

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 6



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



Objectivos da aula



Compreender o **conceito e a função** dos fornos industriais e a sua importância nos processos de transformação física e química.



Identificar e **classificar os fornos** segundo a fonte de calor, o mecanismo de transferência de calor e a natureza da carga e do modo de operação.



Distinguir os principais **métodos de transferência de calor** (radiação, convecção e condução) e compreender como o calor chega à carga.



Entender o **balanço térmico dos fornos** e o conceito de rendimento térmico, bem como os factores que influenciam a eficiência.



Reconhecer a **importância do controlo da atmosfera** em fornos de queima indireta para proteger a carga ou promover reacções químicas.



Diferenciar os **métodos de aquecimento indireto**, incluindo os sistemas com trocadores de calor e as técnicas de aquecimento elétrico.

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

Um forno converte energia química ou eléctrica em calor útil e permite:

- Atingir e manter a temperatura requerida pelo processo.
- Transferir calor de forma controlada para a carga.
- Controlar o tempo de aquecimento e a atmosfera interna.

Principais aplicações

Metais

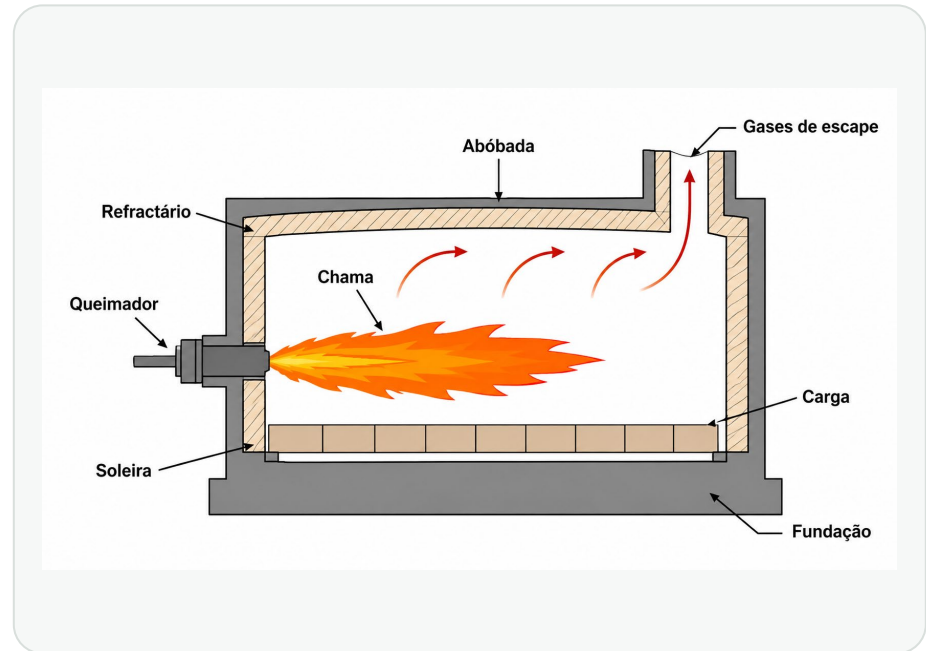
Cerâmica

Vidro

Cimento

Alimentos

Secagem



6.1 Introdução

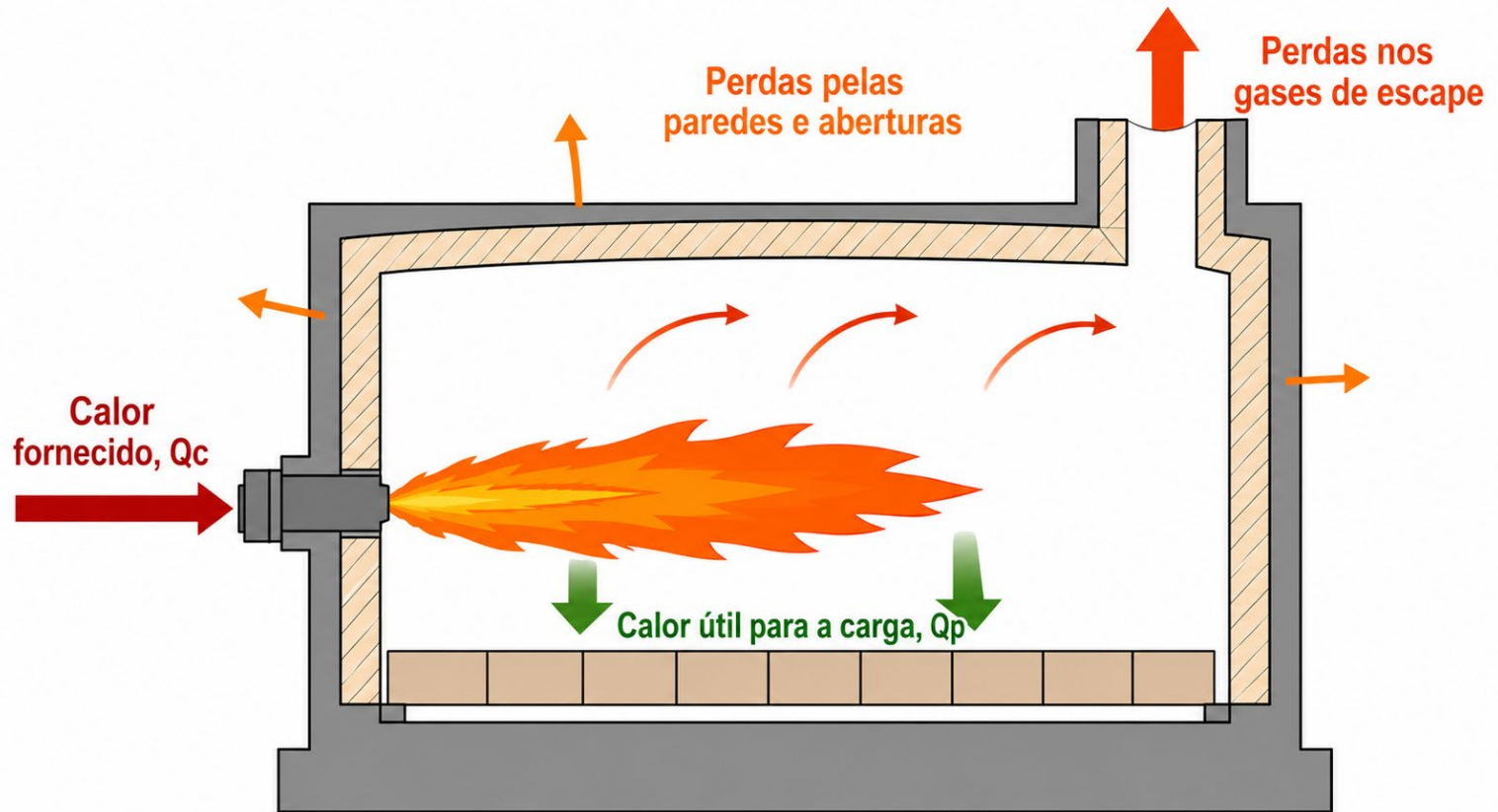
A evolução dos fornos é, sobretudo, a evolução do controlo da temperatura, da atmosfera e do tempo.



Mais controlo térmico → maior qualidade, produtividade e eficiência



6.1 Introdução



$$\text{Balanço térmico: } Q_c = Q_p + Q_{\text{perdas}}$$

6.1 Introdução

Rendimento térmico

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

× 100% quando expresso em percentagem

Significado das grandezas

- η_f — rendimento térmico do forno.
- Q_p — calor útil absorvido pela carga.
- Q_c — calor total fornecido ao forno.

$$Q_c = Q_p + Q_{\text{perdas}}$$

$$\eta_f = 1 - Q_{\text{perdas}} / Q_c$$

Quanto menores forem as perdas, maior será o rendimento do forno



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.



6.2.1 A classificação assenta em três critérios

Um forno pode pertencer simultaneamente a várias categorias.

1

Fonte de calor

- Combustão
Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos
- Electricidade
Resistência, arco eléctrico ou indução

2

Transferência de calor

- Contacto
Aquecimento directo ou indirecto
- Mecanismo dominante
Radiação, convecção ou condução

3

Carga e operação

- Natureza da carga
Sólida, líquida ou gasosa
- Funcionamento
Descontínuo ou contínuo
- Movimentação
Carga fixa ou em movimento

A combinação dos critérios determina a configuração física e operacional do forno



6.2.2 O desempenho depende de três processos

Os três processos devem ser analisados em conjunto.



A alteração de um processo afecta o comportamento dos outros dois

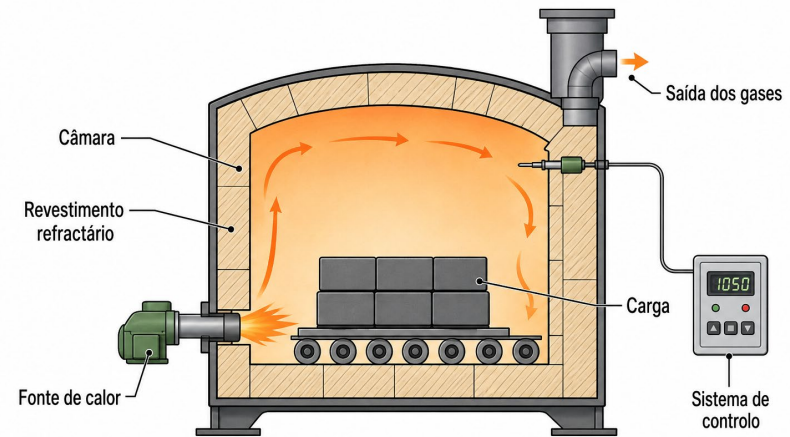


6.2.3 Cada processo exige um tipo de forno

Um forno industrial eleva e controla a temperatura de uma carga para realizar uma transformação física ou química.

A selecção do forno considera:

- Natureza e estado físico da carga
- Temperatura e uniformidade requeridas
- Atmosfera necessária ao processo
- Capacidade e modo de produção
- Fonte de energia disponível

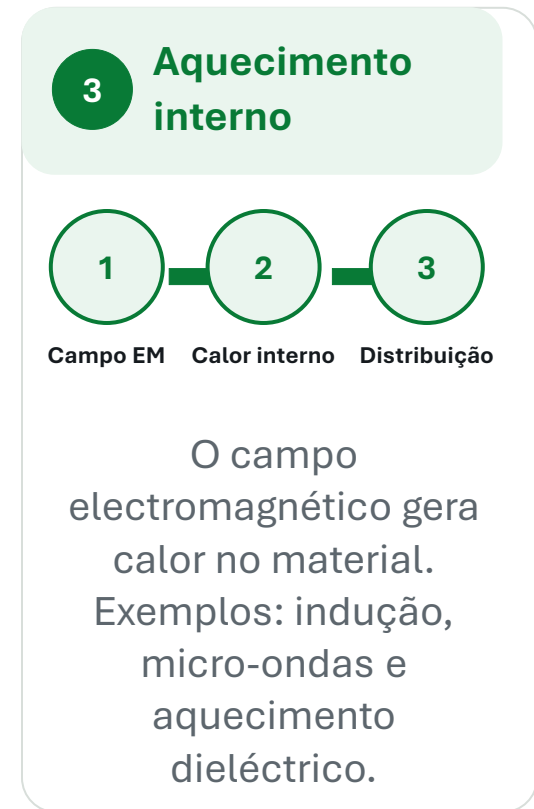
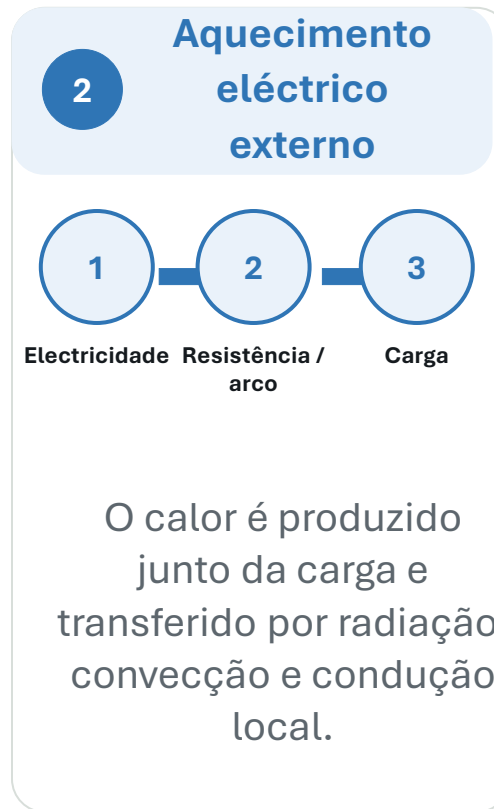
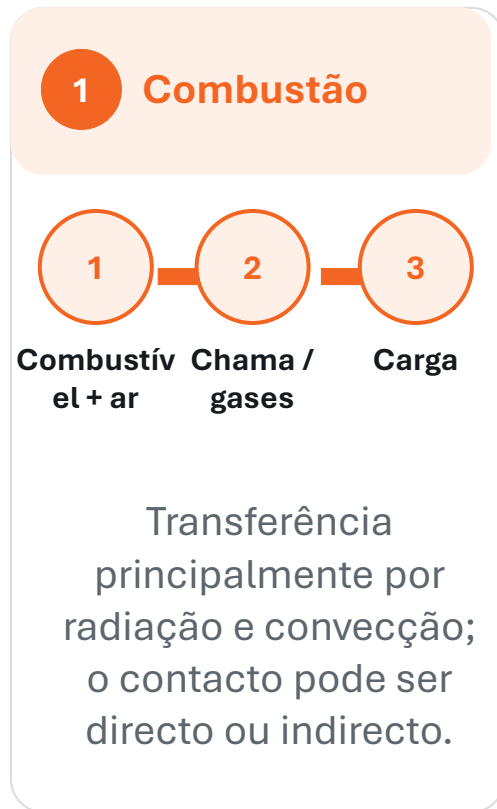


Não existe um forno universal: a configuração deve adaptar-se ao processo



6.3.4 O calor chega à carga de três formas

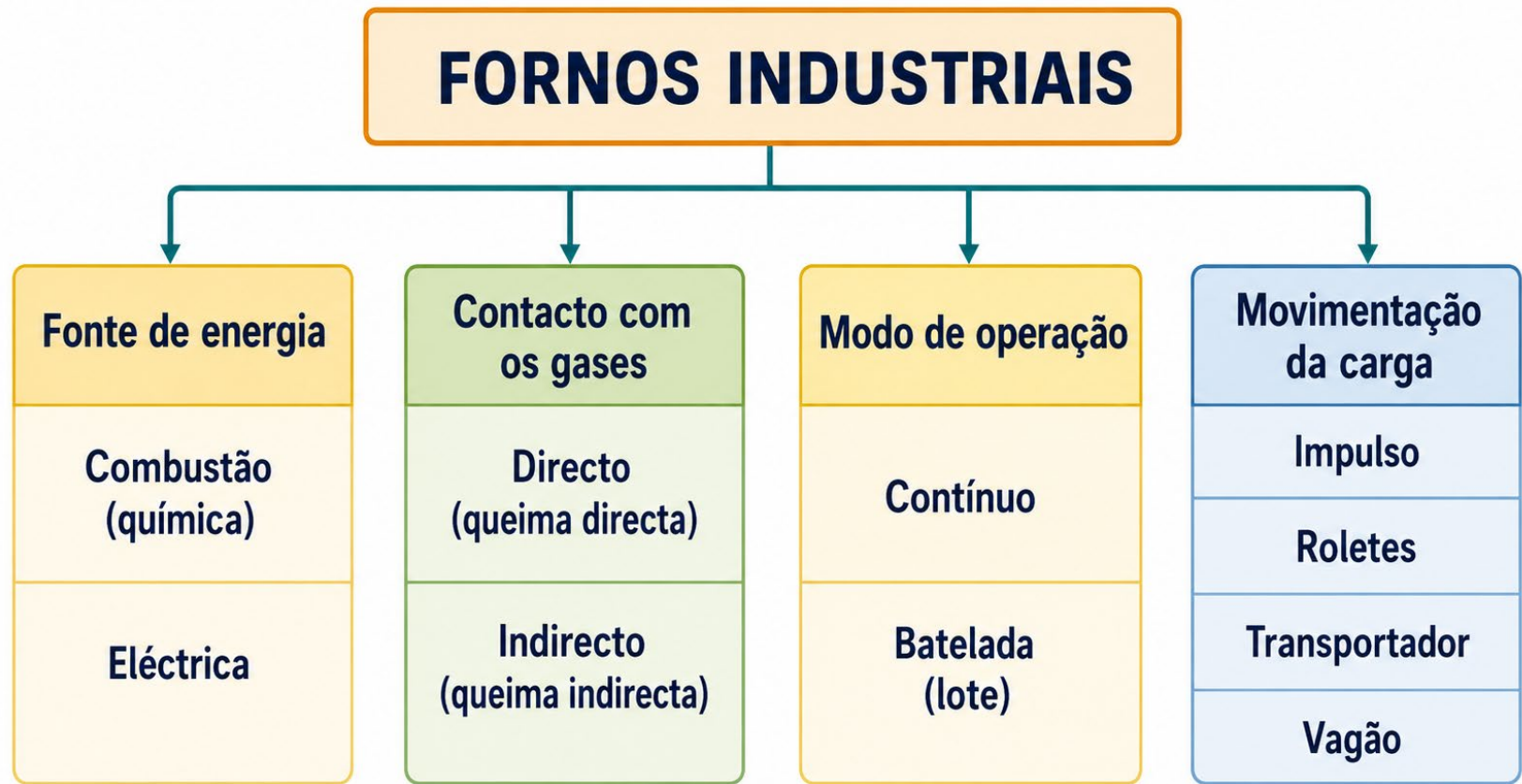
O local onde a energia é convertida determina o percurso do calor.



Radiação, convecção e condução podem actuar simultaneamente



6.4 Tipo de fornos industriais



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.



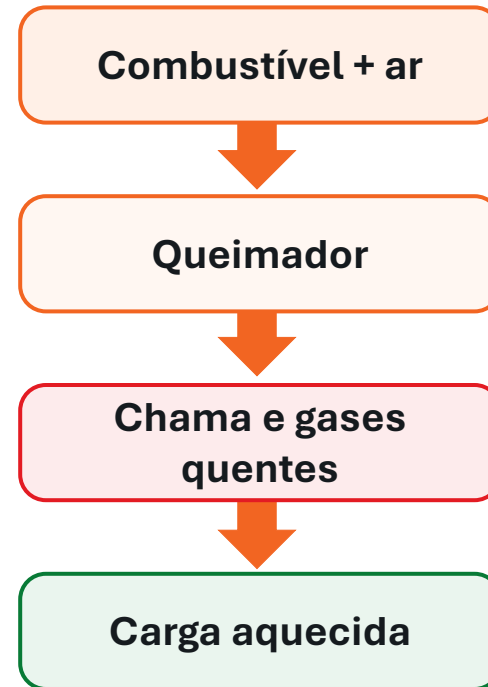
6.4.1.1 A chama aquece directamente a carga

A carga permanece sobre a soleira e fica exposta à chama e aos produtos de combustão.

Características principais

- Utiliza, geralmente, combustíveis líquidos ou gasosos.
- Os queimadores podem ser instalados nas paredes ou na abóbada.
- O calor é transferido principalmente por radiação e convecção.
- O refractário reduz perdas e protege a estrutura do forno.

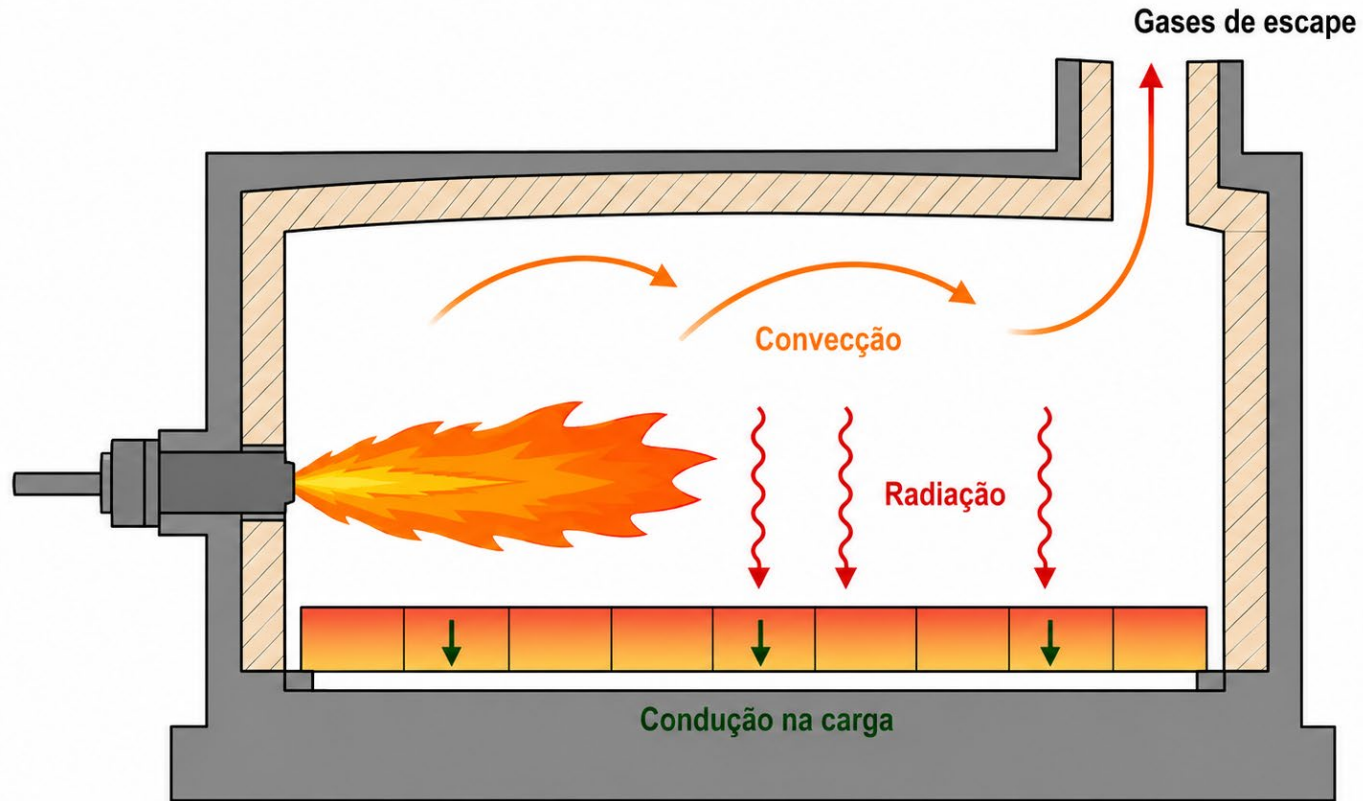
Percurso da energia



Aquecimento directo: a chama e os gases entram em contacto com a carga



6.4.1.2 Transferência de calor para a carga



No interior da carga, o calor propaga-se principalmente por condução

6.4.1.3 A entrada do ar frio reduz o rendimento

A infiltração altera a temperatura e aumenta a energia transportada pelos gases de escape.



Como reduzir as perdas

- Vedação de portas e juntas
- Isolamento e revestimento refractário
- Controlo da pressão e da tiragem
- Controlo da saída dos gases

Menor infiltração → temperatura mais estável e menor consumo de combustível



6.4.1.4 Critérios de configuração do forno

O mesmo princípio térmico pode originar fornos com geometrias muito diferentes.

1

Método de aquecimento

- Directo: chama e gases em contacto com a carga

Indirecto:
separação entre gases e carga

2

Regime de funcionamento

- Descontínuo ou por cargas
- Contínuo

3

Movimentação da carga

- Soleira fixa
- Empurradores ou rolos
- Vigas caminantes
- Tambor rotativo

A configuração final resulta da combinação destes três critérios





6.4.2. Fornos de queima directa

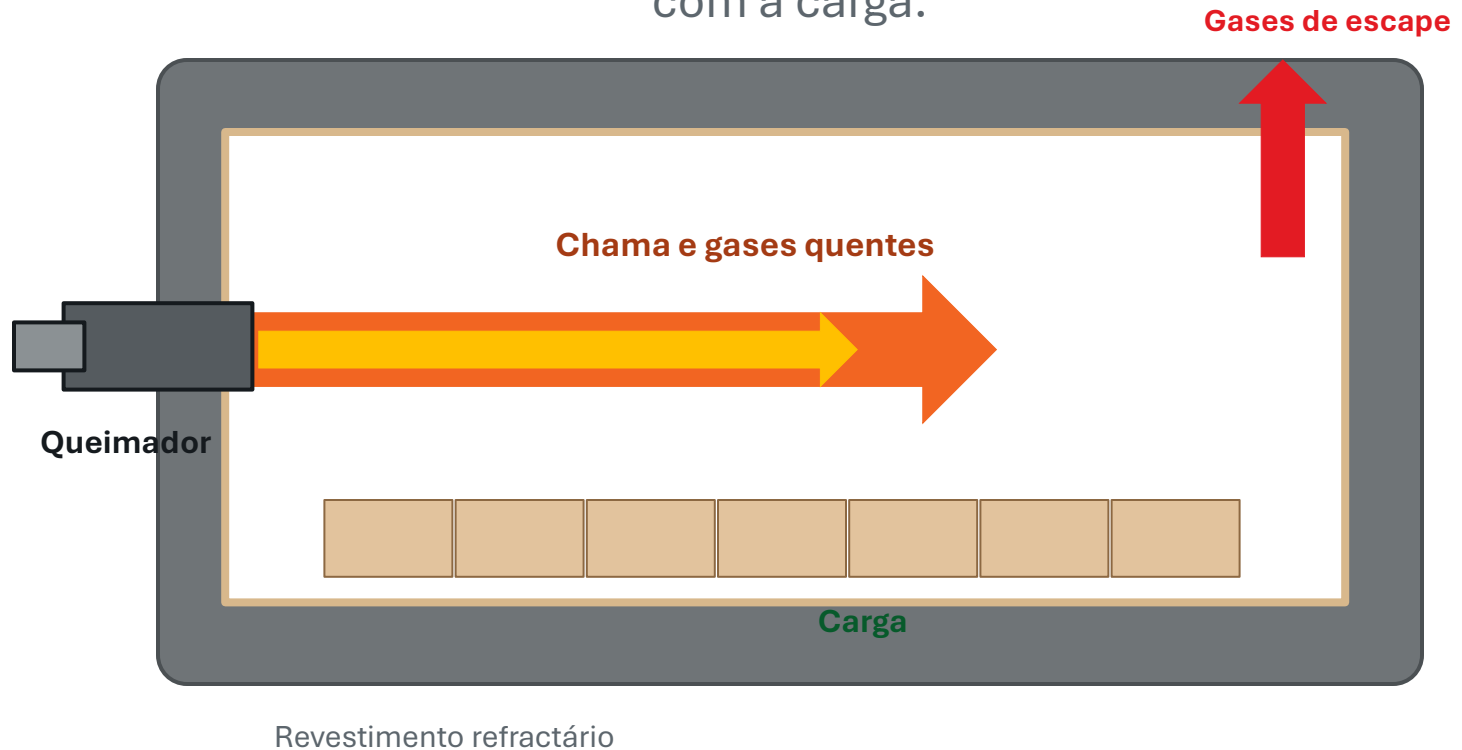
A maioria dos fornos industriais encontra-se dentro desta categoria. Tal como o nome sugere o combustível é queimado directamente dentro da câmara de combustão e a carga é exposta à chama e aos produtos de combustão. Estes fornos não são aconselháveis nos casos em que é preciso usar atmosfera de protecção.



Exemplo de forno de queima directa

6.4.2.1 A queima ocorre dentro da câmara

A chama e os produtos de combustão entram em contacto directo com a carga.



Não existe uma parede ou tubo a separar os gases quentes da carga

6.4.2.2 O contacto directo condiciona a aplicação

A escolha depende da compatibilidade entre os gases de combustão, a carga e a qualidade exigida.

+

Quando é adequado

- Pretende-se aquecimento rápido e elevado fluxo de calor.
- A carga tolera o contacto com os produtos de combustão.
- O processo não exige uma atmosfera protectora.
- Exemplos: reaquecimento, forjamento, secagem e fornos rotativos.

!

Quando deve ser evitado

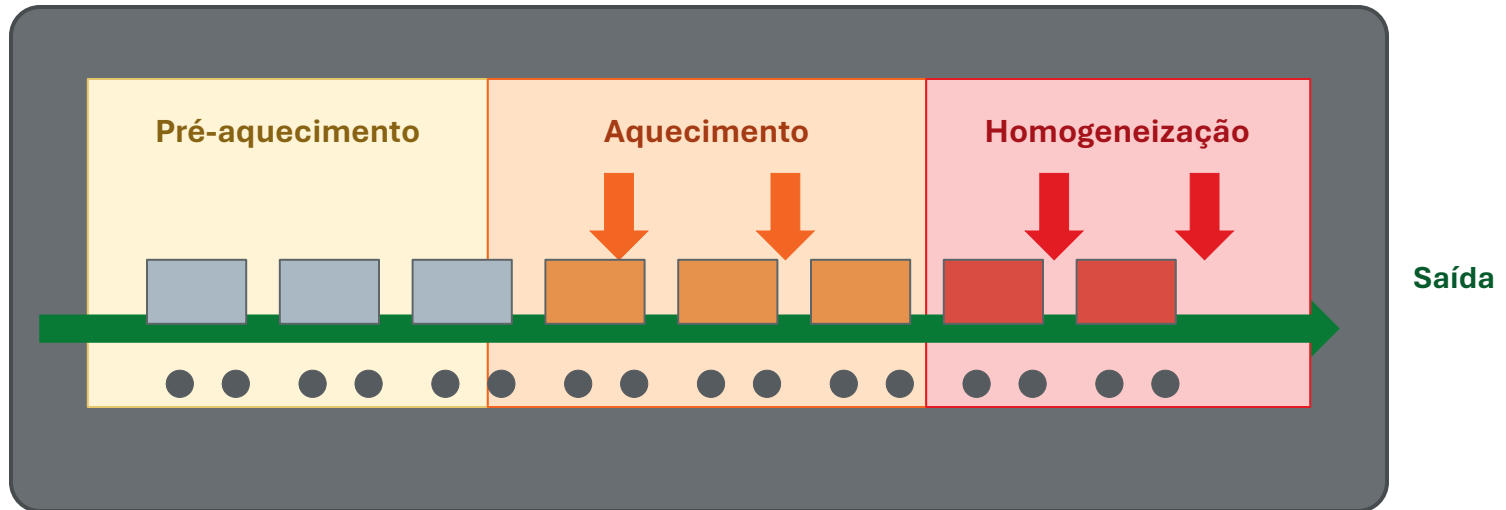
- É necessária uma atmosfera controlada ou protectora.
- Existe risco de oxidação, formação de carepa ou contaminação.
- A superfície ou a composição química do produto é crítica.
- Os gases de combustão podem reagir com o material processado.

Critério decisivo: o contacto gás–carga deve ser compatível com o produto



6.4.3 Fornos contínuos de queima directa

A carga entra, aquece durante o percurso e sai sem interromper a operação do forno.



O transporte da carga define a configuração do forno

- 1 Rolos transportadores
- 2 Empurradores
- 3 Vigas caminhantes

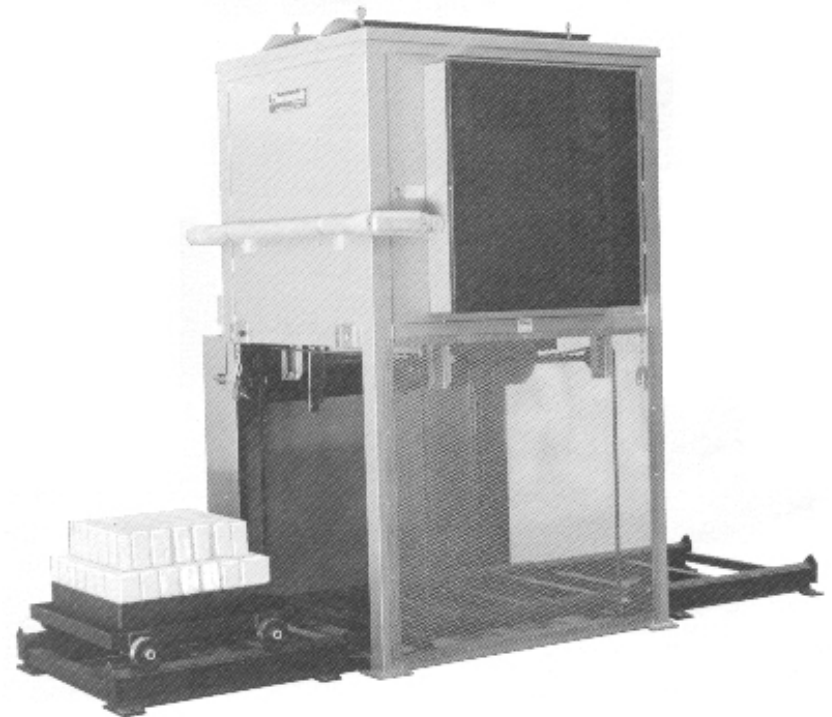
Operação contínua → elevada produtividade e condições térmicas mais estáveis



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 meios 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 de vigas caminhanteres

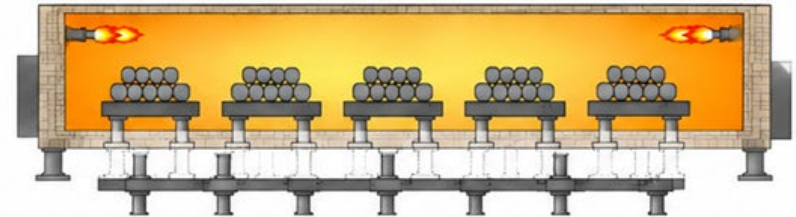
A carga geralmente fica assente sobre uma série de vigas estacionárias ou fornalhas e um conjunto alternativo de vigas móveis eleva a carga, move-a para frente ao longo do forno e depois deposita-a na viga estacionária. As vigas móveis retornam então às suas posições originais. Deve-se deixar espaço 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.

6.4.4. Fornos de vigas caminhanas

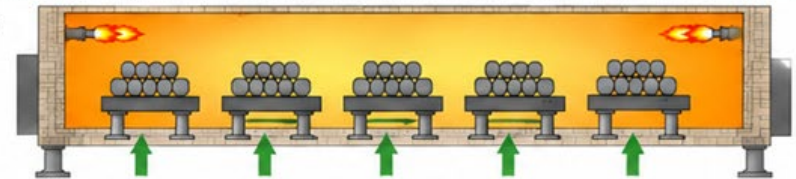
- ✓ A carga geralmente fica assente sobre uma série de vigas estacionárias ou fornalhas e um conjunto alternativo de vigas móveis **eleva a carga, move-a para frente** ao longo do forno e depois **deposita-a** na viga estacionária.
- ✓ As vigas móveis **retornam** então às suas **posições originais**.
- ✓ 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.

COMO A CARGA PASSA DAS VIGAS ESTACIONÁRIAS PARA AS MÓVEIS

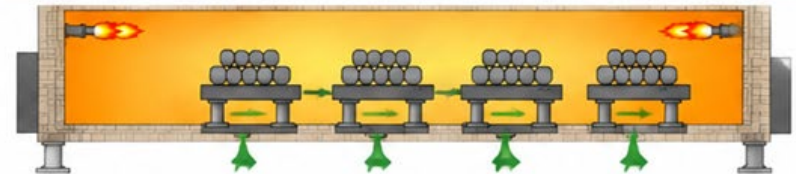
- 1 **Carga assente nas vigas estacionárias**
A carga encontra-se sobre as vigas estacionárias (fornalhas). As vigas móveis estão na posição mais baixa.



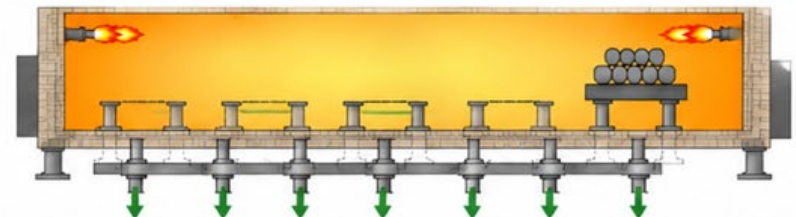
- 2 **Elevação das vigas móveis**
As vigas móveis elevam-se até à mesma altura das vigas estacionárias, ficando alinhadas com a carga.



- 3 **Translação para a frente**
As vigas móveis, já à mesma altura, deslocam-se para a frente ao longo do forno com a carga.



- 4 **Deposição na viga estacionária**
As vigas móveis descem ligeiramente para depositar a carga na viga estacionária à frente. Em seguida retornam à posição inicial (mais baixa).



Este ciclo repete-se continuamente, permitindo o avanço da carga através do forno de forma controlada e eficiente.





6.4.4. Fornos de vigas caminantes

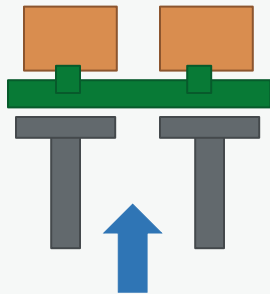


6.4.4. Fornos de vigas caminhantes

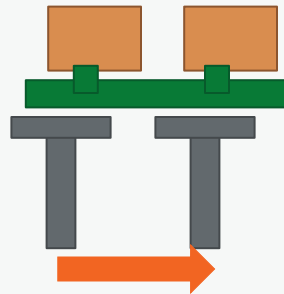
As vigas móveis elevam, avançam e depositam a carga sobre as vigas fixas.

■ Carga ■ Vigas fixas ■ Vigas móveis

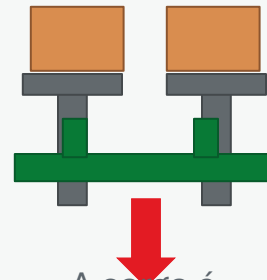
1 Elevar



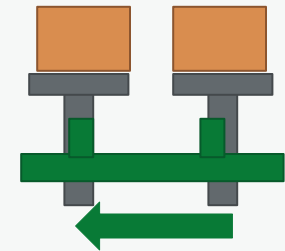
2 Avançar



3 Baixar



4 Retornar



Após o retorno, inicia-se um novo ciclo e a carga avança mais um passo.

O ciclo repete-se sem interromper o aquecimento da carga

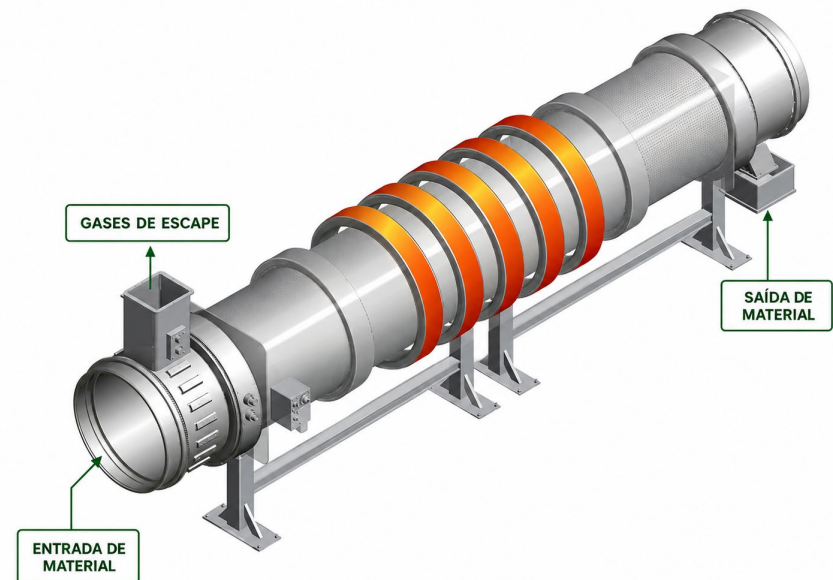




6.4.5. Fornos de Chama Indirecta

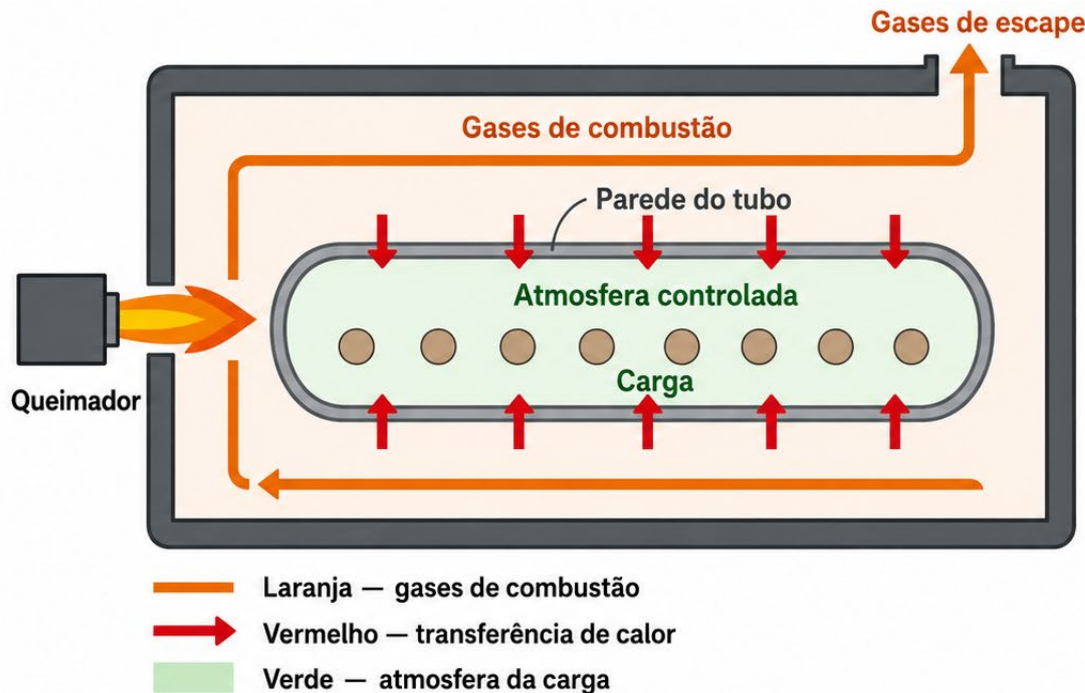
É utilizado em aplicações onde o material não pode ter contacto com os gases de combustão e quando o material seca ou calcina a uma baixa temperatura.

Conhecido também como forno de duplo cilindro.



6.4.5. Fornos de Chama Indirecta

A chama aquece a superfície externa; o calor atravessa a parede e chega ao produto.



- 1  Os gases não contactam a carga.
- 2  A atmosfera da carga é controlada.
- 3  Evitam-se oxidação e contaminação.

Compromisso térmico

A parede reduz o fluxo de calor; pode exigir maior área ou tempo de residência.

Separação física: gases de combustão ≠ atmosfera da carga

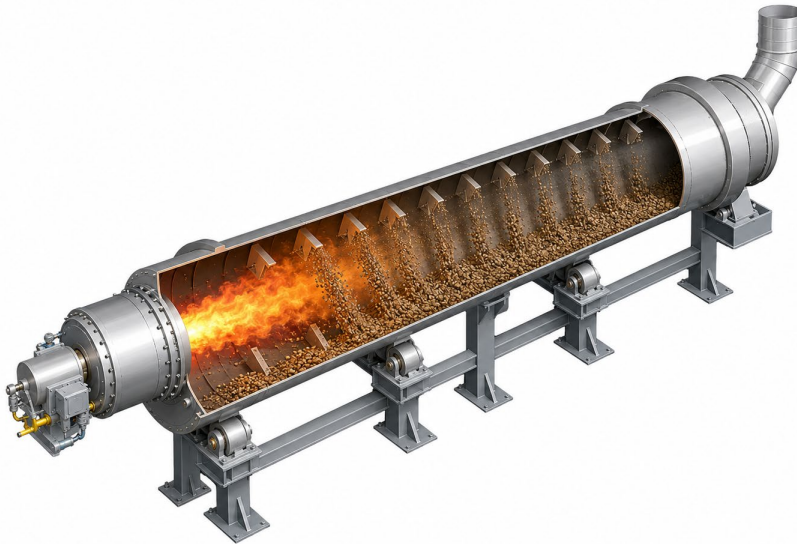
6.4.6. Fornos de Chama Directa

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).



6.4.6. Fornos de Chama Directa

Em chama directa, os gases quentes contactam a carga dentro do tambor.



A chama e os gases contactam directamente o material

Co-corrente (fluxo paralelo)

MATERIAL



GASES



- Os gases mais quentes contactam o material mais húmido.
- Indicada para materiais sensíveis ao calor, húmidos ou com partículas finas.
- Tende a reduzir a temperatura do material à saída.

Contracorrente

MATERIAL



GASES



- Os gases mais quentes contactam o material mais seco.
- Adequada quando o produto tolera temperaturas mais elevadas.
- Favorece menor humidade final e maior temperatura de saída.

A escolha depende da sensibilidade térmica, da humidade e da temperatura de saída requerida





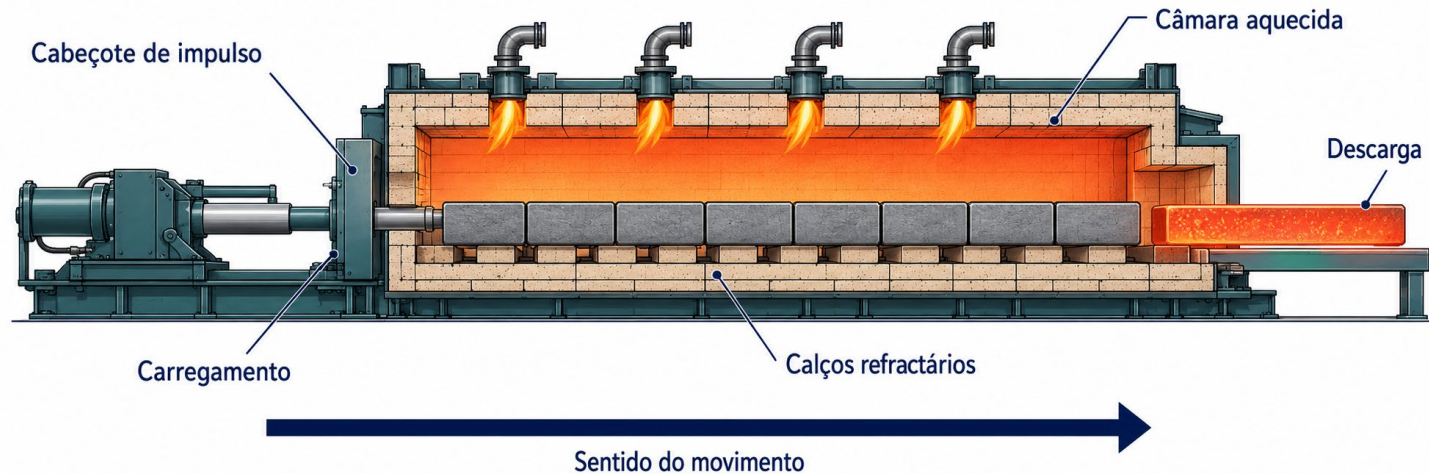
6.4.7. Fornos de Impulso

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

A carga avança por impulsos sucessivos

O cabeçote empurra uma camada contínua de material ao longo da soleira refractária.



Movimento intermitente da carga • aquecimento praticamente contínuo

6.4.7 Fornos de Impulso

O desenho da soleira determina a estabilidade da camada e a resistência ao avanço.

Soleira horizontal

maior risco de sobreposição



Soleira inclinada ou com calços

a carga mantém-se alinhada



- **Risco principal**
Sobreposição da carga e aumento da força necessária para empurrar.
- **Limite prático**
O comprimento do forno fica condicionado pela estabilidade da camada.
- **Material fino**
Espessuras inferiores a 35 mm são, em geral, difíceis de empurrar.
- **Soluções construtivas**
Inclinar a soleira ou colocar calços desde a extremidade de carregamento.

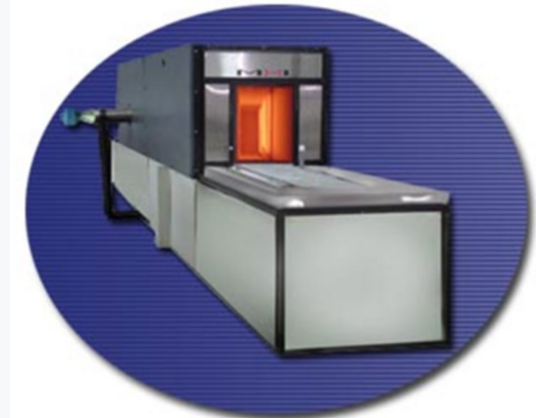


6.4.7. Fornos de Impulso

Aplicação típica: aquecimento uniforme antes da conformação mecânica.



Câmara de aquecimento



Forno com mesa de carregamento

**Produtos
processados**

- Barras de aço
- Lingotes e tarugos
- Peças longas e regulares



Etapa seguinte: forjamento ou laminagem



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.



< 800 °C

limite de operação de ligas
de aço e correias de malha



Aplicações típicas

- Fornos de vidro
- Tratamento térmico de pequenas componentes metálicas



Transportadores de cadeia

Devem ser mantidos frios: funcionando totalmente fora do forno, ou alternativamente em encaixes da fornalha.

6.4.8. Fornos transportadores

A construção destes fornos varia consideravelmente e inclui transportadores de cadeia, ou correias de arame.

Percurso do transportador e perdas de energia



Percurso dentro dos limites do forno

(ida e volta do ciclo da transportadora)

→ **perdas de energia reduzidas**

vs.



Retorno fora dos limites do forno

aquecimentos e arrefecimentos repetidos

→ **tensões térmicas cíclicas**



6.4.8. Fornos transportadores



correia de arame

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 refratário**.



Podem ser utilizados **roletes metálicos** ou **roletes de tubo refratário**, consoante a temperatura de operação e o tipo de produto.



Deve-se notar no entanto que o uso de roletes refrigerados pode **aumentar significativamente o consumo** de **combustível**.



Exemplo de forno de fornalha em roletes com roletes refrigerados a água.

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**.

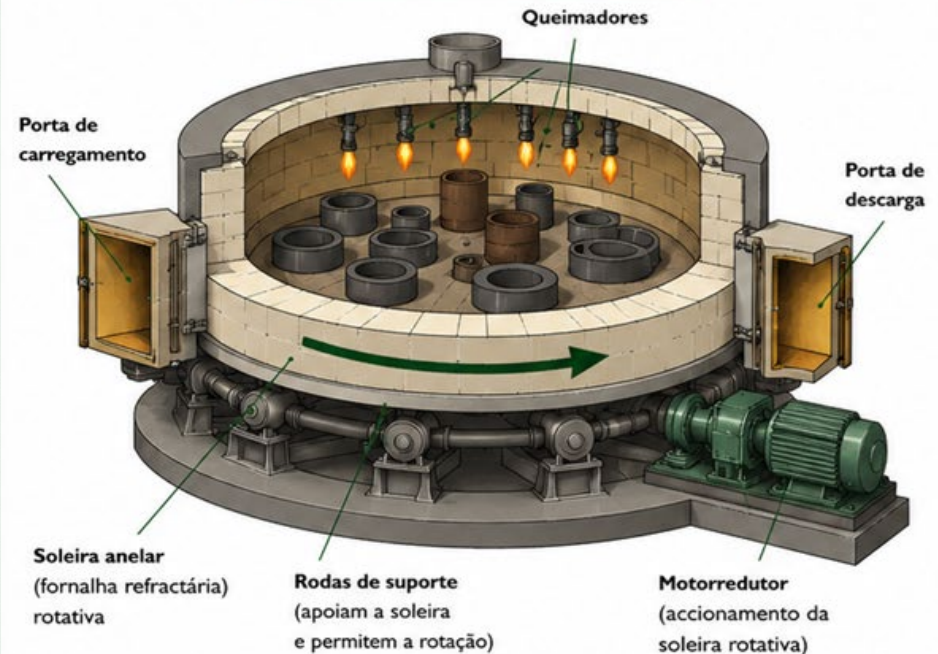


A carga **não se move** relativamente à fornalha, sendo portanto particularmente adequado a todos os **contentores e formas irregulares** que não podem ser empurrados facilmente ao longo do forno.



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

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



FOTOGRAFIA TÍPICA



- Estrutura exterior fixa.
- Soleira circular rotativa transporta a carga.
- Portas de carga e descarga adjacentes.
- Queimadores e sistema de queima na parte superior.

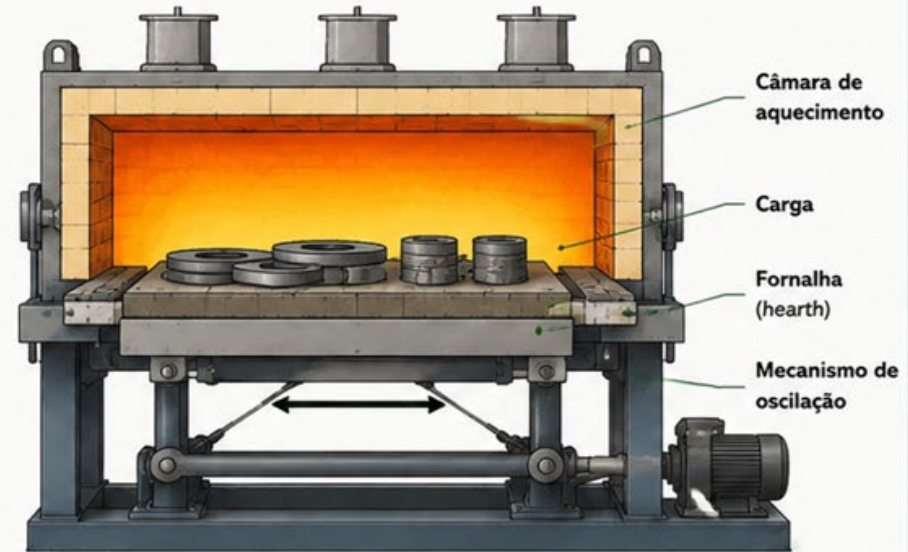
6.4.11. Fornos de fornalha oscilante



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.

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



Oscilação para frente e para trás

CARACTERÍSTICAS



- Movimento alternado da fornalha facilita a transferência térmica e a homogeneidade do aquecimento.
- Indicado principalmente para **peças planas** e de baixa altura.



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.



Exemplo: forno de tambor rotativo utilizado na produção de cimento.

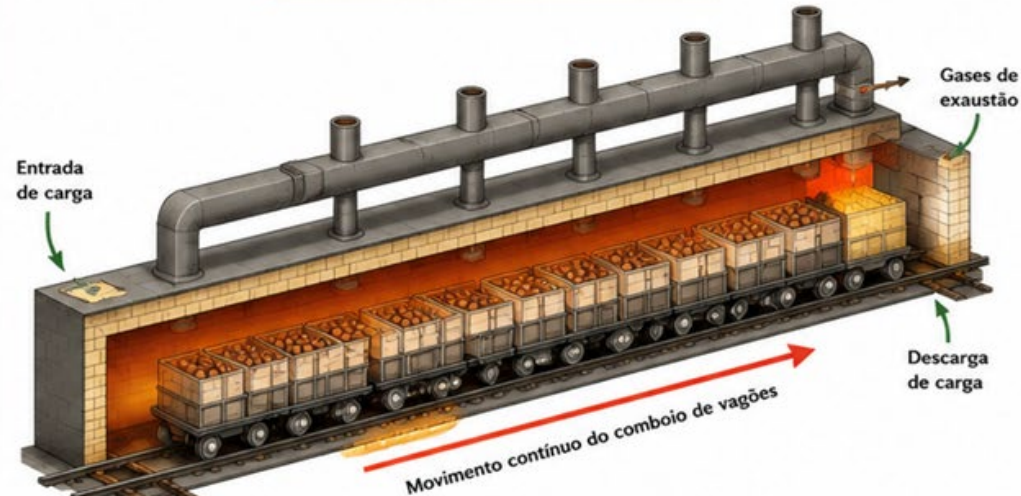
6.4.13. Fornos contínuos – vagão

- ▶ 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 refractária**.
- ▶ 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**.

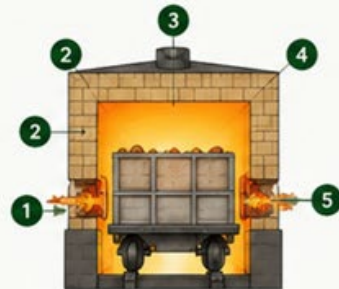
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- ✓ Transporte contínuo da carga em vagões.
- ✓ Vagões pesados com rodas e cobertura refractária.
- ✓ Maior simplicidade construtiva.
- ✓ Menor flexibilidade de operação.
- ✓ Maior consumo de combustível (sistemas antigos).

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



- 1 Entrada de carga: os vagões são carregados com o material.
- 2 Zona de aquecimento: a carga é aquecida pelos gases quentes dos queimadores.
- 3 Zona de queima: combustão dos queimadores e transferência de calor.
- 4 Zona de arrefecimento: os gases cedem calor à carga e arrefecem.
- 5 Descarga: os vagões descarregados seguem continuamente para o início do ciclo.



Vantagem dos sistemas modernos

O uso de vagões de dimensões menores reduz a quantidade de calor armazenado em cada vagão, diminuindo as perdas térmicas e o consumo de combustível.

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).

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO

1 Carregamento



A carga é introduzida no forno.

2 Aquecimento



A carga é aquecida até à temperatura pretendida.

3 Manutenção / Tratamento



Mantém-se a temperatura para o tratamento necessário.

4 Arrefecimento e Descarga



A carga é arrefecida e retirada do forno para a próxima operação.

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Forno de forja (bateladas)



Aquecimento até altas temperaturas seguido de arrefecimento.

Forno de tratamento térmico



Material submetido a ciclos de aquecimento e arrefecimento controlados.



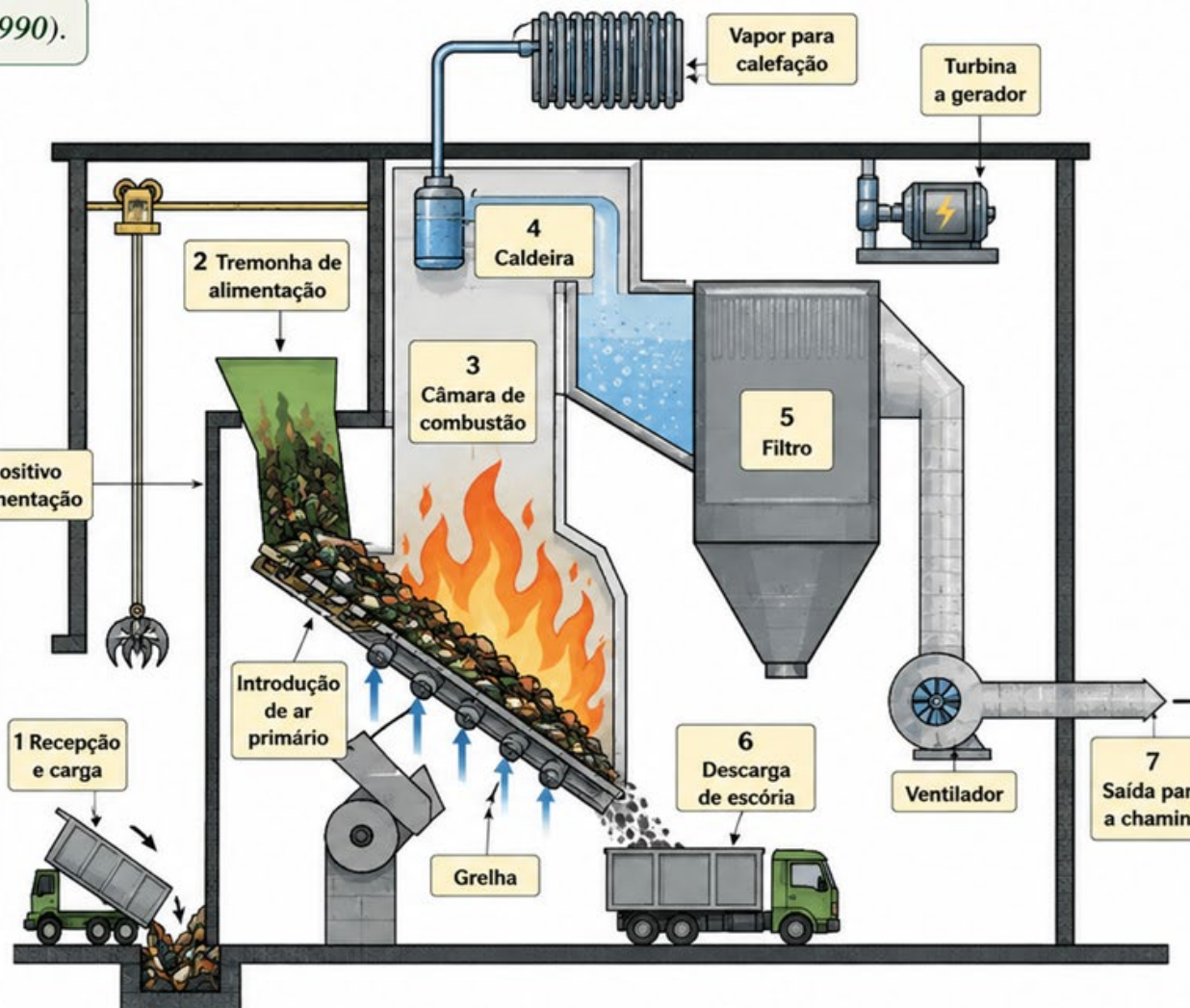
Os fornos de queima directa por bateladas são apropriados para processos que exigem **permanência** da carga na mesma posição, **ciclos controlados** de aquecimento/arrefecimento e **operações intermitentes**.

6.4. 15 Incinerador de lixo

Incinerador de lixo (Cetesh, 1990).

ETAPAS DO PROCESSO

- 1 Recepção e carga**
O lixo é descarregado na recepção e levado ao dispositivo de alimentação.
- 2 Alimentação**
A tremonha de alimentação introduz o lixo na grelha de combustão.
- 3 Combustão**
O ar primário é introduzido abaixo da grelha para sustentar a combustão.
- 4 Produção de calor**
Os gases quentes gerados na câmara de combustão aquecem a caldeira para produção de vapor.
- 5 Tratamento dos gases**
Os gases passam pelo filtro para remoção de partículas e poluentes.
- 6 Descarga de resíduos**
As escórias são removidas e encaminhadas para transporte.
- 7 Evacuação dos gases**
Um ventilador succiona os gases tratados e envia-os para a chaminé.



O incinerador de lixo **reduz** o volume dos resíduos e **recupera energia** na forma de calor e/ou electricidade, com **controlo das emissões** e **tratamento adequado** dos gases de combustão.

6.4.16. Fornos de queima indirecta



Em alguns fornos é necessário **prevenir o contacto** entre os produtos de combustão e a carga que está sendo aquecida. Estes sistemas são conhecidos como **fornos de queima indireta** e a atmosfera do forno é controlada tanto para **proteger a carga** ou para **promover uma reação química na superfície do material** que está sendo aquecido.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- ✓ Os produtos de combustão **não entram em contacto** com a carga.
- ✓ O calor é transferido ao material por **radiação** e/ou **convecção** através das paredes do forno ou de trocadores de calor.
- ✓ **Atmosfera controlada** conforme o objetivo do processo (inerte, redutora, oxidante, etc.).
- ✓ Podem operar de modo **contínuo** ou **intermitente**.
- ✓ Adequados para **materiais sensíveis** à oxidação ou contaminação.

MODOS DE OPERAÇÃO



Contínuo: a carga entra em um lado do forno e sai pelo outro após o aquecimento.



Intermitente (bateladas): a carga é carregada, aquecida durante o ciclo e depois descarregada.



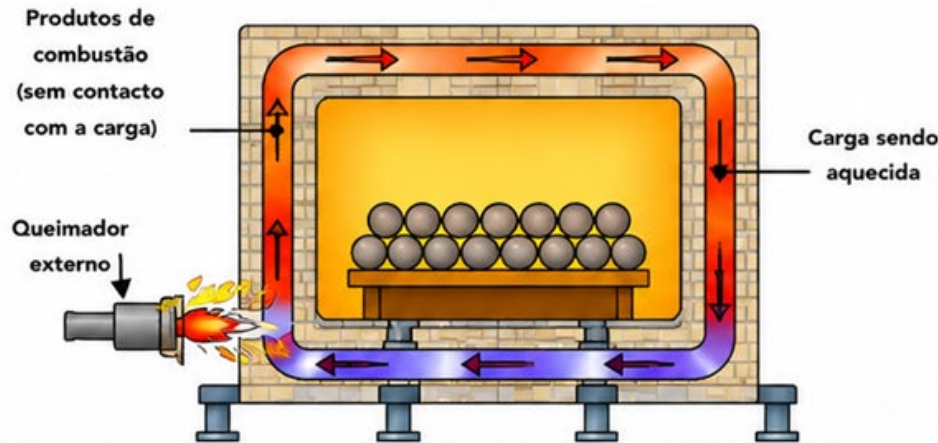
Os fornos de queima indireta são essenciais quando a **qualidade superficial**, a **composição química** e a **pureza do material** aquecido devem ser preservadas.



6.4.16 Fornos de queima indirecta



COMO FUNCIONA?



OBJETIVOS DO CONTROLO DA ATMOSFERA



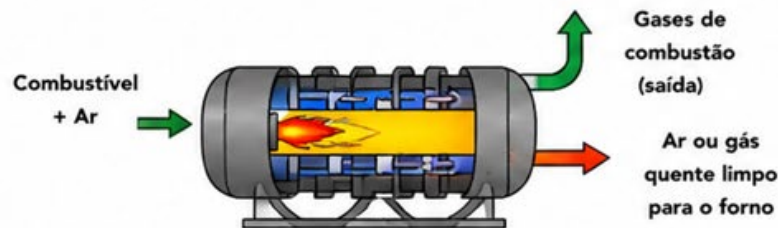
Proteger a carga contra oxidação, descarbonação ou contaminação.



Promover uma reação química específica na superfície do material.

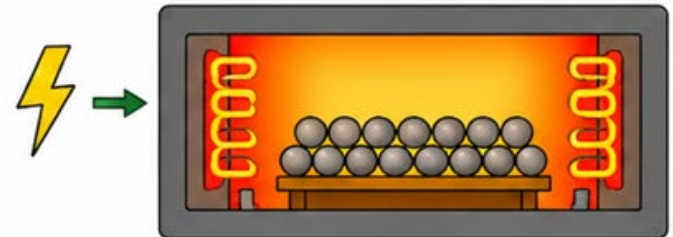
ALTERNATIVAS DE AQUECIMENTO INDIRETO

QUEIMA INDIRETA COM TROCADORES DE CALOR



O calor é transferido ao forno por meio de trocadores de calor, **sem contacto** dos gases de combustão com a carga.

AQUECIMENTO ELÉCTRICO



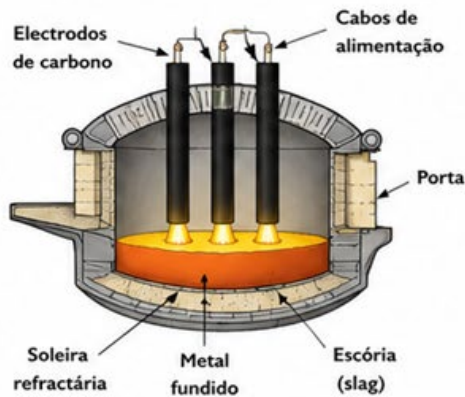
O calor é gerado por resistências eléctricas ou por indução, **não havendo contacto directo** com produtos de combustão.

6.4.17 Fornos Eléctricos

Os fornos eléctricos utilizam **energia eléctrica** como fonte de calor para fundir ou aquecer metais.

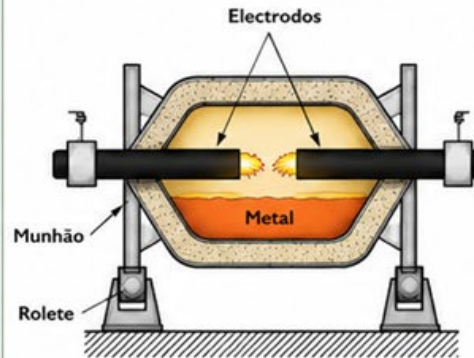
Consoante o modo de transferência de energia, classificam-se em: **arco directo**, **arco indirecto** e **indução**.

(a) FORNO DE ARCO DIRECTO



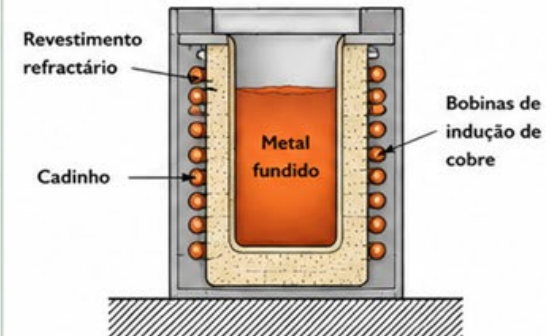
- O calor é gerado pelo arco eléctrico entre os electrodos e o metal.
- Arco estabelecido directamente sobre a carga metálica.
- Elevadas temperaturas e tempos de fusão reduzidos.

(b) FORNO DE ARCO INDIRECTO



- O arco ocorre entre os electrodos, acima da carga (não há contacto directo do arco com o metal).
- O calor é transferido ao metal por radiação e convecção através da abóbada.
- Menor contaminação do metal e arco mais estável.

(c) FORNO DE INDUÇÃO



- O calor é gerado por correntes induzidas no metal devido a um campo magnético alternado.
- Metal aquecido sem contacto eléctrico.
- Elevada eficiência, controlo preciso da temperatura e atmosfera mais limpa.



Os fornos eléctricos oferecem **alta eficiência térmica, controlo preciso da temperatura** e são amplamente utilizados na metalurgia moderna.



6.4.18 Forno tipo Mufla

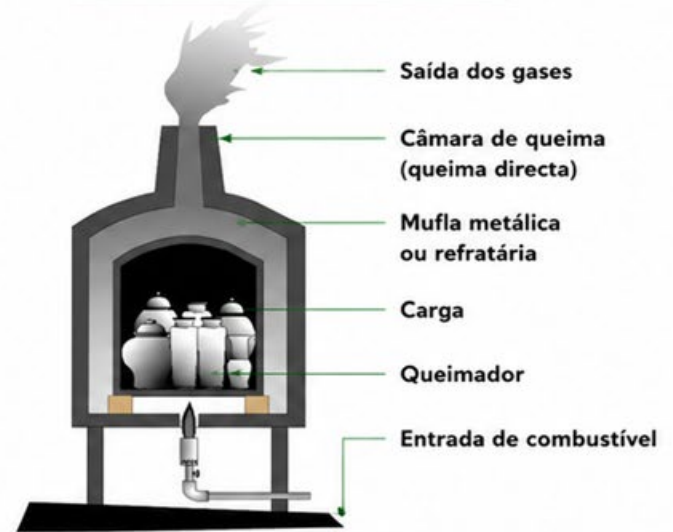


- A carga é colocada dentro duma **mufla metálica ou refratária** cujo exterior é submetido à queima directa. O fluxo de calor para a atmosfera protetora e depois para a carga depende de espessura e condutividade térmica da mufla.
- Outra consideração de igual importância é o **tempo de vida** do material 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.

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



EXEMPLO DE FORNO TIPO MUFLA



Aplicações: tratamentos térmicos (recozimento, têmpera, revenimento, normalização), fusão de metais e aquecimento de materiais em atmosfera controlada.



6.4.19 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.

INTERIOR DO FORNO
(combustão no tubo radiante)



TUBOS RADIANTES INSTALADOS
NA PAREDE DO FORNO



VANTAGENS



Elevada **flexibilidade** de operação.



Elevada **taxa de transferência de calor** por radiação.



Adequados para processos **contínuos** ou por **bateladas**.



Atmosfera protectora garante melhor **qualidade** e controlo do processo.



APLICAÇÕES: tratamento térmico de metais (austenitização, têmpera, recozimento, revenimento), aquecimento de barras, tubos, perfis e peças diversas.

6.4.20. 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.



Aplicações: tratamento térmico de metais (têmpera, revenimento, normalização), aquecimento de peças e processos que exigem elevada uniformidade térmica e ambiente controlado.

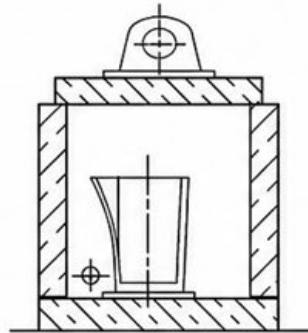
6.4.20 Forno de imersão



Os fornos de imersão destinam-se ao **aquecimento directo** da carga em contacto com sais fundidos ou outros meios líquidos. São conhecidos **dois tipos principais** de fornos de imersão:

1 Forno de pote (cadinho)

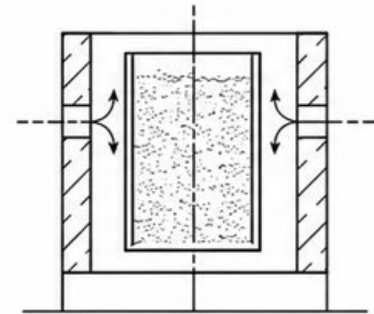
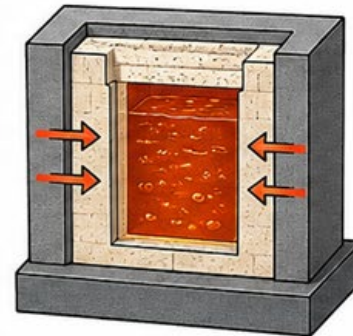
A carga é colocada no interior de um cadinho ou pote resistente ao calor, que se encontra dentro do forno.



Pote

2 Forno de poço

A carga encontra-se envolta em sais derretidos, dentro de um poço formado pelo próprio revestimento refractário do forno.



Poço



Aplicações: Fusão e aquecimento de metais não ferrosos (Al, Cu, Zn), tratamento térmico especial e processos que requerem elevada uniformidade de temperatura e atmosfera controlada.

