

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 6



Aula 6: Esquemas principais de fornos industriais. Teoria do forno e zonas da câmara do forno.

Tópicos

- *Introdução*
- *Classificação dos Fornos*
- *Fornos Industriais*
- *Incinerador de lixo*
- *Fornos de queima indirecta*
- *Fornos Eléctricos*
- *Forno tipo Mufla*
- *Forno de imersão*
- *Forno de tubo radiante*



6.1 Introdução

A combustão e os fornos são o coração da nossa sociedade. As fornalhas e os fornos são usados para produzir praticamente tudo o que usamos incluindo muitos dos nossos alimentos e bebidas, seja directamente, como os produtos de metal utilizados na vida cotidiana e as embalagens para a comida e bebida, ou indirectamente, como os utensílios que são usados para cultivar os alimentos. Mesmo um produto natural, como a madeira, requer secagem para torná-lo adequado à maioria das utilizações, e a secagem ocorre em fornos.



6.1 Introdução (Cont...)

Desde os primórdios da humanidade que a comida foi cozinhada em fogueiras a céu aberto e os paus carbonizados com vista ao seu endurecimento. No entanto, com as fogueiras tinha-se pouco controle do processo de aquecimento, e o nascimento da Idade do Bronze, cerca de 5000 - 6000 anos atrás, teria exigido a construção de um projecto de forno, com o fim de atingir a temperatura necessária para fundir o minério de ferro e produzir metal líquido para a fundição. A produção de metal permaneceu de pequena escala, durante séculos, devido à escassez de combustível adequado (carvão vegetal) e o elevado custo da sua produção.



6.1 Introdução (Cont...)

O calor é libertado pela combustão do combustível com o ar (ou oxigénio), ou a partir da energia eléctrica, e algum deste calor é transferido para o produto. O calor remanescente sai no gás de combustão e através de aberturas tais como portas de carregamento, ou se perde a partir da superfície externa. A eficiência do forno pode ser determinada como:

$$\eta_f = \frac{Q_p}{Q_c} \quad (6.1)$$

Onde:

η_f - Rendimento da fornalha

Q_p - Calor transferido para o produto

Q_c - Calor é libertado pela combustão do combustível com o ar

O calor incorporado no produto muitas vezes é bastante pequeno se comparado com o calor total fornecido, a quantidade de calor que é perdido nos gases de combustão e subprodutos ou resíduos de materiais como escória. Embora a Equação 6.1, seja uma expressão geral para a eficiência e igualmente aplicável às caldeiras, etc, ela tem muitas limitações no que diz respeito à determinação da eficácia de uma fornalha.



6.2 Classificação dos Fornos

Há um número quase infinito de modos de classificar fornos, por exemplo, por forma, indústria, produto produzido, etc, mas uma classificação muito simples com base nos conceitos do tipo de fonte de calor e do tipo de transferência de calor e do dissipador de calor. Este sistema de classificação é muito simplificado, mas é útil porque a natureza do produto, o tipo de combustível, e o mecanismo de transferência de calor têm uma grande influência sobre a disposição física da fornalha. Deve notar-se que muitos fornos têm vários dissipadores de calor e usam vários combustíveis, seja simultaneamente ou alternativamente, o que afecta também a concepção da fornalha.



6.3 Fornos Industriais

- O desempenho de um forno é governado por três processos relacionados entre si, que são a:
 - Combustão;
 - Aerodinâmica do forno; e
 - Transferência de calor.



6.4 Tipo de fornos industriais

Um forno industrial é um dispositivo cujo propósito é aquecer material, muitas vezes conhecido por carga, até uma temperatura determinada.

Diferentes materiais e processos requerem condições de operação diferentes. Muitos processos de aquecimento ocorrem a temperaturas relativamente altas, por isso, geralmente os fornos consistem de uma câmara de combustão refractária que contém a carga.



6.4 Tipo de fornos industriais



O calor é geralmente gerado no interior da câmara de combustão através da combustão de hidrocarbonetos ou por meio de fontes eléctricas.

Em muitos fornos o calor é gerado externamente à carga (ex. através de chama, arco eléctrico ou resistência eléctrica) e transferido para a carga por radiação e convecção.

Em alguns casos, pouco comuns, o calor necessário pode ser gerado no interior da carga e transferido internamente por condução e convecção (ex.: forno eléctrico de indução).

6.4 Tipo de fornos industriais

Material	Processo	Temperaturas típicas de operação[°C]
Barra de aço	Aquecimento para trabalhos a quente	1200 - 1300
Chapas de aço	Recozimento com brilho	680 - 730
Aço	Têmpera	450 – 700
Alumínio	Fusão	750 – 850
Ligas de alumínio	Forja Tratamento a quente	400 – 500 150 – 550
Cimento	Cozimento de Klinker	1530 - 1650
Cobre	Fusão	750 - 1350
Vidro	Fusão	1450 - 1590
Cerâmica: louça sanitária	Cozimento	1200 - 1300



6.4.1 Forno de Chama Aberta

Nos fornos de chama aberta é usado combustível líquido ou gasoso. Nestes fornos o material a ser aquecido ocupa parte da soleira (soalho) do forno e o sistema é aquecido por grandes queimadores montados na parede de fundo. As paredes refractárias e a abóbada reduzem as perdas de calor da chama e dos produtos de combustão para o ambiente. A camada refractária forma uma cavidade à prova de gás o que reduz a entrada de ar frio do ambiente para a câmara de combustão.



6.4.1 Forno de Chama Aberta

A entrada excessiva de ar frio na câmara de combustão devido às infiltrações arrefece a chama e aumenta as perdas com os gases de escape, com a consequente deterioração do desempenho térmico do forno. Por outro lado a câmara de combustão refractária mantém os produtos de combustão dentro da câmara de combustão durante o tempo necessário de modo a que se evite a perda excessiva dos gases quentes para o ambiente.

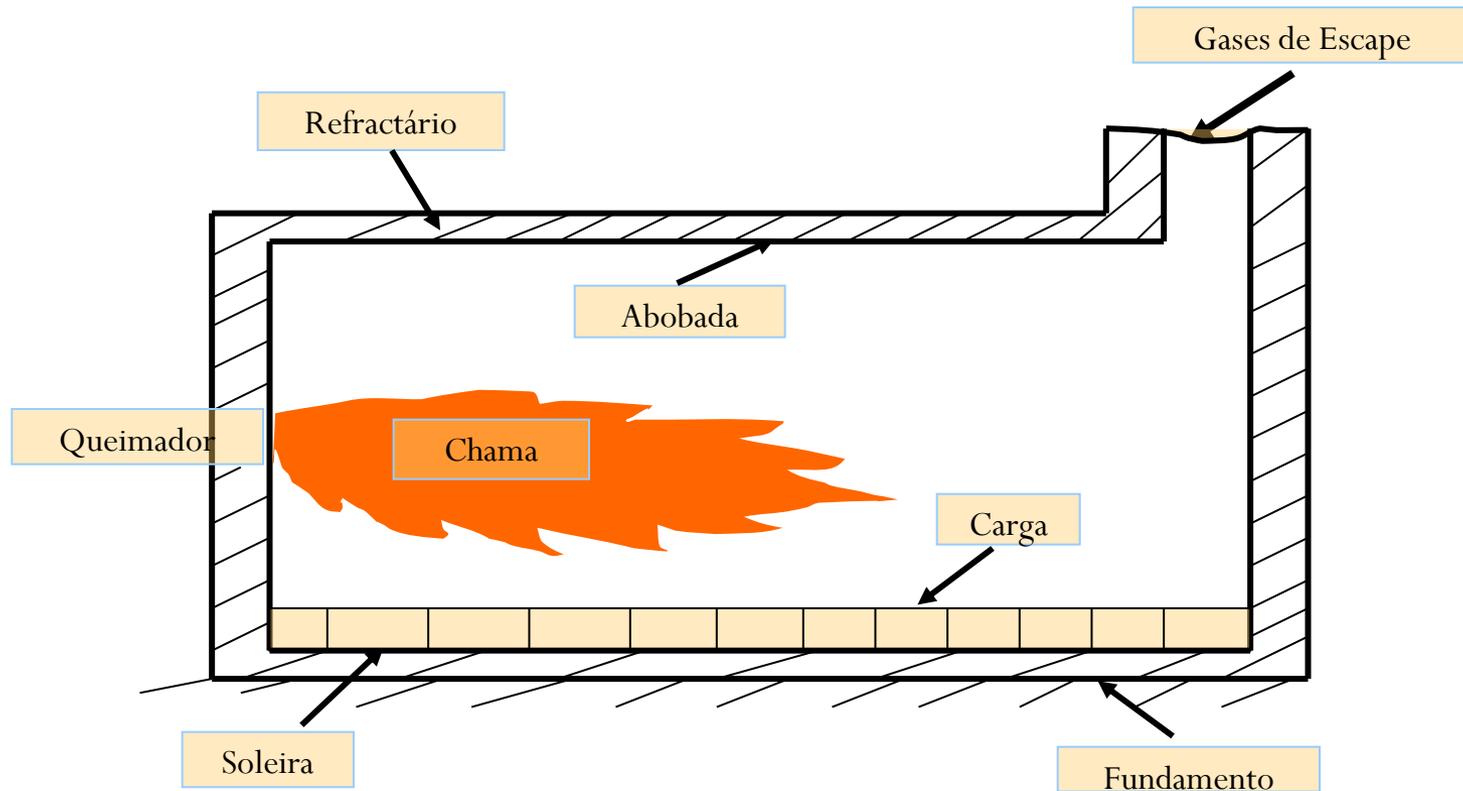


6.4.1 Forno de Chama Aberta



- Os detalhes dos esquemas ou desenhos de fornos variam consideravelmente, embora na prática os fornos possam ser classificados em vários grupos. Neste caso a classificação será baseada em:
 - o método de queima, isto é queima directa ou indirecta;
 - o modo de funcionamento do forno (funcionamento contínuo ou intermitente)
- Outras características, tais como os detalhes sobre o método de manuseamento da carga dentro do forno, podem ser usadas para subdividir os fornos em classes.

6.4.1 Forno de Chama Aberta



Esquema de um forno

6.4.2. Fornos de queima directa

A maioria dos fornos industriais encontra-se dentro desta categoria. Tal como o nome sugere o combustível é queimado directamente dentro da câmara de combustão e a carga é exposta à chama e aos produtos de combustão. Estes fornos não são aconselháveis nos casos em que é preciso usar atmosfera de protecção.



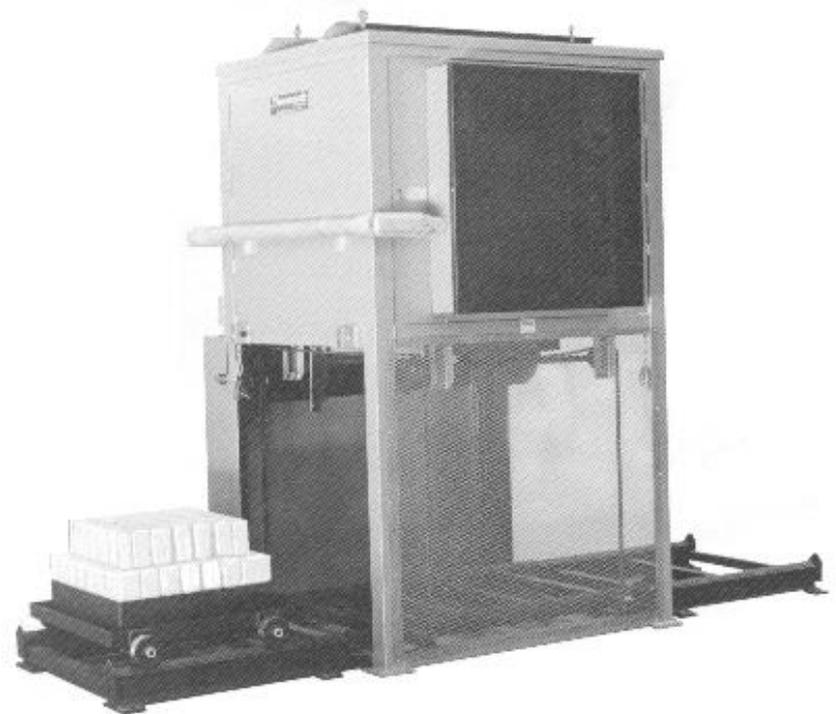
Exemplo de forno de queima directa



6.4.3. Fornos contínuos de queima directa

Nos fornos contínuos a carga move-se ao longo do forno durante o seu aquecimento. Um método conveniente de subdividir estes sistemas é o usar os meio de transporte da carga como segue:

Forno com cadinho móvel



6.4.3. Fornos contínuos de queima directa



6.4.3. Fornos contínuos de queima directa





6.4.4. Fornos Estacionários

A carga geralmente fica assente sobre uma série de vigas estacionárias ou fornalhas e um conjunto alternativo de vigas móveis eleva a carga, move-a para frente ao longo do forno e depois deposita-a na viga estacionária. As vigas móveis retornam então às suas posições originais. Deve-se deixar espaço entre os componentes da carga de modo a que taxas altas de aquecimento possam ser atingidas mais rápido. O forno poder ser rapidamente esvaziado durante longas paragens.

6.4.5. Fornos de Chama Indirecta



É utilizado em aplicações onde o material não pode ter contacto com os gases de combustão e quando o material seca ou calcina a uma baixa temperatura. Conhecido também como forno de duplo cilindro.



6.4.6. Fornos de Chama Directa

Estes equipamentos estão divididos em:

De chama directa **de fluxo paralelo**

(utilizado onde o material tem sensibilidade à alta temperatura, elevada humidade de entrada e material com muitas partículas finas); e De chama directa **de fluxo contra corrente**

(utilizado onde o material não é sensível a alta temperatura, humidade de saída do material baixa e alta temperatura do material na saída).





6.4.7. Fornos de Impulso

Este método de manuseamento de carga é largamente usado devido a sua simplicidade. A carga forma uma camada continua de material que é depositada numa fornalha refractaria ou sobre uma serie de calços. A camada é movida gradualmente ao longo do forno por meio de um cabeçote até à carga final do forno. O comprimento do forno é limitado pela necessidade de evitar a sobreposição (empilhamento) e é em geral difícil empurrar material que tem uma espessura inferior a 35 mm.



6.4.7. Fornos de Impulso

- Os problemas de empilhamento e da força para empurrar o material podem ser minimizados através da inclinação da fornalha ou com calços por baixo a partir da extremidade de carregamento.
- Estes fornos são particularmente aconselháveis para processar formas largas e regulares ex. Barras de aço ou lingotes antes da sua forja ou enrolamento.

6.4.7. Fornos de Impulso





6.4.8. Fornos transportadores

Uma distorção excessiva do sistema do transportador pode surgir devido a elevadas cargas e temperatura, por isso, estes fornos são geralmente usados para o processamento de componentes leves a baixas temperaturas. Assim, por exemplo, ligas de aço e correias de malha estão limitados a operar a temperaturas abaixo de 800°C e são frequentemente usados em fornos de vidro e fornos para tratamento a quente de pequenas componentes metálicas.

Os transportadores de cadeia devem ser mantidos frios se funcionam totalmente fora do forno ou alternativamente devem funcionar em encaixes da fornalha.



6.4.8. Fornos transportadores

A construção destes fornos varia consideravelmente e inclui transportadores de cadeia, ou correias de arame. As perdas de energia são reduzidas se o transportador permanece dentro dos limites interiores do forno tanto no movimento de trabalho como no movimento de retorno do ciclo da transportadora. No entanto se o transportador retorna fora dos limites do forno, ele sujeita-se a tensões térmicas cíclicas, devido aos aquecimentos e arrefecimentos repetidos.

6.4.8. Fornos transportadores



Forno transportador por correia de arame



6.4.9. Fornos de fornalha em roletes

Nestes fornos a carga é transportada através de uma série roletes bem separados. Os fornos deste tipo podem funcionar a altas temperaturas se forem refrigerados a ar ou água com emprego de roletes metálicos ou roletes de tubo refractário. Deve-se notar no entanto que o uso de roletes refrigerados pode aumentar significativamente o consumo de combustível.



6.4.10.Fornos de fornalha rotativa

Nestes fornos, o material a ser aquecido é introduzido numa fornalha anelar em movimento. Toda a fornalha refractária gira e a carga é removida através da porta de descarga geralmente adjacente à porta de carregamento. A construção é compacta e tem sido empregue para operar a temperaturas até 1300 °C. A carga não se move relativamente à fornalha, sendo portanto particularmente adequado a todos os contentores e formas irregulares que não podem ser empurrados facilmente ao longo do forno.

Nas fornalhas anelares que se encontram nas indústrias de argila, a carga e a fornalha permanecem estacionários as paredes do forno e a abobada (assim como o sistema de queima) têm movimento rotativo.



6.4.10.Fornos de fornalha rotativa



Fornos de fornalha rotativa

6.4.11. Fornos de fornalha oscilante

Nestes fornos a fornalha de metal oscila para frente e para trás. Na construção mais comum a carga desliza para frente quando a fornalha encontra-se parada no fim do seu movimento para frente. Esta construção não é adequada para componentes que podem rolar e é limitada ao processamento a relativamente baixa temperatura de artigos planos tais como anilhas.



6.4.12. Fornos de tambor

Os fornos mais comuns deste tipo são as fornalhas rotativas usadas na produção de cimento. A rotação do tambor inclinado provoca o movimento da carga no sentido do topo para baixo da fornalha.

Pequenas instalações similares são usadas no tratamento a quente de componentes metálicos.

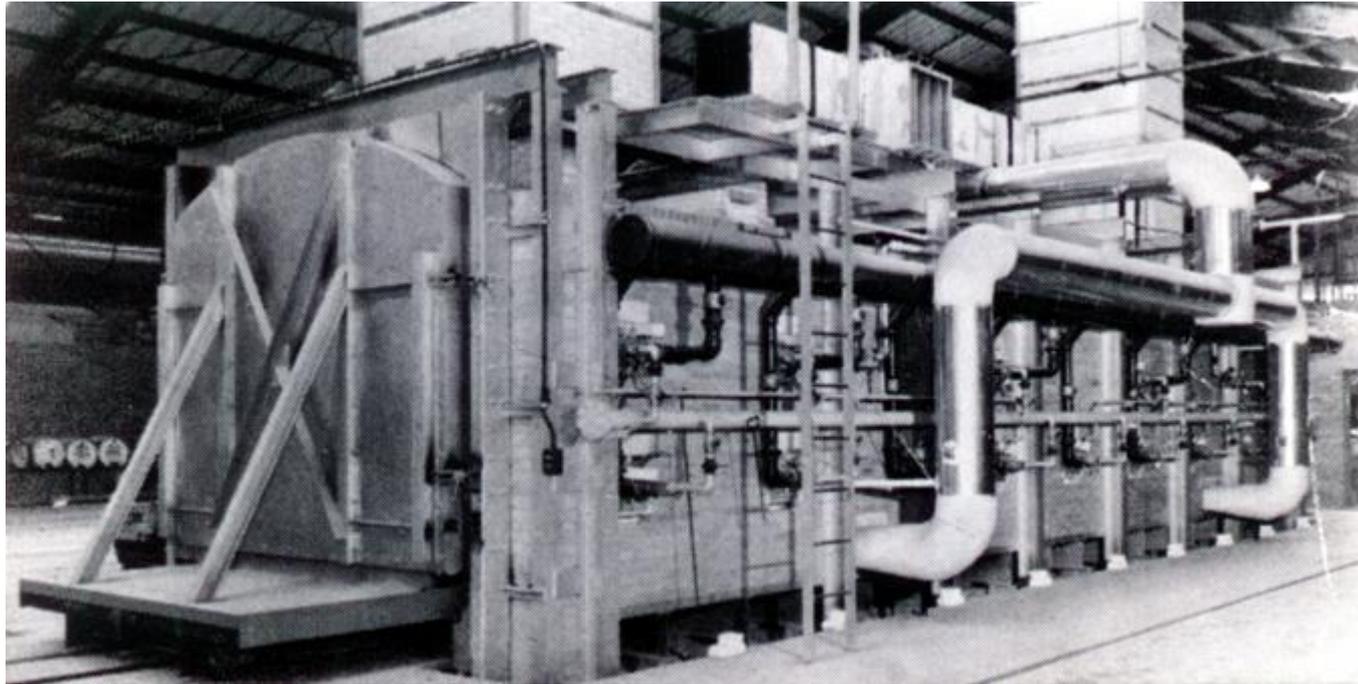


6.4.13. Fornos contínuos – vagão

Estes sistemas são comuns em fornos antigos da indústria cerâmica e a carga é transportada num comboio contínuo de vagões pesados de rodas com cobertura refractaria. O consumo de combustível é adversamente afectado pela subsequente perda do calor armazenado nos vagões e na descarga. Existem sistemas mais modernos onde a carga a transportar é feita em vagões de dimensões menores que os antigos o que acarreta menos perdas de calor.



6.4.13. Fornos contínuos – vagão





6.4.14. Fornos de queima directa por bateladas

Nos fornos por bateladas a carga permanece na mesma posição durante o ciclo de operação. Em algumas instalações, ex., nos fornos de forja a carga é aquecida até altas temperaturas e depois arrefecida para subsequente processamento. Nos outros casos tais como fornos para tratamento a quente o material é levado através de um ciclo de aquecimento e arrefecimento antes de ser removido do sistema do forno.

Estes fornos em bateladas funcionam de um modo intermitente (fornos contínuos podem também funcionar intermitentemente ex., fornos usado em operações de turno único).



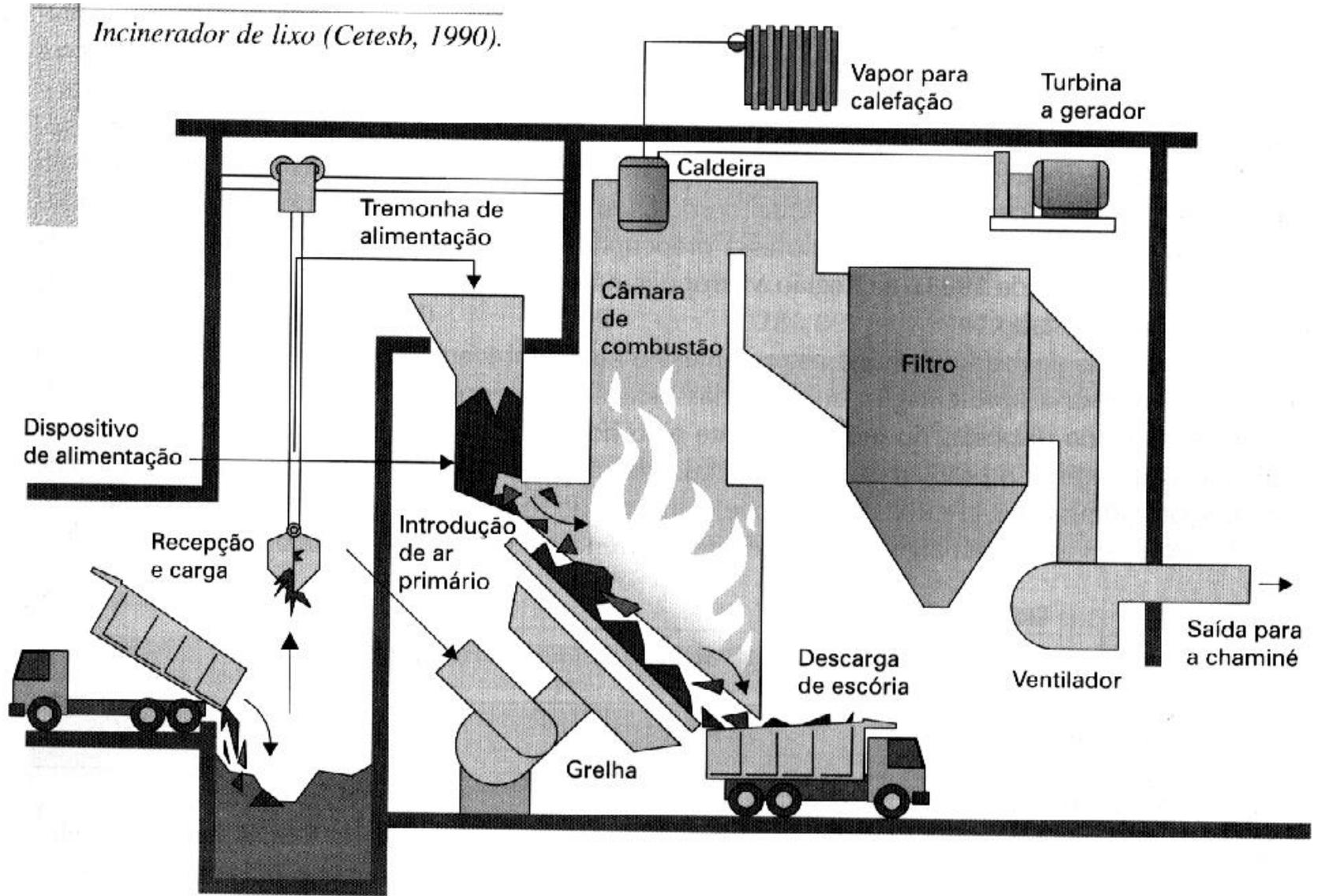
6.4.14. Fornos de queima directa por bateladas



Fornos de queima directa por bateladas

6.5. Incinerador de lixo

Incinerador de lixo (Cetesb, 1990).



6.6. Fornos de queima indirecta

- Os fornos de aquecimento indirecto podem ser operados de modo contínuo ou intermitente. Estes fornos podem ser convenientemente subdivididos pelo método usado para prevenir o contacto entre produto de combustão e a carga.
- Uma alternativa a queima-indirecta é o uso de técnicas de aquecimento eléctricas.

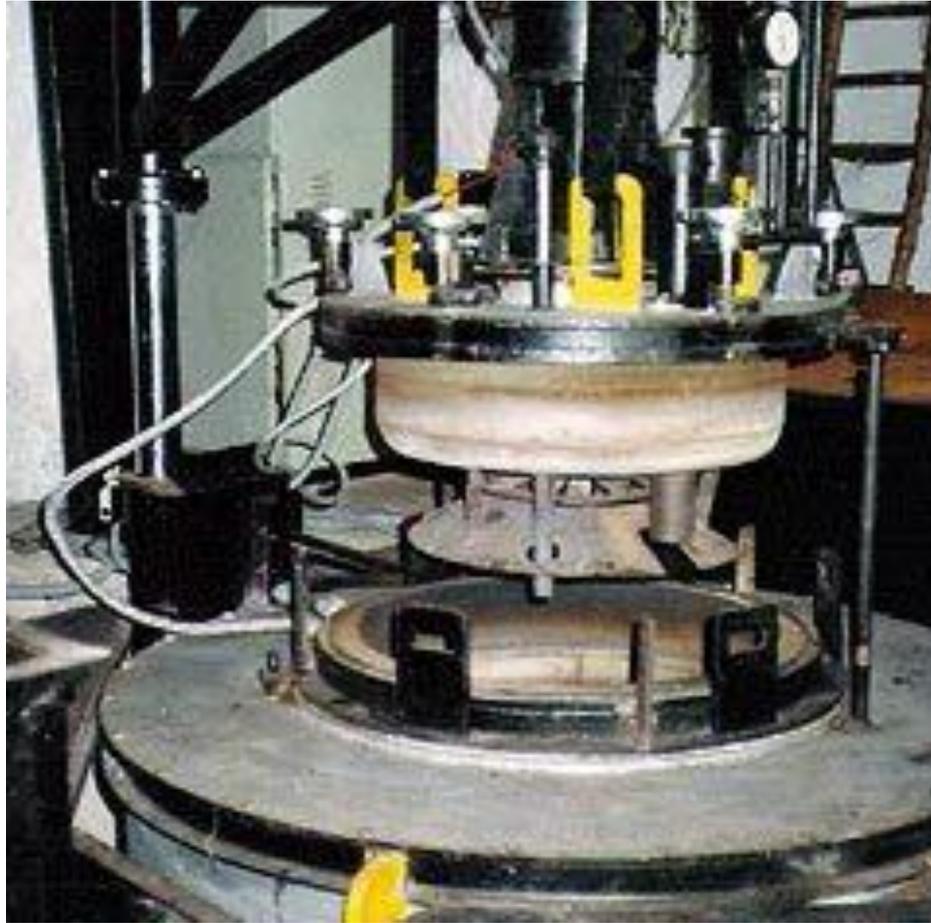


6.6. Fornos de queima indirecta

Em alguns fornos é necessário prevenir o contacto entre os produtos de combustão e a carga que está sendo aquecida. Assim em instalações “bright annealing” isto é necessário para evitar a oxidação da superfície do metal. Estes sistemas são conhecidos como forno de queima indirecta e a atmosfera do forno é controlada tanto para proteger a carga ou para promover uma reacção química na superfície do material que está sendo aquecido.



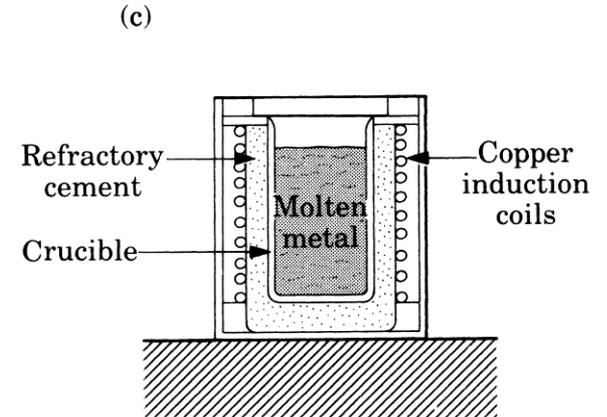
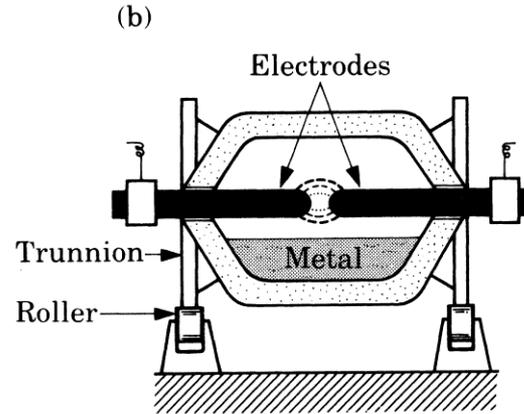
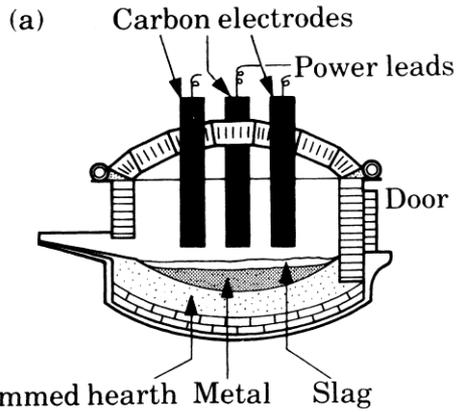
6.6. Fornos de queima indirecta



Fornos de queima indirecta



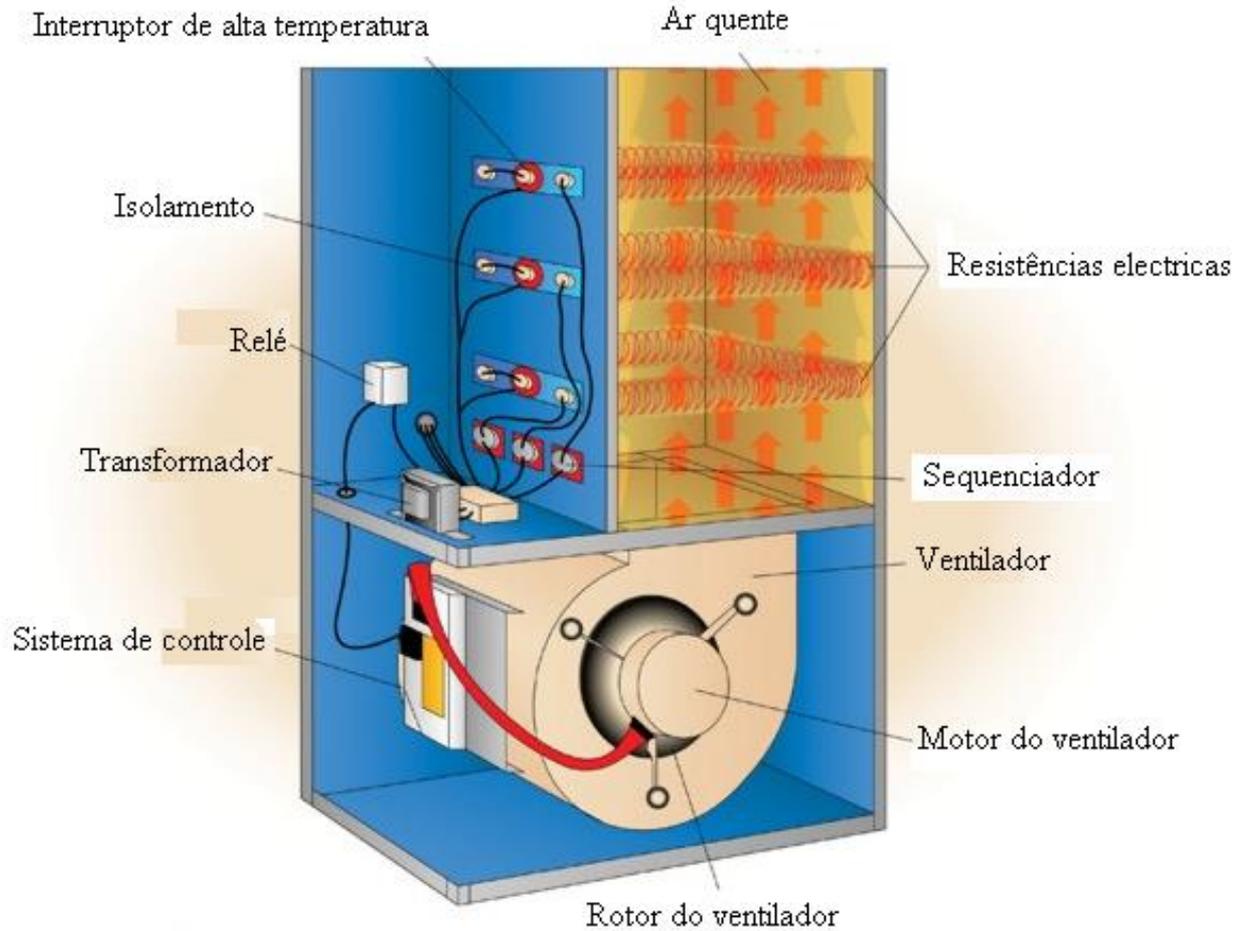
6.7. Fornos Eléctricos



fornos eléctricos: (a) arco directo, (b) arco indirecto, e (c) indução



6.7. Fornos Eléctricos



6.8. Forno tipo Mufla

- A carga é colocada dentro numa mufla metálica ou refractária cujo exterior é submetido á queima directa. O fluxo de calor para a atmosfera protectora e depois para a carga depende de espessura e condutividade térmica da muflas. Outra consideração de igual importância é o tempo de vida do material da mufla e o custo da sua substituição.
- Os fornos para fusão de metais são normalmente categorizados como casos especiais dos fornos de muflas. Os lados do forno protegem o metal fundido enquanto os produtos de combustão contactam com a superfície superior deste metal.



6.8. Forno tipo Mufla



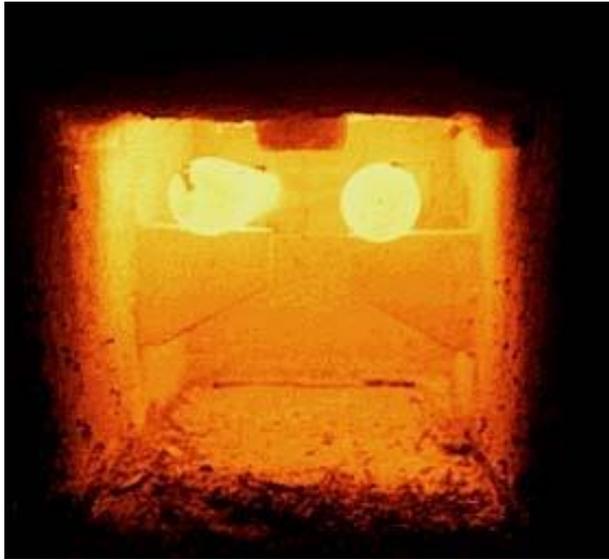
6.9. Forno de tubo radiante

- Grande flexibilidade de operação pode ser atingida se os produtos de combustão forem muflados por tubos radiantes. Tubos metálicos podem ser usados para processos a temperatura até 950°C e construção em cerâmica tem sido usada com sucesso para temperaturas até 1250°C.
- Estes fornos podem funcionar tanto continuamente como em bateladas. O método de manuseamento da carga, é contudo limitado pela necessidade de atmosfera protectora do forno.





6.9. Forno de tubo radiante



6.10. Forno de imersão

A categoria final de fornos de queima directa é aquela em que a carga é aquecida através da sua imersão num banho de sal ou metal, liquefeitos. O banho está contido num pote e não entra em contacto com os produtos de combustão. A imersão da carga em material liquefeito produz uma boa uniformização da temperatura e altas taxas de aquecimento. O forno pode ser usado numa base contínua ou em sistema de bateladas. Estes fornos estão também disponíveis numa vasta gama de temperaturas dependendo do sal liquefeito ou do metal que for usado.





6.10. Forno de imersão



6.10. Forno de imersão

São conhecidos dois tipos de fornos de imersão, um onde se deposita no seu interior um cadinho ou pote e a carga encontra-se dentro deste e outro que se chama forno de poço onde a carga encontra-se envolto em sais derretidos.

