

MANUAL DE SISTEMAS DE SECAGEM NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA



INSTITUTO
NACIONAL DE
TECNOLOGIA **INCT** 95
anos
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES









Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



swisscontact

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA **INCT** 95 anos

MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**



PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA



MANUAL DE SISTEMAS DE SECAGEM NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

Rio de Janeiro - Brasil
Agosto | 2016

| Instituição Executora

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC)

Ministro: Gilberto Kassab

Instituto Nacional de Tecnologia (INT)

Diretor Geral: Fernando Cosme Rizzo Assunção

Coordenação de Tecnologias Aplicadas

Coordenador: Antônio Souto de Siqueira Filho

Divisão de Energia

Chefe: Maurício Francisco Henriques Júnior

| Co-execução

Fundação de Ciência. Aplicações e Tecnologias Espaciais (FUNCATE)

Programa de Eficiência Energética na Indústria de Cerâmica Vermelha - Projeto - EELA

Coordenador: Joaquim Augusto Pinto Rodrigues

| Cooperação Internacional

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE)

Swiss Foundation for Technical Cooperation (Swisscontact)

| Autores

Marcelo Rousseau Valença Schwob

Amando Alves de Oliveira

Joaquim Augusto Pinto Rodrigues

Maurício Francisco Henriques Júnior

| Revisão

Marcia Carla Ribeiro de Oliveira

Julia Santos Nunes de Campos

Vinicius Bernardo Vedovi

Renata de Sousa Candido

| Coordenação

Joaquim Augusto Pinto Rodrigues

Maurício Francisco Henriques Jr.

| Diagramação e Capa

Jeferson Toledo Barros (Nostromo Design Gráfico)

Manual de Sistemas de Secagem na Indústria de Cerâmica Vermelha.

SCHWOB, M. R. V. et al. Rio de Janeiro: INT/MCTIC, 2016. 42p.

ISBN 978-85-99465-13-4

1. Cerâmica Vermelha, 2. Sistemas de Secagem, 3. Eficiência Energética.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| | Apresentação | 6 |
| 1. | Introdução | 7 |
| 2. | Teoria da secagem de produtos cerâmicos | 8 |
| 3. | Tipologia dos secadores para cerâmica vermelha | 22 |
| 3.1 | Secadores Estáticos | 22 |
| 3.2 | Secadores Contínuos | 24 |
| 3.3 | Secadores Semi-Contínuos | 34 |
| 3.4 | Secadores Rápidos | 35 |
| 3.4.1 | Secadores a rolos | 36 |
| 3.4.2 | Secadores de balança | 36 |
| 3.4.3 | Secadores talisca ou de esteira | 37 |
| 3.4.4 | Outros tipos de secadores Rápidos | 39 |
| 3.5 | Secadores a grandes volumes de ar | 41 |
| 4. | Referências Bibliográficas | 42 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Teores de umidade residual | 9 |
| Tabela 2 – Dados operacionais do secador em três condições climáticas distintas .. | 31 |
| Tabela 3 – Consumo específico de eletricidade por função no sistema | 32 |
| Tabela 4 – Consumo específico de eletricidade por função no sistema | 40 |

Lista de Gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Curva de Bigot | 12 |
| Gráfico 2 – Diagrama de Sherwood | 13 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Secagem natural ao ar livre | 17 |
| Figura 2 – Secagem natural em estufa | 18 |
| Figura 3 – Secagem forçada | 21 |
| Figura 4 – Secadores estáticos | 24 |
| Figura 5 – Secadores contínuos | 26 |
| Figura 6 – Sistema autoviajante de secagem | 30 |
| Figura 7 – Secador tipo talisca | 38 |
| Figura 8 – Funcionamento de um secador tipo talisca | 38 |

ACRÔNIMOS

| | |
|---------------|---|
| ANICER | Associação Nacional da Indústria de Cerâmica |
| CE | Ceará |
| COSUDE | Agência Suíça de Cooperação Internacional |
| EELA | Eficiência Energética em Ladrilleras |
| INT | Instituto Nacional de Tecnologia |
| MCTIC | Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações |
| SEBRAE | Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas |
| SFB | Serviço Florestal Brasileiro |

Apresentação

O programa Eficiência Energética na Indústria de Cerâmica Vermelha (EELA) visa contribuir no combate às mudanças climáticas através da redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas indústrias cerâmicas da América Latina e melhorar a qualidade de vida da população envolvida. Este Programa é financiado pela Agência Suíça de Cooperação Internacional (COSUDE) e executado pela Swisscontact junto aos seus parceiros em sete países: Argentina, Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, México e Peru.

No Brasil, a coordenação do programa está a cargo do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), e conta com a parceria de diversos agentes, dentre os quais: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), Serviço Florestal Brasileiro (SFB/MMA) e Associação Nacional da Indústria Cerâmica (Anicer), entre outros.

O presente Manual de Sistemas de Secagem na Indústria de Cerâmica Vermelha faz parte de um conjunto de ações e instrumentos que buscam prover as empresas do setor com informações para uma produção mais eficiente, assim como mais limpa e sustentável. Nele estão sendo abordados os diversos tipos de possibilidades existentes e praticadas pelas indústrias do setor, indicando suas aplicações, vantagens e limitações

1 | Introdução

Entende-se por secagem o processo de transferência do líquido presente num sólido úmido para a fase gasosa insaturada. No processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha a secagem é a etapa do processo que antecede a queima em fornos envolvendo a adição de calor para evaporação parcial do líquido presente no produto cerâmico, a chamada secagem térmica.

Além dela, pode haver a secagem mecânica sem mudança de estado da água, através de filtração, pressão ou centrifugação, mas estes constituem processos não adotados pela indústria de cerâmica vermelha, em função de manterem uma elevada umidade residual do produto.

Numa planta de produção de cerâmica vermelha, a secagem constitui uma operação de importância fundamental para a qualidade do produto final, assim como para a redução de perdas de produção e de energia.

O estudo da secagem e o cálculo de secadores estão ligados a um grande número de problemas nas áreas de mecânica dos fluidos, química, fenômenos de superfície, de estrutura de sólidos, bem como de questões de transferência de calor e de massa. Além disso, a operação do processo demanda o atendimento de condições técnicas distintas, exigidas em cada etapa do processo. Dessa forma, é comum o desajuste da operação de secadores nas plantas de produção cerâmica, em função da necessidade de contar com equipamentos bem projetados e adequados ao processo específico da produção da empresa.

2 | Teoria da secagem de produtos cerâmicos

Na secagem usual de um produto cerâmico, o ar quente produzido em fornalhas e/ou recuperado de fornos nas fases de queima ou resfriamento entra em contato com a superfície da massa cerâmica sólida fazendo elevar a temperatura da peça cerâmica até atingir um valor constante. Nesse período, a temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir até atingir um estado de equilíbrio.

Vale destacar que um material cerâmico úmido não pode ser aquecido de forma brusca até a temperatura de secagem e ser resfriado de forma igual sem riscos de ocorrência de rachaduras devido à rápida evaporação da água **higroscópica**, que se vaporiza entre 50 e 200 °C, e das formas **interfoliares** (lamelares), que se vaporizam em temperaturas acima destas. A água no estado líquido ou vapor, contida num material, possui mecanismos complexos capazes de modificar as propriedades físicas dos corpos segundo a umidade adquirida. O mesmo vale para os gases e seu estado higrométrico, podendo alterar de modo profundo o processo de secagem de um sólido. Desse modo, no processo de secagem de um corpo sólido é preciso fornecer a energia que permita eliminar as moléculas de água, o que depende da temperatura e do teor de água do meio circundante, no caso, o ar quente. Este calor é fornecido até que seja atingido um valor de umidade residual, além do qual a energia para continuar a retirada de líquido torna-se bem maior.

Em suma, as quantidades de água empregadas na fase de conformação da peça cerâmica não são completamente eliminadas na secagem. Defini-se como seca a cerâmica quando permanece a peso constante depois de prolongado tratamento a temperatura de 75 °C, sendo essa referência de percentual de umidade referente ao peso de produto seco, sendo muito importante para a medida da umidade residual e a avaliação de seus efeitos, considerando uma faixa muito estreita de valores de umidade, o que torna o processo exigente em termos de precisão de medida. Por outro lado, uma maior ou menor umidade relativa do material cerâmico influencia em vários aspectos:

- Tempo e custo de secagem: à medida que os percentuais de secagem tendem a valores mínimos, são necessários tempos mais longos para a extração da água. Para compensar o fato, deve-se aumentar a temperatura do ar quente, o que acaba por demandar e dissipar mais calor, refletindo num aumento de custo operacional;
- Reabsorção de umidade: a exposição do produto ao ambiente favorece a estabilização do equilíbrio de umidade entre o ambiente e o produto. Portanto, torna-se contraproducente secar além do necessário;

- Aproveitamento do calor da tiragem do(s) forno(s): os gases de exaustão do forno podem fornecer calor para a remoção da umidade residual do produto que entra na queima, considerando diferenciais de temperatura da ordem de 120 a 140 °C;
- Redução da resistência mecânica a seco: o produto cerâmico seco deve ter resistência mecânica suficiente para suportar as solicitações mecânicas geradas pela manipulação e movimentação das máquinas (empilhadeiras, carregadores, elevadores etc.), destacando que pequenos decréscimos percentuais de umidade podem reduzir essas resistências de maneira acentuada, com destaque para produtos com muitos vazios, por exemplo, lajotas;
- Lascas e rachaduras na queima: a umidade residual do produto num ambiente com temperaturas elevadas, como ocorre durante a queima no forno, tende a elevar a pressão mecânica no interior da estrutura porosa, o que traz risco de explosão no interior da peça, caso ela envolva espessuras de septos grandes, baixa porosidade do material ou elevações súbitas de temperatura, fazendo ocorrer repentinas saídas de vapor;

Por todas essas razões, não é fácil determinar a umidade residual em seu ponto ideal, o que depende de aspectos como:

- Matéria-prima e sua composição granulométrica;
- Tipo de produto com seus percentuais de vazios, espessura de septos etc.;
- Tipo de secador, considerando sua demanda de energia térmica;
- Tipo de forno, considerando sua velocidade de transferência de calor;
- Condições higrométricas do ambiente da fábrica;
- Quantidade e tipos de máquinas de movimentação da produção.

Em linhas gerais, os teores de umidade residual devem variar da seguinte forma:

Tabela 1 – Teores de umidade residual

| Tipo de produto | Umidade residual (%) |
|---|----------------------|
| Produtos com mais de 35% de vazios | 2,5 a 3,0 |
| Telhas e produtos leves e de grandes dimensões | 2,0 a 2,5 |
| Produtos adaptados a fornos de ciclo de queima rápida | 0,8 a 1,0 |

Fonte: Facincani (2002).

Algumas definições importantes de grandezas higrométricas:

- Umidade absoluta de um gás – é a massa de água (g) no estado de vapor que contém uma unidade de volume de gás (g/m^3);
- Umidade de um corpo sólido – é a quantidade de água existente na unidade de massa do sólido, tratado a 105°C , expressa em percentual;
- Umidade relativa ou grau higrométrico de um gás – é a medida da relação entre a pressão parcial do vapor d'água e a máxima pressão na mesma temperatura;
- Ponto de orvalho – é a temperatura na qual o vapor d'água presente satura o gás. Nestas condições, o vapor começa a se condensar sob a forma de gotículas em suspensão;
- Umidade residual de um corpo sólido seco – é a umidade remanescente num corpo sólido, diante da condição de equilíbrio do mesmo com a do meio em seu entorno, considerando a condição higrométrica deste;
- Energia de secagem – é a quantidade de energia térmica necessária para transformar a água presente num corpo sólido para a condição de vapor e retirá-la do mesmo.

Materiais argilosos

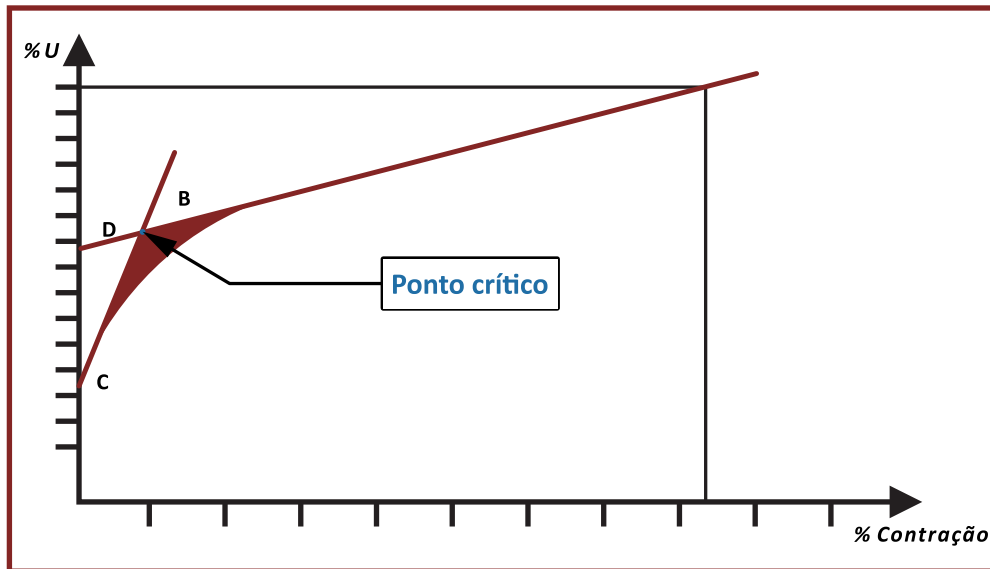
As matérias-primas usadas na indústria cerâmica tradicional são constituídas de silicatos ou sulco aluminatos naturais complexos, podendo ser, conforme os teores minerais, classificados como caulins, argilas ou silicatos. Em geral, apresentam estrutura lamelar e plasticidade notável na presença de água. A entrada de água nas micelas argilosas cria um inchamento na matéria-prima, tanto maior quanto mais alto o teor de umidade. De maneira inversa, a retirada de água (secagem) trará uma diminuição volumétrica da massa cerâmica, acarretando uma retração linear.

As moléculas de água em contato com as partículas argilosas transformam-se em colóides caracterizados de micelas contornadas de água fortemente ligada por força elétrica, permanecendo como água intersticial no estado líquido em proporção mais ou menos fixa. Disso resulta que a secagem ocorrerá de forma bastante simples quando se elimina a água intersticial ou “água livre”, ocorrendo maior dificuldade para a eliminação da água fortemente ligada às partículas argilosas.

Na prática, como mostram as curvas de Bigot, o comportamento das argilas no processo de secagem está relacionado ao tempo e a perda de massa em etapas sucessivas, como segue:

- **Primeira fase** – diminuição de volume proporcional à água eliminada, levando a uma velocidade de secagem constante. Ocorrem variações sensíveis nas dimensões da peça cerâmica devido ao encostamento de grãos pela saída de água coloidal. A velocidade de evaporação é constante, com a água livre evaporando e migrando do interior até a superfície do corpo cerâmico com uma velocidade suficiente para manter a superfície provida de umidade. A princípio, esta velocidade de secagem é independente da natureza da argila. Este período termina quando se atinge o ponto crítico, com a peça mudando de cor pelo desaparecimento do filme de água na superfície.
- **Segunda fase** – formação de vazios (poros) enquanto a massa continua a contrair-se de forma ligeira. A evaporação se aproxima das micelas de argila e a água livre do interior já não é mais suficiente para chegar com rapidez à superfície para manter úmida a superfície externa do corpo cerâmico. Com isso, a taxa de evaporação diminui e se transfere aos poucos para o interior do corpo, formando-se um gradiente de umidade no curso dessa fase. A evaporada corresponde a uma contração não proporcional.
- **Terceira fase** – não ocorrem variações sensíveis nas dimensões da peça cerâmica, até que se chegue ao fim do processo de diminuição de volume, com os poros proporcionais à água eliminada, após a evaporação da água intersticial. A taxa de evaporação é praticamente nula. Ao final da fase, a umidade do corpo se torna fixa e corresponde à água ligada que resta na massa do corpo. Esta água está em equilíbrio com a atmosfera úmida do ambiente e a sua quantidade depende do grau higrométrico existente no ambiente. Se o ar circundante está mais ou menos úmido, a umidade residual muda.

Gráfico 1 – Curva de Bigot



Fonte: Facincani (2002).

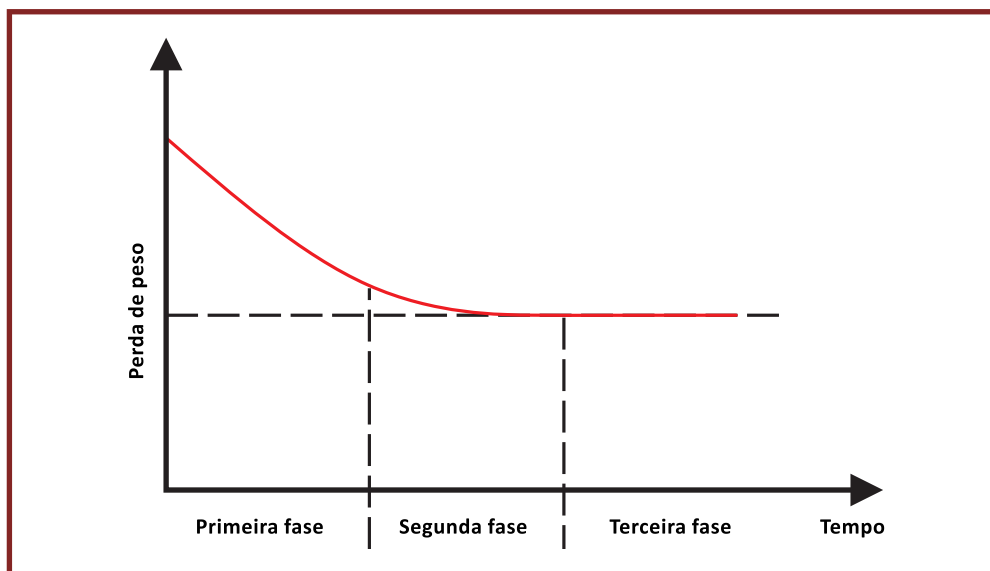
Retirada da água no processo de secagem e a formação de caminhos microcapilares

A retirada de água de uma peça cerâmica só ocorre quando a densidade e a viscosidade da mesma abaixam e as gotículas de água existentes dentro da mesma passa a ter a mesma temperatura do ambiente externo, formando microcapilares no interior da peça. Quanto maior a eficiência de formação dos microcapilares, maior a facilidade de saída da água e assim maior será a velocidade de secagem, que estará relacionada a um maior preparo da massa cerâmica para a formação dos microcapilares.

Verifica-se que a temperatura da superfície úmida do sólido é igual à temperatura do bulbo do meio. A temperatura dentro do sólido tende para o mesmo valor, mas com certo atraso, devido à temperatura do bulbo úmido do ar quente ser constante com a velocidade de secagem. Este é o chamado “período de secagem constante”. Durante esta fase inicial, haverá uma contração em toda a peça. Depois disso, a superfície começa a parecer seca e a evaporação tem início no interior da peça, produzindo-se pouca ou nenhuma contração. É quando se perde a água dos poros e já não se produz contração.

Este período de secagem constante termina quando o sólido atinge o “conteúdo crítico de umidade”, além do qual a temperatura da superfície aumenta e a velocidade de secagem cai rapidamente.

Gráfico 2 – Diagrama de Sherwood



Fonte. Facincani (2002).

O período de queda da velocidade de secagem pode levar muito mais tempo que o período de velocidade constante, embora a remoção de umidade seja muito menor. A velocidade de secagem tende para zero quando se atinge a “umidade de equilíbrio”, que é a maior umidade possível atingida nas condições em que o sólido está secando.

As curvas de secagem típicas estão relacionadas com o mecanismo do processo de secagem. No período inicial de secagem, a temperatura do sólido varia até atingir um valor constante. Durante o período de velocidade constante, toda a superfície exposta está saturada de líquido. A secagem se processa sobre a superfície líquida, com o sólido não exercendo influência direta sobre a velocidade de secagem. A rugosidade da superfície sobre a qual se estende o líquido interfere no coeficiente de transferência de calor e massa. O regime constante se mantém enquanto a massa que é retirada da superfície é substituída de forma contínua por meio do movimento do líquido no interior do sólido. O mecanismo desse movimento e sua velocidade variam com a estrutura do sólido. Se esta possui vazios internos grandes, o movimento tende a ser controlado por forças de tensão superficial e gravidade. Em

sólidos de estrutura fibrosa ou amorfa, o movimento do líquido se dá por difusão, quando as velocidades são muito menores que as de escoamento do primeiro caso. Assim, nos sólidos em que a velocidade é controlada pela difusão ocorrerão períodos de velocidade constante mais curtos e até difíceis de serem medidos, até que a umidade do sólido seja insuficiente para suprir toda a superfície. Este ponto onde começa o decréscimo da velocidade de secagem é chamado de ponto de inflexão. A partir daí, o vapor das partes internas da massa cerâmica irá se difundir para a superfície de forma lenta em comparação com a velocidade de troca de massa e calor por convecção que ocorre na superfície.

Perda de água, retração, tensão interna e tempo de secagem

Uma peça cerâmica extrudada a úmido, atingida por um fluxo de ar a temperatura e umidade relativa constante evapora quantidades constantes de água ao longo do tempo até que a taxa de perda de água da peça comece a decrescer. Se a evaporação ocorre de forma lenta, uma vez atingida uma umidade crítica, além da qual se interrompe o fluxo líquido do interior para a superfície, cessa o regime constante de evaporação. Se a evaporação superficial for acelerada, o fluxo líquido para a superfície se interrompe antes e o teor de umidade crítica aumenta, terminando antes o período de evaporação constante das camadas superficiais.

Atingida a umidade crítica, o regime de evaporação continua a decrescer e as quantidades evaporáveis se reduzem no tempo, sucedendo um regime de evaporação decrescente.

Se o fenômeno ocorre com regularidade em produtos de pouca espessura, a retração consequente à perda de água se efetua somente durante o primeiro período de evaporação. Para produtos de maior espessura, a água se desloca do interior para a superfície ao longo da porosidade da massa (capilares), uma rede de passagem desigual e tortuosa distribuída de forma estatística uniforme em toda a espessura. Em resumo, durante o primeiro período de evaporação a água retirada provém em quantidades maiores das camadas mais externas e menores das internas. Assim, no interior da peça vão se formando zonas de maior ou menor gradiente de umidade. Quanto maior o gradiente, maiores as retrações, que induzem tensões de compressão do lado mais úmido e de tração do lado mais seco, que caso superem os valores limites das forças de coesão, provocam fissuras.

Assim, os tempos necessários de secagem, considerando constantes as temperaturas e a umidade do ar quente e da matéria-prima, são proporcionais à espessura da peça na primeira fase de secagem e ao quadrado da espessura da peça na segunda fase de secagem, após a umidade crítica. Se mudam as diferenças de temperatura entre ambiente e peças, os tempos de secagem tornam-se inversamente proporcionais às respectivas diferenças, tanto na primeira, como na segunda fase de secagem.

Relações entre retração e evaporação

A relação entre a perda de água de uma massa e sua retração é mostrada na Curva de Bigot (umidade percentual referida a seco versus percentual de retração, também referida a seco). Ela apresenta três fases distintas (Curva de Bigot):

- A primeira com teores mais elevados de umidade com proporcionalidade entre percentual de água evaporada e percentual de retração linear, ambas referidas às condições finais de secagem;
- A segunda fase com teores de água intermediários em que a retração decresce de forma rápida;
- A terceira fase com teores de umidade mais baixos, com a água sendo evaporada sem que a retração se modifique (saída de água de porosidade).

No primeiro período deve-se controlar a velocidade de evaporação para evitar desequilíbrios de retração. Uma vez atingido o limite de umidade crítica em todos os pontos, pode-se acelerar o processo de secagem, valendo ressaltar que, ao contrário da experiência com algumas peças no laboratório, num secador com milhares de peças a tarefa é muito mais complexa.

Reabsorção de umidade pelo produto após a secagem

O produto secado com ar quente perde umidade até um valor mínimo, em relação ao qual se cria um desequilíbrio com as condições higrométricas do ar de alimentação. À baixa temperatura, o ar deixa no produto uma umidade residual maior do que a temperaturas mais elevadas. Se o produto seco é exposto no ambiente em condições de maior umidade relativa, o equilíbrio impõe uma transferência inversa de umidade, ou seja, do ar para o produto. Para alcançar o equilíbrio, o percurso é muito longo e a reabsorção de umidade, mais veloz no início, torna-se cada vez mais lenta.

Mais do que das condições higrométricas do ambiente, a reabsorção depende do grau de secagem recebida, da temperatura atingida e da extensão da superfície exposta. Em geral, ela ocorre de 0,5 a 3,0%, sendo mais frequente entre 1,0 e 2,0%. Com a reabsorção, reduz-se a resistência mecânica a seco. Em produtos secados de modo irregular, tal ocorre de maneira ainda mais intensa, com fortes tensões internas ou micro fraturas, ainda que possam ter aspecto estético bom.

Os inconvenientes derivados da reabsorção de umidade são:

- Redução da resistência do seco e possíveis quebras na saída do secador, no empilhamento para a queima e no eventual transporte interno para carregamento dos fornos, principalmente nos casos de manipulação, como no caso dos fornos Hoffmann;
- Lascamentos e esfoliações no forno;
- Necessidade de reevaporação da água absorvida através de ar quente de recuperação ou dos gases de exaustão do forno.

Perda de água, energia térmica e meios de secagem

A secagem térmica em secadores convencionais se efetua por evaporação da água presente na peça cerâmica e a passagem de estado água-vapor ocorre pela absorção de energia térmica na proporção de 580 a 600 kcal para cada quilograma de água evaporada. Num secador, com suas perdas inerentes de energia térmica, a demanda total de calor será maior, conforme sua eficiência térmica.

Uma certa quantidade de energia térmica adicional é necessária para vencer as forças de ligação da água com a argila, mas na prática esta parcela corresponde a menos de 1% da parcela total de calor demandada.

O mecanismo de transferência de calor para a peça cerâmica no secador pode ser direto, com a irradiação direta de calor para a superfície da peça e desta para o interior da mesma, por condução, ou através de aquecimento indireto, caso mais frequente, por meio de ar quente soprando e ventilando as peças cerâmicas num mecanismo de troca de calor por convecção. O ar cede calor para que ocorra a evaporação e o aquecimento eventual da peça, enquanto o ar quente perde calor e se esfria. O processo atinge um limite quando o resfriamento do ar atinge a temperatura de saturação (umidade relativa de 100%), abaixo da qual o ar não pode mais absorver o calor.

A secagem com ar pode ocorrer de dois modos:

- No ambiente atmosférico, pelo aproveitamento da ventilação e da temperatura ambiente, a secagem é conseguida pela massa de ar atmosférico que atravessa a carga de produtos úmidos estocados em pátio ou galpão;



Figura 1 - Secagem natural ao ar livre

- Em ambiente fechado com temperatura controlada mediante alimentação de ar pré-aquecido. A energia térmica de secagem fornecida pelo ar considera a soma da energia de transformação do vapor em água com uma parcela adicional para carrear o vapor gerado, fora as perdas de energia térmica inerentes ao equipamento: fugas de ar quente e calor acumulado no ar quente e carreado para fora do secador.



Figura 2 - Secagem natural em estufa

Secagem natural

É realizada quando as peças cerâmicas são expostas a temperatura ambiente por meio da movimentação natural do ar. O tempo de secagem é muito variável, dependendo das condições climáticas. A secagem natural também apresenta como fatores limitantes a excessiva manipulação das peças e a ocupação de grandes áreas para colocação das peças. Mesmo assim, ainda permanece como a forma mais encontrada de secagem na indústria cerâmica nacional.

A secagem natural é considerada muito longa e ineficaz, considerando as incertezas quanto às variações climáticas, como falta de vento, luminosidade e insolação adequadas. Deve-se, por exemplo, evitar locais frios e pouco iluminados. A secagem natural pode ser executada não em terreiros, mas em ambientes cobertos com telhas ou, melhor ainda, com plástico transparente (mais eficaz e barato) e pé direito baixo. Esta estrutura deixará passar mais calor e luminosidade e tornará a secagem mais eficiente.

Alguns procedimentos podem melhorar o desempenho da secagem natural:

- Evitar a ventilação inicial com a colocação nas primeiras horas de cortinas laterais. A excessiva ventilação inicial pode acarretar atraso do processo de secagem, pois a ventilação imediata pode fechar as passagens superficiais, dificultando a saída de água da peça;
- As coberturas de plástico em galpões devem ter pé direito abaixo de três metros;
- Aumentar as frestas de passagem de ar entre as peças;
- Evitar a formação de mato e poças de água nas leiras de secagem, no caso de secagem em terreiro;
- Logo que montar a carga, cobri-la para que se evite a ventilação inicial, no caso de secagem em terreiro;
- Deixar a cobertura, de preferência de estrutura de tubos de aço com cobertura em plástico (mais barato que o custo de estufas com telhas e paredes em alvenaria, que muitas vezes exigem a operação de ventiladores), por no mínimo quatro horas, após o que será retirada. Isso permitirá maior eficiência de secagem;
- Caso já existam galpões de alvenaria, substituir ao menos parte de suas telhas convencionais por telhas translúcidas;
- Orientar os furos dos blocos na direção do vento;
- Evitar a colocação de peças úmidas junto a peças mais secas, assim como peças empilhadas muito próximas da cobertura, evitando-se excessos de incidência de calor, o que pode provocar trincas;
- Peças maciças ou de grande porte deverão ser mantidas cobertas por mais tempo;
- Aproveitar, dentro do possível, o calor perdido nas paredes de fornos para uma pré-secagem de peças, evitando-se aquecimentos bruscos que provocam trincas e rachaduras.

Secagem artificial:

Este tipo de solução pode envolver a secagem estática (em câmaras), a secagem semi-contínua ou a secagem contínua, conforme o tipo de equipamento de secagem empregado. Os três processos são muito empregados nas indústrias de cerâmica vermelha.

O secador constitui-se de um ambiente fechado com capacidade variável, que pode ser ajustada conforme a carga a ser processada. Funciona com temperaturas que podem chegar a 200 °C, mas que, em geral, estão na faixa usual de 60 a 90 °C, utilizando o ar aquecido por uma fonte própria de geração de calor (fornalha) ou calor oriundo do resfriamento dos fornos.

Embora tenham características técnicas e operacionais diversas, apresentam bons valores de eficiência operacional e energética (térmica e elétrica). Como critérios de escolha dos tipos referidos, podem ser citados: a velocidade necessária aos ventiladores, a quantidade de ventiladores, a demanda de ar quente do processo, tipo de argila processada, tipos de produto (densidade e geometria dos produtos), escala de produção, possibilidades de estocagem de produto úmido e produto seco, tipo de ventiladores (fixos ou autoviajantes), velocidade de secagem (rápida ou lenta).

Nos secadores estáticos, ocorrem variações de temperatura e umidade sobre o material parado. Nos secadores contínuos, tais variações são estabilizadas no espaço e influenciam o material durante o seu movimento, porém são equipamentos mais caros e sofisticados. Outra caracterização dos secadores está associada com o tipo de circuito que os alimenta: circuito aberto – o ar se renova continuamente por tiragem natural (chaminé) ou forçada (exaustores); circuito fechado – o ar é passado mais vezes sobre o material com tiragem forçada.

A escolha entre os tipos de secadores depende do grau de produtividade da indústria. Diante de uma relevante carga de alimentação de peças, recorre-se aos secadores contínuos, ao invés dos intermitentes, considerando-se uma redução notável nos tempos mortos e a adoção de ciclos altamente mecanizados. Os secadores contínuos rápidos são de recente introdução no mercado, criado pelas exigências das indústrias de monoqueima na cerâmica branca. O ciclo de secagem é extremamente reduzido, inferior a uma hora. Nestes tipos de secadores, as peças são tratadas de forma individual, criando-se uma situação de equilíbrio e homogeneidade no processo. A secagem rápida tem os mesmos conceitos dos secadores túnel com uma maior rapidez do processo que permite tratamento em condições ótimas para cada peça processada.



Figura 3 - Secagem forçada

Dicas para uma secagem eficiente:

- Manter as portas sempre fechadas, evitando distúrbios na circulação de ar, alterando a curva de secagem;
- Manter a umidade relativa do ar na entrada do secador (zona úmida) em 85% de umidade relativa e temperatura por volta de 45 °C;
- Manter uma ordem de retirada das vagonetas, sob pena de interferir na curva de secagem, podendo causar trincas ou deficiência de secagem;
- Controlar a retirada de ar úmido pelo exaustor ou chaminé, lembrando que a umidade inicial é responsável pela qualidade e produtividade da secagem;
- Quanto maior o volume de ar fornecido pelos ventiladores, maior a produtividade de secagem;
- Na falta de umidade inicial, usar aspersores ou tambores com água na entrada do secador;
- Gotejar água na entrada do secador em períodos quentes (verão) é sinal de entrada de ar frio na zona úmida;
- Manter a altura da vagoneta próxima da altura interna do secador, evitando espaços entre a vagoneta e o teto. Vagonetas muito baixas em relação à altura do secador provocam bolsão de ar quente no teto. Além de dificultar a secagem, provoca trincas;

3 | Tipologia dos secadores para cerâmica vermelha

Os secadores para cerâmica vermelha, segundo suas características técnicas gerais, se dividem em: estáticos, contínuos e semi-contínuos. A seguir, a caracterização de cada tipo de secador:

3.1 - Secadores Estáticos

São equipamentos de secagem de operação intermitente constituídos por grupos de áreas separadas, chamadas de celas ou câmaras. Durante a operação das máquinas de operação da produção, as câmaras são preenchidas uma após a outra de modo proporcional à produção. No momento em que é preenchida, cada câmara é fechada, tendo início o processo de secagem na mesma. O produto processado permanece parado, enquanto as condições higrométricas internas vão se alterando ao longo do tempo.

Para cada câmara é possível a realização de um processo específico de secagem, de forma independente das outras câmaras, já que as mesmas permitem regulagens próprias para cada tipo de produto, o que se considera uma característica vantajosa desse tipo de secador, que também não necessita comboios de vagonetas como nos contínuos, reduzindo o custo de investimento e evitando problemas de manutenção. Por outro lado, são equipamentos que operam de forma muito ligada à programação de produção das máquinas para as operações de carregamento e descarregamento. Os ciclos de secagem costumam ser de 20 a 60 horas.

O tipo mais comum de secador intermitente é o de câmara. Nele, o ar quente movido pelo ventilador é conduzido para a câmara de secagem através de canais que desembocam na parte anterior da mesma. O ar quente entra por baixo e sai pelas aberturas correspondentes, também situadas na parte baixa da câmara, posicionadas na parte oposta daquelas de entrada. Como o número de câmaras é variável, ele influencia no custo operacional e de manutenção, considerando que cada câmara conta seus instrumentos de regulagem e acessórios (portas, chaminés, rótulas etc).

Quanto ao tipo de recirculação, os secadores estáticos podem ser com ventilação fixa ou ventilação móvel com hélices a eixo horizontal ou a eixo vertical. E quanto à fonte de calor, podem ser com fonte interna ou externa.

O movimento da corrente de ar ocorre segundo critério racional, adequando às várias condições físicas nas quais se encontra o ar durante a secagem. Na entrada de cada câmara, o ar tem uma temperatura superior à do ambiente, que se eleva e atravessa as estantes colocadas na primeira metade da câmara num sentido vertical, de baixo para cima. Pela ação secante exercida pela massa cerâmica, ocorrem um enriquecimento de umidade e um conseqüente resfriamento. Por isso, a massa gasosa produzida tende a descer. A abertura de descarga disposta sobre o assoalho favorece o andamento natural da corrente gasosa (corrente contrária) e evita qualquer paralisação do ar na câmara. Se a abertura de descarga encontrar-se na parte alta do secador, toda a carga que estiver abaixo da abertura do fluxo do fluido ficará em uma zona morta, onde boa parte do ar satura, com conseqüente condensação de vapor d'água.

As câmaras de secagem apresentam a vantagem de prestar-se às regulagens de temperatura e do estado higrométrico de forma bastante precisa, podendo introduzir ar frio no circuito. Porém, não evitam graves inconvenientes devido à falta de uniformidade das condições de secagem na câmara. De fatos, as peças situadas próximas à abertura da entrada de ar recebem uma ação secante bem mais acentuada que aquelas colocadas na parte oposta da câmara, próximas ao fluxo de ar úmido.

Alguns tipos de erros cometidos nesse tipo de secador: a injeção de ar frio no começo da operação é muito comum, o que é desaconselhável. O frio fecha a superfície da peça, provocando a aproximação do grão argiloso, retardando o processo de secagem. No início da secagem, deve-se adicionar ar quente, deixando a atmosfera rica em umidade e calor, o que provoca a abertura de passagens micro-capilares no interior da peça, facilitando a saída de água, permitindo uma maior velocidade de secagem.

A introdução de ventilação nesse tipo de secador deve ser após o preparo da peça através do ar quente. Não existe um tempo predeterminado, já que cada peça tem um tamanho e uma geometria e, portanto, sua dificuldade específica para a eliminação da água interna. Deve-se usar o bom senso para analisar todo tipo de peça, mantendo-se aberta apenas a porta de entrada. A ausência de portas prejudica o processo de secagem. A entrada de ventilação pela porta é prejudicial ao processo de secagem, já que o ar quente se dispersa indo para o teto da câmara, tornando a secagem mais lenta e deficiente. Quanto ao consumo de eletricidade, não há muitas diferenças em relação ao consumo em secadores contínuos, mostrado em detalhe mais adiante.



Figura 4 - Secadores estáticos

Fontes: <http://tinyurl.com/jp9yn5y> // <http://tinyurl.com/jp9yn5y> (2015).

3.2 -Secadores contínuos

O secador contínuo ou tipo túnel assegura, graças ao movimento das peças (em vagonetas ou esteiras) em contracorrente com a massa de ar quente, uma secagem completa e uniforme. São equipamentos de tecnologia tradicional, também denominados secadores longitudinais, formados por galerias percorridas em toda sua extensão por trilhos deslocando-se lentamente de uma extremidade a outra. No sentido oposto, move-se a massa de ar quente que absorve a umidade evaporada na secagem, transportando-a pela ação de ventiladores até próximo à extremidade de entrada das vagonetas. Nos últimos anos, vem encontrando crescente espaço no mercado os secadores contínuos transversais, que estabelecem fluxos verticais de ar quente no sentido descendente, mormente usados para a produção de peças mais específicas, como as de paredes finas ou geometrias mais complexas. Já para blocos perfurados, transportados em vagonetas, usam-se, em geral, os secadores do tipo longitudinal com ventiladores de mistura exteriores e extratores para uma boa ventilação no cerne da carga.

Em termos gerais, um secador túnel contínuo pode ser longitudinal ou transversal, com vagonetas ou esteira, com ou sem ventilação interna de mistura de ar, sendo a mesma contínua ou alternada, tudo dependendo do tipo predominante de produto fabricado.

No início do processo de secagem, o material encontra-se inicialmente úmido quando encontra o ar quente. À medida que as vagonetas avançam, o material das peças torna-se mais quente e seco e, portanto, em condições de receber quantidades sempre maiores de calor. As vagonetas avançam em intervalos determinados. Sempre que

entra uma vagoneta, ocorre a saída de outra. Além das vantagens obtidas da aplicação de um ciclo de trabalho contínuo, evita-se manipular demais as peças, como ocorre nos secadores intermitentes. O ritmo de operação é contínuo e regular, dia e noite, envolvendo, em certos casos, a operação em fins de semana. Por outro lado, mesmo que contínuo no tempo, os ritmos de introdução e extração das peças podem ser diferenciados e corresponder ao ritmo de produção de cada turno de trabalho e aos períodos de repouso da produção (madrugada e fim de semana).

Os secadores contínuos são caracterizados por uma distribuição fixa, no tempo e no espaço, das condições termohigrométricas e do próprio produto, no seu percurso entre a entrada e a saída (em geral, de 50 a 100 metros em 15 a 50 horas), o que pode encontrar variações graduais de condições de secagem, por exemplo, considerando variações na umidade da carga ou das condições atmosféricas. Apesar de não operarem em contracorrente, são também enquadrados nessa categoria os secadores rápidos, com tempos de secagem de 1 a 5 horas, tempo menor que um turno de trabalho.

O comprimento do túnel deve ser adequado ao diagrama de secagem específico para cada tipo de produto. As melhores condições serão realizadas se em cada ponto do túnel a temperatura e o estado higrométrico corresponderem àquele representado no diagrama previsto para a secagem, porém as frequentes manobras de portas para ingresso e retirada de vagonetas faz com que os valores das características físicas da atmosfera interna do secador sofram mudanças que podem desestabilizar o processo de secagem.

Além disso, o sistema de contracorrente provoca a saída do ar quase saturado no ponto de ingresso da carga. As condensações do vapor d'água são inevitáveis, devido à condição higrométrica do ar devido à umidade absorvida do produto que entra. A entrada do secador deve conter uma umidade da ordem de 85%. Este ambiente saturado acelera o processo de retirada de água do produto. Para que se faça uma secagem rápida e eficiente, é preciso abaixar a viscosidade da água contida no produto. Quanto mais eficiente for esta retirada, maior será a velocidade de secagem.

O ciclo de secagem, tempo de efetiva permanência do produto no interior do secador, desde o começo da evaporação até a secagem final, deve considerar uma margem de segurança em termos de previsão de produção que considere o descarte de peças (quebras, deformações, falta de uniformidade etc.), o que dependerá da matéria-prima e suas condições físico-químicas, da geometria da peça (espessura de septos e quantidade de furos), suportes e afastamento das peças, comprimento do percurso de

ar de ventilação, eficácia das máquinas de ventilação etc. Todas essas condições também irão interferir na velocidade de secagem. Assim, para produtos leves e matéria-prima magra, pode ocorrer um ciclo de secagem de 10 a 20 horas, enquanto que, num mesmo secador, para processar produtos espessos de matéria-prima gorda pode levar de 40 a 50 horas. Com esses dados, define-se a capacidade do secador, considerando-se que o número de carrinhos contidos no mesmo é igual ao número de carrinhos produzidos por hora, multiplicado pelo número de horas do ciclo.

O secador contínuo pressupõe a existência na empresa de um depósito (produtos secos) cuja capacidade depende do número máximo de carrinhos em comboio (produtos verdes). A soma dos carrinhos contidos dentro do secador e no depósito (verdes + secos) constitui um parâmetro importante da avaliação do custo dos carrinhos e da superfície necessária de produção. Destaca-se que os produtos secos devem ser mantidos em local distinto dos produtos verdes de modo a evitar a reabsorção de umidade.



Figura 5 - Secadores Contínuos

Fonte: <http://tinyurl.com/glk9hze> (2005).

Um secador tipo túnel possui três zonas distintas de operação:

Zona úmida

Localizada na entrada do secador, onde a umidade deve permanecer em 85%, com temperatura por volta de 45 °C. Nesta zona, o produto é preparado para receber a secagem. São criados caminhos micro-capilares no interior da peça por onde a água migrará para a superfície. Quanto mais eficiente for a formação dessas passagens, mais rápida será a secagem.

Zona neutra

Localizada geralmente no meio do secador, quando bem regulado, neste período a peça cerâmica sofre uma pequena retração até a entrada da zona seca. Geralmente, a temperatura permanece por volta de 50 °C.

Zona seca

Localizada do meio até o final do secador, onde a percentagem de umidade cai de modo drástico para até 2%. É comum encontrar-se secadores com temperatura final por volta de 70 °C, onde falta energia térmica para secar o produto de forma plena. Nesta zona, a temperatura deve ficar por volta de 100 °C, para que o processo se dê por completo. Mesmo nessa temperatura, ainda permanece no interior da peça cerâmica umidades residuais da ordem de 4%, que somente sairá na fase de queima.

O ar quente de alimentação é introduzido em maior quantidade na zona mais seca e quente do secador, onde conservam altas diferenças psicrométricas das misturas; a parte remanescente é injetada em diversos pontos regularmente distanciados no sentido longitudinal, para distribuir em zonas com maior umidade e mais elevados poderes secantes locais. Já o ar de extração é retirado pela extremidade de ingresso dos produtos e forma então um fluxo longitudinal ao secador com direção das velocidades perpendiculares aquelas da *recirculação*, obtendo-se componentes das velocidades oblíquas à disposição dos furos dos produtos processados. Se tais aspectos tornam-se importantes (seções transversais estreitas e baixas temperaturas do ar de alimentação), necessitando de quantidades elevadas de ar, as ações *fluidodinâmicas* e térmicas se desenvolvem de forma predominante na periferia dos produtos, mais que no interior dos furos, caso dos produtos com elevado percentual de vazios. Sob este aspecto, são preferíveis as unidades móveis de ventilação que aproveitam durante a translação fortes velocidades de saída, dirigindo-as para as zonas parciais e sucessivas dos produtos com frequência rítmica.

Quanto ao tipo de ventiladores empregados, entre os secadores contínuos predominam os do tipo helicoidal, porém com arranjos diversos, conforme os modelos fabricados, predominando os seguintes tipos: ventiladores individuais fixos, ventiladores autodeslocáveis com hélices a eixo horizontal e unidade móvel de ventilação com eixo vertical.

Ventiladores individuais fixos

São equipamentos normais de série instalados em bateria e que também podem ser empregados em secadores estáticos. A produção em volume horário depende do diâmetro e da velocidade de rotação. Os volumes de recirculação por unidade variam de 7.000 a 25.000 m³, estabelecendo fluxo e velocidade fixos que podem gerar pouca uniformidade de ventilação, o que deve ser corrigido com o tipo de arrumação da carga e colocação de defletores para redirecionamento da corrente, o que tende a causar perdas de carga em função de muitas chicanas.

A introdução de ar quente é efetuada ao lado dos ventiladores e se torna mais eficaz se distribuída na periferia para obter uma boa mistura, o que pode ser facilitado pelo posicionamento fixo dos ventiladores.

Ventiladores autodeslocáveis com hélices a eixo horizontal

Neste arranjo, os ventiladores móveis são dispostos ao longo do corredor central nas linhas de depósito de material, deslocando-se de forma automática nos dois sentidos dentro de seu espaço de operação em determinado trecho longitudinal. A velocidade média de saída do ar das hélices varia, em geral, de 10 a 11 m/s para hélices de pequeno diâmetro e alta rotação e de 5 a 6 m/s para diâmetros da altura interna do secador. A eficácia da ventilação é assegurada pelo ritmo da ventilação, com altos impactos da corrente no breve período em que a unidade se encontra em frente a zona, com movimentos mais lentos e desordenados na mesma zona na fase seguinte. São dois os modelos principais deste tipo de sistema de ventilação:

- Unidades constituídas de uma só grande hélice estabelecendo fluxos de 150.000 a 350.000 m³/h, conforme o diâmetro; em cada fim de curso, as hélices invertem o movimento de translação e o sentido de rotação;
- Unidades constituídas de várias hélices sobrepostas com volumes totais acima de 30.000 m³/h, conforme o número de hélices e seu diâmetro. Além do movimento de translação alternado, este tipo de arranjo também gira em torno de seu eixo vertical.

Nos secadores dotados de unidades autodeslocáveis, o ar quente é alimentado pelo alto através de bocas reguláveis, dispostas ao longo do corredor central e sempre abertas. A mistura depende da capacidade de aspiração das unidades e da possibilidade de geração de turbulência dos repuxos de ar que saem das bocas de alimentação. Para melhorar a mistura, pode-se reduzir a temperatura do ar de alimentação, introduzindo-se maiores volumes, ainda que sob o risco de criação de turbulências danosas ao sistema de troca de calor e massa. Para a uniformidade da ação da alta velocidade sobre os vários planos horizontais, é necessário garantir que a quantidade de ar varie pouco ao longo da altura interna do secador.

Unidades móveis de ventilação com eixo vertical

São constituídas de uma ou mais hélices posicionadas na parte alta da unidade, girando com eixo vertical e com sentido do fluxo do alto para baixo. A corrente de ar produzida escorre em um tubo vertical e sai lateralmente por uma ou mais fendas sobre as paredes em toda a altura do depósito de produtos, com forte velocidade (10 a 12 m/s). Os principais modelos são: unidades fixas com tubo girante, unidades móveis que giram e unidades móveis e não girantes. A introdução de ar quente ocorre pelo alto através de bocas reguláveis. Para um mesmo volume de circulação, estas unidades apresentam um maior consumo de energia elétrica em relação às unidades com hélices livres.

Controle da umidade em secadores contínuos: O uso de termohigrômetro neste tipo de secador é obrigatório. Quanto mais controladas as zonas, maior será a eficiência de secagem. Deve-se evitar a colocação dos medidores de umidade e temperatura no teto do secador, porque a parte mais seca e quente do mesmo localiza-se justamente no teto. Os termohigrômetros devem ser colocados nas paredes laterais na altura da metade da vagoneta.

O controle da umidade relativa do ar determina a velocidade e a eficiência de secagem. Em alguns casos, é necessária a colocação de água no piso do secador para aumentar a umidade.

O canal de extração de umidade deve ter a mesma dimensão do secador para garantir a retirada de água do produto. É comum encontrar nos secadores diversos tamanhos e modelos de produtos (densidade) onde cada um responde com uma velocidade diferente de retirada de água.

A entrada de ar quente mais indicada é pelo teto do secador, forçando a umidade a baixar próxima a extração. A água só sai do produto quando a densidade e a viscosidade da mesma baixarem.

No caso da produção de blocos, deve-se evitar os secadores com mais de duas linhas. As vagonetas junto às paredes não secam de forma correta devido ao volume de massa existente na frente. Neste caso, o mais indicado é o de duas vias. Já no caso de telhas, as quatro vias são permitidas devido ao baixo volume de massa.

Outro fator importante na secagem é a velocidade dos ventiladores. Quanto mais alto o volume de ar gerado por eles maior será a velocidade de secagem. O sistema de ventilação varia de acordo com o projeto. Existem inúmeros tipos de ventilação com diferentes graus de eficiência. A seguir, alguns exemplos de ventilação forçada:

- **Sistema fixo (ventiladores axiais fixados nas paredes)** – em desuso, devido ao seu elevado custo energético, além de baixo rendimento volumétrico, centraliza a ventilação e um único ponto, provocando em muitos casos trincas indesejáveis. Requer uma quantidade elevada de ventiladores, aumentando o consumo de energia elétrica, com elevado investimento inicial e custo de manutenção (queima de motores). Este tipo de ventilação requer o dobro de ventiladores que o sistema autoviajante. Mesmo assim, não consegue a mesma eficácia dos sistemas circulantes.
- **Sistema autoviajante** – é o mais eficiente, sendo econômico e eficaz, embora alguns fabricantes exagerem na quantidade de ventiladores. Existem dois

tipos: de dois ventiladores e de um ventilador (“ventalão”). Este é mais econômico e eficiente, pois ventila a vagoneta toda com uma hélice. De fácil manutenção, possui geralmente hélice de fibra de vidro. Requer certo volume de ar das hélices, sendo necessário tomar cuidados na especificação da compra. Com ventiladores com hélices de altura das vagonetas, a ventilação se torna mais homogênea, acelerando o processo de secagem,



Figura 6 - Sistema autoviajante de secagem

Fonte : <http://tinyurl.com/jbvk4uw> (2013).

- **Sistema balancim** - é o mais eficaz entre os secadores mais usados no Brasil, secando as peças de forma individual. Elas são colocadas em grades do tipo bandeja e arrastadas por sistemas de correntes que levam as peças a cada setor de secagem com temperatura e umidade controladas, mantendo ciclos de secagem de 6 a 12 horas. Embora seja um secador eficiente, seu custo de operação é alto para os padrões brasileiros. É um sistema complexo e de manutenção cara, exigindo bom conhecimento técnico em secagem e manutenção.

Consumo de energia térmica em secadores contínuos

Os equipamentos contínuos de secagem costumam ser os de menor demanda térmica em função das seguintes razões principais:

- A descarga de ar úmido ocorre sempre na mínima temperatura possível e na máxima umidade relativa possível;
- Considerando que as condições higrométricas internas permanecem fixas no tempo e no espaço, os perfis de temperatura no interior das paredes do secador contínuo também não mudam, salvo em eventuais operações de partida ou desligamento do equipamento.

A seguir, um exemplo de balanço térmico de um secador contínuo em três condições diferentes de operação, relativas à variação das condições climáticas do ar ambiente (Condição A: 5°C com umidade relativa (UR) de 100%; Condição B: 10°C e UR de 80% e Condição C: 20°C com UR de 60%).

Características operacionais do secador contínuo:

- Relação superfície externa / água evaporada por hora: 1.650 m²/2.800 kg/h = 0,59 m²/kg/h;
- Relação peso de suporte / peso seco: 0,8.
- Umidade evaporada (kg) sobre o seco (kg): 0,225 kg/kg;
- Descarga do secador: 90% de umidade;

Tabela 2 – Dados operacionais do secador em três condições climáticas distintas

| Condição climática >> | Condição A | | Condição B | | Condição C | |
|---|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| Temp. descarga (°C) | 32,5 | - | 33,7 | - | 35,0 | - |
| Consumo térmico - kcal/kg H ₂ O | 903 | - | 850 | - | 765 | - |
| kg de ar/kg H ₂ O | 44 | - | 41 | - | 42 | - |
| Temp. máx. produtos (°C) | 50 | - | 51 | - | 52 | - |
| Temp. máx. Interna (°C) | 56 | - | 57 | - | 58 | - |
| Perdas chaminé - kcal/kg H ₂ O | 296 | 30,0% | 238 | 25,7 % | 154 | 18,7 % |
| Evaporação (kcal/kg H ₂ O) | 607 | 61,4 % | 612 | 66,0 % | 611 | 74,1 % |
| Calor produto-suportes kcal/kg H ₂ O | 62 | 6,3 b% | 56 | 6,0 % | 45 | 5,6 % |
| Perdas paredes - kcal/kg H ₂ O | 23 | 2,3 % | 21 | 2,3 % | 15 | 1,8 % |
| Consumo global - kcal/kg H ₂ O | 988 | 100,0 % | 927 | 100,0 % | 825 | 100,0 % |
| Consumo sobre seco - kcal/kg | 225 | - | 206 | - | 186 | - |

Fonte: Facincani (2002).

Os dados da **tabela 3** mostram a influência significativa das condições atmosféricas no desempenho térmico de um secador contínuo. Comparando-se as condições A e C, ocorre uma variação de 225 kcal/kg de produto seco para 186 kcal/kg, uma diferença de 21%, que se reflete na demanda térmica, custo operacional e emissões.

Consumo de energia elétrica em secadores contínuos

O consumo de energia elétrica em secadores contínuos é a soma dos consumos dos motores elétricos que funcionam no equipamento acionando os sistemas de recuperação do forno e alimentação do secador, a recirculação interna, a extração de ar úmido e a movimentação dos carrinhos e regulagens diversas. A maior participação no consumo elétrico se refere às máquinas de recirculação interna e as de alimentação, como pode ser visto nos dados a seguir:

Tabela 3 – Consumo específico de eletricidade por função no sistema.

| Função do sistema | Faixa de consumo específico de eletricidade (kWh/kg de água) |
|-------------------|--|
| Recirculação | 0,013 a 0,023 |
| Alimentação | 0,015 a 0,025 |
| Recuperação | 0,004 a 0,006 |
| Extração | 0,004 a 0,005 |
| Diversos | 0,002 a 0,005 |
| TOTAL | 0,038 a 0,064 |

Fonte: Facincani (2002).

Com dos dados da tabela anterior, verifica-se que, em média, 75% da demanda elétrica num secador contínuo se refere a alimentação e circulação de ar quente.

Considerando uma evaporação de 20% sobre o peso seco, o consumo total irá variar entre 7,6 e 12,8 kWh/t de produto seco (média de 10,2 kWh/t seco). Para uma indústria de cerâmica vermelha que produza 1.200 t/mês de material seco, o consumo elétrico de um secador contínuo, nas mesmas condições anteriores, seria de 12.240 kWh/mês.

Demanda de calor num secador contínuo

Num secador contínuo, a produção horária em peso de material seco ou em número de carrinhos, permanece a mesma para um mesmo tipo de produto, enquanto o depósito permanece como pulmão de reserva. A quantidade de água evaporada é constante no tempo, se mantidos o percentual de umidade da massa e o tipo da matéria-prima. Assim, a quantidade de calor necessário para a operação terá valor constante.

Em termos gerais, a demanda de calor do secador dependerá sempre do tipo de produto, fator mais influente, e ritmo de processamento da carga; do percentual de água a ser evaporada, referida a peso seco; e do consumo específico de calor do processo.

Em geral, um secador é dimensionado em função do tipo mais frequente de produto a ser produzido, baseado na produção diária e horária almejada e no ciclo mínimo previsto. Daí, dimensiona-se a demanda de calor e as quantidades de ar de alimentação e recirculação.

No caso de operação com carga mais leve que a usual, é possível um aumento do ritmo de introdução dos carrinhos no forno, admitindo-se uma redução no ciclo de secagem, o que atenuaria a diferença de necessidade de calor. Nas horas noturnas e nos fins de semana, o ritmo é regulado pelo número de carrinhos no depósito de material seco.

No caso da operação com material mais pesado que o usual, os ciclos de secagem devem ser alongados, o que pode ter limite pelo aumento da demanda térmica ou de ventilação além da capacidade da instalação.

No caso de operação do secador somente de segunda a sexta-feira, impõe-se uma considerável perda do calor de recuperação do forno, por falta de destinação, o que significa prejuízo e uma ação a ser evitada.

Desse modo, é preciso o estabelecimento de uma programação de operação do forno e do secador de forma a evitar-se a ocorrência referida, a saber: redução da marcha ou parada do forno no fim de semana; carregamento do secador com materiais pesados no fim de semana e aumento das zonas de depósito.

3.3 - Secadores semi-contínuos

Trata-se de um secador com recirculação interna de ar, similar ao contínuo quanto ao carregamento do produto sobre carrinhos e ao percurso dos mesmos no túnel, mas que se diferencia do contínuo pelo fato de que todos os carrinhos produzidos em um ou dois turnos de trabalho devem necessariamente ser introduzidos no túnel sem depósito de reserva. Portanto, o ritmo de avanço dos carrinhos é igual àquele da produção e durante as horas de repouso das máquinas, o funcionamento do secador semi-contínuo é similar ao do estático, com a importante diferença de que a descarga do ar é sempre na extremidade de ingresso dos carrinhos.

Em termos de funcionamento, o semi-contínuo se aproxima tanto mais do contínuo, quanto mais longos forem os turnos de produção e o ciclo de secagem. No caso inverso, é muito mais parecido com o estático.

Pertencem também a esta categoria os secadores a grandes volumes de ar, utilizados em localidades de clima quente, por que a temperatura do ar de alimentação pode ser igual ou pouco superior àquela do ambiente. Estes são diferentes dos semi-contínuos tradicionais pela ventilação em contracorrente e alguns outros aspectos.

3.4 - Secadores rápidos

Como secagem rápida, entende-se aquela obtida em contracorrente com duração de ciclo inferior a 5 horas. Secagem rápida significa grande velocidade de evaporação superficial e formação de elevados gradientes de umidade e retração na espessura do produto. Dependendo da espessura, a duração do ciclo pode variar. Com espessuras de 5 a 6 mm, é possível secar matérias-primas plásticas de maneira rápida, enquanto que com espessuras de 20 mm, nem mesmo uma matéria-prima magra e porosa permitiria uma secagem rápida. Outra exigência da secagem rápida é a ocorrência de percentuais de vazios nos produtos acima de 50%.

Duas outras condições devem ser satisfeitas para se obter uma boa secagem rápida:

- Altas velocidades do ar do secador (4 a 10 m/s) para obter suficiente velocidade no interior dos furos, para aumentar de forma adequada a vorticidade do ar, permitindo altos valores de coeficiente de transmissão de calor e massa, obtendo-se baixos índices de saturação devido ao elevado volume de ar;
- Distanciamento das peças no sentido do percurso do ar, permitindo atingir uma boa mistura dos veios na saída de uma fila de peças e uma boa repartição das temperaturas e umidades.

Em um secador rápido bem aproveitado, o comprimento define o ciclo de secagem, porém isso nem sempre ocorre, sobretudo em regimes de produção reduzida. A tendência é estender a superfície evaporante para a redução do perigo de rupturas, o que chama a atenção para a necessidade de elevação da velocidade de evaporação. Mantém-se fixo o coeficiente de transmissão com a manutenção das velocidades dos fluxos gasosos, enquanto se reduzem as diferenças psicrométricas atenuando a temperatura de ingresso. Com frequência, para atingir a maior superfície possível, introduz-se calor em pontos intermediários.

Os secadores rápidos ainda não são muito difundidos no Brasil, mas apresenta boas perspectivas de aumento de participação no mercado pela possibilidade de processar de maneira eficaz tanto produtos planos, como telhas, como blocos com perfuração vertical. Além disso, apresentam razoável simplicidade técnica, facilidade de operação, com velocidades de ar reguláveis em função do produto, e boa confiabilidade, além de baixo custo de operação (automatismo simples com apenas um motor de acionamento) e manutenção (ausência de motores elétricos na parte interna) e capacidades de produção usualmente na faixa de 250 a 1000 t/dia.

Tipos de secadores rápidos:

3.4.1 - Secadores a rolos

São formados de uma única galeria, monocamada, na qual os produtos avançam pela rotação de sucessivos rolos distribuídos em grupos de motorização separada, com roleira contínua da entrada até a saída da galeria. O produto é depositado em grupos de peças sobre a roleira na entrada e retomados sobre ela na saída. O comprimento efetivo de secagem é em geral de 100 metros e a largura varia com a capacidade produtiva. As capacidades de produção são da ordem de 7 a 10 t/h para uma largura da ordem de 4 metros. As larguras máximas são limitadas pelo volume de ingresso e pela flexão dos rolos, devido às distâncias de apoio.

Os ciclos de secagem são da ordem de 1 hora e a temperatura no ingresso é superior a 160°C e a de descarga, medida antes da mistura com o ar aspirado do lado da porta de ingresso, atinge 60 a 70°C. Diferenças psicrométricas assim elevadas são devidas a uma restrita superfície de troca de calor entre o ar e o produto. Em função das altas velocidades de fluxo (cerca de 10 mm/s), as perdas de carga no secador são da ordem de 100 a 120 mmCA. As quantidades de ar empregadas variam, em geral, entre 27 e 33 kg/kg de água evaporada. Para a aspiração se encontram quantidades maiores (20 a 35%) devidas ao ar parasita ou ao ar proveniente da abertura de saída do produto, mantida em depressão.

3.4.2 - Secadores de balança

São construídos com várias galerias paralelas e sobrepostas, pelas quais as balanças no final de cada galeria giram ao redor das rodas dentadas do reenvio para entrar na galeria sucessiva. O ar faz um percurso inverso. Para não interferir entre elas durante a rotação, as balanças devem estar distanciadas a intervalos. Os ciclos com secadores de balanças podem variar de 2,5 a 5,0 horas. As temperaturas na entrada ficam entre 100 e 120°C e na saída, entre 35 e 40°C, com velocidades do ar na faixa usual de 5 a 8 m/s. Os ciclos mais longos permitem melhor desempenho térmico por incorporar com menos impacto a perda de calor na estrutura.

As quantidades de ar empregadas variam, em geral, entre 25 e 28 kg de ar/ kg de água evaporada. As perdas de carga variam entre 0,4 e 0,5 mm de coluna de água por balança, com velocidade de 5 a 6 m/s e até 0,9 a 1,0 mmCA por balança para velocidades entre 8 e 9 m/s. As quantidades de ar na descarga, em relação aquelas introduzidas, são maiores em cerca de 15 a 20%.

3.4.3 - Secador talisca ou de esteira

Originário da Europa nos anos 50, chegaram ao Brasil há apenas poucos anos. O primeiro secador deste tipo no país foi construído em Flores (CE), na região de Russas. Tem sido a escolha de alguns ceramistas para a produção de blocos de vedação, telhas extrudadas, peças de laje e outros prensados, podendo operar com fonte calor própria (fornalha) ou recuperação de calor do forno. Funciona como um túnel, onde as peças a serem secadas são colocadas em único plano e transportadas através de esteiras em contracorrente em relação ao fluxo de ar quente insuflado a partir da saída do secador.

Este tipo de secador conta em sua parte superior (teto) com tubos de distribuição do calor por toda a área de secagem, onde, através de registros, são feitas as regulagens de volume de ar quente e, portanto, de quantidade de calor, ao longo do comprimento do equipamento, buscando atender o perfil de secagem exigido, ajuste que pode ser refinado com a regulagem dos flaps externos, que ajudam a direcionar melhor o calor para as peças. Apresenta secagem rápida, dispensa o uso de vagonetas e do automatismo de carga e descarga, reduz a mão de obra, apresentando baixa manutenção e baixo consumo de energia térmica, operando com temperaturas de trabalho no exaustor de 160 a 220°C e pressões internas de 10 a 17 mmCA.

Quanto às suas dimensões principais, apresentam comprimentos de até 120 m, larguras de 4 a 6 m e altura de 0,4 m, entre a talisca e o teto. A capacidade de produção pode variar de 10 a 20 t/h, dependendo da qualidade da argila, umidade de entrada (1 a 4%), umidade de saída (20 a 24%) e do comprimento do secador, com ciclos de 45 minutos (telhas extrusadas leves) a 3 horas (blocos de laje), segundo dados de alguns fabricantes nacionais. As potências elétricas totais envolvidas nos secadores de talisca costumam variar entre 110 e 140 cv, conforme a escala de produção, tipo de produto e de argila. Apresenta como inconveniente o razoável espaço requerido na planta de produção e demanda um estudo criterioso da argila empregada, pois trata-se de um ciclo rápido de secagem, exigindo alguns ensaios laboratoriais importantes, como a Curva de Bigot.

A seguir alguns exemplos de secadores taliscas ou de esteiras:



Figura 7 - Secador tipo talisca



Figura 8 - Funcionamento de um secador tipo talisca

3.4.4 - Outros tipos de secadores rápidos

O secador rápido a carrinhos está sob o mesmo princípio do secador de balanças, mas aqui os carrinhos deslizam sobre trilhos e seguem o seu percurso em galerias paralelas situadas no mesmo plano. Secadores com galerias a dois carrinhos unidos atingem a produção de 40 a 45 t/h de produto seco. Existe também o secador rápido com uma galeria e vários planos, onde o transporte do produto se dá em caixilhos com quatro rodas, que rodam sobre guias laterais e são carregados e descarregados por meio de um elevador de corrente.

Consumo de energia térmica em secadores rápidos

Os consumos térmicos mais elevados entre os secadores rápidos ocorrem nos secadores a rolos devido a elevada perda na chaminé e ao acúmulo térmico no material, mesmo considerando não haver a perda nos suportes. Os consumos específicos de calor ficam por volta de 1.200 kcal/kg de água evaporada, mas há casos frequentes que chegam a 1.600 kcal/kg. Uma adequada recirculação de ar úmido, observando a possibilidade de maiores condensações sobre o produto úmido, poderia reduzir o consumo.

Por outro lado, o secador a rolos permite uma alimentação direta com gás. Os menores consumos são obtidos com secadores que operam em ciclos de 3 a 4 horas, com integração de gases muito quentes, sendo bastante frequentes consumos específicos entre 900 e 970 kcal/kg de água evaporada. Nos dois casos referidos, as perdas nas paredes são baixas, considerando que a extensão superficial é pequena em relação à água evaporada por hora.

Nos secadores rápidos a rolos, os ciclos são de 50 minutos e uma hora e, nesse caso, os tempos de parada (10 a 20 minutos) podem ser relevantes em sua influência no desempenho e no consumo térmico. Com o emprego de secadores rápidos, torna-se necessário prever a operação da produção em três turnos durante o dia e de parar o forno ou reduzir o ritmo ao mínimo durante os fins de semana.

Consumo de energia elétrica em secadores rápidos

Nesse tipo de secador, as quantidades necessárias de ar para ventilação são menores que nos equipamentos tradicionais. Os consumos de energia elétrica podem ser divididos da seguinte forma:

Tabela 4 – Consumo específico de eletricidade por função no sistema.

| Função do sistema | Faixa de consumo específico de eletricidade (kWh/kg de água) |
|--------------------|--|
| Circulação interna | 0,008 a 0,013 |
| Alimentação | 0,007 a 0,009 |
| Recuperação | 0,004 a 0,006 |
| Extração | 0,004 a 0,005 |
| Diversos | 0,002 a 0,003 |
| TOTAL | 0,025 a 0,036 |

Fonte: Facincani (2002).

Da mesma forma que no caso dos secadores contínuos, analisado anteriormente, o consumo de energia elétrica nos secadores rápidos se concentra na alimentação e circulação de ar quente, neste caso, em cerca de 2/3.

Considerando uma evaporação de 20% sobre o peso seco, o consumo total irá variar entre 5,0 e 7,2 kWh/t de produto seco (média de 6,1 kWh/t seco). Para uma indústria de cerâmica vermelha que produza 1.200 t/mês de material seco, o consumo elétrico de um secador contínuo, nas mesmas condições anteriores, seria de 7.320 kWh/mês.

3.5 - Secadores a grandes volumes de ar

A idéia do aproveitamento da energia natural está na base da concepção dos secadores a grandes volumes de ar, considerando que se o ar não está saturado, há a possibilidade de absorver algumas gramas de umidade para cada quilo de ar, cedendo-se uma parte modesta do seu conteúdo térmico para a evaporação. O secador, adequado a produtos furados com percentuais de vazios acima de 50%, é formado de um túnel com carrinhos com carga e descarga semelhante ao de um secador semi-contínuo, com o ar circulando em contracorrente em relação ao produto.

São necessárias grandes quantidades de ar (250 a 300 kg de ar/kg de água evaporada) para fornecer o calor necessário para a evaporação de grandes massas de umidade de uma produção industrial.

Por outro lado, nada impede que este tipo de secador possa eventualmente contar com fontes auxiliares de calor, como a recuperação de gases de combustão do forno ou fornalhas próprias de aquecimento. Algumas dificuldades e desafios tendem a limitar o uso dos secadores a grandes volumes de ar:

- As condições ideais de operação ocorrem apenas quando a temperatura do ar ambiente supera 35 °C;
- Para regiões de clima mais frio, torna-se necessário prever ao lado do secador um túnel de retorno para que o produto possa passar em contracorrente com ar mais quente e chegar ao valor ideal de umidade residual.

As parcelas de consumo de energia elétrica nesse tipo de equipamento são menores em cerca de 50% que nos tipos tradicionais de secadores, ficando pouco acima do consumo específico de eletricidade dos secadores rápidos.

4 | Referências bibliográficas

FACINCANI, E., Tecnologia cerâmica: cerâmica estrutural. 1 ed em português / Tradução Geól. PEDRASSANI, J. , Gruppo Editoriale Faenza Editrice, São Paulo, 2002.

HENRIQUES JR., M.F., SCHWOB, M.R.V., FERREIRA JR., J.A.F., TAPIA, R.C., Manual de conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha, Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1993.

OLIVEIRA, A.A., Tecnologia em cerâmica, Editora Lara, Criciúma, 2013.