principalmente,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Durante o pelotamento, alguns fatores são críticos para obtenção das qualidades químicas, físicas e metalúrgicas ideais <sup>(25)</sup>, são eles:

- Umidade da mistura ou da Polpa Retida (PR);
- Granulometria e Superf. Específica da PR;
- Gênese dos minérios (Metamórficos ou Supergênicos);
- Tipo e quantidade de aglomerantes; e
- Equipamento (disco ou tambor) e condições operacionais.

Os equipamentos de pelotamento, onde a mistura do pellet feed é transformada em pelota crua, podem ser um disco pelotizador, mais comumente utilizado, ou em um tambor. A principal razão para preferência do disco é o fácil manuseio. Os discos operam praticamente sem circulação de carga de tamanho inferior ou com apenas uma pequena quantidade. Conseqüentemente, não é necessária a recirculação de carga de tamanho inferior, e rapidamente o disco entra em equilíbrio, isto é, a quantidade de mistura fornecida para pelotização corresponde à mesma quantidade de pelotas cruas descarregadas. Com um tempo menor e com menor quantidade de material testado, resultados satisfatórios são obtidos mais rapidamente no disco do que no tambor.

As pelotas cruas possuem baixa resistência mecânica e precisam ser queimadas para obter resistência <sup>(25,26)</sup>. Os principais tipos de fornos para queima <sup>(25)</sup> de pelotas de minério de ferro são:

- Grelha Móvel (*travelling grate / straight grate*)
- Grelha Móvel / Forno Rotativo (*grate kiln*)
- Vertical (*shaft furnace*)
- Circular (*circular indurating furnace*)

O processo de queima requer uma intensa necessidade energética, tanto no aquecimento do forno (ambiente externo a pelota), através de queima de combustível: sólido (antracito), líquido (óleo) e gás (gás natural), quanto no

interior da pelota, através de carvão e o teor de magnetita no minério de ferro, buscando realizar uma queima homogênea da superfície ao núcleo da pelota.

Conforme pode ser observado na **Tabela 11**, o consumo calorífico é menor para minérios contendo somente magnetita ou uma mistura de magnetita e hematita, isto é justificável porque durante a queima das pelotas a magnetita se oxida para hematita, em uma reação exotérmica, liberando cerca de 460 kJ por quilo de magnetita. Esta energia adicional é obviamente favorável ao processo de endurecimento das pelotas <sup>(27)</sup>.

**Tabela 11** – Produtividade e consumo específico de combustível na pelotização por tipo de minério<sup>(25)</sup>

TIPO DE MINÉRIO	Produtividade (t / m <sup>2</sup> . dia )		Consumo de Combustível (Kcal / t)		PAÍS
	Projeto	Operação	Projeto	Operação	
100% Magnetita	26 – 30	32,0	110.050 / 131.580	77.751	Suécia
100% Hematita	22 – 24	23,0	239.234	203.349	Brasil
50:50 Magnetita / Hematita	24 – 26	27,5	167.464 / 191.390	167.464	Holanda
Limonita / Hematita	16 – 18	18,5	287.100 / 358.850	299.040	Austrália

Fonte: Lurgi - Dravo

Portanto, existem duas grandes vantagens na utilização de um minério de ferro magnetítico na pelotização ao invés de outros. A primeira relacionada à economia de energia no processo de queima das pelotas e a segunda relaciona-se à oxidação da magnetita para hematita contribuindo para melhoria da qualidade das pelotas.



### 3.4. REDUÇÃO

#### 3.4.1. Termodinâmica da Redução

Os agentes redutores mais usados na redução dos óxidos de ferro são o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H<sub>2</sub>), ou ainda misturas destes dois gases. A termodinâmica dos óxidos de ferro trata basicamente do equilíbrio existente entre as fases dos óxidos de ferro e estes agentes redutores, ou seja, definirá se uma determinada reação pode acontecer ou não. Entretanto, a termodinâmica não determinará com que velocidade estas reações ocorrerão, pois este parâmetro é definido pelas leis que governam a cinética do processo, necessitando que ambas as condições (termodinâmicas e cinéticas) se façam presentes para que as reações ocorram.

O diagrama de equilíbrio de fases Fe-O (**Figura 31**) mostra as fases Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> existindo em seis fases condensadas. Estas fases são o ferro metálico (subdividido em ferro-alfa, ferro-gama e ferro-delta), wustita, magnetita, hematita, ferro líquido e óxido de ferro líquido <sup>(28)</sup>.

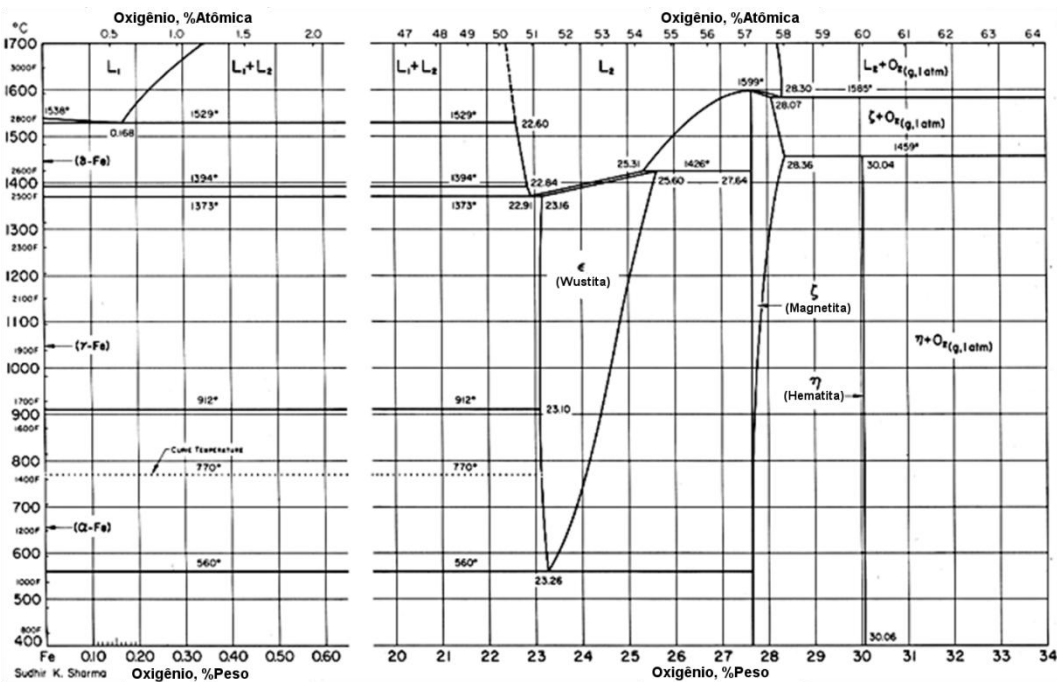
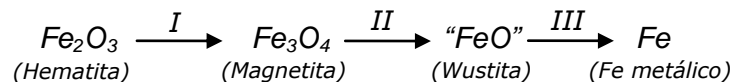
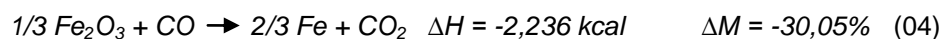
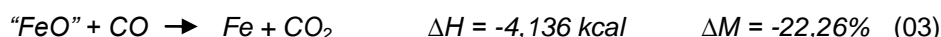
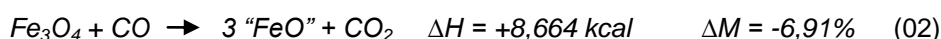
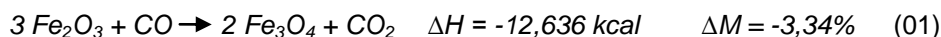


Figura 31 – Diagrama Fe-O

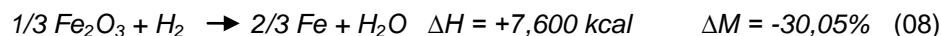
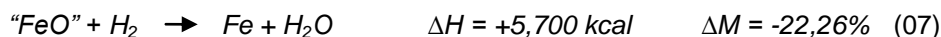
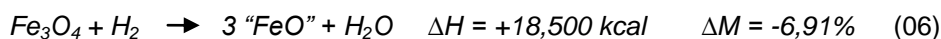
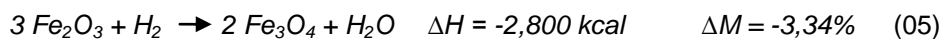
A redução do Ferro, começando pelo maior estado de oxidação do ferro, a Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ocorre em três estágios, para temperaturas acima de  $560^\circ\text{C}$ :



Estas três reações para redução pelo CO, com os seus calores de reação a  $25^\circ\text{C}$  ( $\Delta H$ ) e a variação de massa ( $\Delta M$ )<sup>(29)</sup>, são apresentadas a seguir:



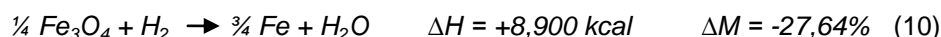
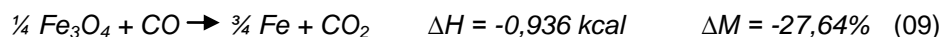
Para a redução pelo  $\text{H}_2$  as reações são:



Conforme mostram as reações da redução desde o estado mais oxidado do ferro até o ferro metálico, a redução pelo CO (reação 04) é exotérmica (libera calor), diferentemente do que ocorre com a redução pelo  $\text{H}_2$  (reação 08) que é endotérmica (absorve calor).

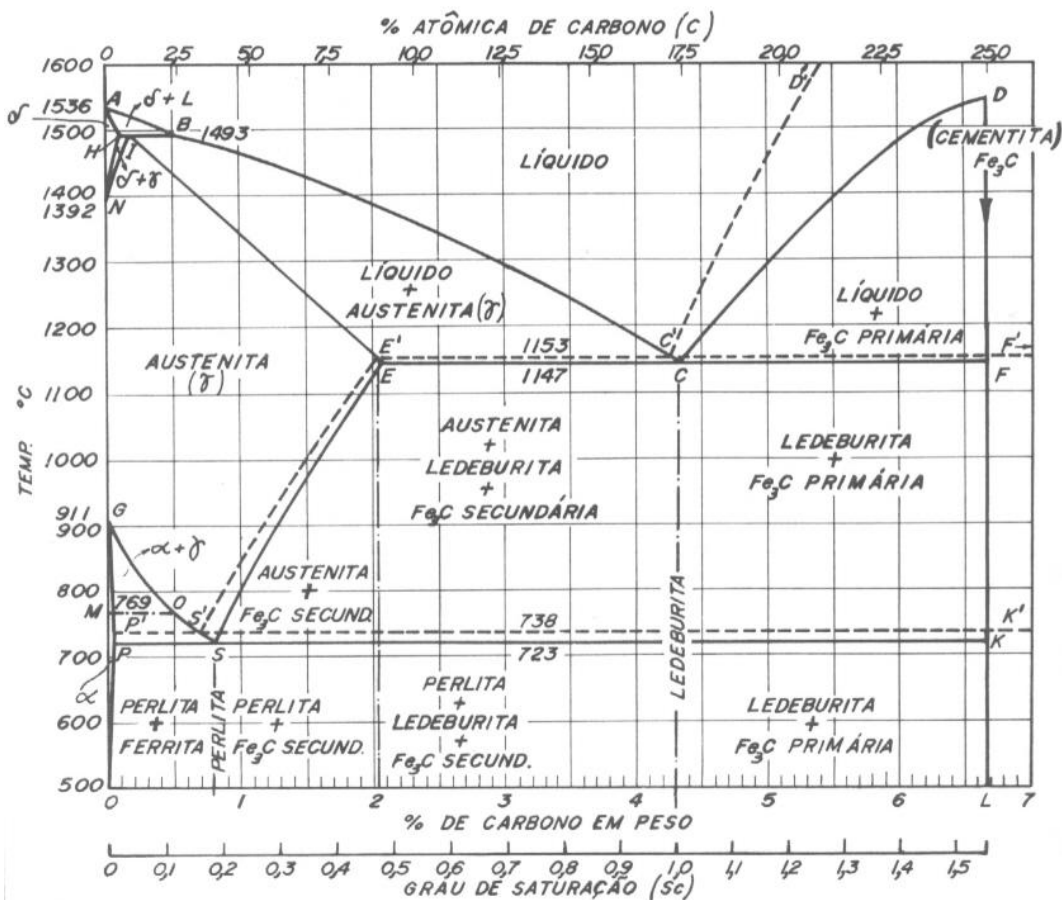
A redução da hematita a ferro metálico apresenta uma variação de massa de cerca de -30%. Dentre os três estágios de redução, o terceiro (wustita para ferro metálico) é o que apresenta maior redução de massa ( $\Delta M = -22,26\%$ ).

Como a wustita, "FeO", é metaestável abaixo de  $560^\circ\text{C}$ , a redução em baixas temperaturas ocorre em apenas dois estágios, ao invés de três. Neste caso, termodinamicamente, a magnetita produzida de acordo com a reação 01 (caso redução pelo CO), ou reação 05 (caso redução pelo  $\text{H}_2$ ), é reduzida a ferro diretamente, ou seja, sem a formação de "FeO":



Para temperaturas abaixo de 560°C, embora seja termodinamicamente viável, a cinética de redução não é favorável <sup>(28,29,30)</sup>.

A **Figura 32** apresenta o diagrama de equilíbrio Fe-C. Este diagrama é geralmente apresentado para teores de carbono até 6,7%. As ligas Fe-C com percentagem de carbono variando de 0,008 a 2,11% são denominadas de aço. Para percentuais de carbono variando entre 2,11% e 6,7% têm-se os ferro fundidos. A diferença fundamental entre ambos é que o aço, pela sua ductibilidade, é facilmente deformável por forja, laminação e extrusão, enquanto que uma peça em ferro fundido é muito frágil <sup>(31)</sup>.



**Figura 32** – Diagrama de equilíbrio Fe-C<sup>(28)</sup>

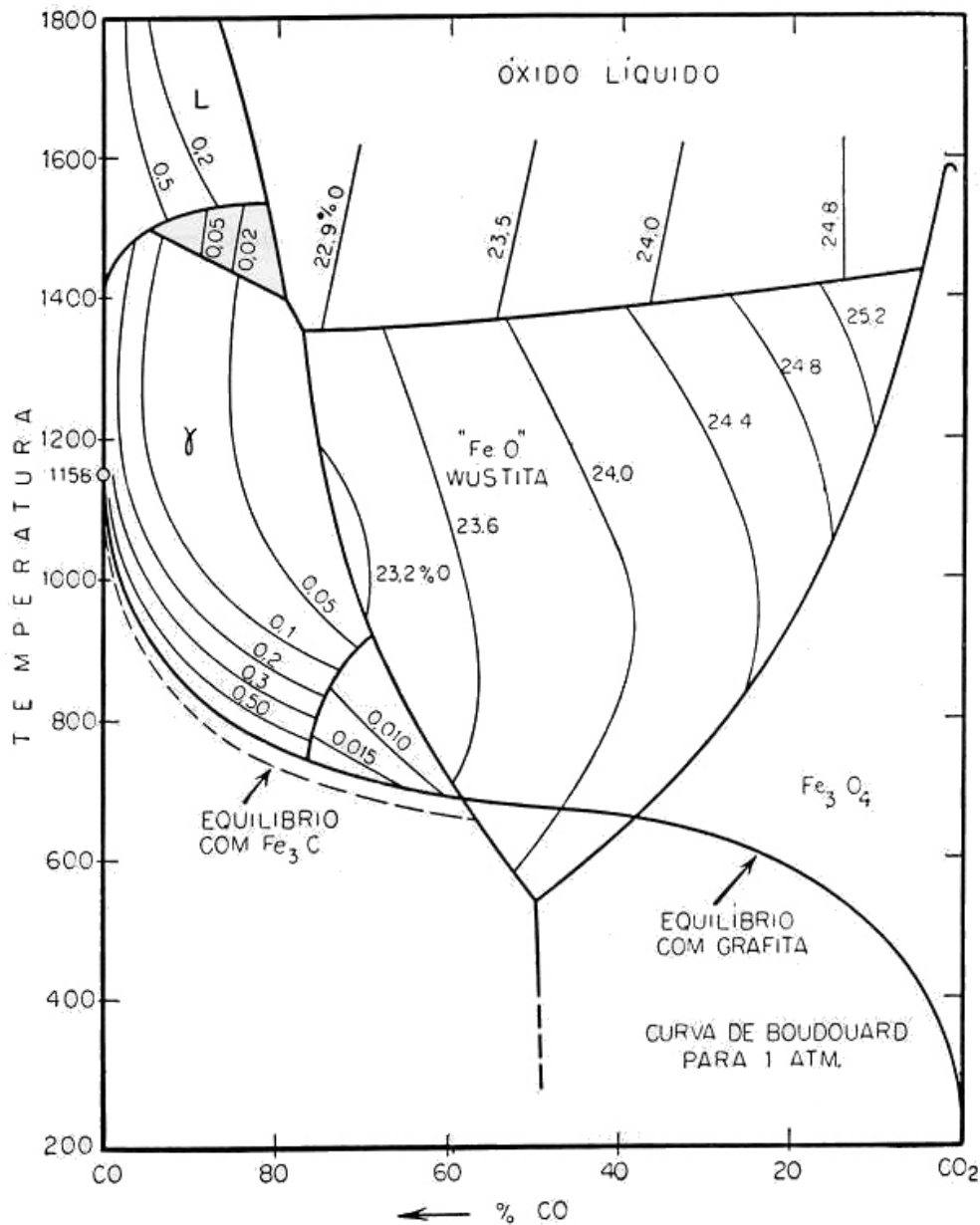
Apesar de na siderurgia as ligas de ferro produzidas não serem de fato ligas binárias, pois nelas estão presentes outros elementos, tais como fósforo, enxofre, manganês e silício. A presença desses elementos, em teores considerados normais, pouco afeta o diagrama Fe-C <sup>(28)</sup>.

O diagrama de Chaudron (**Figura 33**), cujas coordenadas são, composição dos gases (CO/CO<sub>2</sub>) versus temperatura, apresenta as áreas em que as fases estão estáveis, para uma pressão das fases gasosas igual a 1 atm. Estas áreas

são conhecidas como campos de predominância. Por exemplo, a uma temperatura de 800°C, com a fase gasosa contendo 20% de CO, a fase estável é a magnetita. Isto significa que, se a composição do gás permanecer constante, a reação 01 irá ocorrer no sentido indicado, ou seja, a hematita será reduzida a magnetita, mas as reações 02 e 03 irão ocorrer no sentido contrário ao indicado, oxidando o ferro e a wustita para magnetita.

Este diagrama fornece as fronteiras de ocorrência dos óxidos de ferro e do ferro metálico, em função da temperatura e do potencial redutor da atmosfera gasosa. Pode-se então a partir de qualquer temperatura, definir-se a relação CO/CO<sub>2</sub> necessária para que as reações de redução ocorram até cada estado de oxidação possível (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>(1-y)</sub>O e Fe).

A curva da reação de Boudouard ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ), responsável por definir o equilíbrio entre o Carbono e as suas fases gasosas CO e CO<sub>2</sub>, também é projetada sobre o diagrama de Chaudron. Neste diagrama, à esquerda da curva de Boudouard (baixas temperaturas), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é a fase gasosa estável. Neste caso, o monóxido de carbono (CO) tende a se decompor em CO<sub>2</sub> e Carbono, ou seja, reação reversa de Boudouard. Para maiores temperaturas, o CO<sub>2</sub> reage com Carbono para produzir CO, em mais um exemplo do Princípio de Le Chatelier, pois sendo esta reação endotérmica, é favorecida pelas altas temperaturas.



**Figura 33** – Diagrama de Chaudron (oxi-redução)<sup>(28)</sup>

De acordo com o diagrama, nota-se que acima de 1000°C a reação de Boudouard é essencialmente completa, ou seja, a fase gasosa consiste de 100% CO. Isto significa dizer que termodinamicamente, CO<sub>2</sub> não pode existir na presença de Carbono para temperaturas acima de 1000°C. Entretanto a redução dos óxidos ocorre, devido às reações 03 e 10 que ocorrem separadamente. Estas duas reações podem ser combinadas, para indicar a reação global:

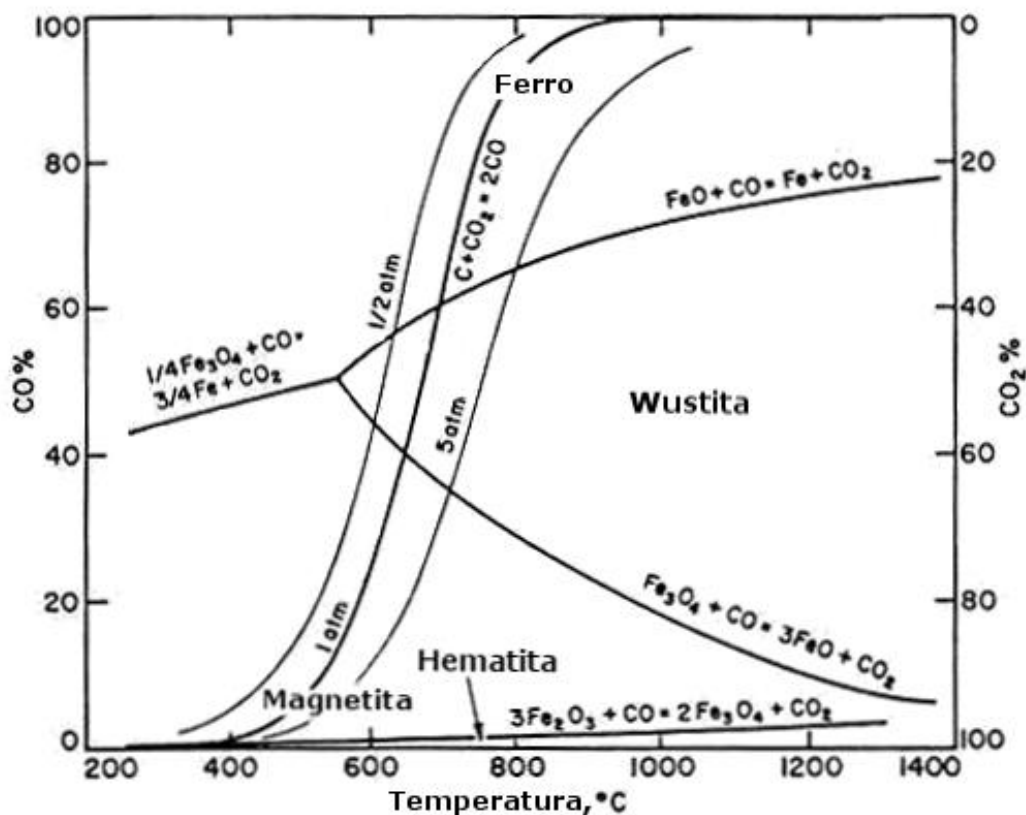


A reação 12 é chamada de redução direta pelo carbono, enquanto que a reação 03 é chamada de redução indireta pelo carbono.

Nota-se que a curva de equilíbrio da reação de Boudouard cruza a curva do equilíbrio wustita-ferro à aproximadamente 700°C e a curva de equilíbrio magnetita-wustita à cerca de 650°C. Novamente isto significa que, termodinamicamente, wustita não pode ser reduzida diretamente em temperaturas menores do que 700°C e magnetita não pode ser reduzida em temperaturas menores do que 650°C, pelo fato de que o CO tende a se decompor em CO<sub>2</sub> e C, sem reduzir os óxidos desejados.

Na reação de Boudouard um volume de CO<sub>2</sub> produz dois volumes de CO à pressão constante, logo esta reação causará um aumento na pressão total do sistema. Se o sistema C-O estiver em equilíbrio, a pressão aumentando, acarretará em uma resposta do sistema no sentido de aliviar a pressão, decompondo o CO em CO<sub>2</sub> e C. Para manter a mesma relação CO/CO<sub>2</sub>, em pressões maiores, a temperatura aumentaria <sup>(28)</sup>.

Resumindo, para aumentos de pressão a curva de equilíbrio da reação de Boudouard desloca-se para à direita, e vice-versa, conforme mostra a **Figura 34**.

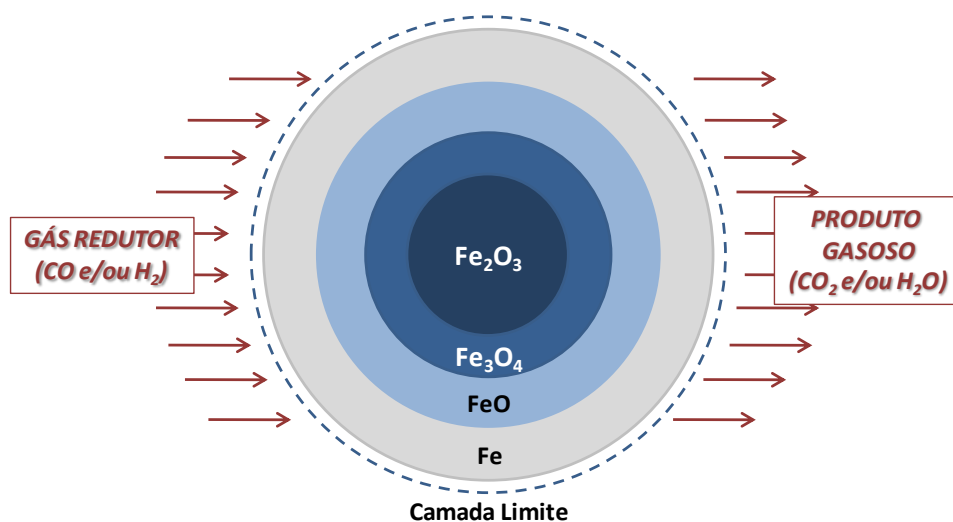


**Figura 34** – Efeito da variação de pressão sobre o equilíbrio da reação de Boudouard<sup>(28)</sup>

### 3.4.2. Cinética da Redução

Os principais modelos cinéticos da redução de óxidos de ferro desenvolvidos são o modelo topoquímico e o modelo redução interna uniforme <sup>(28,29)</sup>. Nestes casos considera-se que a redução acontece a partir das superfícies das partículas para o centro; no caso específico do modelo topoquímico, as partículas manteriam a sua geometria inicial.

A maior parte das reduções das partículas densas geralmente se ajusta razoavelmente ao modelo topoquímico (**Figura 35**). Neste modelo a reação se inicia na superfície da partícula e progride, como uma frente, até o núcleo denso ainda não reagido. O núcleo fica rodeado de camadas concêntricas dos produtos sólidos das reações. À medida que a reação topoquímica avança, o núcleo sem reagir diminui de tamanho e conseqüentemente, a área da superfície ativa da reação também decresce.



**Figura 35** – Representação esquemática do modelo topoquímico

Os mecanismos presentes na redução de óxidos de ferro, via um redutor gasoso <sup>(28,29,30)</sup> seriam os seguintes:

- I. Transporte dos gases redutores ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ) pela camada limite;
- II. Transporte dos gases nos microporos;
- III. Adsorção do redutor pelo óxido;
- IV. Reação química com o óxido;
- V. Desorção
- VI. Transporte dos gases nos microporos
- VII. Transporte dos produtos gasoso ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) pela camada limite

A reação de redução dos óxidos de ferro pelo CO é considerada de primeira ordem em relação aos reagentes, podendo ser os mecanismos controladores da cinética a reação química da redução da wustita a ferro metálico (IV) e/ou transporte/difusão dos gases pelos microporos (II e VI), dependendo do modelo admitido e das variáveis do processo, sendo usualmente encontradas energias de ativação da ordem de 63 a 125 kJ/mol <sup>(22)</sup>.

As experiências demonstram que os mecanismos controladores variam de acordo com o avanço da redução do óxido de ferro. Para redução até 40%, o mecanismo controlador é a reação química da wustita. Entre 40% e 90%, existe um controle misto, tanto transporte dos gases pelos microporos quanto a reação química da wustita. Acima de 90%, o controle da velocidade de redução é feito pelo transporte dos gases pelos microporos, isto acontece devido à espessa camada de ferro metálico <sup>(29,32)</sup>. A **Tabela 12** resume os mecanismos controladores de acordo com a redução.

**Tabela 12** – Mecanismo controlador em função da redução do óxido de ferro <sup>(29,32)</sup>

REDUÇÃO	MECANISMO CONTROLADOR
Até 40%	Reação química da wustita.
Entre 40% e 90%	CONTROLE MISTO (Transporte/difusão dos gases pelos microporos + Reação química da wustita.)
Acima de 90%	Transporte/difusão dos gases pelos microporos.

As principais variáveis que influenciam a redução de óxidos de ferro por redutores gasosos são <sup>(29,32,33)</sup>:

- Temperatura;
- Vazão e composição da atmosfera redutora;
- Porosidade do material;
- Granulometria e morfologia das partículas de óxido de ferro;
- Presença de impurezas e ganga;
- Área de contato entre metal formado e óxidos não reduzidos;
- Difusão iônica e gasosa através das camadas porosas; e
- Variação do tamanho de partícula dos reagentes.