

ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO DE TROCADORES DE CALOR PARA RESFRIAMENTO DE GASES PROVENIENTES DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE CHUMBO

Cristiano Meneghini¹
Luan Meneghini²

RESUMO

Durante a fundição de chumbo ocorre a liberação de gases tóxicos os quais devem passar por um processo de filtragem. Esses gases saem do forno de fundição a uma temperatura média de 320 °C e percorrem um caminho passando por tubos e ciclones até chegarem nos filtros de manga, constituídos geralmente de poliéster ou polipropileno, que finalizam a filtragem. Esse material não suporta temperaturas superiores a 115 °C, que, quando ultrapassadas, causam queima e degradação dos filtros, perdendo sua funcionalidade. Assim, no presente trabalho teve-se como objetivo projetar um trocador de calor para resfriar os gases tóxicos provenientes do processo de fundição até a temperatura limite de 115 °C. O dimensionamento do trocador de calor considerou o método ΔT_{ML} , o qual contou com a criação de uma planilha iterativa no *software* Excel e o modelamento geométrico em *software* SolidWorks. O trocador projetado foi do tipo tubular, com 33,28 m² de área total de troca térmica, o qual tem a capacidade de remover 750,56 kW de carga térmica dos gases por meio de uma vazão de 12,93 m³/h de água. Com o término do trabalho, foi possível reduzir a temperatura desses gases com o trocador projetado aumentando a eficiência da filtragem dos gases tóxicos e também do ganho que se tem pelo aquecimento da água que deixa o trocador.

Palavras-chave: Trocador de calor. Análise de dimensionamento térmico.

1 INTRODUÇÃO

Os gases provenientes da fundição do chumbo são tóxicos e, se liberados para a atmosfera sem tratamento, causam sérios problemas de poluição, portanto, precisam passar por um complexo processo de filtragem. Tal sistema de filtragem é composto de uma trama de tubulações de transporte pneumático, ciclones e, por fim, os filtros de manga.

Os filtros de manga são constituídos de poliéster ou polipropileno, material que suporta uma temperatura máxima de 115 °C. Os gases que são liberados pela fundição do chumbo se encontram em temperaturas na faixa de 320 °C e, pelo fato de os filtros não suportarem a exposição a elevadas temperaturas, é comum ocorrer a degradação prematura deles, que resulta na liberação direta de gases tóxicos para a atmosfera, trazendo prejuízo ambiental.

Com base nessa problemática, tendo como principal referência Incropera e De Witt (2014), resolveu-se dimensionar um trocador de calor que possibilite reduzir as temperaturas dos gases a 115 °C a fim de evitar os incidentes causados pelas altas temperaturas dos gases, diminuindo custos de manutenção, paradas de produção e de prejuízos ambientais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Incropera et al. (2008, p. 2), transferência de calor é energia térmica em trânsito em razão de uma diferença de temperatura no espaço, ou seja, sempre que houver uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor.

¹ Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor na Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; cristiano.meneghini@unoesc.edu.br

² Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; luanmeneghini@hotmail.com

Conforme Incropera et al. (2008, p. 2), existem diferentes tipos de processos de transferência de calor, os quais são designados por modos. Quando existe uma diferença de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, usa-se o termo condução para se referir à transferência de calor que ocorrerá mediante o meio. Em contraste, o termo convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. O terceiro modo de transferência de calor é chamado de radiação térmica. Todas as superfícies com temperaturas não nulas emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, na ausência de um meio interposto participante, há a transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas. A Figura 1 mostra os modos de transferência de calor.

Incropera et al. (2008, p. 425) afirmam que o processo de troca de calor entre dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações de engenharia, sendo o equipamento usado para implementar essa troca conhecido como trocador de calor. Suas aplicações podem ser encontradas no aquecimento de ambientes e no condicionamento de ar, na produção de potência, na recuperação de calor em processos industriais e no processamento químico.

Incropera e De Witt (2014, p. 455) explicam, ainda, que para projetar um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor a grandezas como as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, ao coeficiente global de transferência de calor e à área da superfície total disponível para a transferência de calor.

Incropera e De Witt (2014, p. 455) aduzem que duas relações podem ser obtidas com a aplicação de balanços globais de energia nos fluidos quente e frio. Se q é a taxa total de transferência de calor entre os fluidos quente e frio, e a transferência de calor entre o trocador e a vizinhança é desprezível, bem como as mudanças nas energias potencial e cinética, a aplicação da equação da energia para processos contínuos em regime estacionário fornece

$$q = \dot{m}_q (h_{q,ent} - h_{q,sai}) \quad (1)$$

$$q = \dot{m}_f (h_{f,sai} - h_{f,ent}) \quad (2)$$

Sendo h a entalpia do fluido, os subscritos q e f se referem aos fluidos quente e frio, enquanto ent e sai designam as condições do fluido na entrada e na saída. Se os fluidos não passam por uma mudança de fase e se forem admitidos calores específicos constantes, essas expressões se reduzem a

$$q = \dot{m}_q . Cp_{,q} . (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (3)$$

$$q = \dot{m}_f . Cp_{,f} . (T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (4)$$

As temperaturas que aparecem nas expressões se referem às temperaturas médias dos fluidos nas localizações indicadas. Nota-se que as Equações 3 e 4 são independentes da configuração do escoamento e do tipo de trocador de calor.

Conforme Incropera e De Witt (2014, p. 455), o coeficiente global de transferência de calor U foi usado no lugar de um único coeficiente de transferência de calor h . Entretanto, como ΔT varia com a posição no trocador de calor, torna-se necessário trabalhar com uma equação para a taxa na forma

$$q = U . A . \Delta T_{ML} \quad (5)$$

Conforme Incropera e De Witt (2014, p. 458), o coeficiente global de troca térmica é determinado pela Equação 6, em que para tubos de parede fina o coeficiente de convecção interno é elevado (como no caso de escoamento de líquido) e o lado externo ao tubo está sujeito a um escoamento com temperatura elevada. De tal forma, tanto a convecção quanto a radiação são importantes, U é dado por:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{he + hr} \quad (6)$$

Nesta ΔT_{ML} é uma média apropriada de diferenças de temperaturas. Incropera e De Witt (2014, p. 456) concluem que a diferença de temperatura média apropriada é uma média logarítmica das temperaturas, ΔT_{ML} .

Neste trabalho o coeficiente de radiação não será calculado em razão da falta de instrumentação adequada para se determinar a concentração precisa de cada elemento químico que se faz presente nos gases. Entretanto, como mencionado por Bazzo (1995), esse coeficiente é da ordem de 10 W/m²°C e o valor que será utilizado no decorrer dos cálculos.

$$\Delta T_{ML} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (7)$$

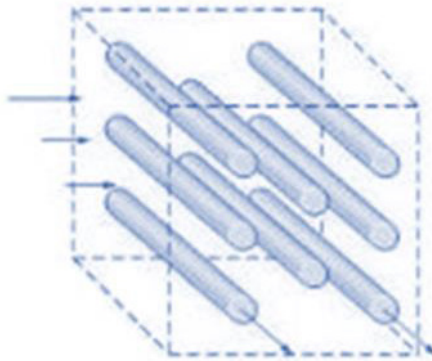
Em que,

$$\Delta T_1 = T_{q, ent} - T_{f, sai} \quad (8)$$

$$\Delta T_2 = T_{q, sai} - T_{f, ent} \quad (9)$$

Segundo Incropera e De Witt (2014, p. 296), a transferência de calor a partir de um feixe de tubos em um escoamento cruzado é relevante em numerosas aplicações industriais. O arranjo geométrico é mostrado esquematicamente na Figura 1. Tipicamente um fluido se move sobre os tubos enquanto um segundo fluido, a uma temperatura diferente, escoava no interior deles.

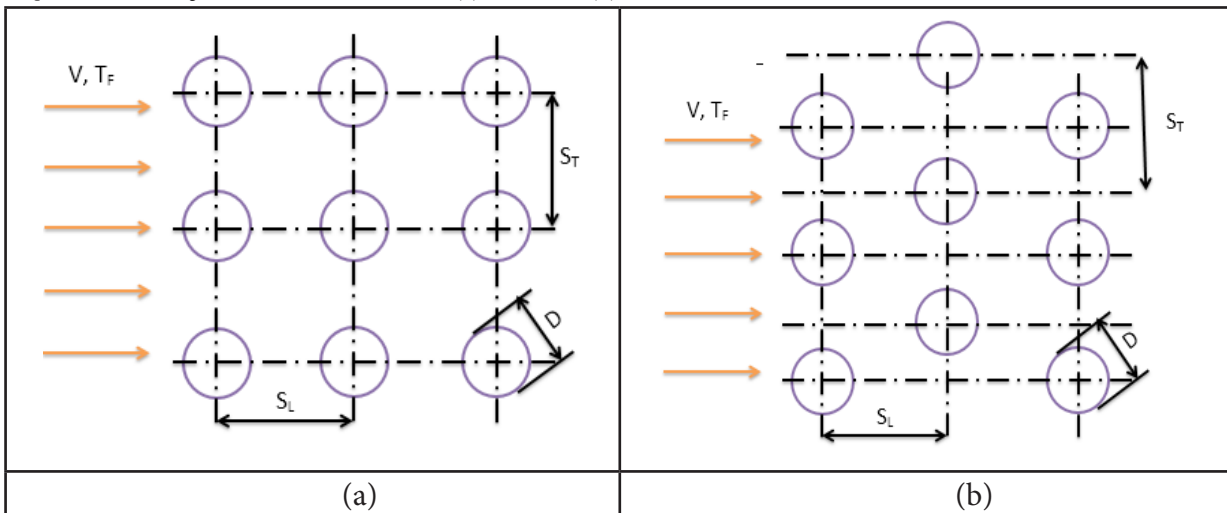
Figura 1 – Esboço de uma matriz tubular em escoamento cruzado



Fonte: adaptada de Incropera e De Witt (2014, p. 297).

De acordo com Incropera e De Witt (2014, p. 296), as filas de tubos em feixe tubular podem estar alinhadas ou alternadas na direção da velocidade do fluido V , conforme o Esquema 1. A configuração é caracterizada pelo diâmetro dos tubos D , e pelos passos transversal S_T e longitudinal S_L , medidos entre os centros dos tubos.

Esquema 1 – Arranjo dos tubos em um feixe: (a) Alinhado, (b) Alternado



Fonte: adaptado de Incropera e De Witt (2014, p. 297).

Tipicamente, deseja-se conhecer o coeficiente de transferência de calor externo, que em caso de projeto de trocadores de feixe tubular pode ser considerado o coeficiente global de troca térmica entre os fluidos, determinado pela Equação 10.

$$h_e = \frac{k}{d} * Nu \quad (10)$$

Conforme Incropera e De Witt (2014, p. 297), o número de Nusselt é determinado por meio dos números adimensionais de Reynolds (Re) e Prandtl (Pr), conforme a Equação 11.

$$Nu = C1 * Re^m * Pr^{0,36} \quad (11)$$

Mas a relação somente é válida para as dadas situações:

- a) Número de fileiras > 20;
- b) $0,7 < Pr < 500$;
- c) $1000 < Re < 2000000$.

Os valores das constantes $C1$ e m para a Equação 11 dependem das configurações do trocador e também do número do Reynolds.

De acordo com Incropera e De Witt (2014, p. 298), o número de Reynolds Re é baseado na velocidade máxima do fluido presente no interior do feixe tubular, sendo determinado pela Equação 12.

$$Re = \frac{\rho * V_{m\acute{a}x} * d}{\mu} \quad (12)$$

No arranjo alinhado, $V_{m\acute{a}x}$ ocorre no plano transversal, e, a partir da exigência de conservação da massa em um fluido incompressível, obtém-se a Equação 13.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{ST}{ST - d} * V \quad (13)$$

Conforme Incropera e De Witt (2014, p. 260), o número de Prandtl é a razão entre as difusividades de momento e térmica, como mostra a Equação 14. Nela, μ é a viscosidade dinâmica, Cp é o calor específico e k é a condutividade térmica do fluido.

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{k} \quad (14)$$

3 METODOLOGIA

O dimensionamento do trocador de calor foi determinado pelo método ΔT_{ML} especificado por Incropera e De Witt (2014), que traz todos os procedimentos de cálculo os quais devem ser realizados para projetar um trocador de calor.

Conhecendo os requisitos do projeto em que os gases saem do forno a 320 °C e devem chegar nos filtros com temperaturas até 115 °C e possuem uma vazão de 18000m³/h, inicia-se o dimensionamento do trocador. Consideraram-se as propriedades termofísicas do ar que se assemelham com os gases resultantes da fundição de chumbo, visto que gases no geral possuem propriedades muito semelhantes e não se têm métodos para determinar com exatidão as concentrações de cada elemento químico presente em tais gases.

As equações descritas por Incropera e De Witt (2014) foram compiladas em *software* Excel, em que a planilha desenvolvida autocalcula a capacidade do trocador de calor, conforme se altera qualquer variável envolvida no cálculo. Assim, pode-se conhecer e analisar qual é a influência da alteração de cada variável no resultado final do projeto.

Também foi obtido um desenho em *software* CAD para facilitar o entendimento de seu funcionamento, bem como para se conhecer o peso teórico do trocador a fim de se dimensionar sua sustentação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir de diversas interações com a planilha desenvolvida foram estipulados como dados de entrada as principais dimensões que o trocador deveria ter, bem como o diâmetro dos tubos que compõem o feixe tubular e também seus espaçamentos. Esses dados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões principais do trocador de calor

	Comprimento	1000 mm
Largura		800 mm
Altura		800 mm
Diâmetro dos tubos		12,7 mm
S _T		27,7 mm
S _L		27,7 mm

Fonte: os autores.

As dimensões principais do trocador de calor também foram definidas, o que levou à necessidade do conhecimento das condições das substâncias envolvidas na troca térmica, como temperaturas de entrada e saída, vazão volumétrica das substâncias, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de entrada

Temperatura entrada gases	320 °C
Temperatura saída gases	115 °C
Temperatura entrada água	25 °C
Temperatura saída água	75 °C
Vazão de gases	18000m ³ /h

Fonte: os autores.

Mediante as médias das temperaturas entre entrada e saída de cada fluido, pode-se determinar as propriedades termofísicas médias, mostradas na Tabela 3, e que serão usadas no dimensionamento do trocador de calor.

Tabela 3 – Propriedades termofísicas

Propriedades termofísicas – água	Propriedades termofísicas – ar
$C_p = 1,028 \text{ kJ/kg.K}$	$C_p = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$
$\rho = 0,7111 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1,00 \text{ kg/m}^3$
$\mu = 2,66 \text{ E-05 Pa.s}$	$\mu = 8,55 \text{ E-04 Pa.s}$
$k = 4,01 \text{ E-02 W/m.K}$	$k = 6,13 \text{ E-01 W/m.K}$

Fonte: os autores.

Com base nos dados de entrada, a planilha é capaz de fornecer diversos parâmetros que são importantes em um projeto de trocador de calor, os quais são mostrados a Tabela 4. Como resultados, constatou-se que uma área de troca térmica de $33,28 \text{ m}^2$ é suficiente para atender à demanda de retirar a carga térmica dos gases tóxicos provenientes do processo de fundição de chumbo. Pode-se ressaltar, também, que o coeficiente de convecção obtido é resultado direto da alta velocidade de escoamento dos gases pelo feixe tubular, que está diretamente relacionado ao valor de Reynolds considerado no cálculo de coeficiente de convecção para o caso.

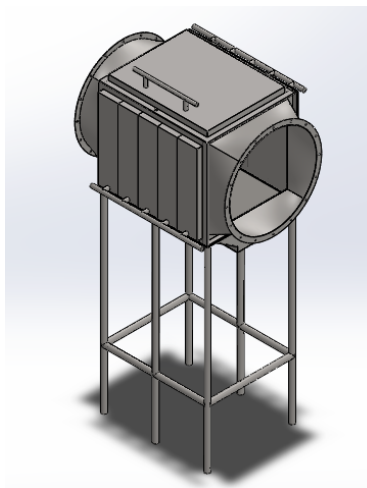
Tabela 4 – Parâmetros resultantes

Número de tubos	1043 tubos
Área da seção transversal fria	$0,077 \text{ m}^2$
Área de troca térmica	$33,28 \text{ m}^2$
Carga térmica gases	$749,29 \text{ kW}$
ΔT_{ML}	$154,78 \text{ }^\circ\text{C}$
ΔT_F	$143,94 \text{ }^\circ\text{C}$
V máx gases	$14,42 \text{ m/s}$
he	$156,68 \text{ W/m}^2\text{K}$
Nusseldt	49,68
Reynolds	4890,60
Prandtl	0,6838
Capacidade do trocador	$750,56 \text{ kW}$
Vazão água	$3,59 \text{ Kg/s (12,93 m}^3\text{/h)}$

Fonte: os autores.

O Desenho 1 mostra uma vista isométrica da montagem, em *software* CAD, do trocador de calor projetado. Este será construído quase na sua totalidade por meio de juntas soldadas e utilizará Aço SAE 1020 em decorrência da boa soldabilidade que o material apresenta e do seu baixo custo.

Desenho 1 – Vista isométrica da montagem do trocador de calor



Fonte: os autores.

5 CONCLUSÃO

Como os gases provenientes do processo de fundição de chumbo estavam em temperaturas elevadas, cerca de 320 °C, a etapa de filtragem formada pelos filtros de manga, compostos principalmente por poliéster ou polipropileno, tendia a ser ineficiente e muitas vezes nem exercia sua função em decorrência da degradação das mangas que ocorria muito prematuramente pela exposição às temperaturas que elas não suportavam.

Com base em tal problemática, discutiu-se a intenção de resolvê-la com o dimensionamento de um trocador de calor que possibilite reduzir as temperaturas dos gases para 115 °C, temperatura limite de trabalho das mangas, a fim de evitar os incidentes causados pelas altas temperaturas dos gases, diminuindo custos de manutenção e paradas de produção.

Para tal propósito, foi preciso trabalhar no dimensionamento do tipo de trocador de calor mais adequado para o processo e que se enquadre no *layout* disponível na empresa para instalação, de modo que sejam avaliados os requisitos principais, como dimensionamento térmico e estrutural dele. O projeto do trocador de calor utilizou diversas equações de projeto térmico, as quais foram resolvidas com o auxílio do *software* Excel.

O objetivo com o presente trabalho foi alcançado, que era projetar um trocador de calor para resfriar os gases provenientes do processo de fundição de chumbo, propondo uma configuração que reduzisse a temperatura dos gases para 115 °C suportando uma vazão de 18000m³/h de gases. Também foi modelado geometricamente o trocador em *software* CAD a fim de se ter uma concepção do produto final.

Portanto, com a implantação do trocador de calor no processo de filtragem dos gases não ocorrerão mais problemas com a elevada temperatura dos gases nos filtros de manga, evitando, assim, sua degradação e contribuindo para um processo de filtragem mais eficiente.

Analysis of the dimensioning of heat exchangers for cooling of gases from the leading casting process

Abstract

During the casting of lead, the release of toxic gases that must undergo a filtration process. These gases leave the melting furnace at an average temperature of 320 °C and run a path through tubes, cyclones until they reach the sleeve filters, generally made of polyester or polypropylene, which ends the filtration. This material does not withstand temperatures above 115 °C, which when burned out causes burns and degradation of the filters, losing their functionality. Therefore, the present work has the objective of analyzing and designing a heat exchanger to cool the toxic gases from the smelting process in order to cool them to the limit temperature of 115 °C. The dimensioning of the heat exchanger took into account the ΔT_{ML} method, which included the creation of an interactive spreadsheet in Excel software and geometric modeling in SolidWorks software. The designed exchanger was of tubular type, with 33.28 m² of total area of thermal exchange, which has the capacity to remove 750.56 kW of thermal load of the gases through a flow of 12.93 m³/h of water. It is then concluded that it is possible to reduce the temperature of these gases with the designed exchanger by increasing the filtering efficiency of the toxic gases and by the gain obtained by heating the water leaving the exchanger.

Keywords: Heat exchanger. Thermal analysis.

REFERÊNCIAS

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. rev. e ampl. Florianópolis: UFSC, 1995. 216 p.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 672 p.

