

CETM

Curso de Especialização em
Tratamento de Minérios

Aglomeração mineral

3. Pelotização

Prof. Dr. André Carlos Silva



5mm < Pelotas < 18mm

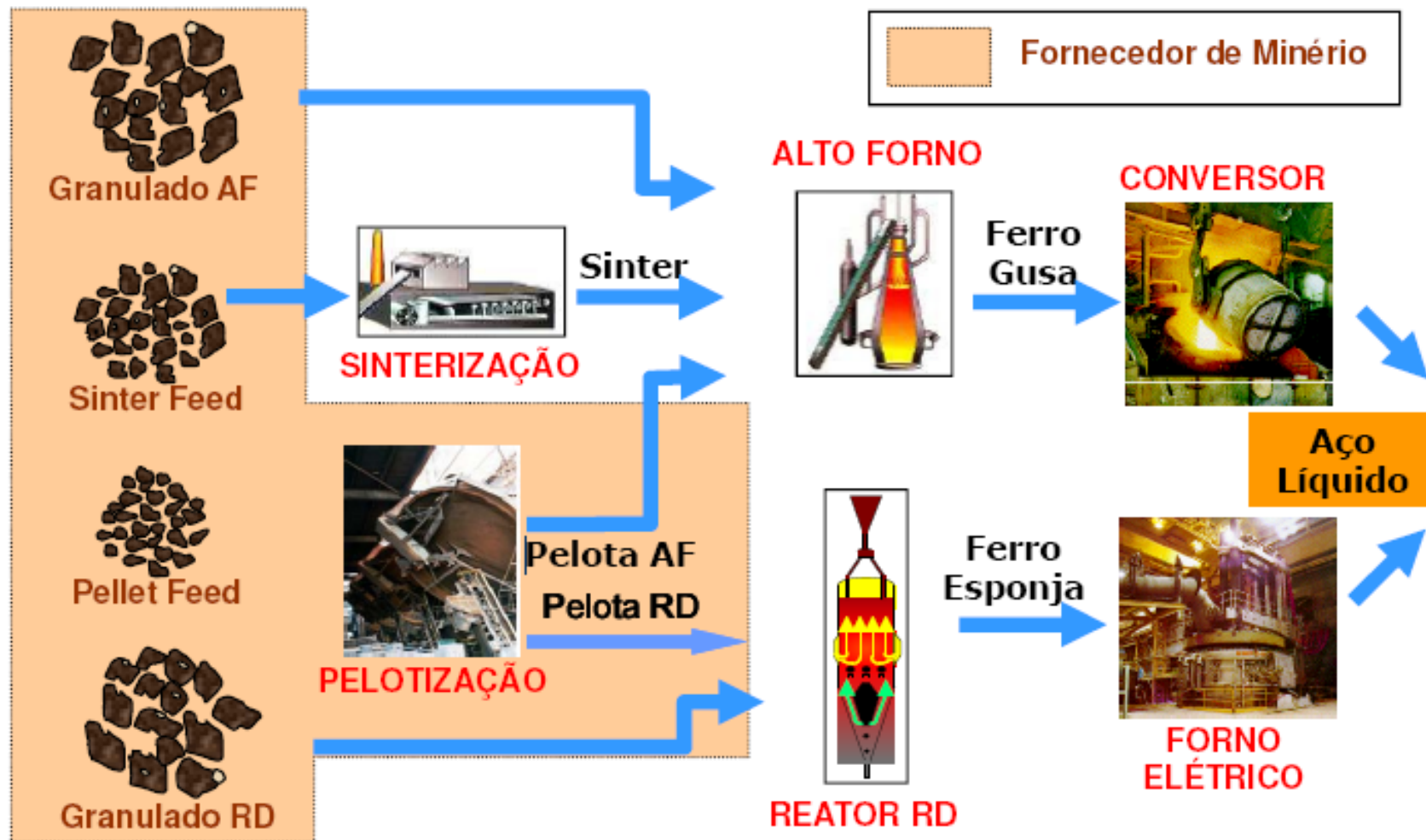


5mm < Sínter < 50mm



6mm < Minério granulado < 40mm





1. Pelotização

- Processo de **aglomeração** de finos de minério de ferro (com granulometria e superfície específica controladas) com emprego de um processamento térmico a elevadas temperaturas (1300-1350° C) em atmosfera oxidante, objetivando:
 - Aproveitamento econômico de partículas ultrafinas ($< 0,150$ mm) geradas nas minas;
 - Ajuste da qualidade química e física e agregação de valor às cargas metálicas de altos fornos e reatores de redução direta.

2. Fundamentos

- Não há aplicação de forças externas ao processo.
- Os aglomerados formados são chamados **pelotas**.
- Podem ser utilizados ou não aglutinantes.

3. Etapas do processo

- **Preparação das matérias-primas:**
 - Concentração/separação;
 - Empilhamento, recuperação e homogeneização;
 - Moagem e classificação;
 - Espessamento;
 - Homogeneização;
 - Filtragem;
 - Adições (aglomerante, fundentes);
 - Misturamento.

3. Etapas do processo

- **Pelotamento:**

- Formação de pelotas cruas;
- Classificação de pelotas cruas.

- **Processamento térmico:**

- Queima das pelotas cruas;
- Peneiramento e estocagem de pelotas queimadas.

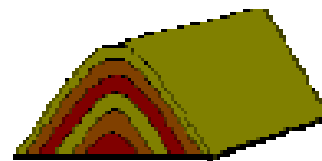
2.1. Concentração/Separação

- Atividades típicas de beneficiamento de minérios;
- Enriquecimento do teor de ferro metálico;
- Remoção parcial de constituintes indesejáveis (ganga : SiO_2 , Al_2O_3 , P, Mn);
- Principais operações: lavagem, concentração gravimétrica, separação magnética, flotação convencional, flotação em colunas.

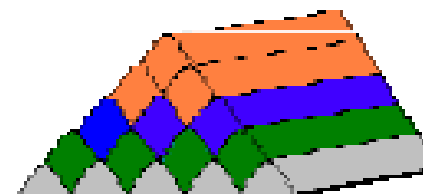
2.2. Empilhamento/Homogeneização

- Esta etapa objetiva:
 - Minimizar flutuação das propriedades das diversas matérias-primas;
 - Servir como "pulmão", garantindo a continuidade operacional;
 - Adição de fundentes e, às vezes, combustíveis sólidos;
 - Parâmetros-chave de controle: % SiO_2 dos minérios; índice de moabilidade; mineralogia dos minérios.
- Uma pilha típica possui de 45.000 a 50.000 t minério.

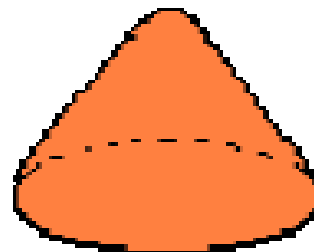
✓ **Chevron**



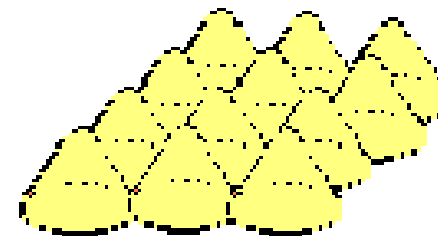
✓ **Windrow**



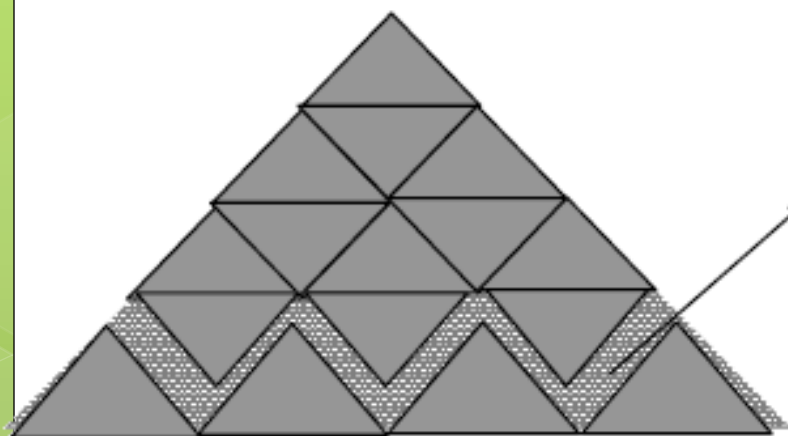
✓ **Cone**



✓ **Multicones**

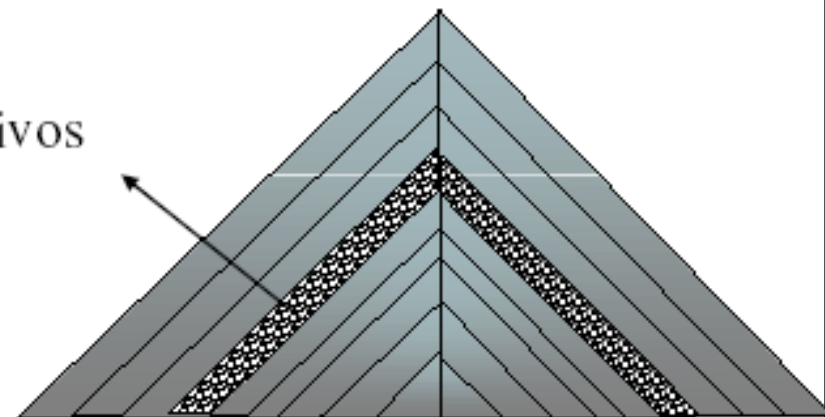


2.2. Empilhamento/Homogeneização



Windrow Modificado

Aditivos



Chevron



Empilhamento Windrow



Empilhamento Chevron







2.3. Recuperação/Retomada

- Tem como objetivos alimentar uma unidade em operação e diminuir a variação do material alimentado.
- A recuperação de pilhas de minério, via de regra, é feita utilizando-se uma recuperadora (ou retomadora) com roda de caçambas.
- A roda escava o material em uma ou mais passadas pela seção transversal da pilha.





2.4. Cominuição e Classificação

- Ajuste das propriedades físicas da mistura de minérios às exigências do pelotamento e processamento térmico:
 - **Granulometria:** 80-90% < 0,045 mm (325 mesh)
 - **Superfície específica:** 1750 - 1950 cm²/g
- Realizada através de moinhos e/ou prensa de rolos.

2.5. Espessamento

- Etapa necessária apenas nas plantas com circuito de moagem fechado e a úmido.
- Adensamento da polpa ciclizada (% sólido ~ 20%) via princípio da sedimentação (normalmente exige-se adição de floculante).
- Obtenção de polpa espessada com % sólido igual a 70%.
- Recuperação da água de transbordo, normalmente retornando aos moinhos.

03/08/2013



7 12:11 PM

2.6. Homogeneização

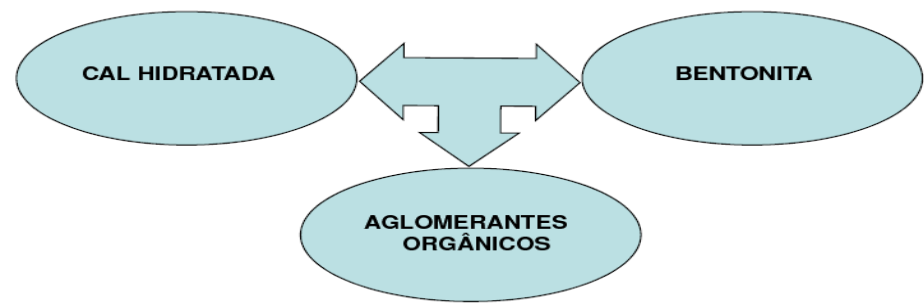
- Manutenção de sólidos em suspensão e polpa homogeneizada em tanques com agitação mecânica.
- Estoque intermediário de material (pulmão).
- Possibilidade de adição de combustível sólido (antracito, coque de petróleo, etc).
- Recalque de material para o circuito de filtragem.

2.7. Filtragem

- Requerida nas plantas com circuito de moagem a úmido.
- Filtros de discos rotativos a vácuo.
- Ciclo: formação da torta / secagem / descarga.
- Obtenção de “polpa retida” com umidade 8% - 10%.
- Eventual necessidade de aditivos de filtragem (polímeros).

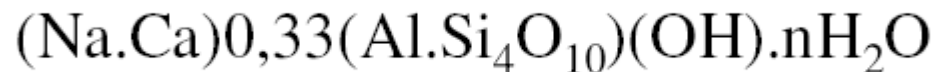
2.8. Fundentes

- O objetivo da adição de fundente à pelota é modificar a basicidade (relação CaO/SiO_2) da ganga da pelota.
- São usados os calcários calcítico ou dolomítico, dunito ou magnesita.
- São moídos a uma finura correspondente à superfície específica de cerca de 2500 – 4000 cm^2/g .
- Em Mina de Fábrica e Tubarão o fundente é moído juntamente com o minério de ferro.



2.9. Aglomerante

- Visa a formação de pelotas cruas com resistência física suficiente para resistir ao trajeto **pelotamento** → **forno** e evitar a ocorrência de choque térmico na secagem.
- **Principais tipos:**
 - Inorgânicos: bentonita e cal hidratada;
 - Orgânicos: carboximetilcelulose (CMC), hidroxietilcelulose (HEC) e poliacrilamida.



2.9.1. Bentonita

- Material argiloso, tendo como principal mineral a montmorilonita, além de pequenas quantidades de quartzo, mica, feldspato e caulim.
- Estrutura lamelar com grande capacidade de retenção de moléculas de água entre as camadas possibilitando melhor controle da umidade das pelotas.
- Dosagem típica: 0,5% ou 5 kg/t mistura.

Análise típica de bentonitas

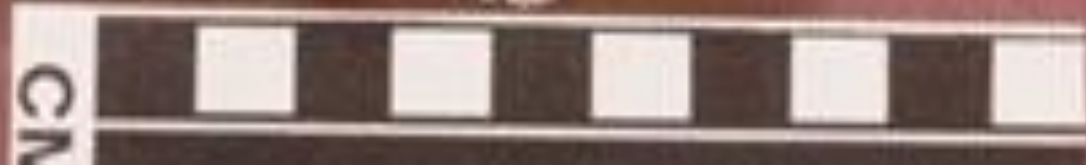
ANÁLISE	IMPORTADA	NACIONAL
Na ₂ O (%)	2,30	1,35
Absorção de água - 2hs (%)	420	350
SiO ₂ (%)	50	65
Umidade (%)	12	13
Granulometria < 0,045 mm (%)	68	60
Superfície Específica (cm ² /g)	4.000	4.000
Colóides - Método Proveta (%)	80	80
Colóides - Método Centrífuga (%)	50	50

Importada – Índia (Ashapura)

Nacional – Paraíba



BENTONITA
98mm Cabañas (Tol.)



2.9.2. Cal hidratada

- Obtida via calcinação de calcário, em fornos verticais, rotativos ou de leito fluidizado ($T > 800^{\circ} \text{C}$), é recebida na usina como cal virgem (CaO):



- Produto com alta superfície específica ($12.000 \text{ cm}^2/\text{g}$).

2.9.2. Cal hidratada

- Hidratação da cal:



63.7kJ/mol de CaO

- Dosagem típica: 2,5% ou 25 kg/t mistura.
- Atua também como fonte de CaO.

2.9.3. Aglomerantes orgânicos

- Compostos poliméricos (longas cadeias de carbono de alta massa molecular).
- Têm como vantagem não incorporar contaminantes às pelotas, pois são decompostos durante o processamento térmico.

2.9.3. Aglomerantes orgânicos

- Principais tipos comerciais são:
 - PERIDUR (CMC - carboximetilcelulose)
 - CARBINDER (HEC - hidroxietilcelulose)
 - ALCOTAC (PAM - poliacrilamida)

2.9.3. Aglomerantes orgânicos

- As dosagens tipicamente utilizadas são: 0,035% a 0,060% ou 0,35 kg/t a 0,60 kg/t de mistura.
- Apesar da baixa dosagem utilizada, o custo destes aglomerantes é relativamente elevado.

2.10. Qualidade dos aglomerantes

Aglomerante	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Dosagem Típica (kg/t pelota)
BENTONITA	59,8	16,4	0,9	2,6	5,0
CAL HIDRATADA	0,9	0,1	72,9	0,3	27,0
ORGÂNICO	50% Carboximetilcelulose – 30% Na ₂ CO ₃ – 20% NaCl				0,4

2.10. Qualidade dos aglomerantes

FUNDENTE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Dosagem Típica (kg/t pelota)
CALCÁRIO CALCÍTICO	1,4	0,7	53,4	0,3	13,0
CALCÁRIO DOLOMÍTICO	2,2	0,2	37,0	15,1	18,0
DUNITO	38,8	3,5	2,5	34,6	25,0
MAGNESITA	0,7	1,5	1,1	46,8	30,0

2.11. Adições

- Particularmente na Usina de São Luiz, devido à qualidade do minério Carajás, é adicionada areia para ajuste do teor de SiO_2 da mistura.
- Antes de ser adicionada ao minério a ser pelletizado, a areia é moída (moagem a seco em moinhos de bolas) a uma granulometria correspondente a superfície específica de cerca de $2000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

2.12. Combustíveis sólidos

- Normalmente utiliza-se o coque de petróleo ou o antracito.
- A granulometria tipicamente utilizada é de 82% do material abaixo de 1 mm.

2.12. Combustíveis sólidos

○ OBJETIVOS DO USO:

- Diminuir o consumo de óleo/gás na queima das pelotas.
- Melhorar a resistência à compressão da pelota crua para minimizar as variações de qualidade do produto e proporcionar bons resultados em termos de redutibilidade.



Turfa



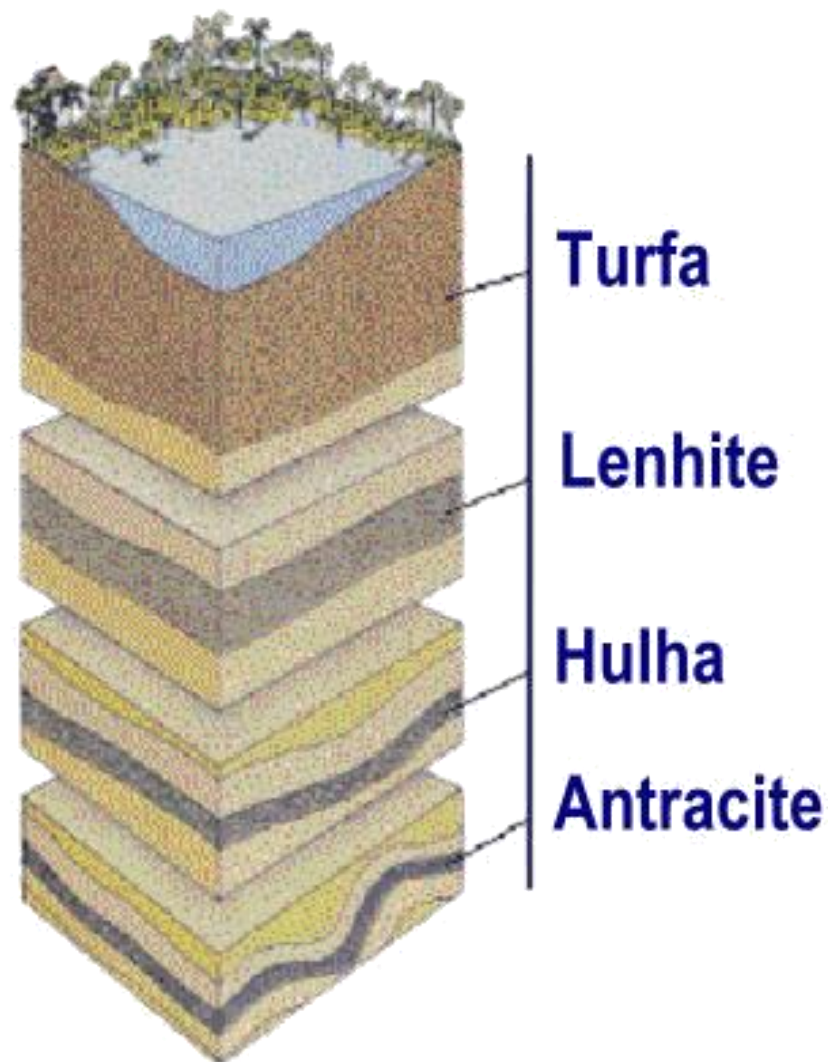
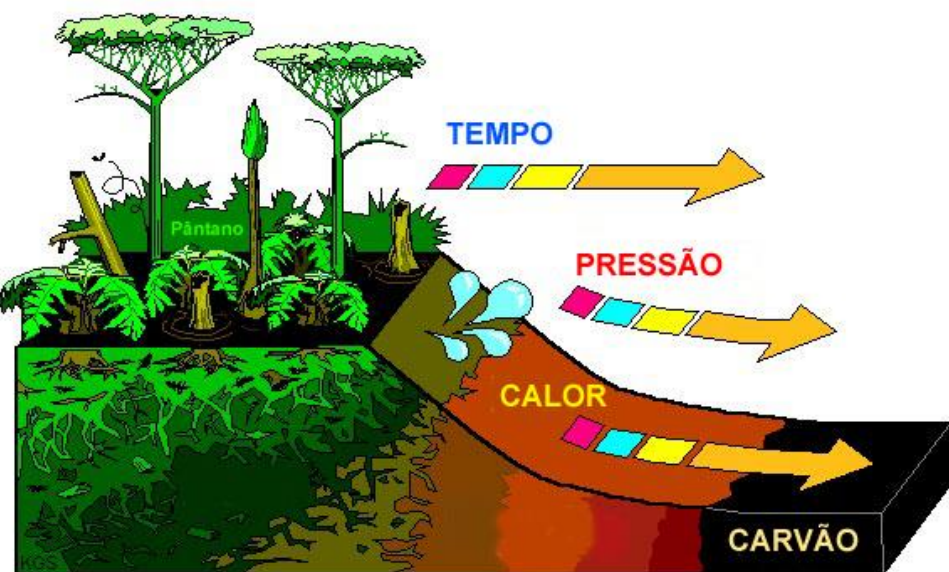
Hulha



Lenhite



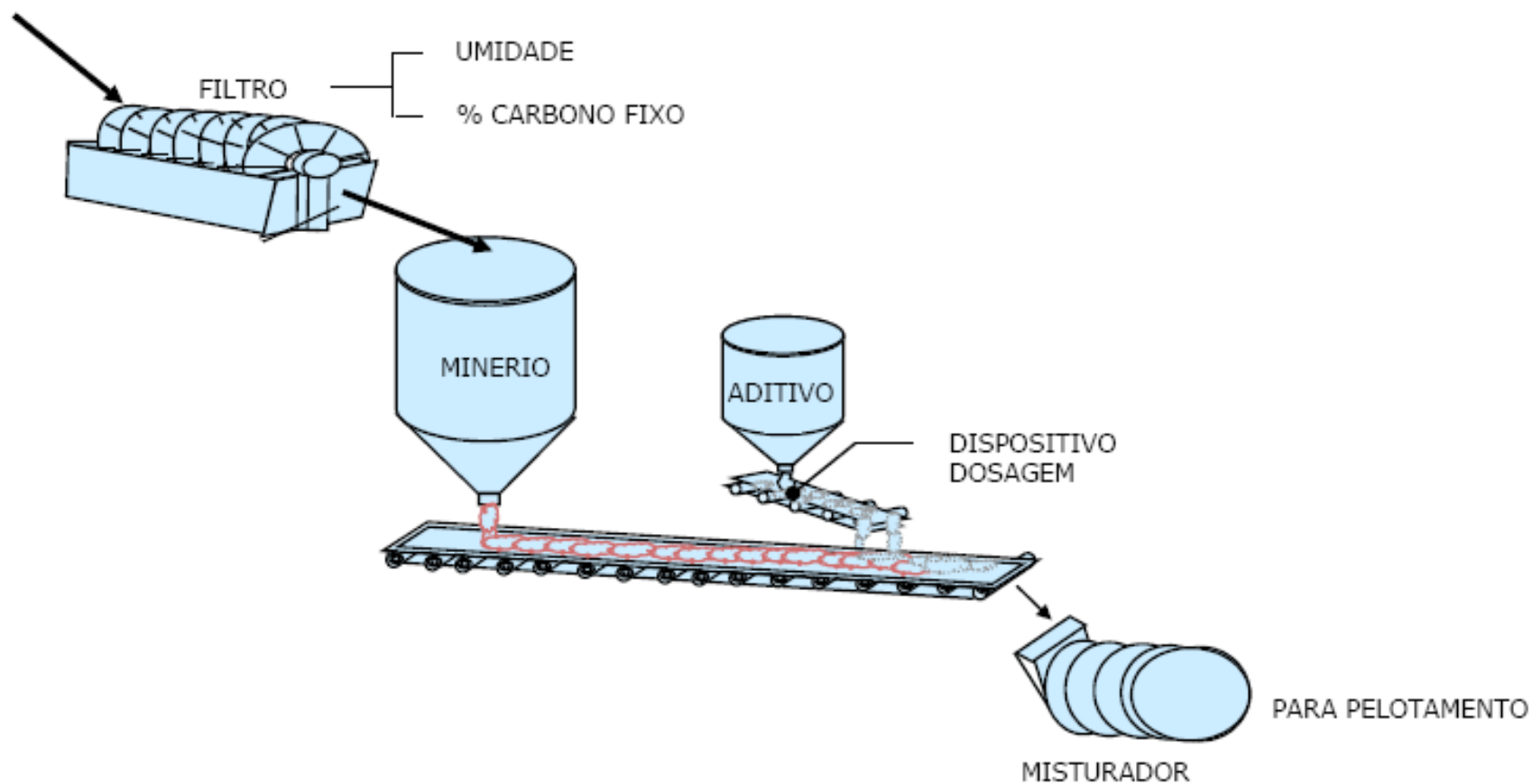
Antracite



2.13. Qualidade do combustível sólido

COMBUSTÍVEL	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinza (%)	S (%)	Poder Calorífico (kcal/kg)	Dosagem Típica (kg/t pelota)
ANTRACITO	68,9	11,6	19,6	1,2	6.600	14,0
COQUE DE PETRÓLEO	89,6	9,8	0,6	1,8	7.890	12,0

3. Dosagem de aditivos e mistura



3. Dosagem de aditivos e mistura

- A mistura é uma etapa crítica devido às baixas dosagens de aglomerante.
- Importância de boa eficiência de mistura para garantia da qualidade das pelotas cruas e redução dos desvios-padrão dos parâmetros de qualidade.

3. Dosagem de aditivos e mistura

- A maioria das usinas de pelotização dispõem de misturadores ineficientes.
- Ganhos de eficiência de mistura podem implicar em reduções expressivas no consumo específico de aglomerantes.



Mistura de insumos industriais

4. Pelota

- É um aglomerado de forma esférica obtido pelo rolamento em tambores, cones ou discos ricos em ferro moídos e umedecido e, depois, submetido à queima a temperaturas superiores a 1250°C , quando a pelota se consolida.

03/08/2013



03/08/2013



4. Pelota

- A pelletização possibilita:
 - Aproveitamento econômico da fração de partículas ultrafinas ($\phi < 0,150$ mm) gerada nas minas e na usina.
 - Ajuste da qualidade química e física e agregação de valor às cargas metálicas de altos fornos e reatores de redução direta.

5. Preparo das pelotas

- As principais etapas são:
 - Preparação da matéria-prima;
 - Formação das pelotas cruas;
 - Secagem e endurecimento das pelotas.

5.1. Preparo da matéria-prima

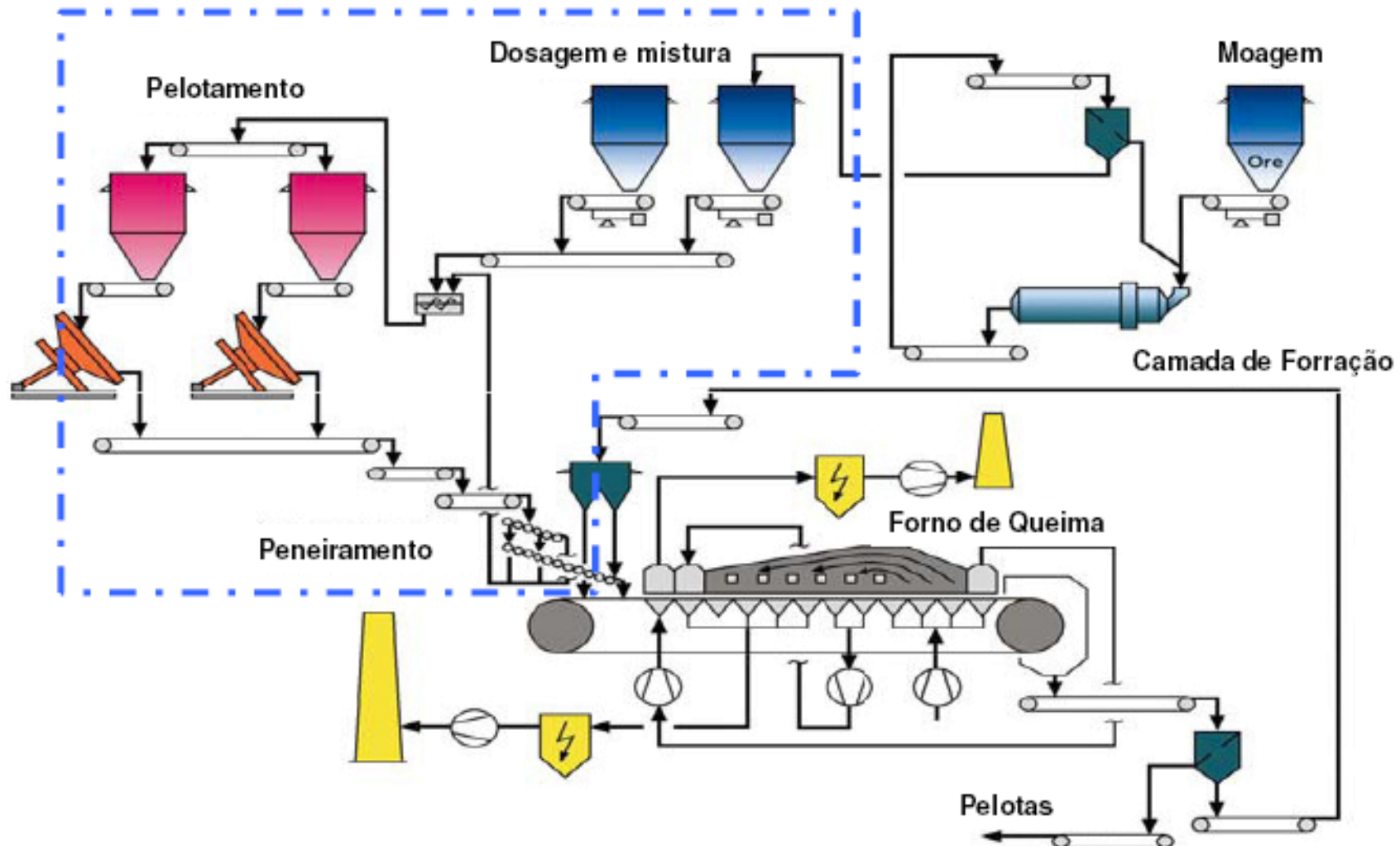
- De acordo com a intenção de uso na pelotização e sua composição química, pode-se dividir a matéria-prima em dois diferentes grupos:
 - Um composto de minerais ferríferos e representa a **matriz** da pelota.
 - O outro compreende a matéria livre de ferro.

5.1. Preparo da matéria-prima

- O segundo tipo é usado exclusivamente para:
 - Facilitar a fabricação de pelotas (aglomerantes);
 - Melhorar a qualidade física e mecânica (aglomerantes e aditivos);
 - Modificar as propriedades metalúrgicas das pelotas (aditivos).

5.2. Formação das pelotas cruas (pelotamento)

- Etapa de formação de pelotas cruas com tamanho e resistência mecânica adequados à etapa de processamento térmico.
- Mecanismo baseado na ação de forças capilares no sistema partículas de minério - água - ar.



5.2. Formação das pelotas cruas (pelotamento)

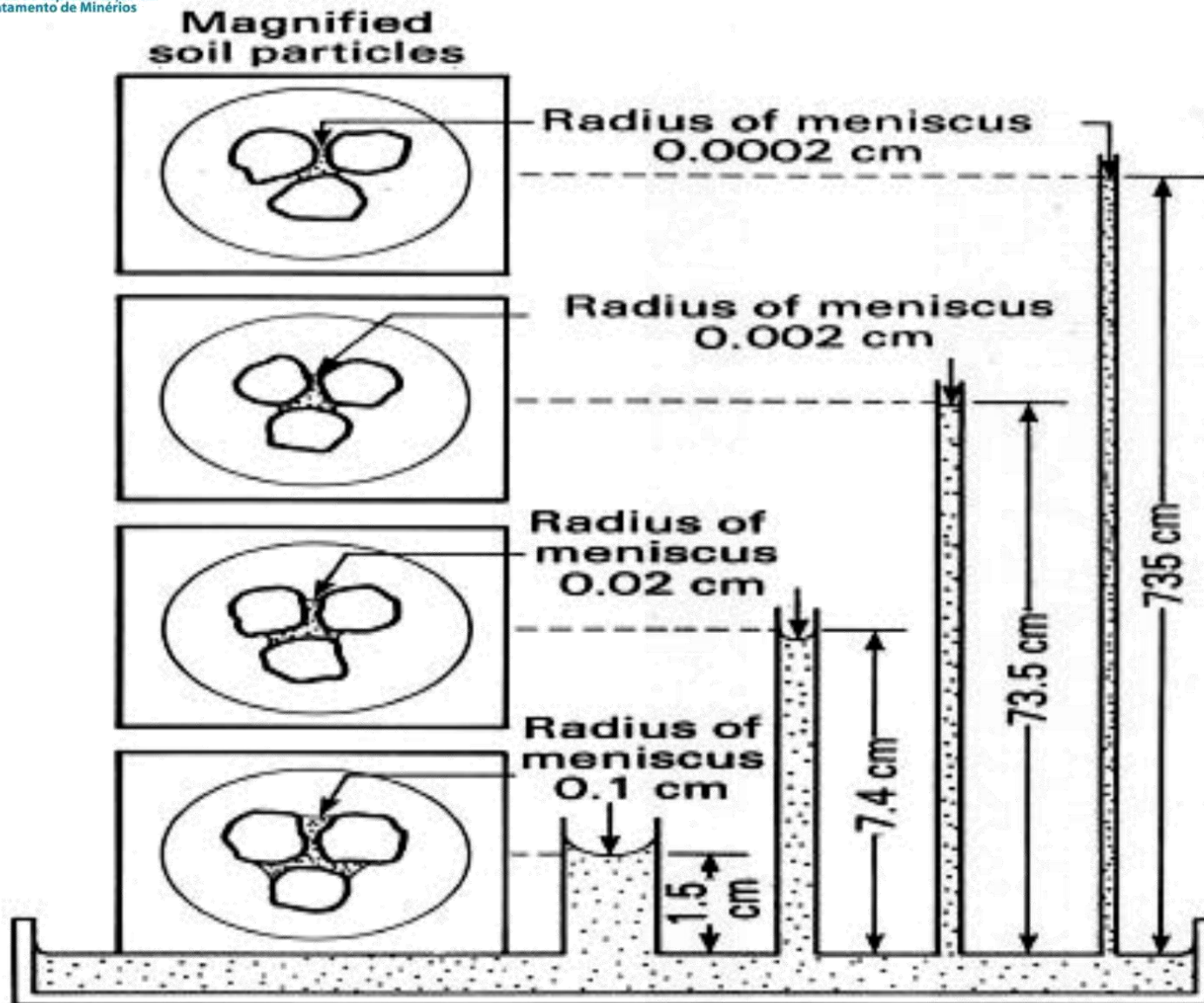
- O termo *pelota crua* implica que o material aglomerado ainda não sofreu nenhum processo de secagem e/ou de endurecimento.

5.3. Formação das pelotas

- É comum a adição de água às partículas, proporcionando a umidade necessária à formação das pelotas (**sucção**).
- A quantidade de água adicionada varia de acordo com o material a ser pelletizado.

5.3. Formação das pelotas

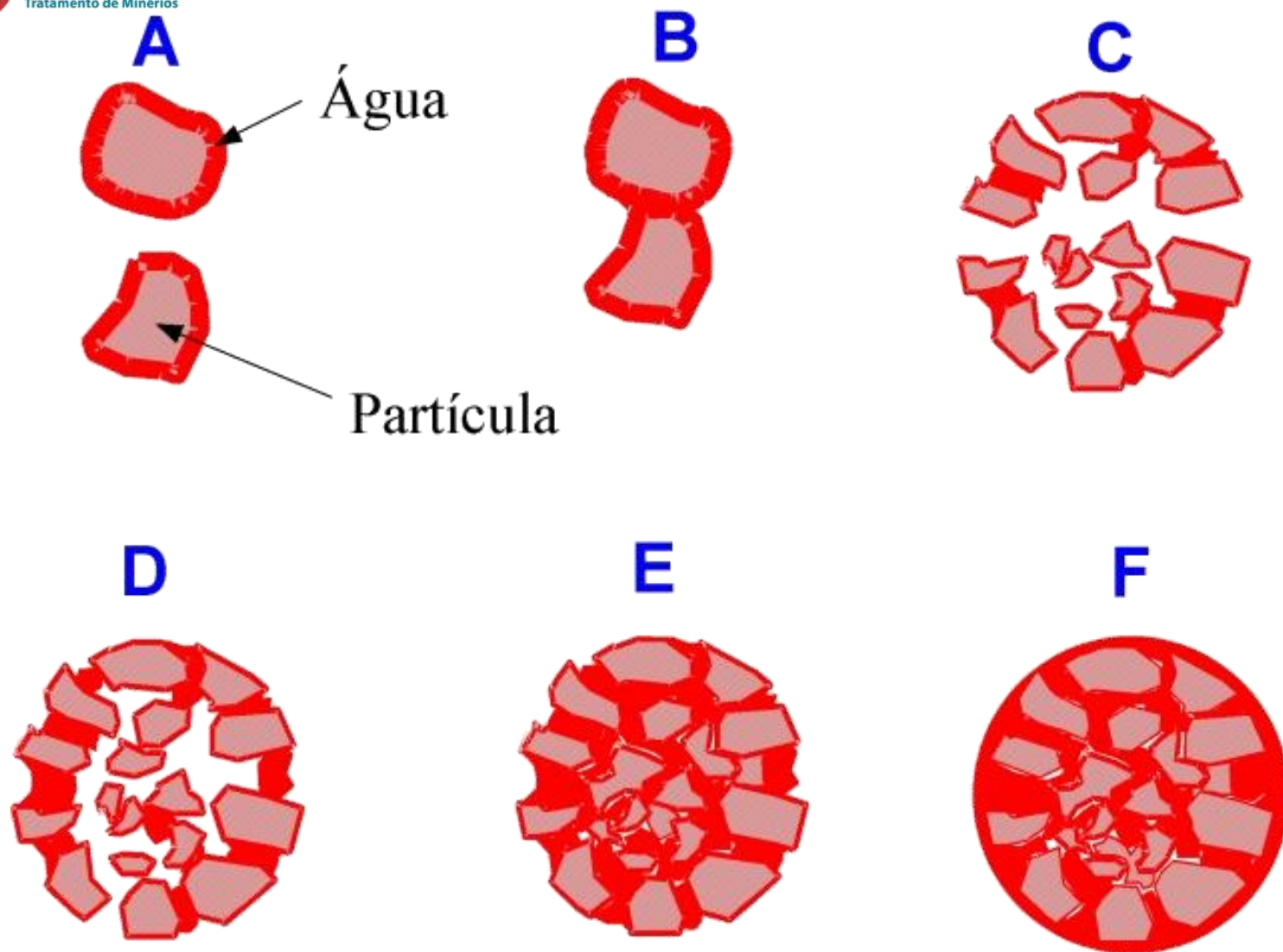
- A umidade provê a força coesiva necessária para a aderência das partículas a serem pelletizadas.





5.4. Mecanismos do pelotamento

- A evolução da aglomeração de partículas, quando revolvidas em presença de água, se dá por etapas:
- Inicialmente as partículas são envolvidas por uma película de água contida na mistura úmida (**A**).



Influência da adição de água no processo de pelotização

5.4. Mecanismos do pelotamento

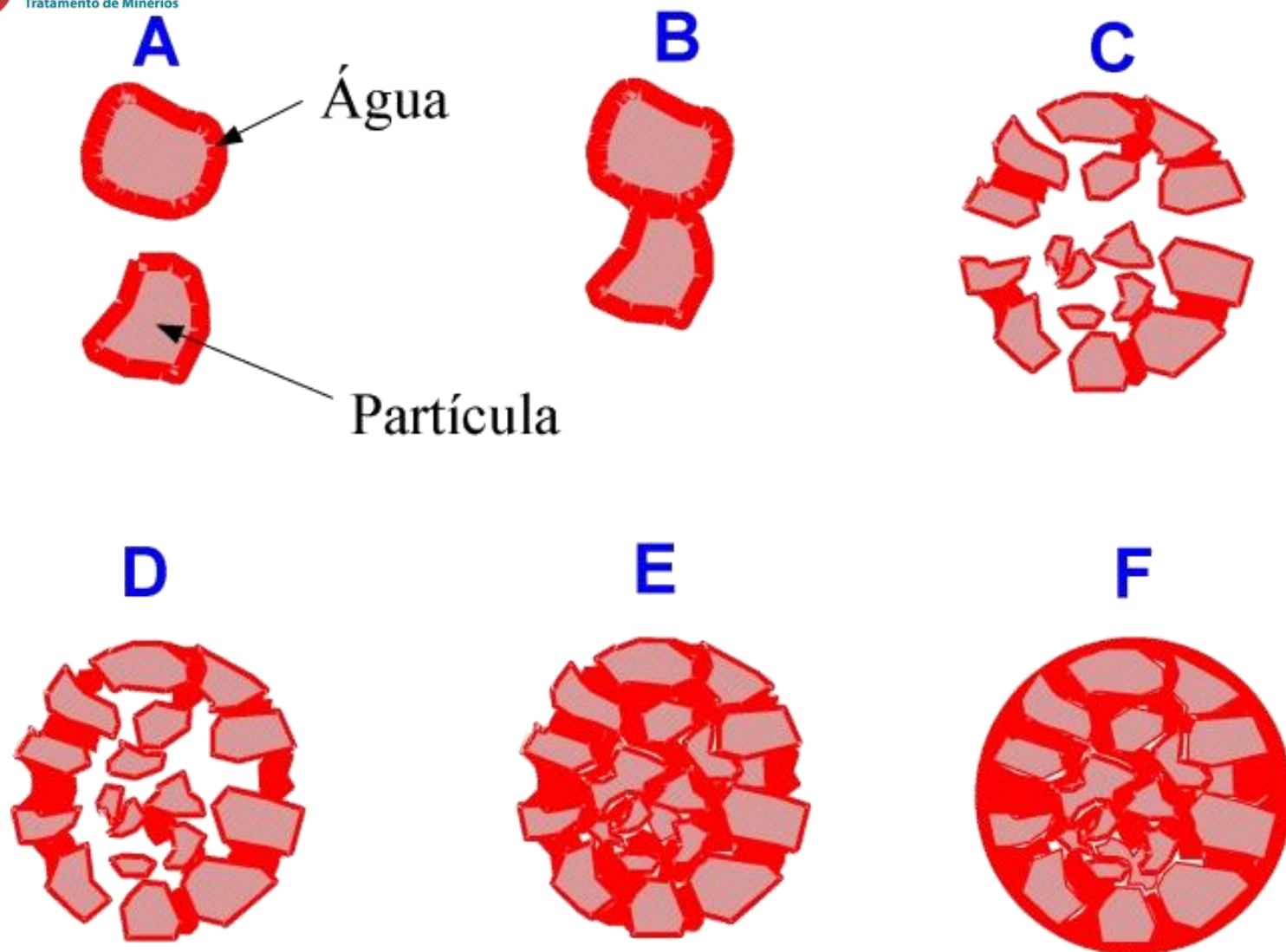
- Devido à tensão superficial, são formadas pontes líquidas, unindo partículas (**B**). Isto, no misturador, tem um caráter transitório, ocorrendo sucessivas uniões e separações. No disco a tendência preferencial é no sentido da união.

5.4. Mecanismos do pelotamento

- Continuando a movimentação da mistura, e pela presença de gotas individuais, formam-se os primeiros aglomerados. As primeiras pontes líquidas aparecem, mas os aglomerados são fracos, porque predominam os vazios (**C**).
- Incorporando mais água, mais pontes são formadas e os aglomerados se tornam mais densos e as forças capilares, crescentes (**D**).

5.4. Mecanismos do pelotamento

- Condição ótima: todos os vazios preenchidos, sem que a água envolva toda a superfície da partícula (**E**).
- Os níveis de umidade, correspondentes a esta etapa, são dependentes da quantidade e qualidade dos poros das partículas.



Influência da adição de água no processo de pelotização

5.4. Mecanismos do pelotamento

- Última etapa (**F**): partículas totalmente envolvidas pela água. Acréscimos de umidade nesta situação tendem a aumentar a espessura da película de água entre os grãos, diminuindo a sua adesão, até o colapso do aglomerado.

5.5. Água existente no interior da pelota

- Pode ser classificada em dois tipos principais:
 - **Água capilar/absorvida/umidade:** água absorvida pela pelota e que se encontra livre mas dispersa entre as partículas internamente à pelota ou mesmo internamente às partículas em caso de minérios muito porosos. Essa água é normalmente conhecida como umidade.

5.5. Água existente no interior da pelota

- **Água combinada:** água que se encontra quimicamente combinada com moléculas de diferentes minerais presentes na pelota seja do minério de ferro ou dos minerais adicionados.

5.5.1. Água capilar

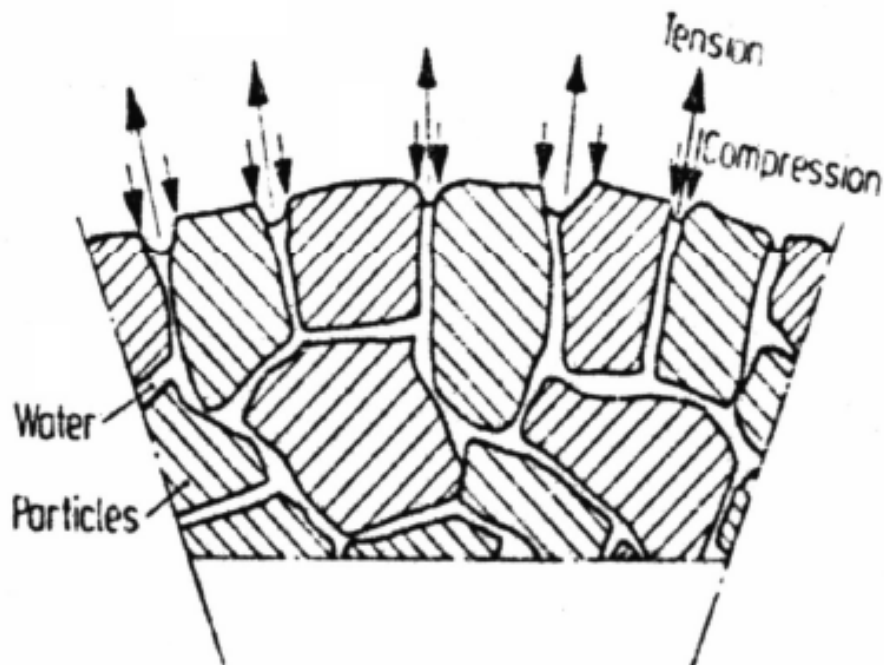
- A pelota crua (verde) tem um intrincado sistema de canalizações internas que estão cheios de água absorvida e é nesses canais que são exercidas as forças de capilaridade (forças de compressão e de tensão superficial) da água as quais são as responsáveis pela manutenção das partículas minerais unidas garantindo a estabilidade da pelota.

5.5.1. Água capilar

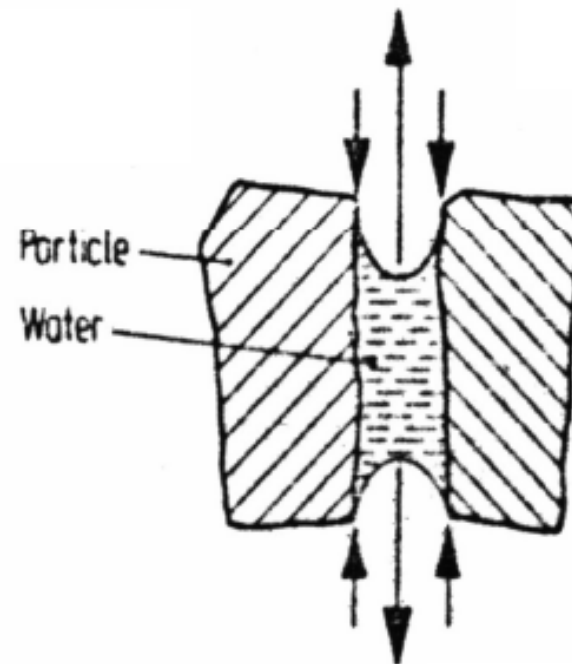
- Essa água normalmente contém muitas partículas em suspensão e sólidos dissolvidos.
- Tanto as partículas em suspensão como as dissolvidas na água podem ser provenientes de diferentes fontes tais como a própria água utilizada na preparação da polpa de concentrado ou a dissolução de sais solúveis presentes no minério de ferro ou mesmo a dispersão de partículas dos aditivos utilizados tais como: cal hidratada, calcário, bentonita, carvões, etc.

5.5.1. Água capilar

Capillary tensile and compression strength
of green balls



Capillary tensile and compression forces
between two particles



5.5.2. Água combinada

- Água combinada de um mineral é a quantidade de água que reagiu com a molécula do mineral e que portanto está quimicamente ligada a ele.
- Uma grande variedade de minerais reage com a água se hidratando, no entanto essa hidratação é uma função das características moleculares de cada mineral.

5.5.2. Água combinada

- Quando um sal iônico é dissolvido na água primeiramente ocorre a dissociação da molécula do sal e depois disso os seus íons reagem com a água se hidratando e quando a solução é evaporada o sólido cristalino que se forma pode ainda conter íons hidratados.

5.5.2. Água combinada

- Esse sólido cristalino que se forma por evaporação da água e que contém água combinada é chamado de *hidrato* e a água que está quimicamente ligada à molécula do sal é chamada água combinada, água de hidratação ou água de cristalização.

5.5.2. Água combinada

- **Por exemplo:**

- Hematita (Fe_2O_3) reage com a água e se hidrata formando na natureza a Goethita $\text{FeO}(\text{OH})$.
- A água combinada só pode ser extraída com o fornecimento de energia à molécula capaz de romper a ligação química da água com a molécula do mineral.

5.5.2. Água combinada

- Durante a fase de aquecimento na produção de pelotas com minério hidratado do tipo goethita ocorre a transformação dessa para hematita com perda de uma molécula de água e com forte absorção de calor a 300° C.

5.5.2. Água combinada



Hematita



Goethita

5.6. Formação das pelotas

- No pelletizador, uma partícula com um filme de água envolvendo sua superfície pode servir de núcleo para o processo de pelletização.
- Seja por uma colisão ou pelo contato com outra partícula também coberta por um filme de água, ocorre uma coalescência entre as partículas.

5.6. Formação das pelotas

- Pode-se identificar dois mecanismos distintos e consecutivos relativos à participação da água no processo de formação de pelotas:
 - Adsorção de água pela superfície das partículas.
 - Umidade capilar retida pelo contato entre partículas.

5.6. Formação das pelotas

- A repetição deste processo em um determinado grupo de partículas pode produzir pelotas do tamanho desejado.

5.7. Mecanismos de crescimento

- Os mecanismos de crescimento das pelotas podem ser classificados em:
 - Nucleação;
 - Coalescência;
 - Recobrimento;
 - Transferência de massa por abrasão.

5.7.1. Nucleação

- Resulta da atração capilar entre as partículas individuais.
- A formação do núcleo da pelota ocorre logo nas primeiras rotações do pelletizador, causando mudanças na massa e na quantidade de pelotas formadas.

5.7.2. Coalescência

- Fenômeno de crescimento das pelotas devido à agregação de dois ou mais grânulos que colidem entre si.

5.7.3. Recobrimento

- O recobrimento ou desintegração das pelotas geram vários fragmentos menores que irão se redistribuir na superfície das pelotas (**efeito bola de neve**).
- Esse efeito também acontece quando se adiciona ao sistema uma nova alimentação úmida.

5.7.3. Recobrimento

- As pelotas formadas inicialmente agem como “sementes” e coletam os finos particulados adicionados, devido ao movimento de rotação proporcionado pelo pelletizador.

5.7.4. Transferência de massa por abrasão

- Ocorre devido à abrasão entre as pelotas formadas.
- A transferência de massa por abrasão é um tipo de crescimento que não altera a massa total do sistema, porém produz mudanças contínuas no diâmetro das pelotas.

6. Cinética de pelotização

- Durante a formação de pelotas podem ocorrer simultaneamente os seguintes mecanismos:
 - Aderência de partículas finas, formando camadas sucessivas;
 - Coalescência de pelotas já formadas, devido a alguma pressão exercida;

6. Cinética de pelletização

- Incorporação de fragmentos de pelotas partidas e pelotas maiores;
- Incorporação de material fino produzido por abrasão de pelotas menos resistentes à superfície de pelotas mais resistentes.

6. Cinética de pelotização

- Durante a produção de pelotas, a sua formação ocorre paralelamente à desintegração de um certo número de pelotas já existentes.
- Ocorre assim uma seleção daquelas pelotas mais resistentes, possibilitando a produção de pelotas de densidade e resistência bastante uniformes.

7. Mecanismo de degradação e crescimento das pelotas

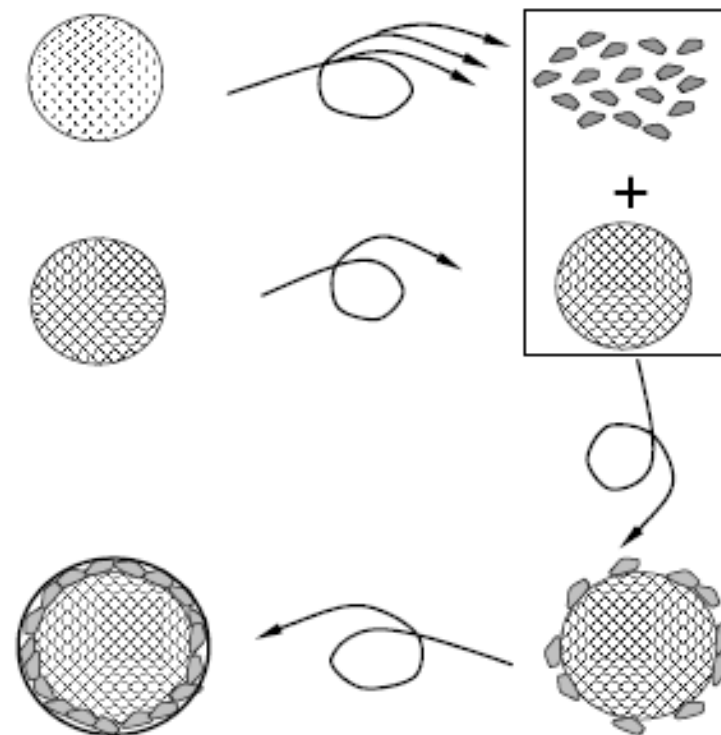
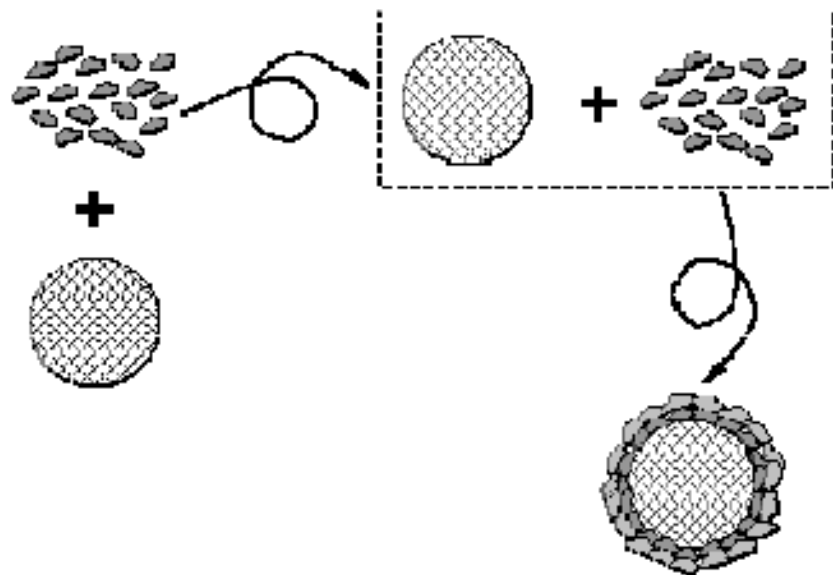
- O movimento de rotação (ou rearranjo das partículas) aumenta a adesão, pela multiplicação dos pontos de contato associada à força de compressão devida à pressão do material circulante.
- Sob a ação da pressão e do movimento, os aglomerados mais fracos são degradados em partículas menores.

7. Mecanismo de degradação e crescimento das pelotas

- O fenômeno é mais intenso:
 - Em umidades mais baixas
- Distribuição da água irregular
 - Frações degradadas se incorporam sobre aglomerados úmidos, estáveis.
 - União de micro-aglomerados pré-existentes.

7. Mecanismo de degradação e crescimento das pelotas

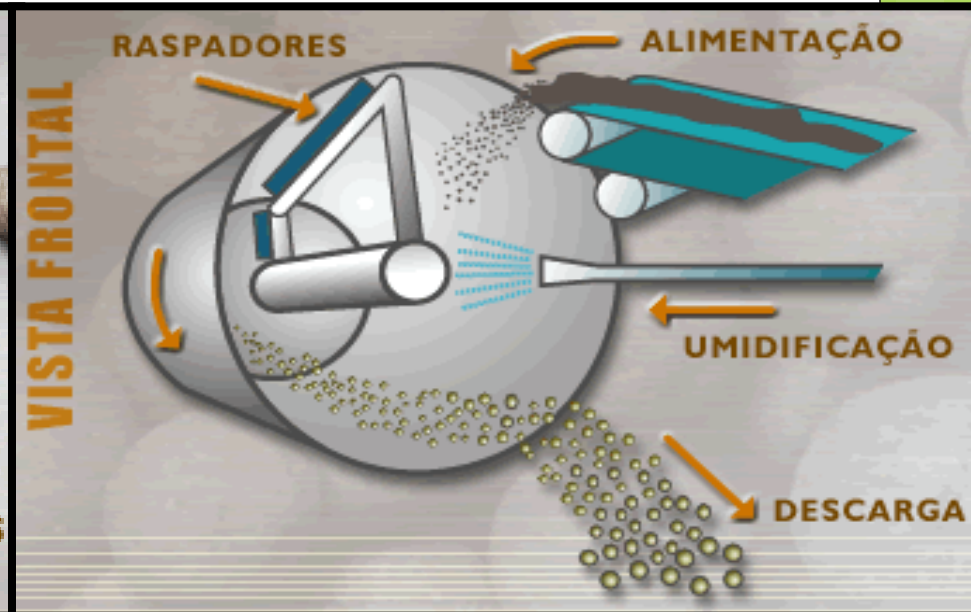
- Os processos de destruição e formação ocorrem simultaneamente, criando uma condição de seleção natural, onde apenas as pelotas com resistência suficiente para suportar as forças destrutivas, sobrevivem, favorecendo, então a predominância final dos aglomerados densos e estáveis.



8. Equipamentos para pelotamento



Disco



Tambor

	DISCO	TAMBOR
Diâmetro (m)	5 - 7,5	3 - 3.6
Comprimento (m)	-	9 - 11
Inclinação (°)	45 - 50	5 - 10
Rotação (rpm)	6 - 7	8 - 15
Capacidade (t/h)	90 - 140	90 - 130
Recirculação (%)	20 - 30	200 - 400



Pelotização em tambor – Mina de Fábrica (Vale)

Alimentação



Raspador

Mesa
Classificadora ou
Peneira de rolos

**Vista interior do tambor e mesa classificadora – Mina de Fábrica –
Gongonhas/MG:**

8 no laminados
5 stampas
manchas



GT/E

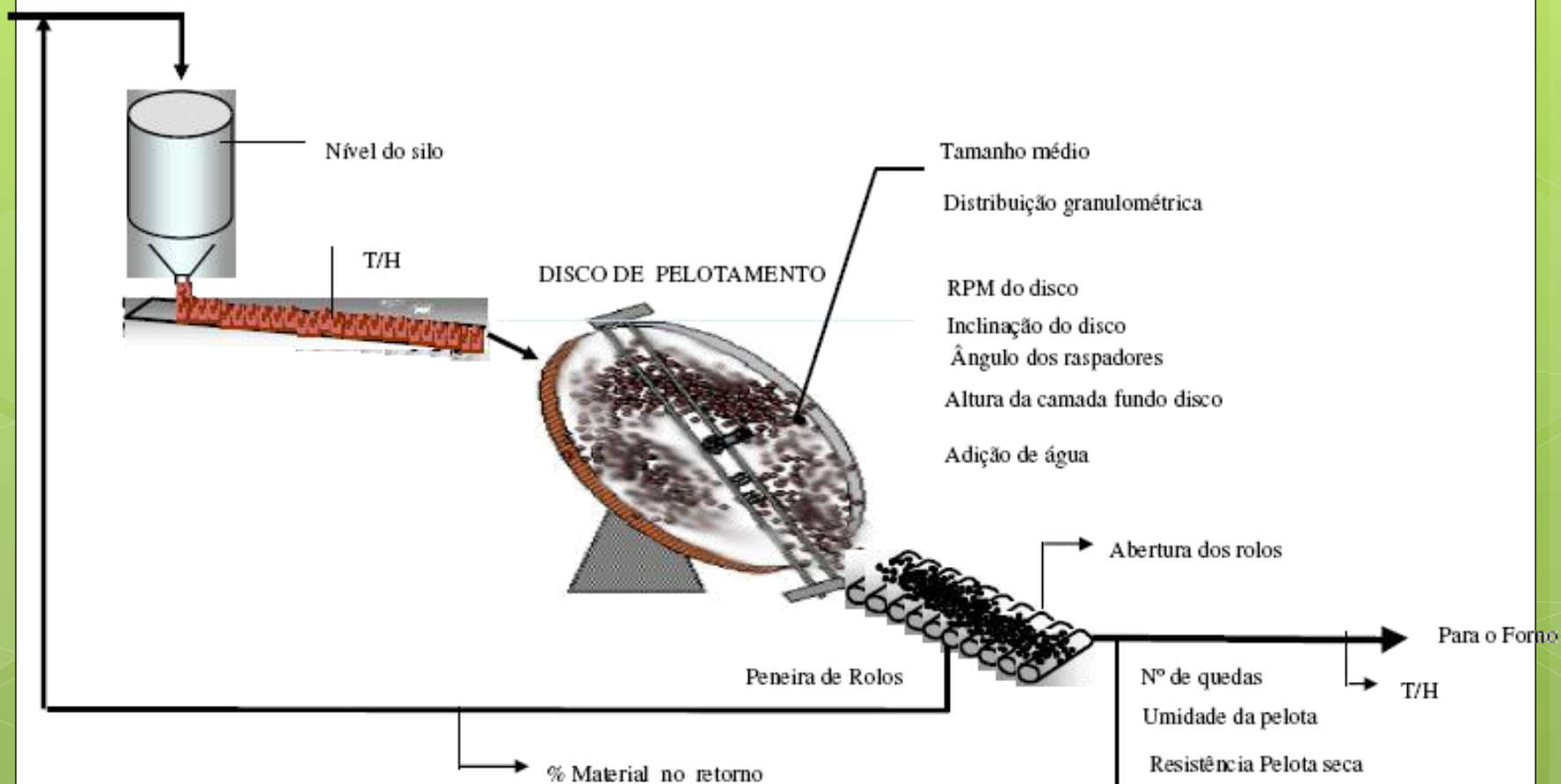








POLPA FILTRADA COM ADITIVOS



Pelotização em disco

8.1. Disco de pelotamento

- Dimensões:
 - Diâmetro: 7500 mm;
 - Altura borda: 680 mm;
 - Camada de fundo: 80 a 160 mm;
 - Inclinação: 44 a 53°.







CETM
Curso de Especialização
Tratamento de Minérios



9. Fatores que interferem no processo de pelotamento

- **Propriedades físicas e químicas do minério de ferro;**
- **Propriedades físicas e químicas e quantidade de aditivos;**
- **Umidade do material alimentado nos discos:** atua diretamente na resistência das pelotas e na variação granulométrica da seguinte forma:

Efeitos da umidade na qualidade da pelota

H₂O alta (> 10,0%)

Pelotas grandes e sem resistência. Não há boa queima o que aumenta o consumo calórico no forno.

H₂O baixa (< 8,5%)

Constante variação granulométrica, baixa resistência e elevado retorno de finos.

9. Fatores que interferem no processo de pelotamento

- **Quantidade de água adicionada nos discos;**
- **Inclinação dos discos:** inversamente proporcional ao tempo de retenção das pelotas nos discos.
- **Posição dos raspadores:** devem estar posicionados de maneira que propiciem formação de camada sem ressaltos e que não alterem ou alterem fracamente a trajetória da pelota.
- **Posição dos bicos "sprays" de água;**

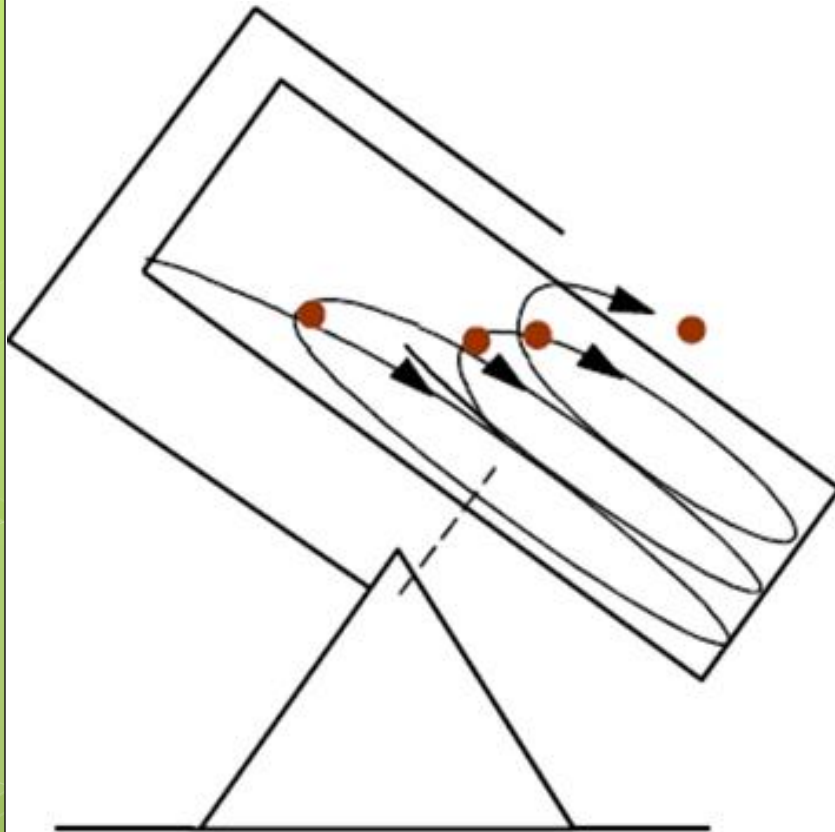
9. Fatores que interferem no processo de pelotamento

- **Taxa de alimentação de material nos discos;**
- **Limpeza na descarga do disco:** com a descarga suja será formada uma barreira que dificultará a saída das pelotas, aumentando o tempo de retenção delas no disco.

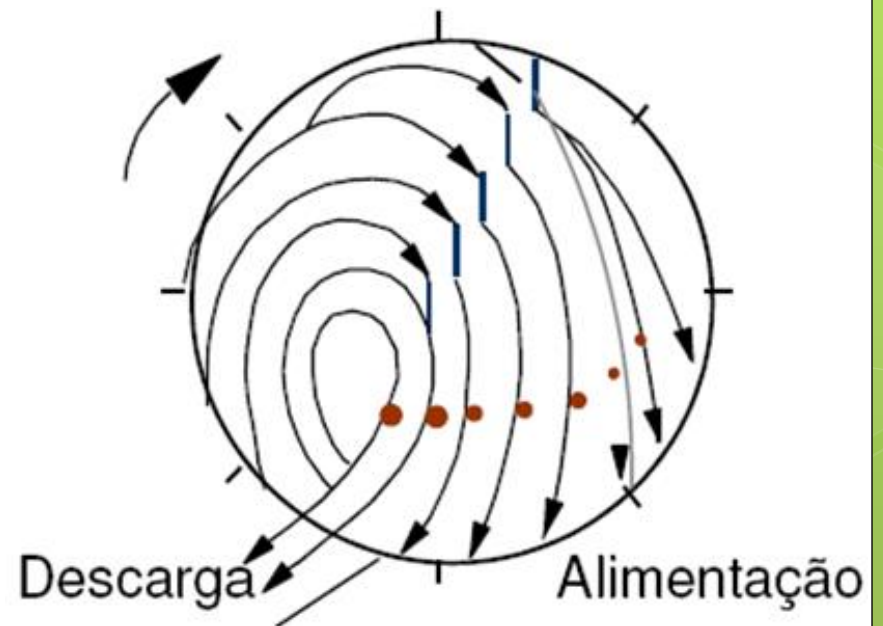
9. Fatores que interferem no processo de pelotamento

- Uniformidade da camada de fundo;
- Velocidade rotacional: diretamente proporcional ao tempo de retenção das pelotas no disco.

Movimento do material no disco

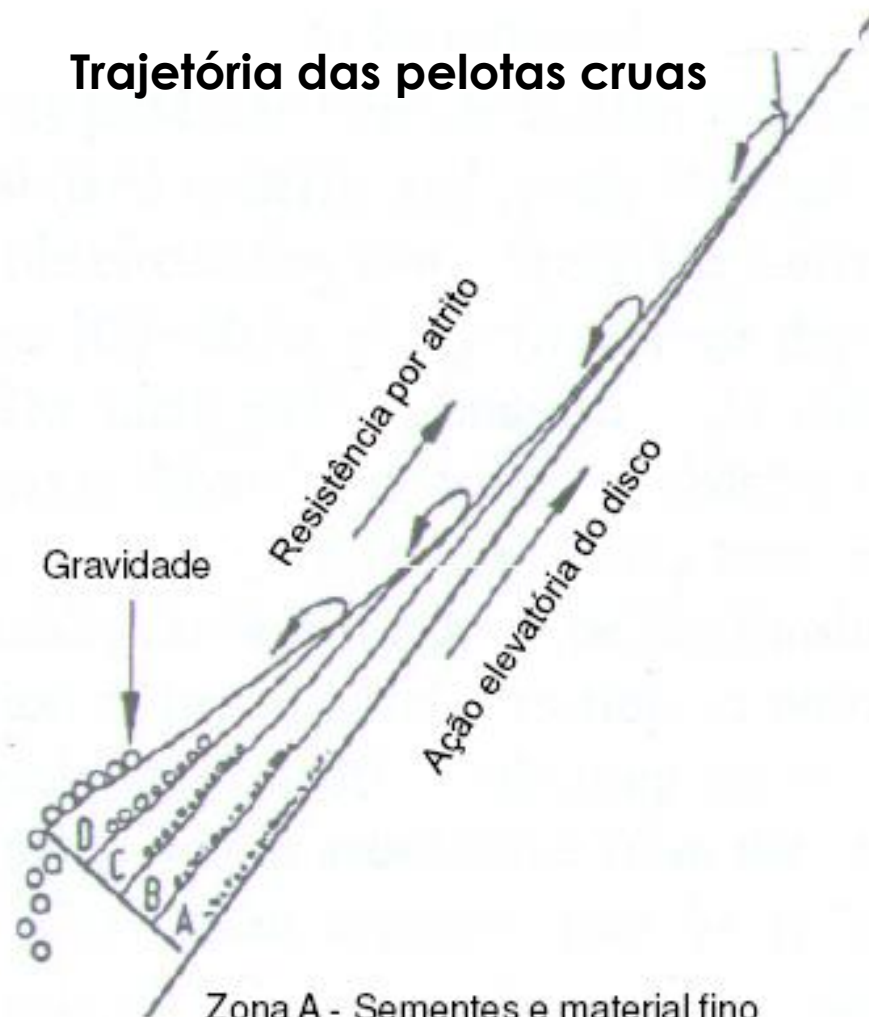


Seção transversal



Na superfície

Trajetória das pelotas cruas



Zona A - Sementes e material fino

Zona B - Sementes e pelotas pequenas

Zona C - crescimento de pelotas

Zona D - Pelotas em tamanho final



alimentação

descarga
de pelotas

raspador

rainhas



Limpeza interna nos discos

9.1. Influência da “rainha” do pelotamento

- Provocada pelo acúmulo de material nos raspadores (umidade elevada) ou a falta dos desagregadores dos discos.



9.2. Mesa/Peneiras de rolos

- Equipamento responsável pela classificação granulométrica das pelotas cruas.



03/08/2013



9.2. Mesa/Peneiras de rolos

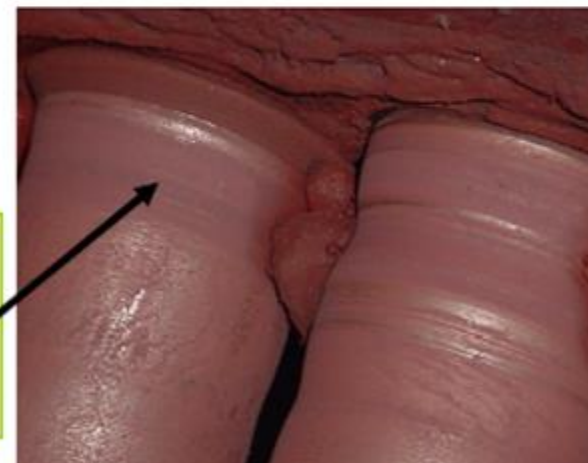


Rolos revestidos de poliuretano



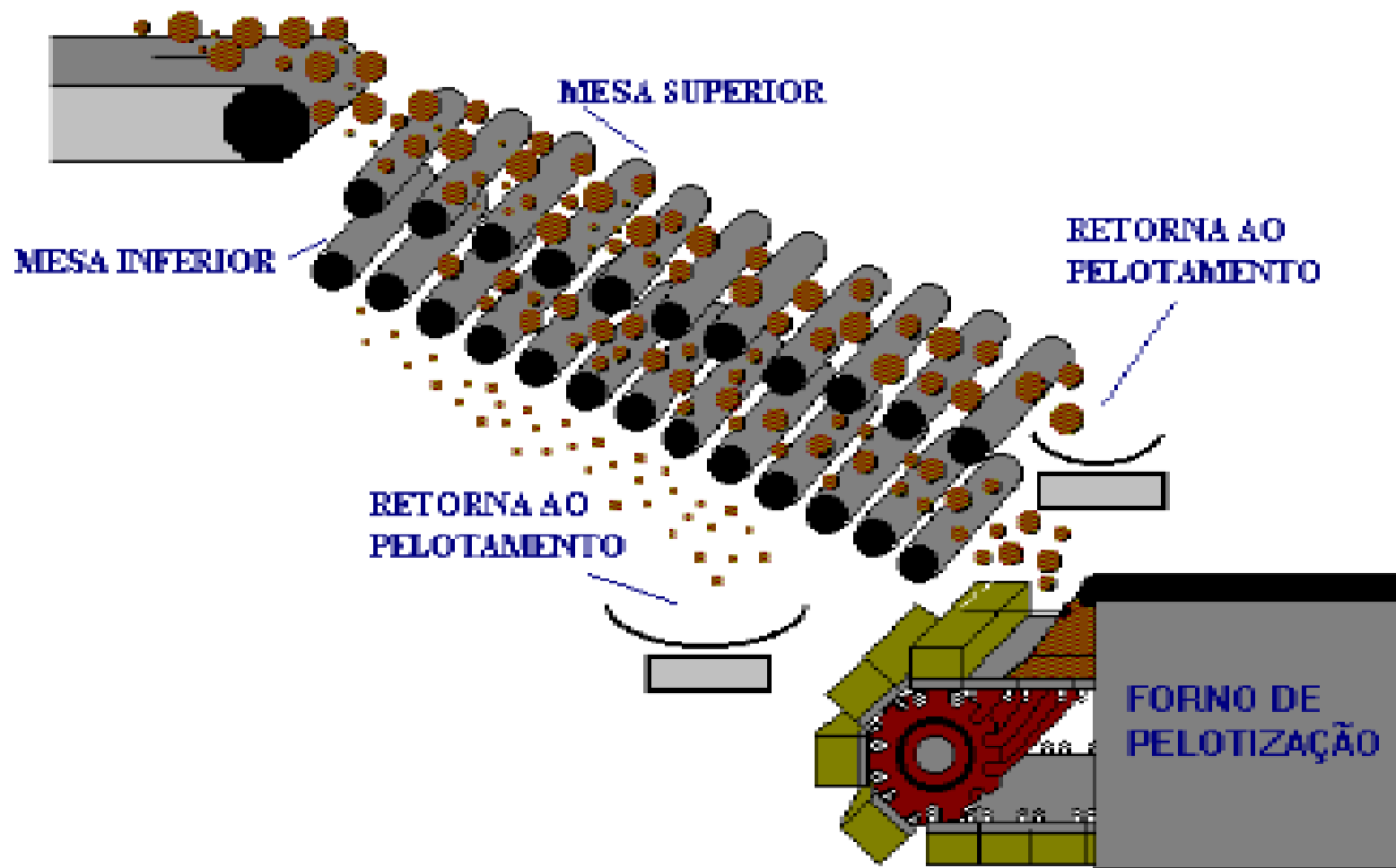
Rolos revestidos
de CrNi

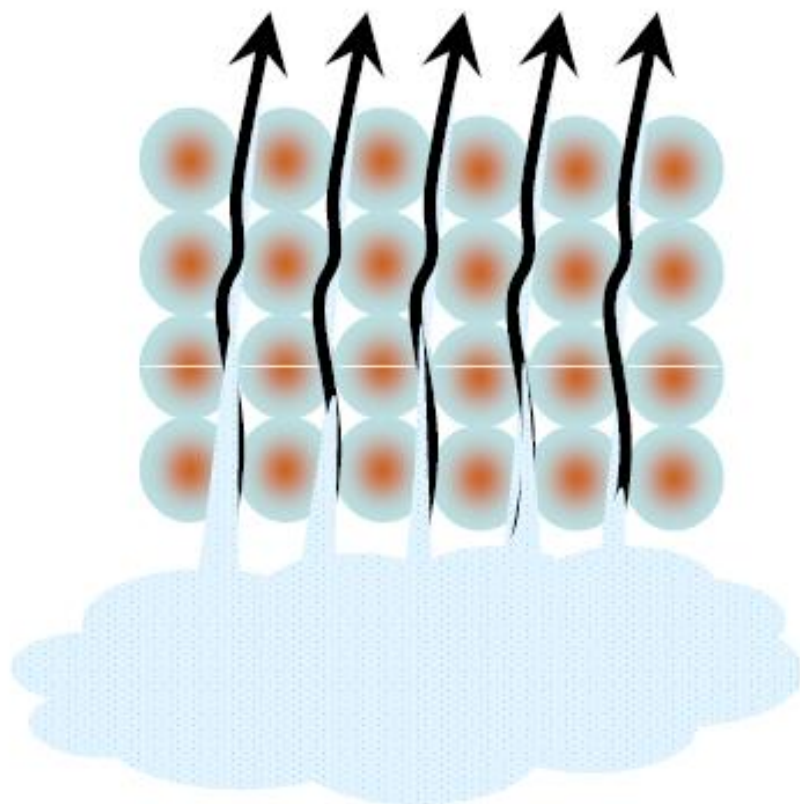
Desgaste do rolo de
CrNi provocado pelo
acúmulo de material
na borda da peneira.



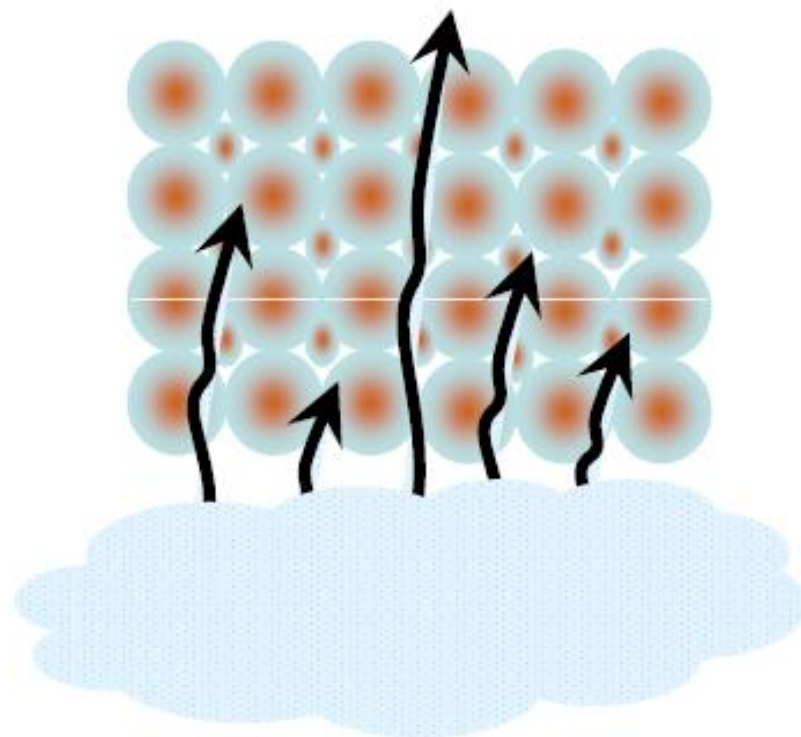
9.3. Mesa/Peneira de rolos de duplo deck

- As pelotas cruas são reclassificadas na alimentação do forno de endurecimento/queima.
- O objetivo desta etapa é manter a maior uniformidade possível na alimentação do forno, melhorando, conseqüentemente, o acabamento superficial das pelotas e as condições operacionais do forno (permeabilidade).





Boa permeabilidade



Má permeabilidade

Granulometria x permeabilidade da pelota no forno

10. Queima ou endurecimento da pelota

- Durante o aquecimento e queima das pelotas ocorrem uma série de **reações químicas** em sequência, regidas pelos parâmetros físicos e químicos das pelotas cruas e pelas condições da queima.
- Essas reações são responsáveis pela formação de uma grande variedade de compostos químicos que juntos formam a estrutura interna da pelota.

10. Queima ou endurecimento da pelota

- Esses compostos são chamados de **fases mineralógicas** e são os responsáveis pelo endurecimento e resistência final das pelotas.
- Cada pelota tem qualidade típica associada ao tipo de minério de ferro, aos aditivos e aglomerantes bem como às condições de queima utilizadas.

10. Queima ou endurecimento da pelota

- Essas reações químicas necessitam de energia para ocorrer.
- Essa energia é conseguida através da queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, gás natural, carvão mineral ou vegetal), cuja energia térmica é transferida às pelotas.

10. Queima ou endurecimento da pelota

- Durante a queima das pelotas ocorrem os seguintes estágios:
 - Secagem e aquecimento;
 - Aquecimento e pré-queima;
 - Pré-queima e queima.

10.1. SECAGEM E AQUECIMENTO

- Perda de água absorvida ou capilar e água combinada até cerca de 600° C.

10.2. AQUECIMENTO E PRÉ-QUEIMA

- Decomposição térmica de carbonatos, hidróxidos de cálcio e magnésio e de argilas tipo bentonita e de impureza minerais como a caulinita.
- Ataque químico do CaO sobre a hematita e sobre componentes da caulinita e da bentonita na faixa de 650°C a 1000°C .

10.2. AQUECIMENTO E PRÉ-QUEIMA

- Na fase de aquecimento que se inicia próximo a 650°C e vai até cerca de 1000°C ocorre uma série de reações químicas de importância fundamental para a qualidade das pelotas.
- Esta fase se refere a uma região do forno onde as pelotas vão ser preparadas quimicamente para futuras reações químicas que ocorrerão na fase de queima.

10.2. AQUECIMENTO E PRÉ-QUEIMA

- As reações desta fase são:
 - Reações de decomposição térmica de compostos fluxantes, tais como calcários calcíticos e dolomíticos, cal hidratada calcítica e dolomítica.
 - Reações de decomposição térmica de sulfetos metálicos.

10.2. AQUECIMENTO E PRÉ-QUEIMA

- Reações de transformação dos sulfetos metálicos a sulfatos.
- Reações de decomposição térmica de minerais argilosos tipo caulinita e bentonita.

Reações de calcinação e as temperaturas de ocorrência

Reação química	Faixa de temperatura (° C)
$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	300 a 400
$\text{Mg(OH)}_2 \rightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$	200 a 300
$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	800 a 900
$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	400 a 500

10.3. Pré-queima e queima

- Interação entre silicatos de cálcio e alumínio e de cálcio ferritas formando silicatos férricos de cálcio e alumínio (SFCA) e ou minerais piroxenios (1000°C a 1200°C).
- Fusões de SFCA e piroxênios formando magnetita calcífera e escória (1200°C a 1300°C) seguido pela conversão gradual da hematita para magnetita acima de 1350°C .

10.3. Pré-queima e queima

- Na faixa de temperatura acima de 800°C , bem como em toda a fase de queima (que se estende até temperatura de 1350°C), os óxidos básicos e os óxidos ácidos que se formaram por fenômenos de decomposição térmica de calcário e argilas, bem como as hematitas já desidratadas, começam a participar das reações químicas de construção da estrutura de fases mineralógicas internas à pelota.

10.3. Pré-queima e queima

- As pelotas, após queimadas, podem mostrar uma variação na composição de fases mineralógicas dependendo de vários fatores, como a composição química e mineralógica do *pellet feed* e também dos aditivos que foram utilizados (calcários, cales, olivinas, dunitos, serpentinitos) e em menor extensão uma dependência dos aglomerantes (bentonitas ou aglomerantes orgânicos).

10.3. Pré-queima e queima

- Além desses fatores ligados às matérias-primas e insumos adicionados à pelota, a composição mineralógica e a qualidade da pelota dependem também em grande parte das condições de queima utilizadas, porque cada tipo de reação e seus produtos dependem das condições físico-químicas do meio de reação, tais como: temperatura, pressão e tempo de permanência na fase de queima.

10.4. Endurecimento pela secagem

- No processo de secagem os sais dissolvidos na água existente nos espaços interpartículas da pelota vão gradativamente aumentando a sua concentração até o momento em que começam a precipitar e a se solidificar em forma de partículas muito pequenas que interagem com as partículas em suspensão na água e também precipitam sobre as partículas maiores de minério de ferro.

10.4. Endurecimento pela secagem

- Enquanto a umidade vai sendo eliminada, as partículas de aditivos em suspensão na água e os sais dissolvidos vão precipitando e solidificando entre as partículas e assim preenchendo o volume de poros anteriormente ocupado pela água.

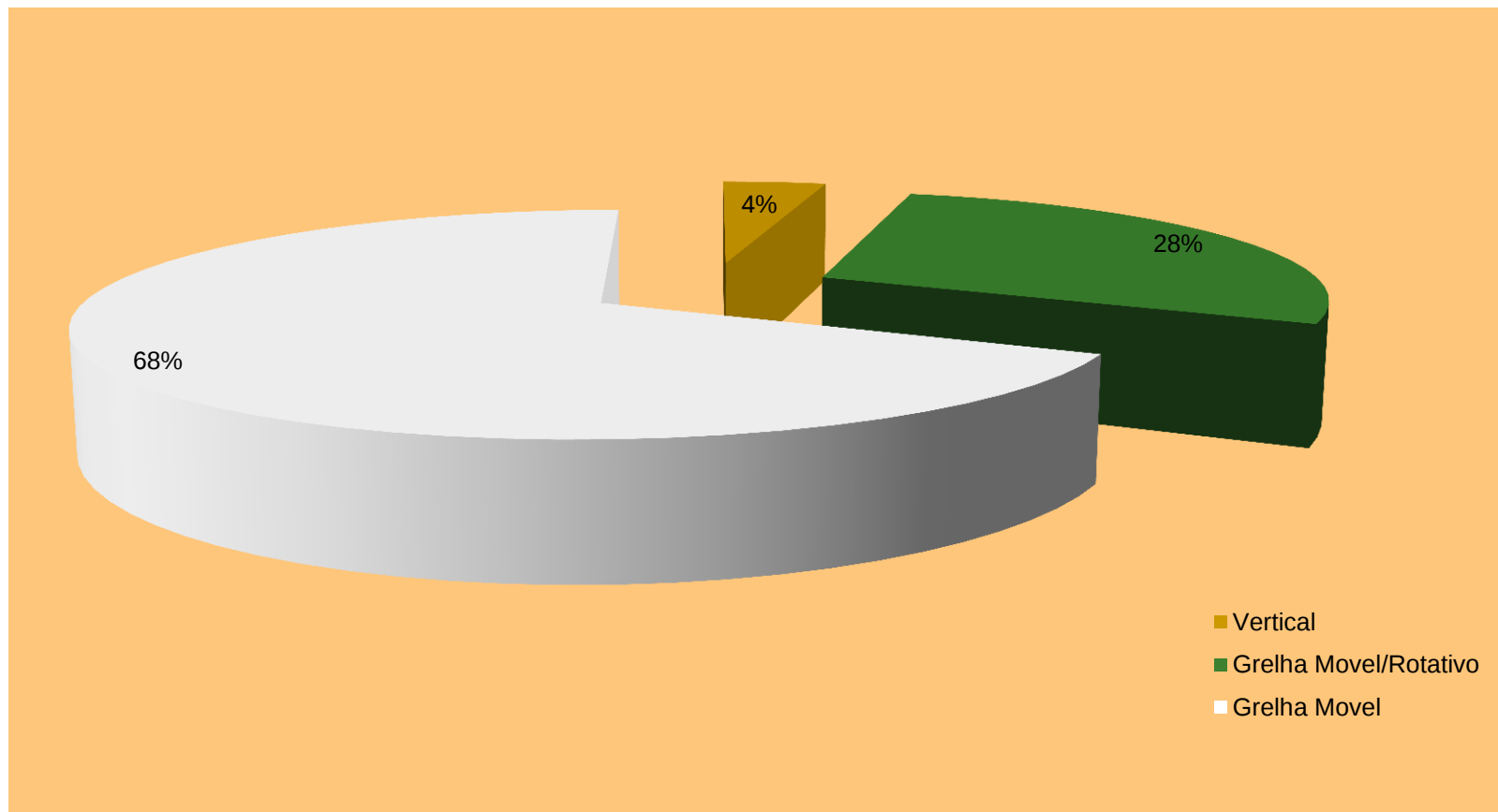
10.4. Endurecimento pela secagem

- Com a liberação rápida da água combinada, a pressão de vapor gerada pode superar a resistência mecânica da pelota e pode ocorrer a desintegração das pelotas causada pela rápida saída do vapor de água.

11. Fornos de pelotização

- Principais tipos de fornos para queima de pelotas são:
 - Forno vertical (*Indurating Shaft Furnace*);
 - Forno de grelha móvel com forno rotativo (*Grate Kiln*);
 - Forno de grelha móvel (*Travelling Grate*).

Fornos em operação na atualidade



Plantas de pelotização

EXPANSÕES OU NOVOS PROJETOS DE PELOTIZAÇÃO

PAÍS	COMPANHIA	TIPO DE FORNO	CAPACIDADE ANUAL (Mt/ANO)	LOCALIZAÇÃO	TIPOS DE PRODUTOS	START UP
Brasil	Samarco	Grelha Movel	7,6	Ponta Ubu-ES	AF, RD	fev/08
	MBR	Grelha Movel	7,6	Vargem Grande-MG	AF, RD	ago/08
	VALE VIII	Grelha Movel	7,6	Tubarão-ES	AF, RD	dez/08
	VSB	Grelha Movel/Rotativo	1,36	Jeceaba-MG	AF	n.d.
	CSN	Grelha Movel/Rotativo	6	Casa de Pedra-MG	AF, RD	n.d.
	Usiminas	n.d.	n.d.	n.d.	AF	n.d.
	MMX	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Suécia	LKAB	Grelha Movel	2		AF, RD	2007
Arabia Saudita	Hadeed	Steel Belt	0,7	Al Jubail	RD	fev/10
China	AIH		4	Nanjing	AF, RD	2007
Mauritânia	SNIM	Grelha Movel	7	Mauritânia	AF, RD	
Canada	New Millenium Capital		10	Canada	AF, RD	2011
Irã	Chador Malu		3,4	Irã	RD	2006
	Tata Steel, Imidro		n.d.	Irã	n.d.	n.d.
India	Essar		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fonte: Tex Report

Capacidade anual total (Mt)

57,26

11.1. Forno vertical (shaft furnace)

- **Princípio de operação:**

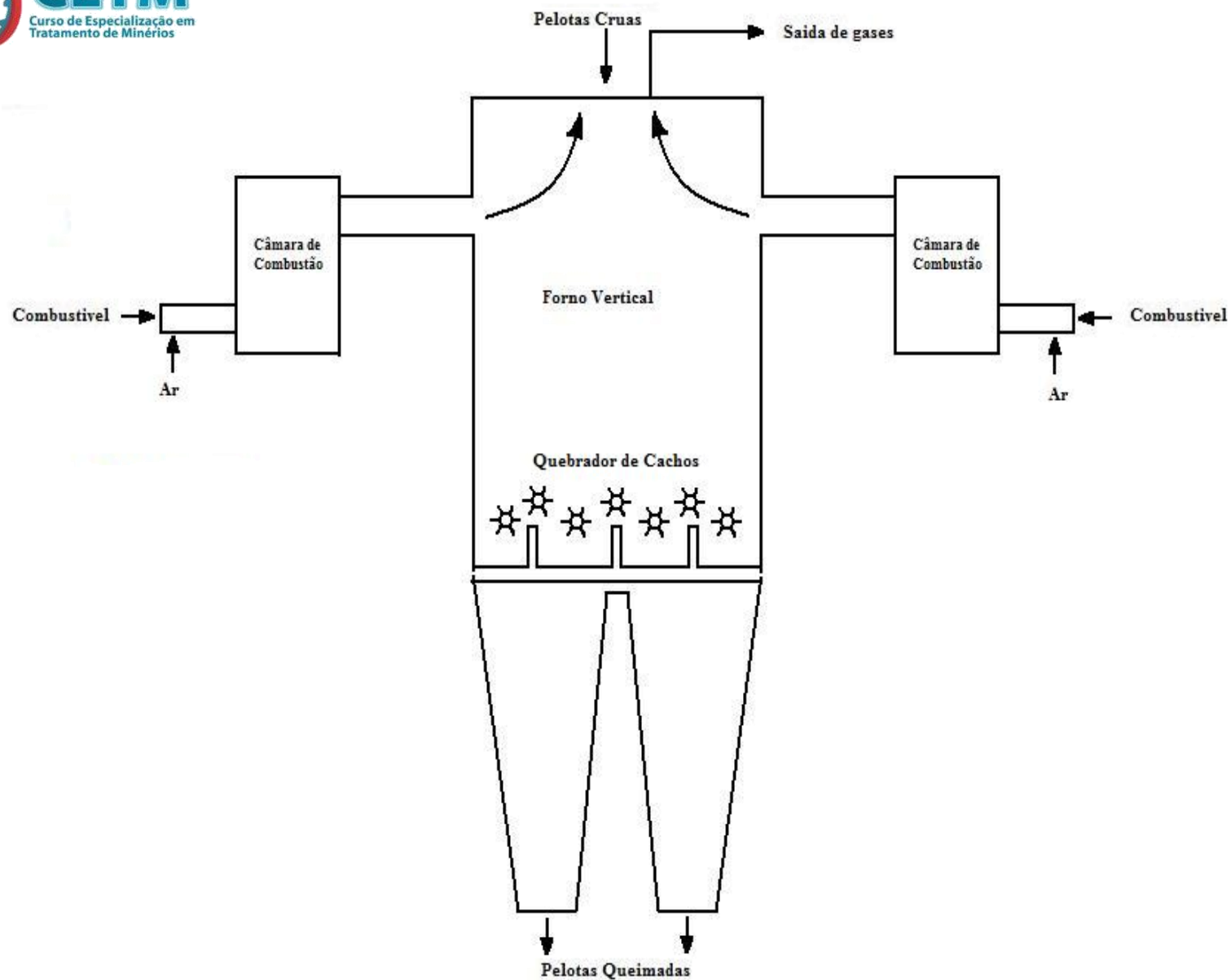
- As pelotas cruas são alimentadas pelo topo do forno e as pelotas queimadas saem pelo fundo. A descida da carga é controlada de modo a garantir uma qualidade desejada mas há limitações severas quanto a essa velocidade.
- Os gases quentes são introduzidos na metade superior do forno onde as pelotas são queimadas. Na metade inferior é feito o resfriamento quando o forno é longo.

11.1. Forno vertical (shaft furnace)

- O processo é utilizado apenas para pelotas de magnetita, pois depende muito de geração de calor próprio para se ter bons resultados.
- **Desvantagens:**
 - Não tem flexibilidade e a produção é limitada pelo processo de descida da carga que é lento.

11.1. Forno vertical (shaft furnace)

- Há severas limitações quanto a resistência das pelotas cruas devido ao processo de descida da carga , pois pode ocorrer processos de degradação que limitam fortemente a produção.
- Os fornos instalados com maiores capacidades são para 500.000 t/ano e o consumo de combustível é da ordem de 120Mkcal/t para pelotas de magnetita.



11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

○ Princípio de operação:

- O primeiro módulo é um forno de grelha móvel. Na grelha ocorrem os processos de secagem das pelotas úmidas e de aquecimento até a fase de pré-queima com um fluxo de gases descendente. Nessa fase a temperatura pode variar desde a temperatura ambiente até cerca de 1250° C.

11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

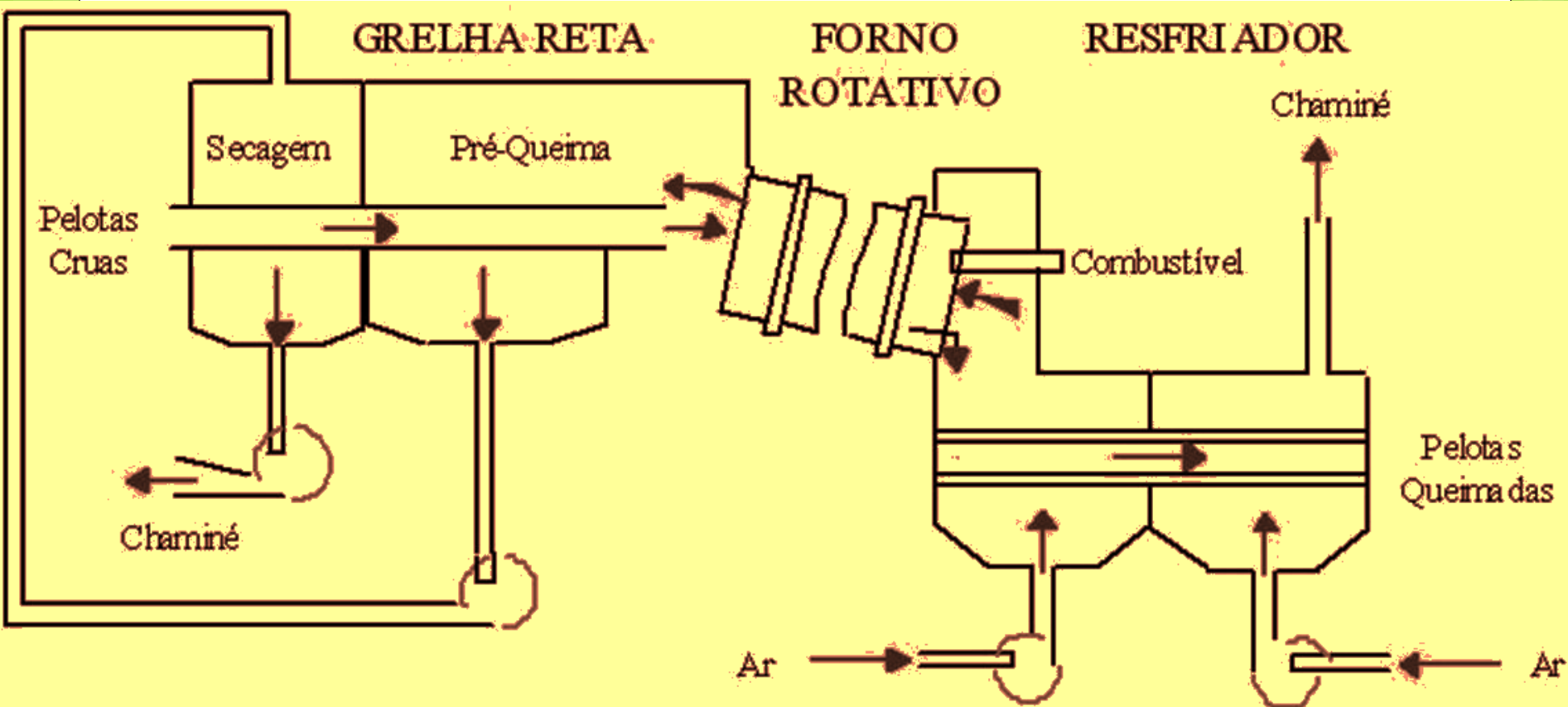
- As pelotas são alimentadas continuamente sobre a grelha formando uma camada de pelotas de cerca de 20 cm e devido a temperatura nesta fase normalmente não ultrapassar 1150°C não é utilizada camada de forramento para proteção da grelha.

11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

- O segundo módulo é um forno rotativo com diâmetro em torno de 5m e comprimento de 35m e que gira entre 1 e 1,2 rpm e onde as pelotas podem ser aquecidas até cerca de 1300° C. Nele existe um queimador que proporciona energia para a queima das pelotas.
- Devido ao processo rotativo onde as pelotas estão em constante movimento existe uma queima homogênea das pelotas.

11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

- O terceiro módulo é a etapa de secagem onde as pelotas passam por um resfriador circular onde recebem um fluxo de ar ascendente para baixar a temperatura das pelotas até próximo da temperatura ambiente.



11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

- o **Vantagens:**

- o Operam sem camada de forramento.
- o Proporciona uma queima mais uniforme das pelotas devida à formação de uma fina camada de pelotas sob rotação e que recebem calor por radiação de forma homogênea.

11.2. Grelha móvel/forno rotativo (Grate Kiln)

- **Desvantagens:**

- Capacidade de produção limitada (pouco abaixo de 6 Mt).
- Rompimento do sistema de refratários do forno rotativo.

03/08/2013



**Grate-Kiln™ System for
Iron Ore Pelletizing**



11.3. Grelha móvel (traveling grate)

- **Princípio de operação:**

- O processo consta de um forno de grelha móvel circulante sem fim.
- Na grelha ocorrem os processos de secagem das pelotas úmidas onde são utilizados fluxos de gases quentes ascendente e descendente.
- Em alguns casos de fornos mais modernos pode haver mais de uma fase ascendente.

11.3. Grelha móvel (traveling grate)

- Em seguida ocorre a fase de aquecimento até a fase de pré-queima com um fluxo de gases descendente.
- Nessa fase a temperatura pode variar desde a temperatura ambiente até cerca de 1200° C.

11.3. Grelha móvel (traveling grate)

- Na terceira fase, que é a fase de queima, as pelotas são submetidas a um processo de aquecimento onde a temperatura pode chegar até cerca de 1350°C .

11.3. Grelha móvel (traveling grate)

- A alimentação de pelotas é feita continuamente sobre a grelha formando uma camada de pelotas cruas de cerca de 40 cm.
- Devido a temperatura nesta fase alcançar valores muito altos é utilizada entre a camada de pelotas cruas e a grelha uma camada de forramento de pelotas queimadas que pode ser de 10 cm de altura e tem a finalidade de impedir o sobre-aquecimento dos carros de grelha e com isso aumentar a sua vida útil.

11.3. Grelha móvel (traveling grate)

- Durante a alimentação de pelotas na grelha, são alimentadas pelotas queimadas nas laterais dos carros, com o objetivo de proteger a estrutura lateral dos carros de grelha.

Silo de Camada
(material para
camada
de fundo)

Silo de Camada
(material para
camada lateral)

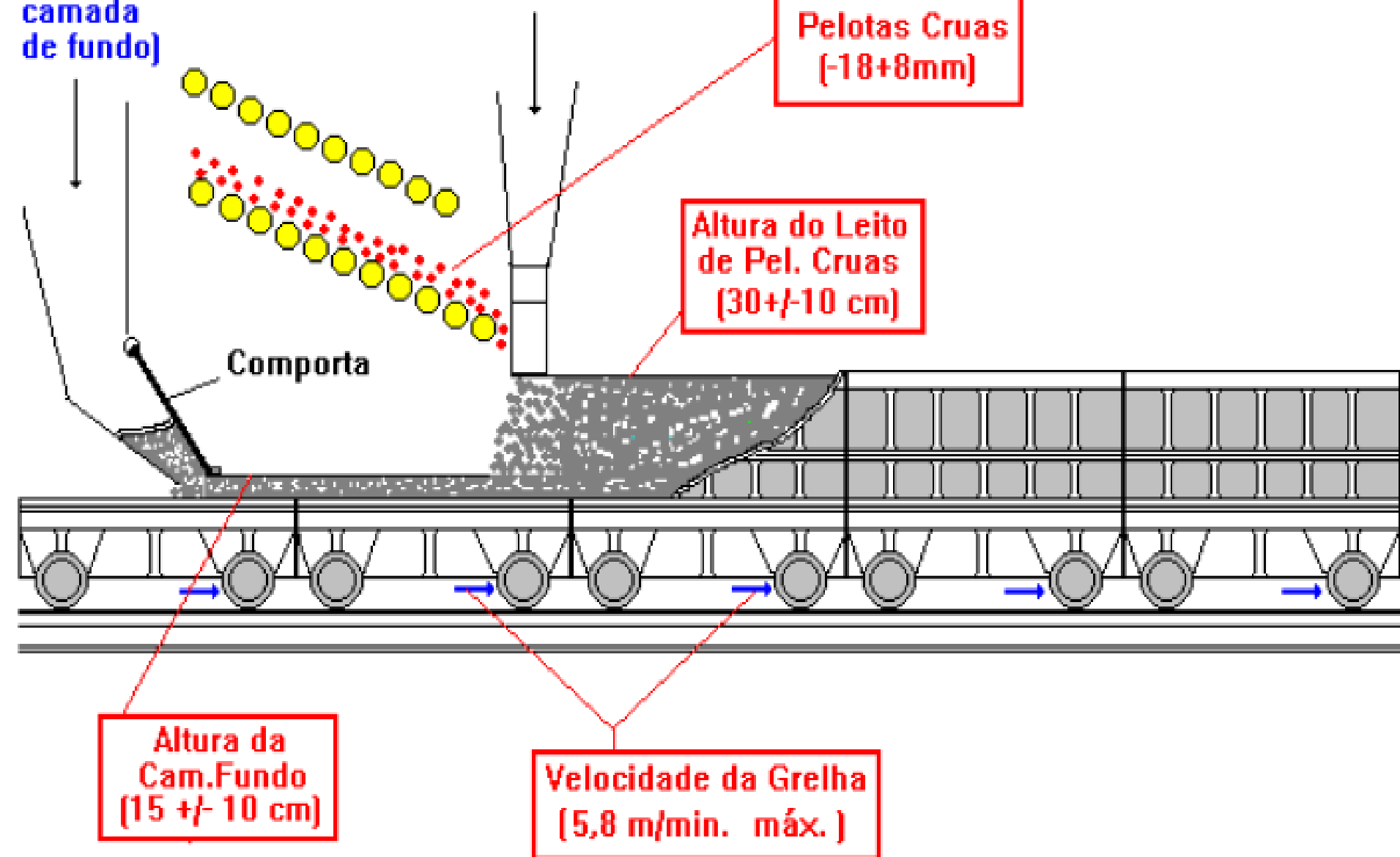
Pelotas Cruas
(-18+8mm)

Altura do Leito
de Pel. Cruas
(30+/-10 cm)

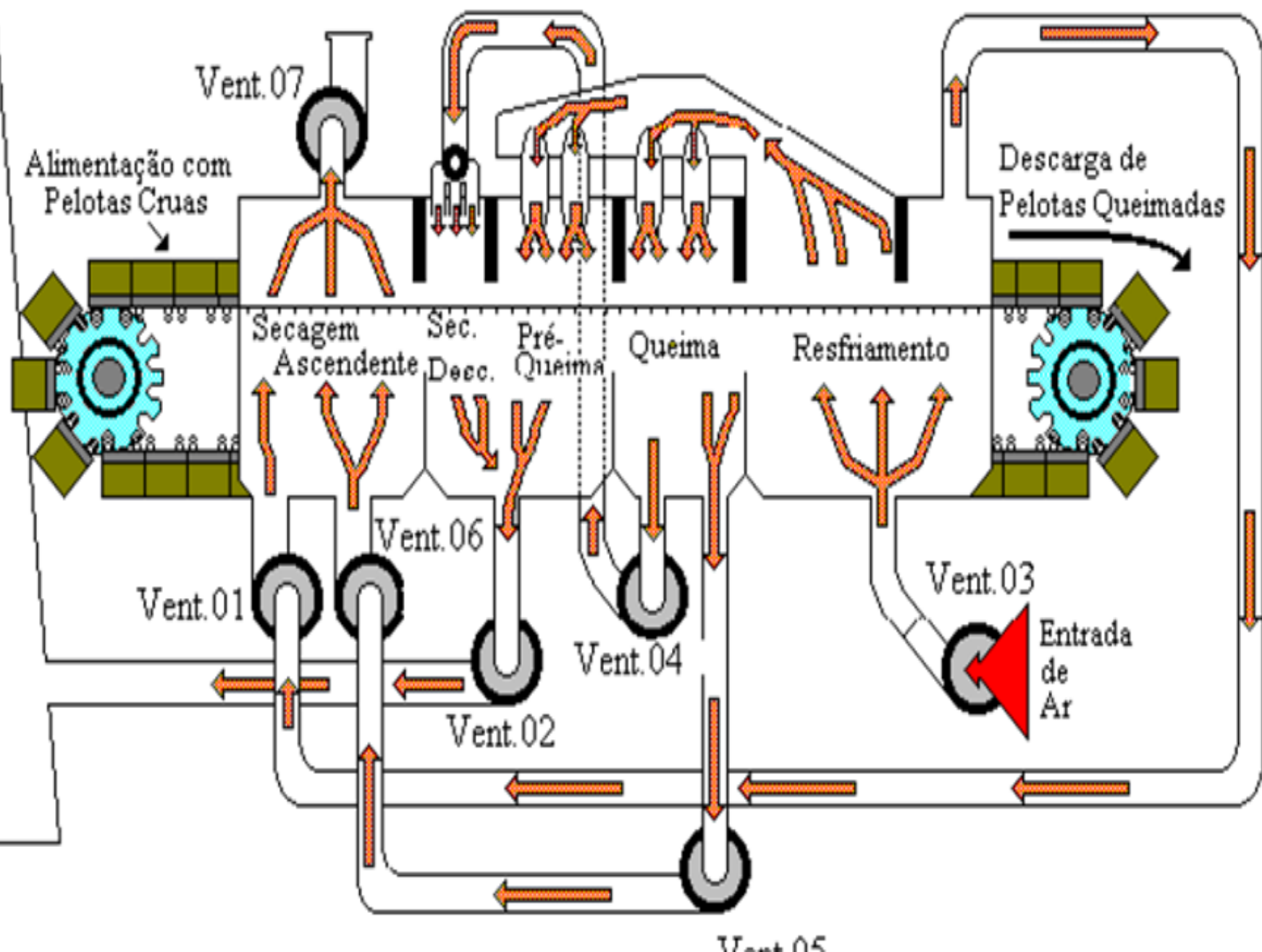
Comporta

Altura da
Cam.Fundo
(15 +/- 10 cm)

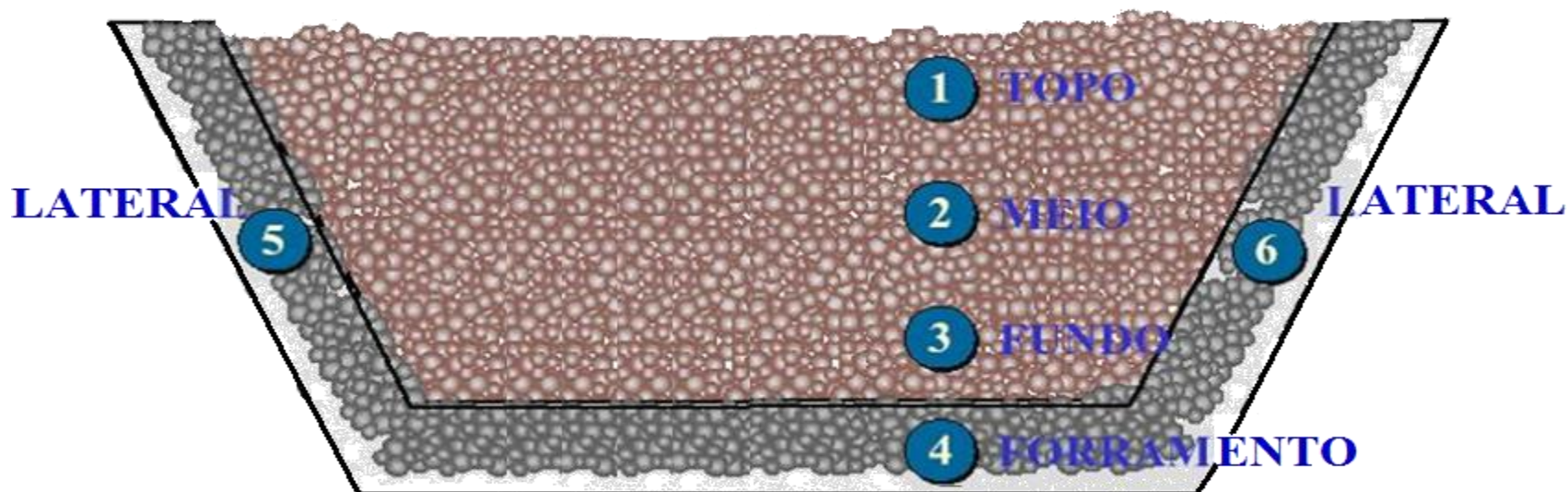
Velocidade da Grelha
(5,8 m/min. máx.)

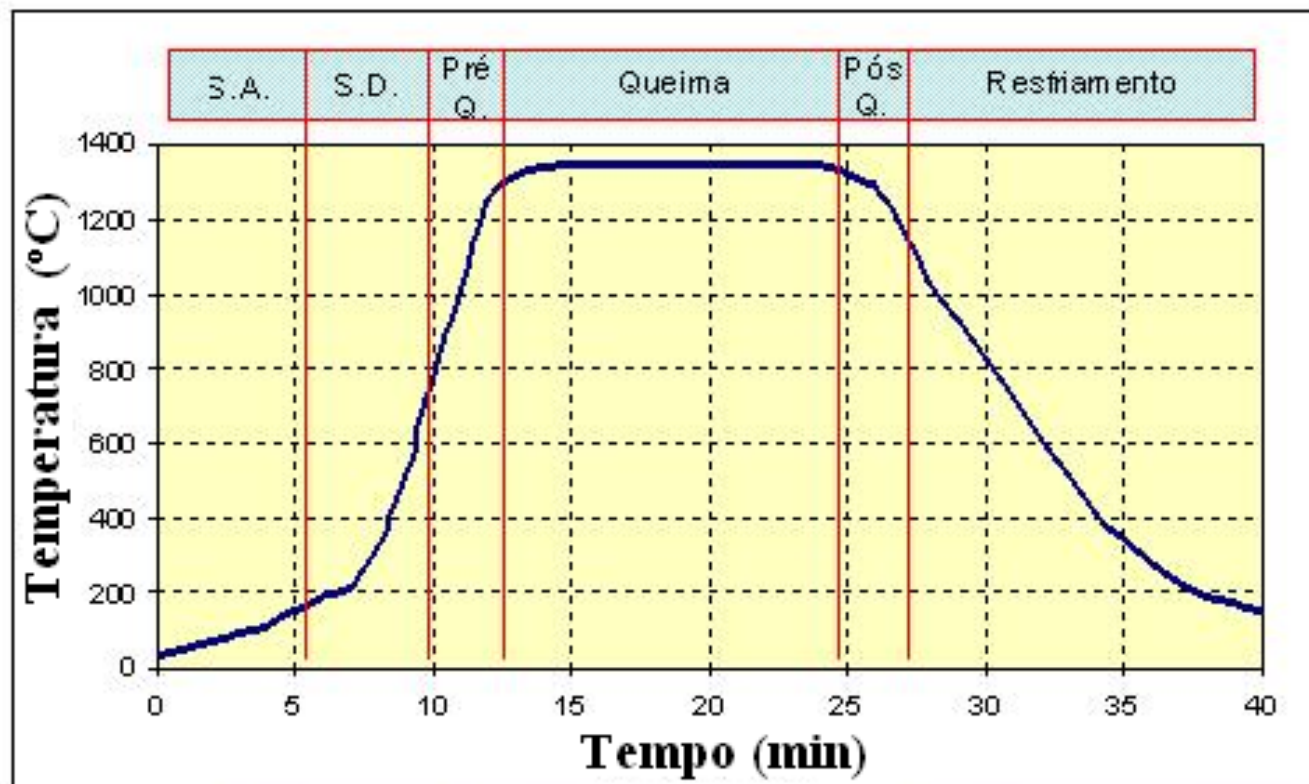


Forno de pelotização do tipo grelha-móvel Lurgi-Dravo



FLUXO DE GASES QUENTES





	Tempo	(%)		Tempo	(%)
Secagem Ascendente	05' 00"	12.8	Queima	12' 20"	30.8
Secagem Descendente	04' 20"	10.5	Pós-Queima	02' 20"	5.8
Pré-Queima	03' 00"	7.6	Resfriamento	13' 00"	32.5

Perfil térmico de queima das pelotas





CETM
Curso de Especialização em
Tratamento de Minérios

03/08/2013



12. Peneiramento das pelotas queimadas

- Visa o ajuste final na especificação granulométrica das pelotas, eliminando os materiais com granulometria inferior a 6,3 mm.





Pilhas de pelotas





Recuperadoras (ou retomadoras)



Ship loader