

# Instalações Térmicas

**3º ano 6º semestre**

**Aula 12**

# ***Aula 12: Tipos de fornos em função do destino Classe de fornos e sua subdivisão.***



# Tópicos

- *Classificação tecnológica e estrutural dos fornos*
- *Classificação dos fornos pelo princípio de geração de calor*
- *Classificação dos fornos pelo método de operação*



# 12 - Tipos de fornos em função do destino

## Classe de fornos e sua subdivisão

Pelo princípio tecnológico, todos os fornos metalúrgicas são classificadas em fornos de fusão ou de aquecimento. Os fornos de fusão servem para obter metais a partir dos minérios e os de aquecimento para tratamento dos metais obtendo-se assim as propriedades desejadas.

Uma característica dos fornos de fusão é dos materiais processados neles alterarem o seu estado de agregação. Os fornos de aquecimento são empregues para aquecer materiais para calcinação ou para secagem como também para aumentar a plasticidade dos metais antes do seu funcionamento.



# 12 - Tipos de fornos em função do destino

## Classe de fornos e sua subdivisão

Muitos dos fornos de aquecimento são usados no tratamento térmico de metais, onde a estrutura destes sofre determinadas alterações. Todos os fornos de aquecimento têm uma característica comum que é das moléculas dos materiais neles processados permanecerem no mesmo estado de agregação.



# fornos de aquecimento



## *12 - Tipos de fornos em função do destino*

### *Classe de fornos e sua subdivisão*



Fornos de tratamento térmico Intermitentes



## 12 - Tipos de fornos em função do destino Classe de fornos e sua subdivisão

Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ◊ Instalações Térmicas



8

Fornos de tratamento térmico contínuos com emprego de microqueimadores



## 12 - Tipos de fornos em função do destino Classe de fornos e sua subdivisão

Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ◊ Instalações Térmicas



9



Forno de fusão de vidro

## 12.1 - Classificação tecnológica e estrutural dos fornos

Os fornos de cada um destes dois grupos são classificadas de acordo com as operações particulares que se pretende executar. Por exemplo: os fornos de fusão são usados para o derretimento do ferro, o aço, o cobre, sílica, etc.. Os fornos de aquecimento podem ser usadas para calcinação de minérios ou de refractários, para aquecimento do metal antes da laminação ou o forjamento ou para o tratamento térmico dos metais. Estes grupos de fornos, são destinados à operações tecnológicas específicas, são classificados também pelas características estruturais, pelos métodos de transporte do metal na fornalha, e pelo tipo de produto que é aquecido.



## 12.1 - Classificação tecnológica e estrutural dos fornos

Por exemplo, os fornos de aquecimento para aquecer o metal antes da laminação são divididas nos seguintes grupos:

- ❑ (a) Fornos contínuas, fornos de fornalha fixa etc.;
- ❑ (b) Fornos de fornalha oscilante, fornos de fornalha rotativa etc;
- ❑ (c) Fornos para lingotes, tubos, lâminas, barras, etc..



## 12.1 - Classificação tecnológica e estrutural dos fornos

Os fornos de chama são classificadas pelo tipo de combustível usado. Por exemplo, os fornos de fornalha aberta para a produção de aço podem ser a gás ou a combustível líquido, os fornos podem ser regenerativos ou recuperativos de acordo com o método de utilização do calor dos gases.

Os fornos eléctricos são classificadas pelo método da conversão da energia eléctrica em calor: podem ser fornos de resistência ou fornos de indução.





## 12.1 - Classificação tecnológica e estrutural dos fornos

Os fornos modernos são unidades térmicas complexas compostas geralmente por equipamento principal e auxiliar da fornalha. O forno tem geralmente a câmara de reacção (espaço da fornalha) e os meios para gerar a energia térmica, tais como queimadores ou eléctrodos em fornos eléctricos. O equipamento auxiliar compreende meios para a utilização do calor dos gases de escape, os ventiladores os exaustores, as válvulas, portas, etc..

O processo tecnológico para determinada fornalha é executado na câmara de reacção, é aí onde outros elementos da fornalha asseguram as condições mais eficazes para o processo tecnológico principal.

## 12.2 - Classificação dos fornos pelo princípio de geração de calor

Os fornos funcionam com base na conversão de qualquer tipo de energia em calor. As fontes primárias principais de energia são:

- (a) Energia química do combustível (em fornos de chama);
- (b) Energia química do metal derretido; e
- (e) Energia eléctrica.

Em fornos de chama, a energia química do combustível é convertida em calor através da combustão.



## 12.2 -Classificação dos fornos pelo princípio de geração de calor

Em alguns tipos de fornos, a geração do calor pode ser a custa da energia química do combustível ou do metal fundido. Esses são os fornos de fornalha aberta que ocupam um lugar intermédio entre os fornos e conversores de chama. Nestes fornos, o combustível é queimado sobre a superfície do metal e tanto os gases da chama como os incandescentes passam pela superfície do metal, isto é, os processos que ocorrem são típicos dos fornos da chama. Por outro lado, as impurezas do metal derretido são queimadas devido ao calor gerado e expulsas para fora do metal.



## 12.2 -Classificação dos fornos pelo princípio de geração de calor

O calor pode ser obtido devido à energia eléctrica convertida pela: (a) passagem da corrente eléctrica através de um gás; (b) acção da corrente eléctrica num campo magnético, com as *eddy* correntes que são fornecidas ao metal; (c) pela remagnetização e polarização dos dieléctricos; (d) pela passagem da corrente eléctrica através de condutores (ou às vezes do líquido) do eléctrodo contínuo; e (e) pela energia cinética dos electrões.

Estes princípios da conversão da energia eléctrica em calor determinam os tipos de fornos eléctricos utilizados, a saber: (a) fornos de arco eléctrico e de plasma; (b) fornos de indução; (c) centrais de aquecimento dieléctrico; (d) fornos de resistência; e (e) fornos de feixe do eléctrico.





## 12.3 - Classificação dos fornos pelo método de operação

A primeira tentativa de formular os princípios da teoria dos fornos foi feita entre 1905-1911 por V. E. Grurn-Grzhimailo, um proeminente metalúrgico Russo. Ele desenvolveu o que foi chamado teoria aerodinâmica dos fornos, que explica os processos que ocorriam nos fornos desse tempo, caracterizados pelo movimento livre dos gases.

O progresso na construção de fornos, há uns anos atrás, seguiu na direcção do desenvolvimento de fornos com o movimento intenso forçado dos gases no seu interior.



## 12.3 -Classificação dos fornos pelo método de operação

Como os fornos de movimento forçado dos gases ganharam mais expressão, os conceitos da teoria aerodinâmica dos fornos tornou-se cada vez mais inaplicável até que perdeu por completo o seu sentido.

Na teoria actual, há dois grupos distintos de fornos, que diferem na natureza dos processos que ocorrem neles.

- Num grupo, a geração do calor ocorre no interior do material processado. Com estes fornos os processos de geração de calor são de importância principal. Um exemplo pode ser o conversor de Bessemer, em que o ferro é derretido e convertido ao aço;



## 12.3 -Classificação dos fornos pelo método de operação

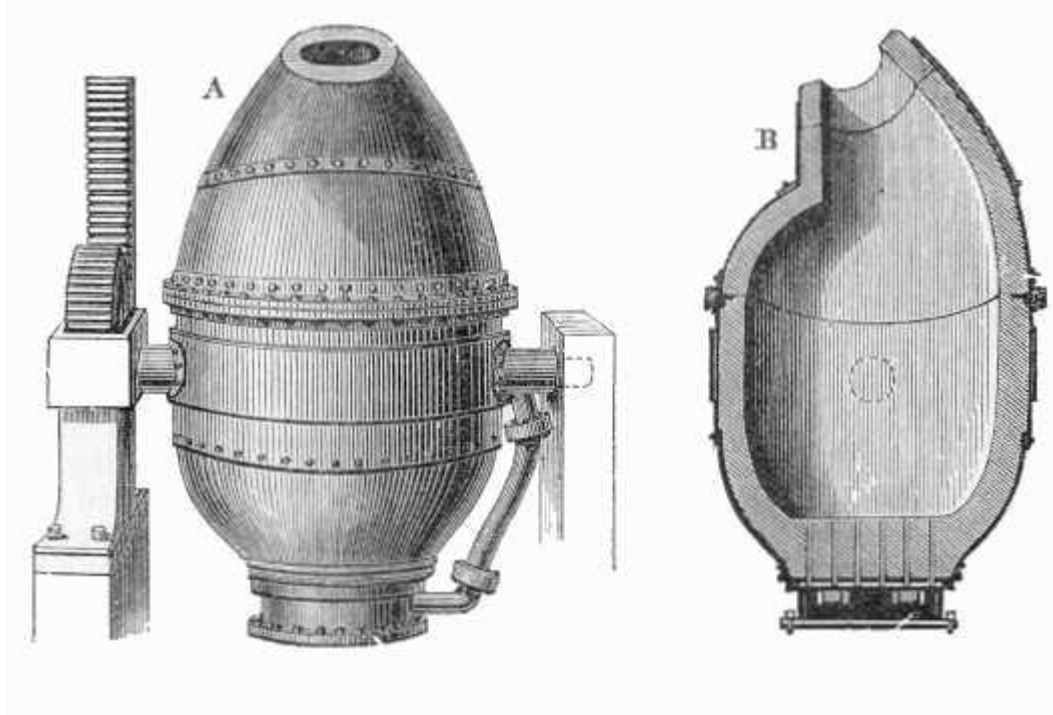
- O outro, grupo incomparavelmente mais numeroso de fornos é constituído pelos fornos em que a energia calorífica é gerada fora do material que está sendo processado e o último obtém o calor devido à transferência de calor. Este grupo inclui diversos fornos de fusão e aquecimento em tratamentos térmicos.

Acredita-se assim que os processos de transferência de calor são decisivos nos fornos modernos.





## 12.3 - Classificação dos fornos pelo método de operação



Conversor Bessemer

## 12.3 -Classificação dos fornos pelo método de operação

As condições a serem criadas em uma fornalha devem ser tais que o fluxo de calor à superfície do material esteja no seu máximo e que este seja absorvido completamente. Isto pode ser assegurado pelas seguintes medidas:

- (1) A diferença da temperatura entre o meio de aquecimento e a superfície aquecida deve ser tão elevada quanto possível em tais condições;
- (2) Ao forno deve ser fornecido calor intensamente e a utilização deve ser a máxima possível dentro do espaço da fornalha;





## 12.3 -Classificação dos fornos pelo método de operação

- (3) A circulação dos gases no espaço da fornalha, deve ser forçada sob a acção de jactos de ar e de combustível dos queimadores;
- (4) O combustível deve ser queimado completamente e a combustão deve ocorrer dentro do espaço da fornalha sempre que possível;
- (5) O projecto da fornalha e as condições de pressão no seu interior devem garantir ou minimizar o contacto da atmosfera da fornalha com o arredor.

Os fornos devem ser projectados para assegurar as condições enumeradas acima e para fornecerem as melhores condições possíveis de transferência de calor.



## 12.3 -Classificação dos fornos pelo método de operação

Os fornos modernos devem utilizar no máximo possível as vantagens oferecidas pela mecanização e pelo controle automático e produzir produtos de elevada qualidade e a baixo custo. Os métodos de geração de calor, que precedem os processos de transferência de calor e determinam uma grande parte do projecto e a operação dos fornos, devem ser seleccionados e optimizados tendo em conta os aspectos de engenharia e os pontos de vista tecnológicos.



## 12.3.1-Classificação e características gerais do modo de operação dos fornos

A classificação das modalidades de operação dos fornos em função das condições de transferência de calor, que foi proposta por M. A. Glinkov, fez possível combinar fornos de finalidade tecnológica diferente em grupos, de acordo com o seu modo de operação e estabelecer para cada grupo as melhores condições mecânicas e de combustão do combustível. Na maioria dos fornos, há dois estágios principais de transferência de calor de um emissor de calor (chama, electricidade, etc..) à superfície do material e dessa superfície ao interior do material.





## 12.3.1-Classificação e características gerais do modo de operação dos fornos

O primeiro estágio é chamado de problema externo e o último, problema interno.

No problema externo, a transferência de calor ocorre principalmente devido à radiação e a convecção enquanto no problema interno, a transferência de calor ocorre predominantemente pela condução, apesar de em líquidos aquecidos, a transferência de calor convectiva também possa ser possível.

## 12.3.1.1 -Modo radiante

A modalidade da radiação é caracterizada pelo papel prevaiente da radiação térmica. Se a temperatura e a emissividade de uma chama ou do volume de um gás incandescente forem as mesmas ao longo da profundidade (por exemplo, ao longo do eixo  $y$ ), pode-se dizer, para fornos, que a transferência de calor ao metal e a abobada da fornalha é uniforme. Com um campo não uniforme de temperatura e uma emissividade variável através da profundidade do volume da chama ou do gás, a transferência de calor nos vários sentidos não será uniforme.



## 12.3.1.1 -Modo radiante

Assim, as modalidades possíveis podem ser determinadas no caso geral como segue:

- Transferência de calor radiante uniformemente distribuída onde  $Q_f^m$  e  $Q_f^l$  são respectivamente fluxos de calor da chama ao metal e ao revestimento;
- Transferência de calor radiante directamente orientada;
- Transferência de calor radiante indirectamente orientada.

$$Q_f^m = Q_f^l$$

$$Q_f^m > Q_f^l$$

$$Q_f^m < Q_f^l$$



## 12.3.1.1 -Modo radiante

Em todos estes casos de transferência de calor radiante, o papel do revestimento que funciona como uma ligação intermediária de transferência de calor das chamas será diferente. Com a transferência de calor uniformemente distribuída, a emissividade da chama  $\epsilon_f$  é o factor mais decisivo. Para valores baixos de  $\epsilon_f$ , o fluxo de calor que alcança o metal e que nele se introduz é relativamente pequeno.

Uma tentativa de aumentar o fluxo de calor para o metal com uma distribuição uniforme da temperatura, em resultado da chama, consiste no aumento da emissividade da chama  $\epsilon_{f'}$ , aumento que influi na absorvidade do revestimento do forno em uns valores mais elevados de  $\epsilon_{f'}$ , e conseqüentemente, o metal receberá menos calor do revestimento.



## 12.3.1.1 -Modo radiante

No caso considerado, um aumento da emissividade  $\epsilon_f$  da chama a  $T = \text{constante}$ , intensifica sempre a transferência de calor. Nos casos práticos, a taxa de  $\epsilon_f$  pode ser aumentada de duas maneiras: aumentando a espessura da camada dos gases ou pela melhoria da carburação natural ou artificial, das chamas.

O caso anterior só pode ser conseguido aumentando a altura do espaço da fornalha, que em muitos casos é impossível. A modalidade de transferência de calor radiante uniformemente distribuída pode ser empregue mais eficazmente nos fornos de aquecimento de artigos de grande massa em que a taxa de aquecimento é determinada pelas condições de transferência de calor internas, de modo que a intensidade relativamente baixa de transferência de calor externa não seja essencial.



## 12.3.1.1 -Modo radiante

Na prática metalúrgica, esta modalidade de transferência de calor radiante é empregue em alguns tipos de fornos como fornos por bateladas, fornos contínuos, etc..O combustível é seleccionado geralmente pela necessidade de se assegurar um brilho elevado da chama, o mais frequentemente usado é o gasóleo, gás natural ou uma mistura de coke do forno e dos gases do alto forno.

A transferência de calor radiante, directamente orientada é assegurada pela criação de um gradiente de temperatura entre a chama e a superfície mais próxima do metal. Com uma distribuição não uniforme da temperatura através da chama, o fluxo de calor mais elevado é emitido pela camada da chama que tem a temperatura mais alta.



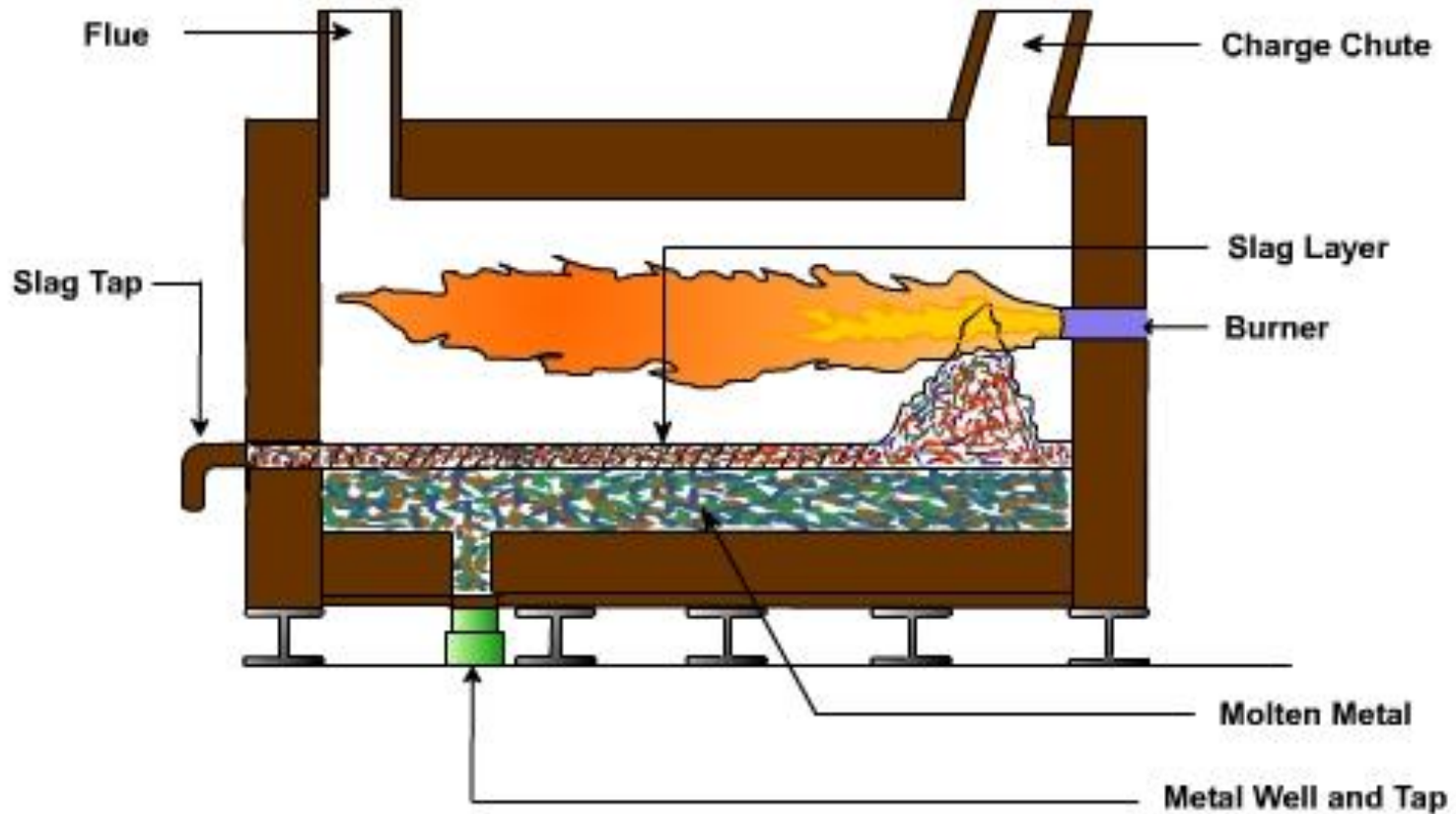
## 12.3.1.1 -Modo radiante

É racional alcançar-se uma distribuição melhor do  $\epsilon_f$  e da temperatura através da chama, com um valor mais elevado de  $\epsilon_f$  nas camadas que têm a temperatura mais alta.

Na prática, a **Transferência De Calor Radiante Directamente Orientada** é empregue em fornos de fusão e para o aquecimento fino de artigos maciços colocados na fornalha quando, propagando para o metal e o revestimento, o fluxo de calor se submete a uma alteração devido à acção absorptiva das outras camadas da chama.



# 12.3.1.1 -Modo radiante

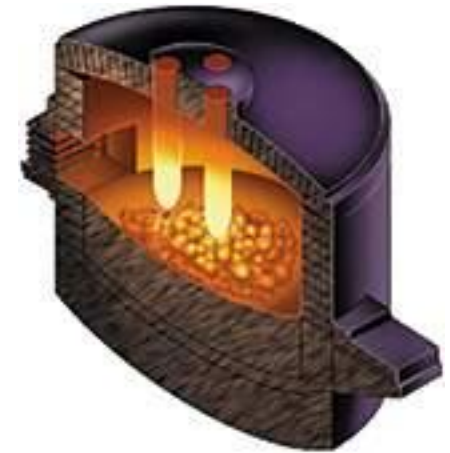




## 12.3.1.1 -Modo radiante

Para assegurar estas condições em fornos chama, uma chama brilhante de alta temperatura é dirigida ao longo da superfície do metal aquecido ou derretido. Em fornos de arco eléctrico, isto é conseguido dando forma a um arco eléctrico perto da superfície do material.

A transferência de calor radiante directamente orientada é ineficaz nos casos em que a superfície aquecida é distribuída uniformemente sobre o espaço inteiro da fornalha.



## 12.3.1.1 - Modo radiante

A Transferência De Calor Radiante Indirectamente Orientada encontra-se nos casos em que o calor da combustão do combustível é transferido ao material aquecido não directamente da chama, mas indirectamente, isto é, através de um intermediário que frequentemente é a abóbada da fornalha ou todo o revestimento. Uma mistura de ar combustível forma gases incandescentes na combustão (por exemplo em queimadores de injeção) e estes gases têm uma alta temperatura e emissividade relativamente baixa em comparação com à radiação selectiva do  $\text{CO}_2$  e de  $\text{H}_2\text{O}$ .



# 12.3.1.1 - Modo radiante



## 12.3.1.1 -Modo radiante

O metal que está a ser aquecido tem um espectro de absorção contínuo. O fluxo de calor que a ele é dirigido deve consequentemente ter um espectro de emissão contínuo, onde possível. Em conexão com isso, é racional intensificar a transferência de calor ao metal dirigindo os gases incandescente à superfície da abóbada da fornalha de modo que a região da temperatura máxima esteja tão perto quanto possível da superfície do revestimento refractário. Isto pode aumentar a temperatura do revestimento e transformar a radiação selectiva dos gases na radiação contínua do revestimento.



## 12.3.1.1 -Modo radiante

O método de aquecimento da abóbada das fornalhas em que a fornalha só opera sob condições de transferência de calor indirectamente orientada está sendo cada vez mais usado. Muitas fornalhas modernas têm uma largura grande (até 12-14 m), e conseqüentemente, uma área muito grande da abóbada. Pode-se facilmente imaginar que um efeito elevado pôde ser obtido em relação à intensidade e à uniformidade do aquecimento se a abóbada da fornalha poder ser feita como uma superfície intensamente radiante.



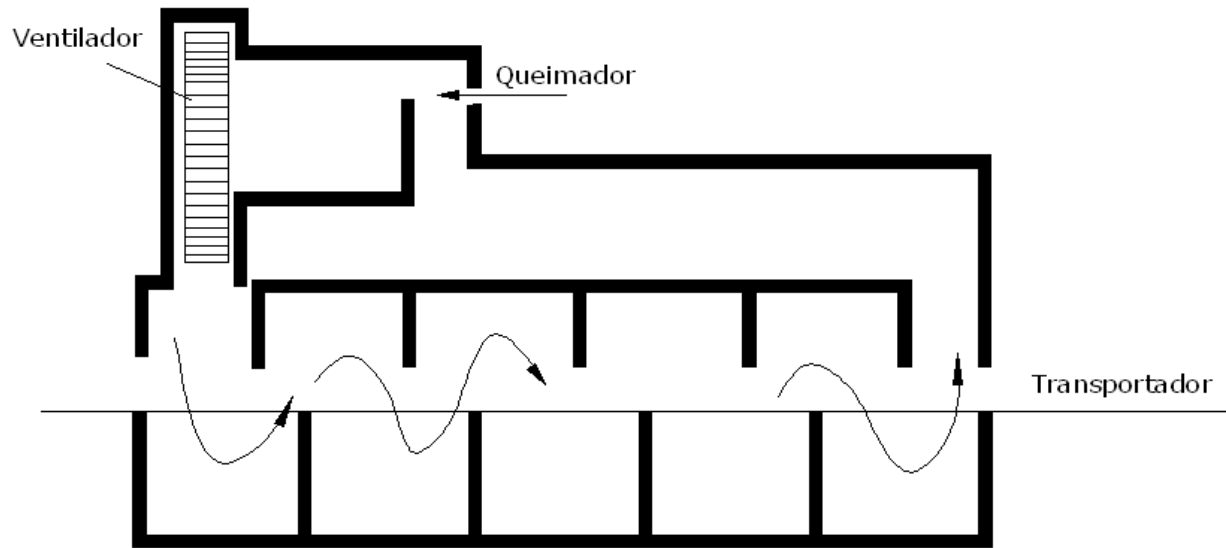
## 12.3.1.2 -Modo convectivo

A temperaturas baixas de transferência de calor 550-600 °C a convecção é predominante. Esta modalidade de transferência de calor é típica do tratamento térmico de baixa temperatura e de fornalhas de secagem.

A temperatura do espaço de funcionamento destas fornalhas deve ser mais baixa do que a temperatura da combustão do combustível, por que o combustível é queimado em um volume apropriado separado, isto é fora da câmara. As fornalhas deste tipo, devem proporcionar movimento aos gases a fim aquecer uniformemente o material. A modalidade convectiva é empregue também nos banhos de aquecimento em que um fluído quente é o portador de calor.



# 12.3.1.2 -Modo convectivo



## 12.3.2 - Aquecimento em camada

O material enche geralmente todo o volume de uma fornalha vertical e os gases incandescentes fluem entre suas saliências, ou as partículas do material são suspensas num meio gasoso, portador de calor. A modalidade de operação da fornalha tem a característica típica dos três modos de transferência de calor (radiação, convecção e condução) interligados assim de uma forma próxima que praticamente não podem ser separados um do outro. Há três variantes principais desta modalidade: com camada densa, com leito fluidizado, e com camada suspensa do material processado.



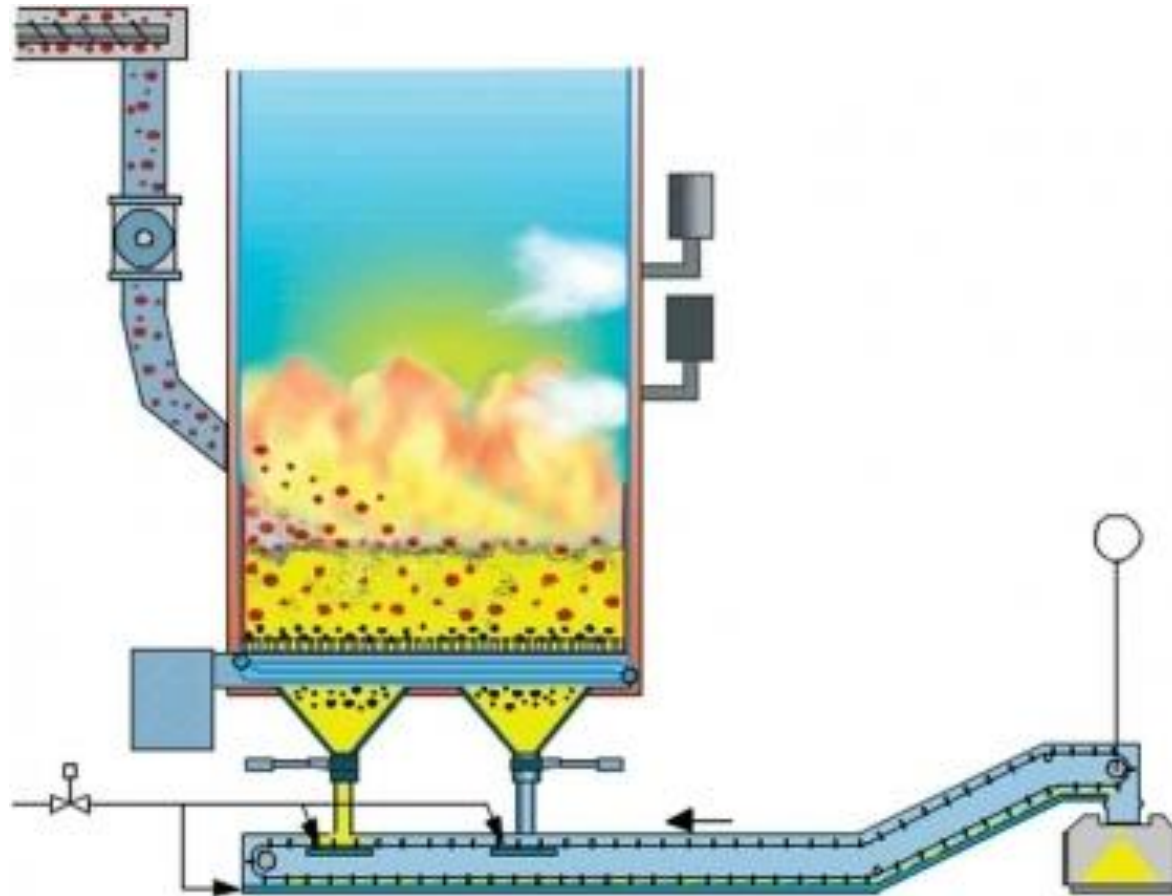


## 12.3.2- Aquecimento em camada

Nas fornalhas com uma camada densa, o material é colocado na camada densa espessa, que enche na totalidade o espaço da fornalha, e move-se gradualmente para baixo. Os gases quentes passam (são filtrados) pela camada enquanto se movem entre as saliências da carga. Esta é a operação mais usada nos fornos de leito fluidizado. É típica dos fornos de eixo que são empregues intensamente na metalurgia ferrosa. Nos fornos de leito fluidizado, o material está num estado latente e é misturado vigorosamente pela acção dinâmica dos gases. Esta modalidade é usada frequentemente nos fornos de calcinação de materiais seleccionados, como também na metalurgia não ferrosa.



# 12.3.2- Aquecimento em camada



## 12.3.2 - Aquecimento em camada

Em fornos da camada suspensa, os materiais são processados num estado pulverizado. As partículas finas do material são separadas umas de outras por camadas de gás e são suspensas no gás em movimento. A concentração das partículas no gás é determinada pelo processo particular que está sendo realizado no forno. Tais fornos são empregues cada vez mais na metalurgia não ferrosa.

