

CETM

Curso de Especialização em
Tratamento de Minérios

Aglomeração mineral

4. Sinterização

Prof. Dr. André Carlos Silva

1. Introdução

- O escopo da siterização consiste em:
 - Melhorar a permeabilidade da carga;
 - Aumentar o contato entre os sólidos e o gás redutor;
 - Baixar o “coke rate” (consumo de coque);
 - Aumentar a velocidade de redução.

1. Introdução

- **Processo de sinterização:** foi projetado com o objetivo inicial de aproveitar as frações de minérios e combustíveis inferiores a aproximadamente 6 mm.
- **Frações finas:** não podem ser utilizadas diretamente nos alto-fornos, por diminuïrem a permeabilidade da carga, dificultando a passagem dos gases.

1. Introdução

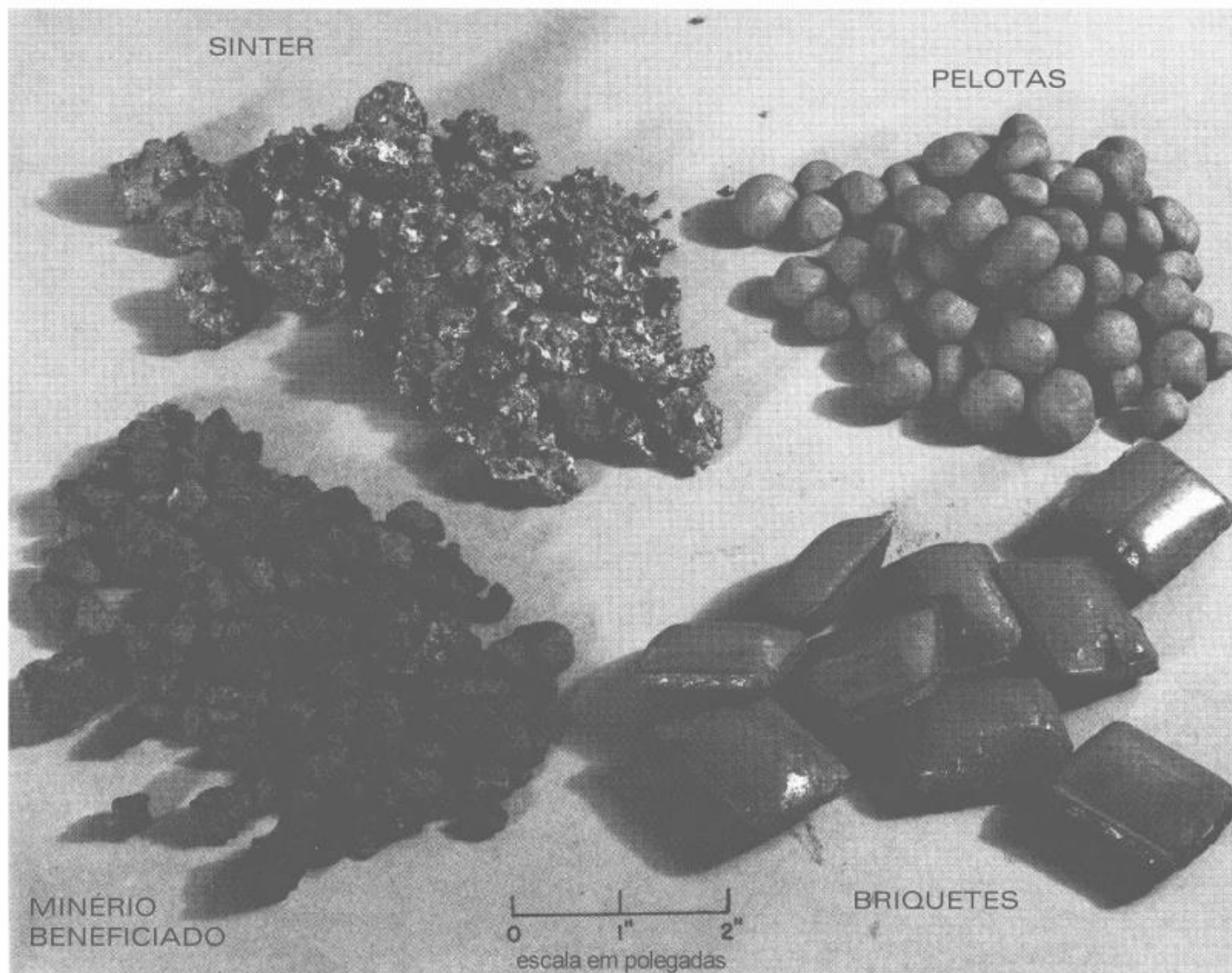
- **Sinterização:** processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas.
- **Produto resultante:** **sínter**, deve apresentar características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.

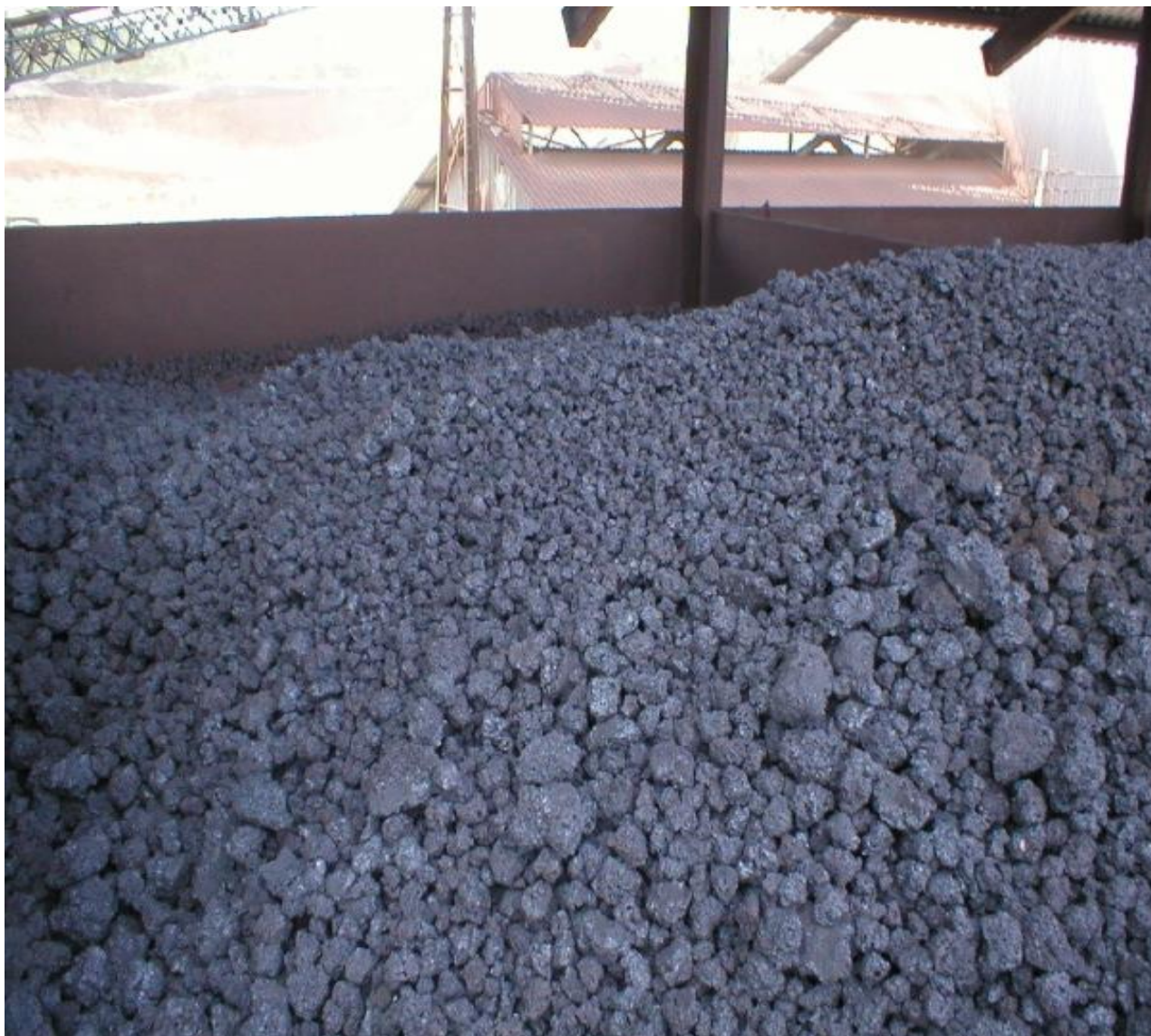
1. Introdução

- Ocorre a colagem das partículas sob condições em que a fusão ainda não ocorre ou em que é impedida a fluidização de toda camada.
- O fortalecimento das ligações entre as partículas resulta de processos de amolecimento superficial, fusão parcial e formação da escória.

1. Introdução

- O calor necessário às reações provém da queima de carbono misturado à carga depositada sobre uma grelha, que é atravessada pelo ar de combustão.
- Conforme o tipo de minério e das adições, o teor do combustível pode variar entre 8 e 12%.
- A temperatura alcançada neste processo é da ordem de 1200 - 1400° C.





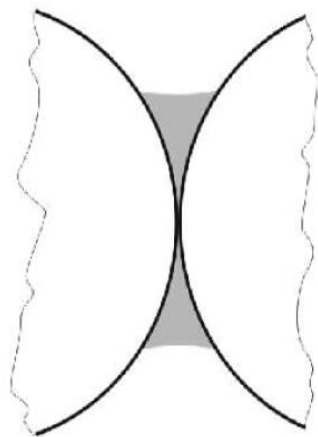
1. Introdução

- As partículas se unem pelas zonas de contato em pedaços maiores.
- Devido à maior movimentação às temperaturas elevadas, íons ou moléculas difundem-se nos cristais vizinhos e causam a aglomeração ou crescimento dos grãos.

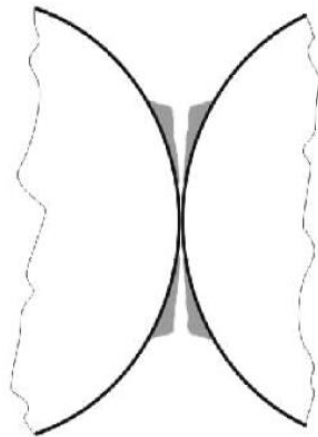
1. Introdução

- Terminada a queima, resulta num material poroso, que é depois quebrado no tamanho adequado, resfriado e peneirado.
- Durante o aquecimento, a água adicionada evapora-se, aumentando a permeabilidade.

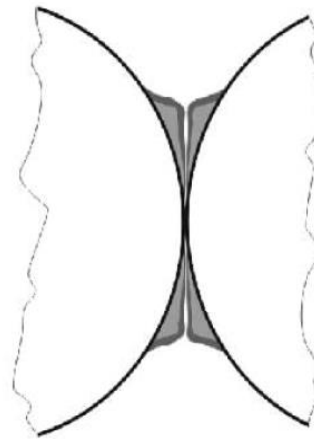
Bond After Drying



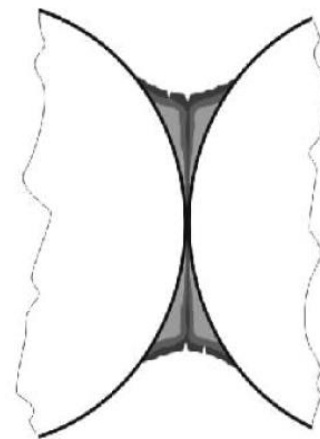
After Sintering



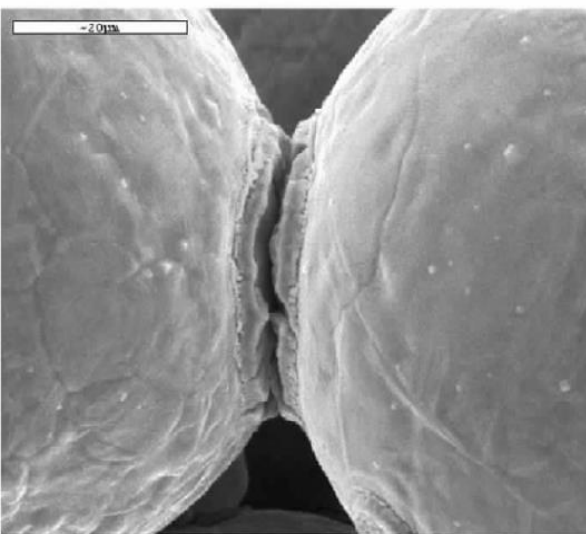
Nanobinder reapplied and sintered



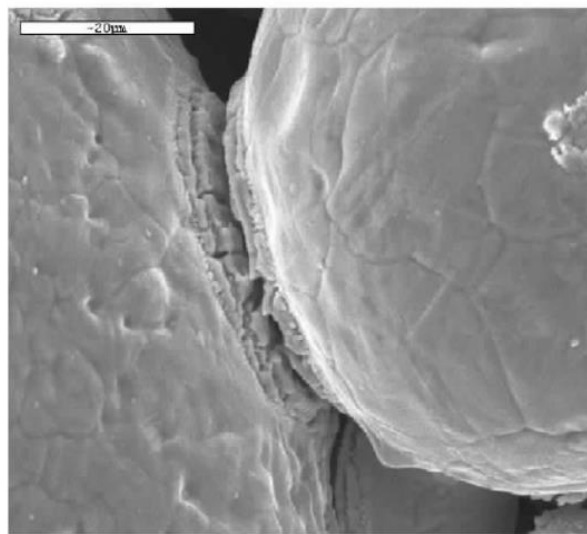
Third Application



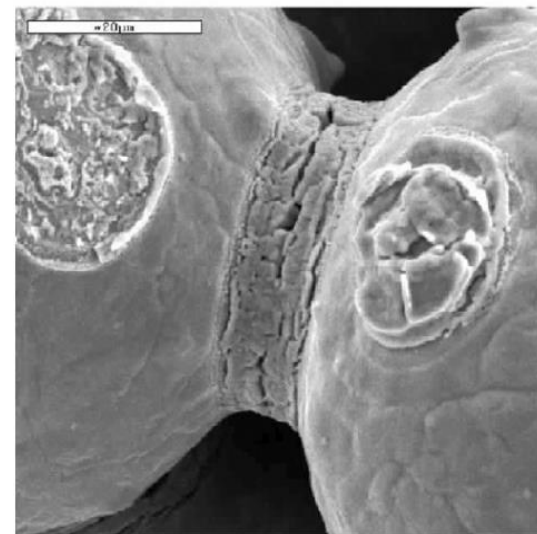
One Application



Two Applications



Four Applications



Note: (Top) Schematic illustration of bond repair by multiple applications of nanobinder. (Bottom) Images comparing bonds sintered to 700°C in samples with 1, 2, and 4 applications and dried under a magnetic field. The size of the cracks in the bonds decreases with additional applications

2. Sínter

- Para atender às condições de consumo no alto-forno, deve apresentar as seguintes características:
 - Alta resistência mecânica;
 - Boa redutibilidade;
 - Distribuição granulométrica especificada;
 - Composição química controlada.

2. Sínter

- Os sínteres são definidos genericamente como:
 - NÃO AUTO-FUNDENTE:** quando é proveniente de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO).

2. Sínter

- **AUTO-FUNDENTE:** o minério pode ser o mesmo anterior, mas são acrescentadas algumas bases para correção da composição química. Podem ser ácidos, quando a relação CaO/SiO_2 for inferior a 1, ou básico, quando esta relação for superior a 1.

3. Processo de sinterização

- O processo de sinterização se desenvolve conforme as seguintes etapas:
 - As matérias-primas, incluindo o combustível, são dosadas e misturadas;
 - A mistura é carregada em um misturador com o objetivo de promover a homogeneização e o controle da umidade. Nesta unidade ocorre a primeira etapa de aglomeração, a frio, denominada de *micropelotização*;

3. Processo de sinterização

- A mistura é carregada na grelha;
- Ao entrar em contato com o forno de ignição o combustível de sua camada superficial entra em combustão, iniciando a sinterização propriamente dita;
- Um volume de ar é succionado de cima para baixo, através do sistema de exaustão, dando continuidade à queima de combustível;

3. Processo de sinterização

- A continuidade da queima do combustível desenvolve uma frente de combustão, que gera o calor necessário às reações de sinterização, promovendo uma semifusão e uma consequente aglomeração da mistura, formando o sínter;

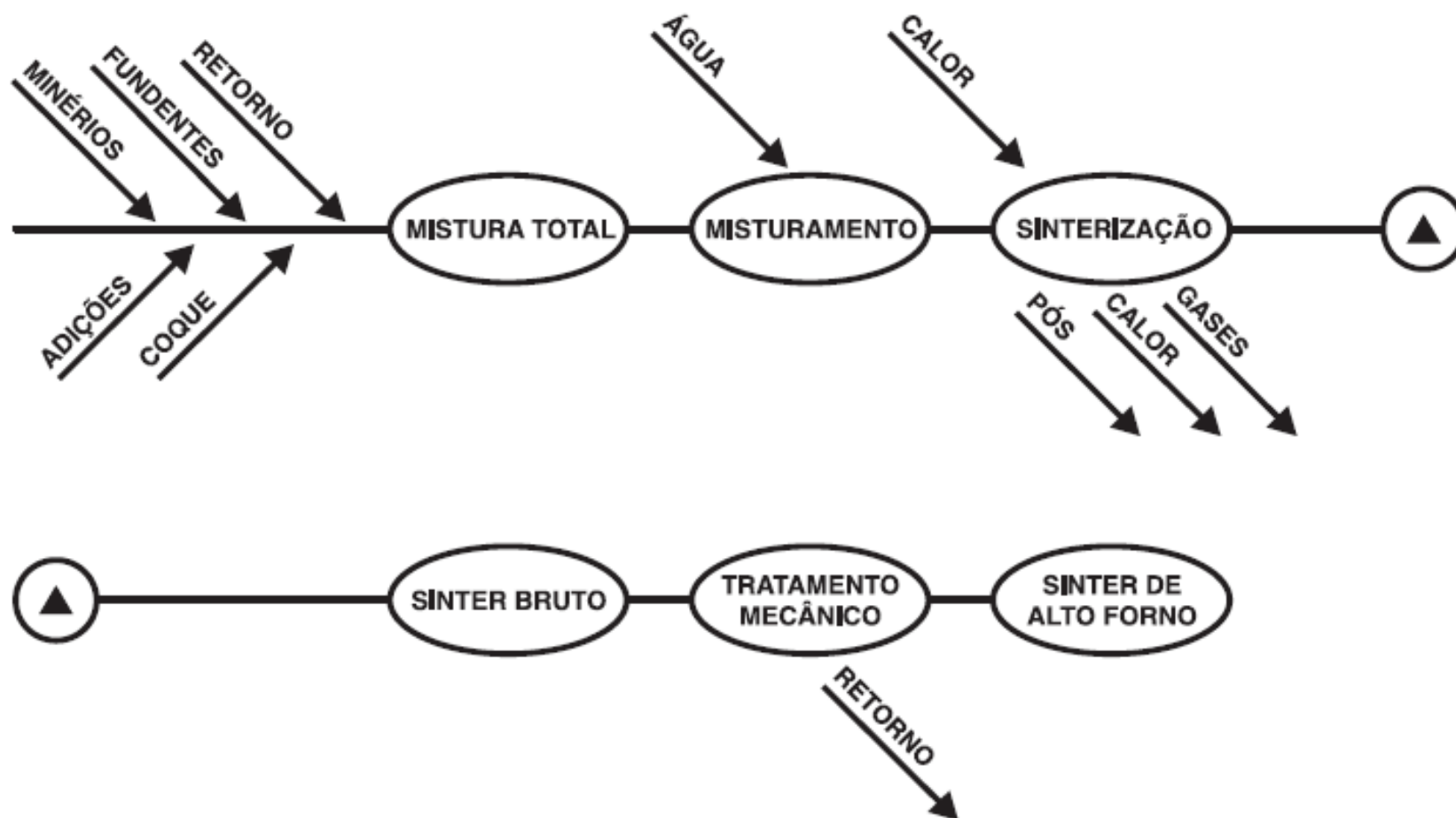
3. Processo de sinterização

- Quando a frente de combustão atinge as grelhas, na parte inferior da camada da mistura, indica que toda a mistura se transformou em sínter;
- Descarregado da grelha, o sínter se apresenta em grandes blocos e é, então, submetido a um tratamento de britagem e peneiramento;

3. Processo de sinterização

- As frações superiores a 5mm são carregadas no alto-forno, e as inferiores realimentam a mistura a ser sinterizada.

Processo de sinterização



3.1. Micropelotização da mistura

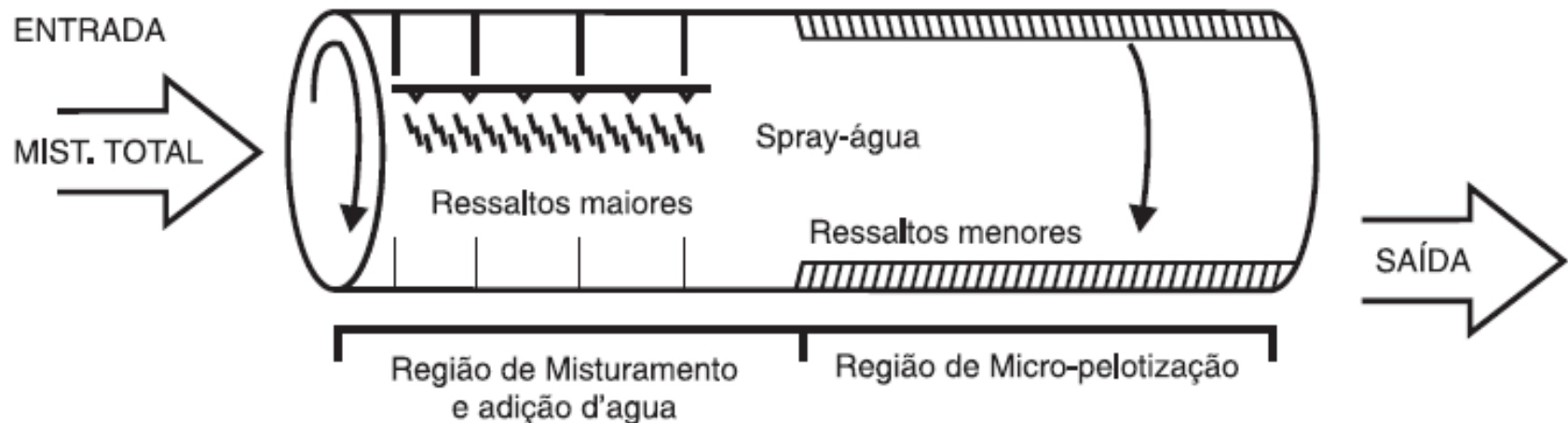
- **Micropelotização:** pode ser definida pela união de partículas através de tensões superficiais, onde grãos grossos (nucleantes) servem como base para aderência de grãos finos (aderentes).

3.1. Micropelotização da mistura

- Grande parte dos sinterizadores objetivam o tratamento da mistura, conseguindo-se:
 - Aumentar a permeabilidade do leito;
 - Reduzir o consumo de coque;
 - Aumentar a produtividade, minimizando a dispersão química e física do sínter.

3.1. Micropelotização da mistura

- O misturador promove a homogeneização e micropelotização da mistura, além da adição de água para controle da umidade deste material.





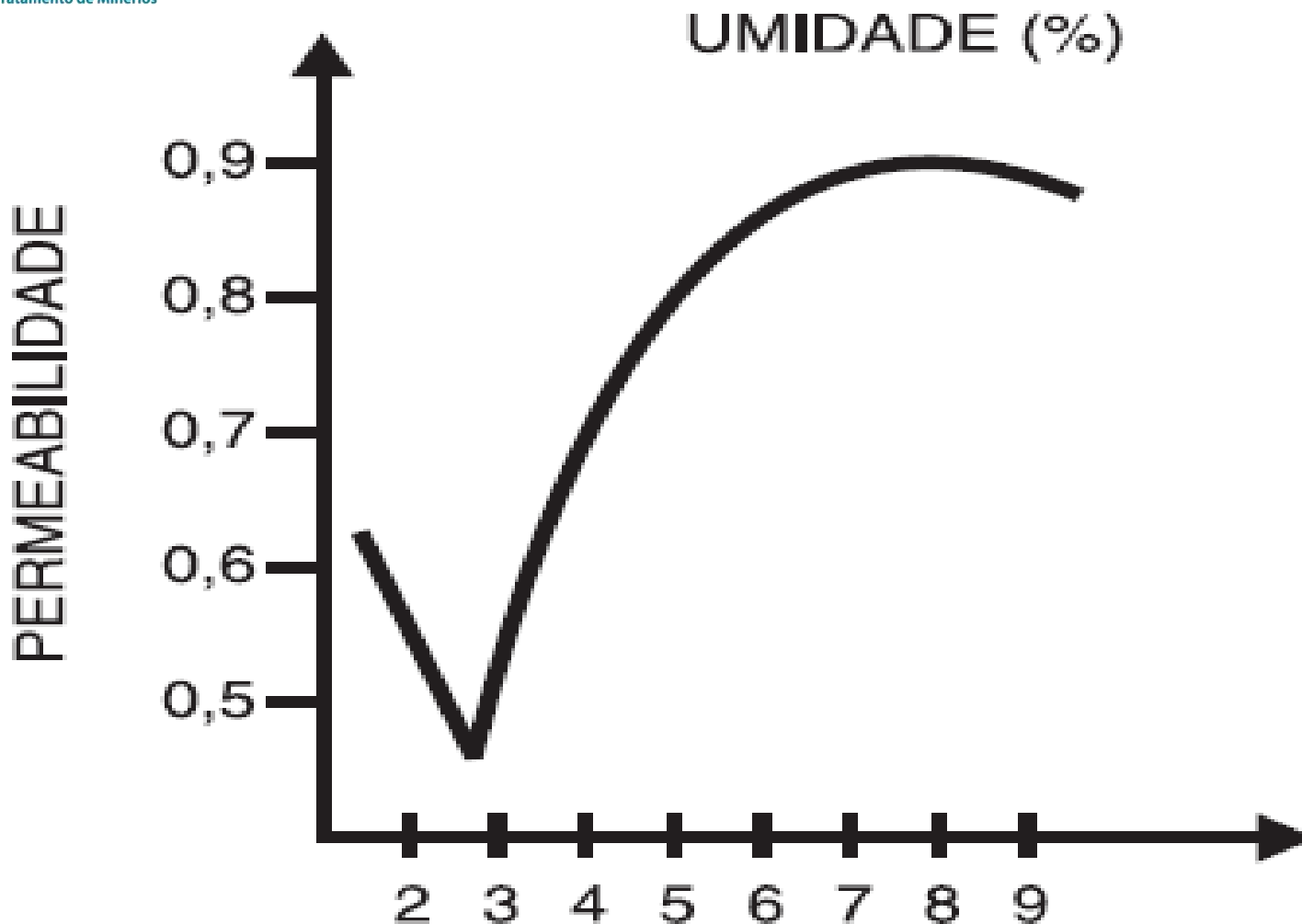
Tambor de mistura e micropelotização – sistema por bateladas

3.1. Micropelotização da mistura

- A dosagem de água (atualmente é automatizada) é feita no misturador com o sistema já tendo conhecimento da umidade e da massa de mistura que entraram para correção.
- O controle da umidade deve ser rigoroso para não haver o risco de perda de produção, consumo elevado de combustível e má qualidade do sinter.

3.1. Micropelotização da mistura

- O controle de umidade está relacionado com a granulometria da mistura pois:
 - Quando a mistura a sinterizar apresenta maiores concentrações granulométricas na faixa inferior a 150#, o acréscimo na adição de água em conjunto com a ação do misturador, permite maior formação de micropelotas, melhorando com isto, a permeabilidade da mistura;
 - A mistura excessivamente granulada necessita, às vezes, para controle da permeabilidade, da diminuição da água adicionada.



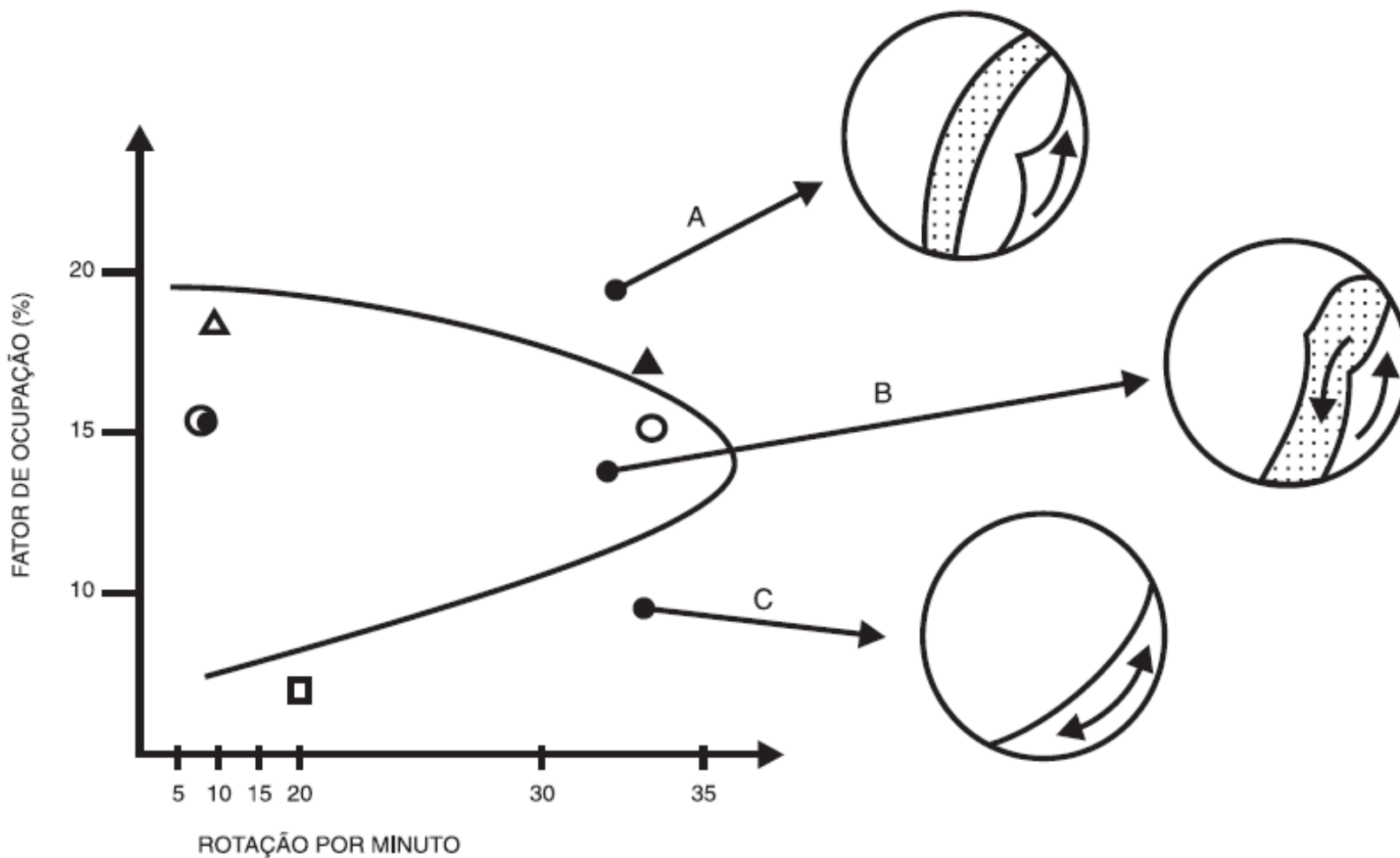
Reflexos do controle de umidade nos rendimentos, na produção e na permeabilidade da mistura:

3.1. Micropelotização da mistura

- O aumento da umidade da mistura é benéfico à permeabilidade da mesma e à produção de sinter devido à maior formação de micropelotas.
- A elevação da umidade além de um certo nível, promove o encharcamento da matéria-prima com consequente destruição das micropelotas, refletindo negativamente na produtividade.

3.1. Micropelotização da mistura

- A formação das micropelotas depende:
 - Do movimento das partículas dentro do misturador, o qual é regido pelas características do equipamento;
 - Do fator de ocupação;
 - Do tempo de retenção do material no equipamento.



Modelos de movimentos possíveis das partículas dentro do misturador:

3.2. Modelos de movimentos possíveis das partículas dentro do misturador

- O movimento **A**, chamado de **catarata** tem a característica de formar as micropelotas em um primeiro estágio, para destruição das mesmas logo após.
- O movimento **C**, ou de **escorregamento**, não tem poder suficiente para promover um contato efetivo entre grãos aderentes e nucleantes, sendo portanto também ineficaz.

3.2. Modelos de movimentos possíveis das partículas dentro do misturador

- O movimento **B**, ou movimento de **cascata** permite um contato intenso entre as partículas, sem as destruir posteriormente, sendo, neste caso, o desejado no que diz respeito a um maior índice de granulação da mistura.

4. Zonas de sinterização

- O mecanismo de sinterização de minério de ferro é determinado pelo desenvolvimento de dois fenômenos distintos:
 - Fenômeno físico
 - Fenômeno químico

4.1. Fenômeno físico

- Transferência de calor da camada superior para a inferior do leito de sinterização, proporcionada pela sucção forçada de ar, criando uma fonte térmica cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar e definindo duas regiões distintas: uma de concentração térmica maior (**região inferior**) e outra menor (**região superior do leito sinterizado**).

4.2. Fenômeno químico

- Combustão do coque contido na mistura a sinterizar que, produzindo calor, gera uma frente de reações químicas, cuja evolução é função da reatividade, da qualidade do combustível e da umidade e composição química e granulométrica da mistura.

4. Zonas de sinterização

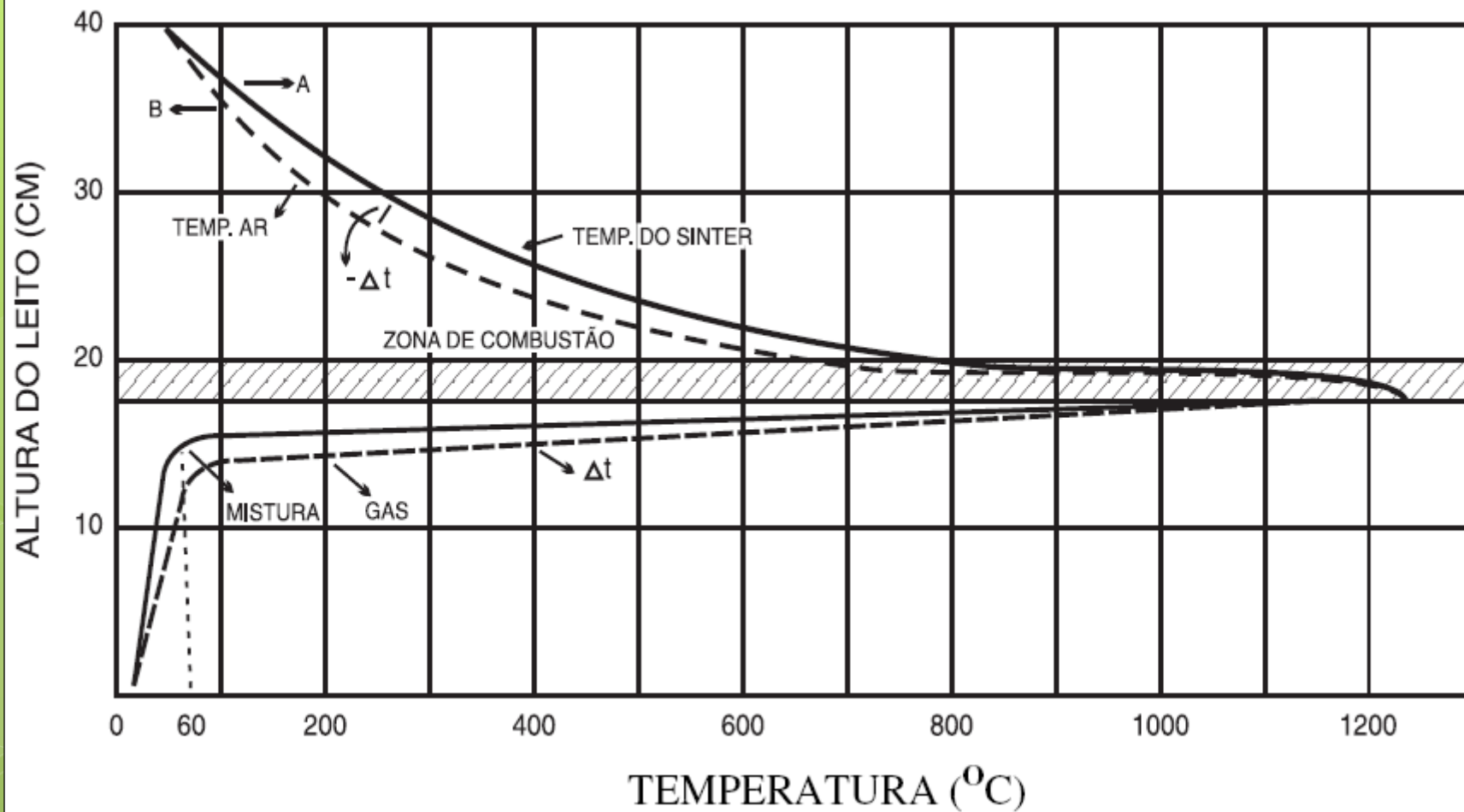
- Estes dois fenômenos são inteiramente dependentes entre si, pois o combustível só entra em combustão, desencadeando o processo, após a mistura atingir uma certa temperatura, determinada pela reatividade do próprio combustível.

4. Zonas de sinterização

- O fenômeno de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do coque, ocorrendo simultaneamente, definem as "zonas de sinterização" e assim todo o processo de aglomeração de mistura.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- Na região **acima da zona de combustão**, o ar retira calor do sinter já formado, transportando-o para as regiões inferiores.
- Na **zona de combustão** ocorrem quase todas as reações do processo, a uma temperatura superior a 1000°C , sendo que o gás e o material sólido trocam entre si as funções de receptor e fornecedor de calor, em curtas frações de segundo e de centímetro.



Esquema de troca de calor no leito de sinterização

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- Assim, **abaixo da zona de combustão**, os gases superaquecidos passam a fornecer calor para a mistura, que se aquece bruscamente da temperatura ambiente até mais de 1200°C .
- A curva "A" da figura mostra que a temperatura, ao passar violentamente de cerca de 60°C para $1200/1400^{\circ}\text{C}$, desencadeia todas as reações de sinterização.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- A curva "B" mostra um deslocamento do perfil térmico do leito, que ocorre ao longo do tempo, observando-se que a cada ponto de "A" corresponde um novo ponto de "B", ou seja, a frente física de propagação de calor se deslocou de "A" para "B", promovendo neste deslocamento um ciclo completo de reações físicas e químicas.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- Ao se atingir temperaturas próximas de 100°C , inicia-se a evaporação da umidade da mistura, porém como o vapor é carregado para regiões mais frias nas camadas inferiores, ao passar por $60/70^{\circ}\text{C}$ (ponto de orvalho) é novamente condensado.
- Entre 60 a 100°C aproximadamente, forma-se uma região em que a umidade da mistura é superior à média, e acima de 100°C inicia-se a zona de secagem.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- Entre 150 a 200° C, mesmo no curto intervalo de tempo, toda umidade já foi vaporizada, iniciando-se a desidratação dos hidróxidos (150 a 500° C), o que se faz consumindo calor do processo.
- Quando a mistura atinge a faixa de 500 a 700° C, inicia-se a combustão do coque com violento desprendimento de calor, elevando o nível térmico do ambiente para 1200/1400° C.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- A decomposição dos carbonatos inicia-se em torno de 700°C , com consumo de calor.
- Na faixa de 900 a 1400°C , que define a **zona de combustão**, também chamada de **zona de sinterização** ou **de escorificação**, ocorrem as reações no estado sólido ou semilíquido, formando-se o magma do sínter, ou seja, o conjunto de silicatos, cálcio-ferritas, que, após cristalização, juntamente com os óxidos de ferro, constituem o sínter.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- A reação de combustão do coque na mistura:



além de produzir grande quantidade de calor, torna o ambiente ligeiramente redutor, o suficiente para uma redução parcial da hematita e magnetita.

4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- Atingida a temperatura máxima do processo, sob atmosfera ligeiramente redutora, inicia-se o resfriamento do síter sob atmosfera francamente oxidante, pois o único gás acima da zona de combustão é o ar.
- À temperatura bastante elevada ocorre, então, uma reoxidação da magnetita.

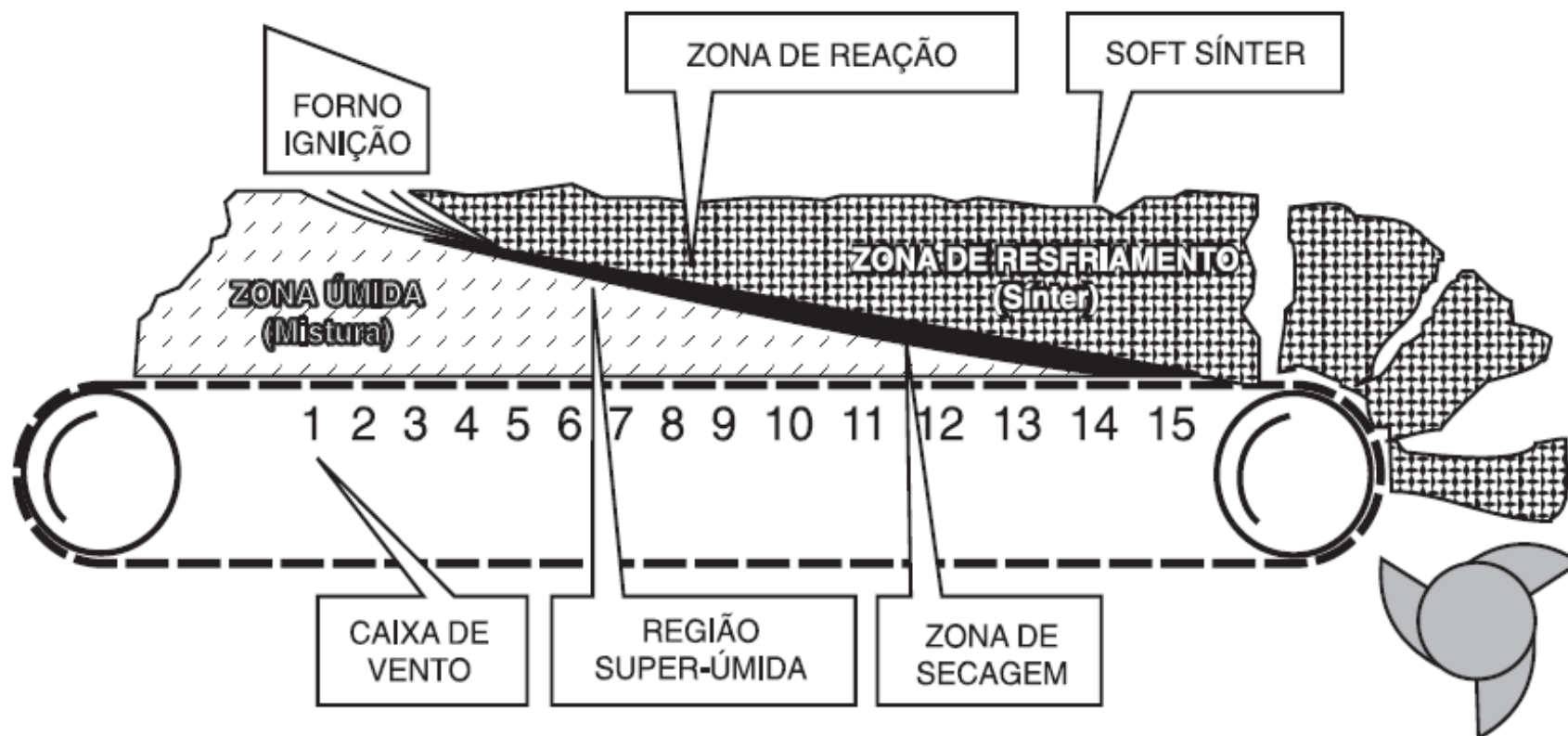
4.1. Esquema de troca de calor no leito de sinterização

- A cerca de 900°C o ciclo de reações químicas se completa, iniciando-se o resfriamento propriamente dito.
- O sínter da camada superficial, numa espessura de aproximadamente 2cm, sinterizado diretamente pelo calor das chamas do forno de ignição e resfriado bruscamente pelo ar à temperatura ambiente, quando sai do forno é frágil e, por isso, denominado **soft sinter**.

5. Zonas de sinterização

- Pode-se dividir o processo de sinterização nas seguintes zonas principais:
 - Zona úmida;
 - Zona de secagem;
 - Zona de reação;
 - Zona de resfriamento.

Corte longitudinal de um leito de sinterização



5.1. Zona úmida

- Constitui a base do leito de mistura a sinterizar.
- Tem como limite superior a temperatura de 100° C.

5.2. Zona de secagem

- Região onde ocorre principalmente a vaporização da umidade da mistura e depois a desidratação dos hidróxidos.
- Compreendia entre 100 a 500° C.

5.3. Zona de reação

- Compreende toda a região térmica no aquecimento acima de 500°C , quando se inicia a combustão do coque, passando pelo ponto de temperatura máxima do processo e chegando até 900°C , quando se inicia o resfriamento do sinter.

5.3. Zona de reação

- As principais reações que ocorrem nesta zona são:
 - Combustão do coque (exotérmica);
 - Decomposição dos carbonatos (endotérmica);
 - Reações na fase sólida;
 - Reações na fase líquida (formação do magma);
 - Redução e reoxidação dos óxidos de ferro.

5.4. Zona de resfriamento

- Tem início abaixo de 900°C , quando termina a reação.
- Nesta fase ocorre resfriamento do síter aparecem os primeiros cristais que, conforme o seu desenvolvimento, irão conferir determinadas propriedades ao síter.

6. Descrição das operações

- A sinterização compreende três fases principais:
 - Preparo da carga;
 - Queima da carga em uma grelha;
 - Resfriamento, britagem e peneiramento, visando obtenção de dois produtos:
 - Sínter de alto forno;
 - Finos de retorno, que serão reciclados.

6.1. Preparo das matérias-primas

- Distribuição granulométrica para a matéria-prima a ser sinterizada:
 - 0% > 9,0 mm;
 - Máximo de 5% > 6,0 mm;
 - De 45 a 60% entre 1 e 6 mm;
 - Máximo de 20% < 0,150 mm.

6.1. Preparo das matérias-primas

- Durante o processo de controle de umidade e homogeneização no misturador, acontece o fenômeno de micropelotização da mistura:
 - Partículas finas (aderentes) se juntam em torno de partículas graúdas (nucleantes), promovendo uma pré-aglomeração da mistura.
- Um teor mínimo de umidade é essencial para o processo (6%).

6.1. Preparo das matérias-primas

- Caracteriza-se na mistura:
 - **Minério base:** aquele em maior proporção.
 - **Minério de adição:** aquele que atua como corretivo.

7. Máquinas de sinterização

- A esteira de sinterizar consiste num grande número de grelhas móveis (*pallets*), formando uma correia sem fim.
- Os “dedos” que compõem a grelha, deixando espaços livres para a passagem do ar aspirado, são feitos geralmente, de ferro maleável ou de ferro fundido com 25 a 30% de cromo e 1 a 2% de níquel.

7. Máquinas de sinterização

- As grelhas são montadas em carrinhos que deslizam sobre trilhos, formando uma esteira contínua.
- No ponto de descarga, os carrinhos de grelha engatam numa roda dentada, de modo a evitar o impacto das laterais das grelhas umas contra as outras e seu desgaste prematuro durante a virada.

03/08/2013



Composição do sinter:
Ferro (Fe): 57(%) a 61(%)

Quebra do Sinter

7.1. Quebrador do bolo de sínter

- Consiste em um eixo robusto, com espigões regularmente espaçados que pressionam o bolo de sínter.
- As pontas do quebrador são revestidas de *Stellite* (liga à base de cobalto, usada para resistir ao desgaste severo, impacto e choque térmico).

7.2. Peneiramento

- O bolo de sínter que deixa a máquina deve ser reduzido a dimensões adequadas ao alto forno e os finos nele contidos, separados pelo peneiramento.
- Após o resfriamento, o sínter é britado e peneirado, geralmente nas frações:
 - 0 – 8mm: finos de retorno
 - 8 – 15mm: sínter de alto forno
 - 15 – 25mm: material para falsa grelha

7.3. Resfriadores de sínter

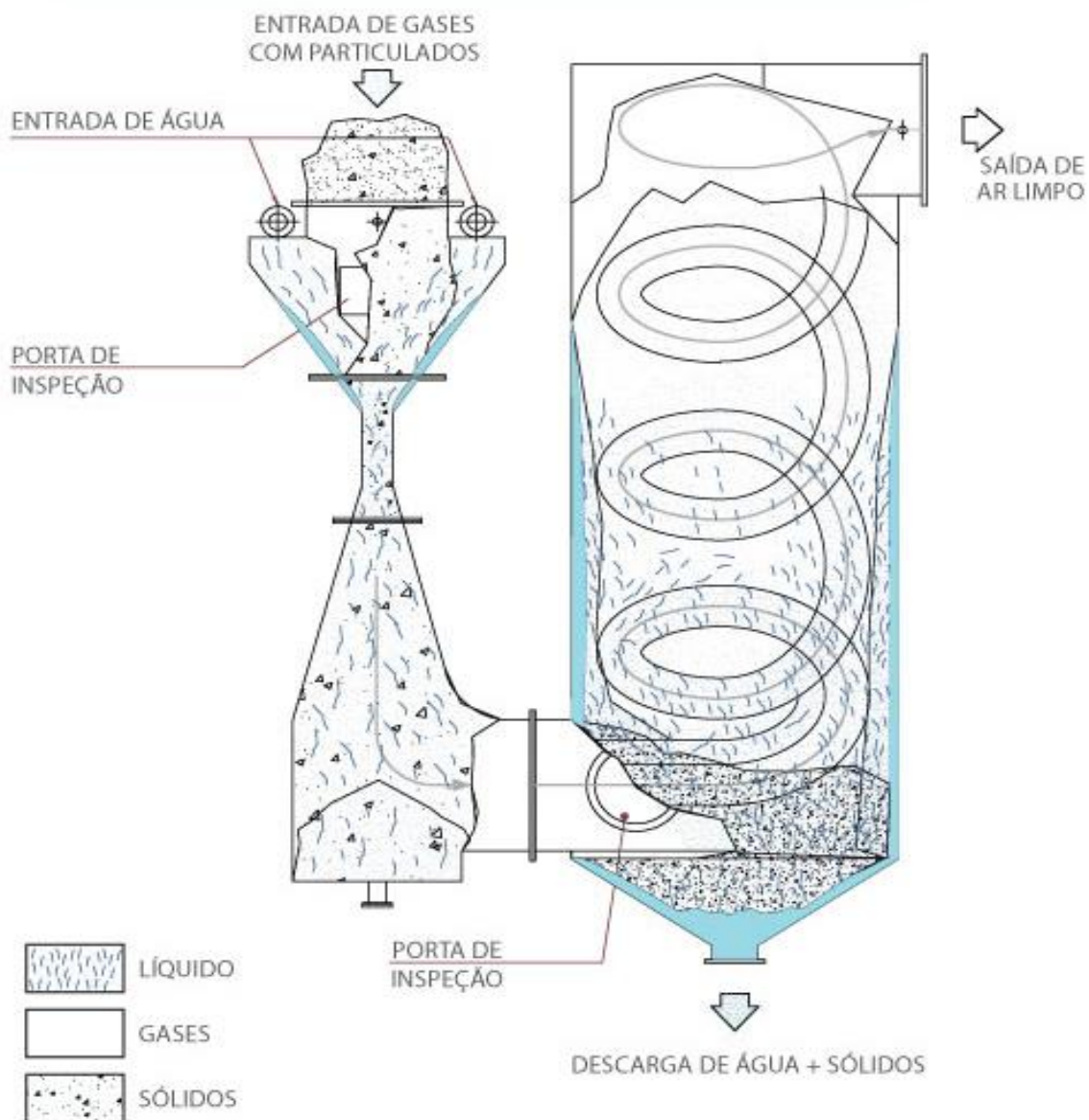
- A temperatura do sínter, ao deixar a máquina é de 700 – 800° C e deve ser reduzida a menos de 120° C, evitando a deterioração das correias transportadoras de borracha que o levarão aos silos de alto forno.

7.4. Despoeiramento das instalações

- A poeira sugada pelas caixas de vento para os ventiladores pode ser recuperada por via úmida (Venturis) ou via seca (precipitador eletrostático).
- No transporte e manuseio dos materiais da carga, os finos de retorno e do síter produzido, há geração de poeiras, que são recolhidas fechando-se o ambiente e sugando-se o ar carregado de poeiras através de filtros.

7.4.1. Lavadores Venturi

- São equipamentos industriais usados na limpeza de gases e coleta de material particulado.



Lavadores Venturi

7.4.2. Precipitador eletrostático

- É um equipamento industrial, utilizado na coleta de material particulado de gases de exaustão.
- Operam carregando eletrostaticamente as partículas e depois captando-as por atração eletromagnética.



SÍNTER	PELOTA
Aproveitamento de finos de mineração abaixo de 8mm até 0,25mm e de resíduos siderúrgicos (pó de coletor, carepa, poeiras)	Aproveitamento de finos de mineração abaixo de 0,5mm
Pouca resistência mecânica	Elevada resistência e baixa degradação de transporte
Fácil degradação durante transporte	Boa transportabilidade
Tamanho do sínter: 5 a 100mm, em pedaços irregulares	Tamanho da pelota: 10 a 12mm, de formato esférico
25 a 50% de finos de retorno	5 a 10% de finos de retorno
Queima do combustível em contato com o minério	Aquecimento pelos gases quentes produzidos fora do leito de pelotização