

Dimensionamento de um Sistema de Ventilação Local Exaustora Aplicado ao Processo de Fundição de alumínio

Daniel Júnio Figueiredo Soares¹, Mateus Ferreira Veloso¹,
Ana Flávia Silva Aguiar¹, Wellington Marcos Gomes Rodrigues¹, Micael Aloísio
Lourenço Ruas¹, Tiago Mendes¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil
(daniel.soares@ufvjm.edu.br)

Resumo: Durante a fundição de alumínio, há liberação de monóxido de carbono que prejudica a saúde dos trabalhadores. Visando manter os níveis desse gás conforme a NR-15, neste trabalho é dimensionado um exaustor. Para isso, foi calculada a vazão e a perda de carga total para a seleção do ventilador adequado. Pelos resultados encontrados, foi selecionado o ventilador centrífugo modelo LMS-500. Assim, o sistema projetado é capaz de garantir boas condições no ambiente de trabalho.

Palavras-chave: Fundição de alumínio; monóxido de carbono; saúde dos trabalhadores; NR-15; exaustor.

INTRODUÇÃO

Estima-se que grande parte da população passe cerca de 90% do seu tempo em ambientes fechados, seja em casa, no trabalho ou nas escolas (Isaiq-Cib Tg42, 2004). A qualidade do ar em ambientes fechados tem sido motivo de pesquisa em todo o mundo devido aos danos causados quando em má qualidade e, em virtude do aumento da industrialização em todo o mundo, principalmente a partir da segunda metade do século passado, muitos estudos foram realizados nessa área e foi possível relacionar os índices de poluição interna com efeitos adversos à saúde (Gioda e Neto, 2003).

O complexo metal mecânico é um setor de grande representatividade na economia do país, porém, alguns processos inseridos neste setor, como a usinagem e a fundição, são objetos de preocupação quando trata-se da qualidade do ar do ambiente interno e da saúde dos funcionários. A exposição à temperatura elevada, umidade alta e contato com o fluido de corte seja em sua forma líquida ou gasosa, são consequências às quais os trabalhadores estão expostos, nos setores de fundição e usinagem respectivamente, e podem afetar a qualidade do ar interior, e a produtividade no ambiente de trabalho (Teixeira, 2007). No setor metal-mecânico os processos que podem liberar poluentes são diversos e, dentre eles, podemos citar processos de fundição.

Nesse contexto, destaca-se a escória de alumínio, um resíduo gerado durante o processo de fundição, quando o alumínio fundido reage com o oxigênio, formando óxidos na superfície do metal. Além desses óxidos, a escória também pode conter alumínio metálico, óxido de magnésio, carbonetos e nitretos de alumínio (Shinzato; Hypolito, 2004).

A implantação de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) no setor metal-mecânico torna-se imperativa para garantir a saúde e segurança dos trabalhadores expostos a contaminantes gerados nos processos de fundição e usinagem. Além disso, conforme a NR-15, itens 15.1.1 e 15.1.3, ambientes com concentração de contaminantes acima dos limites de tolerância são classificados como insalubres de grau máximo, o que exige controle rigoroso dos níveis de exposição ocupacional (ABNT, 2008).

A escória de alumínio, em particular, além de afetar a composição química do ambiente, compromete o rendimento e a confiabilidade dos sistemas de exaustão, exigindo soluções de engenharia específicas para seu manuseio e remoção (Shinzato; Hypolito, 2004). Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver um projeto de VLE que atenda às normas técnicas vigentes (ACGIH, 2019; ABNT, 2008), reduza os riscos à saúde e proporcione eficiência energética e operacional ao processo de fundição.

A ventilação Local Exaustora (VLE) é uma técnica disponível e bastante efetiva para controle da poluição do ar em ambientes de trabalho e mesmo em ambientes residenciais e de lazer. A VLE pode ser definida como a movimentação intencional do ar, de forma planejada, com intuito de atingir um determinado objetivo (Assunção, 1999).

A VLE possibilita a captação dos poluentes diretamente na fonte de emissão, evitando a dispersão dos mesmos no ambiente de trabalho. De acordo com Assunção (1999), os principais componentes constituintes de um sistema de ventilação e suas definições são:



- **Captore**s - São os pontos de entrada dos poluentes mais gás carreador no sistema, sendo o gás carreador o ar ou fluido com propriedades próximas ao ar atmosférico.
- **Dutos** - São as estruturas que transportam o fluido carreador dos poluentes e podem ser divididos em dutos principais, ramais, tramos e chaminés.
- **Equipamentos de controle de poluição (ECP)** - O equipamento de controle da poluição do ar é destinado à limpeza do ar exaurido antes do seu lançamento na atmosfera, incluindo tudo o que é necessário para o seu funcionamento, como por exemplo, trocadores de calor e coletores. O tipo de eficiência destes equipamentos dependerá de um conjunto de fatores, como: tipos de poluentes, toxicidade de poluentes, tamanho das partículas, normas locais de controle de poluição e localização da indústria.
- **Conjunto de ventilador-motor** - Conjunto que fornece energia necessária para movimentar o fluido e vencer todas as perdas de carga do sistema.
- **Chaminé** - é a parte final do sistema cuja finalidade é o lançamento do gás carreador mais a emissão residual na atmosfera.

A eficiência do sistema de VLE está diretamente relacionada com o correto dimensionamento dos componentes, caracterização do tipo de poluente, da velocidade de captura, posição do captor em relação à fonte e da manutenção periódica dos equipamentos. Para definir as propriedades do fluido é comum o uso de equações da mecânica dos fluidos para o cálculo da perda de carga, da vazão e da velocidade nos dutos (Lee e Strasman, 2016).

Além disso, normas como a NR-15 (Atividades e Operações Insalubres) e a NR-9 (PPRA) estabelecem diretrizes legais para o uso da VLE como forma de prevenção à exposição ocupacional. A adoção de um sistema de ventilação bem projetado contribui para o atendimento às exigências de saúde e segurança do trabalho, além de aumentar a eficiência operacional e reduzir passivos ambientais (ABNT, 2011).

Tipos de Poluentes

As substâncias emitidas nos ambientes de trabalho podem estar na forma de partículas sólidas ou líquidas (aerossóis) ou na forma gasosa (gases e vapores) ou na forma mista. A forma como a substância é emitida é importante do ponto de vista de ventilação e toxicológico. Assim, partículas (maiores que 40 micrômetros) se depositam logo após a emissão e não representam em geral um problema de saúde ocupacional. A inércia das partículas maiores também é um fator importante do ponto de vista aerodinâmico e deve ser levado em consideração quanto a um projeto do sistema de captação e transporte (Costa, 2005).

Dentre as partículas pequenas destacam-se aquelas de diâmetros menores que aproximadamente 10 micrômetros que são consideradas respiráveis. Quanto menor a partícula, maior é a probabilidade de entrar no aparelho respiratório humano e causar danos de acordo com a toxicidade da partícula. Alguns dos principais poluentes são: Poeiras – Aerossóis formados por dispersão é constituído por partículas sólidas, geralmente menores que 1 micrômetro. Fumos – Aerossóis formados pela condensação, sublimação ou reação química e constituídos por partículas sólidas, geralmente com diâmetros menores que 1 micrômetro. Fumaça – Aerossóis resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos, geralmente com diâmetros menores que 1 micrômetro. Existem também no ar partículas de organismos vivos de interesse para a ventilação tais como fungos, vírus, pólen entre outros (Costa, 2005).

Para locais expostos a emissões de poluentes resultantes de processos de fundição, os itens 15.1.1 e 15.1.3 da NR-15 classifica-o como ambiente insalubre de grau máximo. Dessa forma, o sistema de exaustão deve garantir uma renovação eficaz do ar, assegurando níveis aceitáveis de exposição ocupacional conforme normas técnicas vigentes.

Poluentes Gerados Durante a Fundição de Alumínio

No setor metal-mecânico os processos que podem liberar poluentes são diversos e, dentre eles, podemos citar processos de fundição. Nesse contexto, destaca-se a escória de alumínio, um resíduo gerado durante o processo de fundição, quando o alumínio fundido reage com o oxigênio, formando óxidos na superfície do metal. Além desses óxidos, a escória também pode conter alumínio metálico, óxido de magnésio, carbonetos e nitretos de alumínio (Shinzato; Hypolito, 2004).

Durante o processo de fundição são liberados gases e partículas que tornam o ambiente local de trabalho insalubre de grau máximo, conforme previsto nos itens 15.1.1 e 15.1.3 da norma regulamentadora nº (NR-15). Diante disso, torna-se essencial a implementação de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) capaz de minimizar a exposição dos trabalhadores a contaminantes presentes no ar.

O presente trabalho possui como objetivo dimensionar, sob as normas brasileiras e internacionais, um sistema de ventilação local exaustora para um ambiente industrial de fundição de alumínio, visando manter os níveis de contaminantes dentro dos limites de exposição ocupacional.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do Sistema a Ser Dimensionado

Para o presente trabalho será abordado um contexto em que a fundição do metal ocorre em dois fornos do tipo cadinho, comumente utilizados em processos de fundição de alumínio com capacidade de 50 a 800 kg, modelo FEAL, fornecido pela empresa DJ Fornos Industriais.

O Sistema consiste em dois captosres iguais (captor 1 e captor 2) posicionados próximos a cada forno (forno 1 e forno 2), um ventilador, 6 tubulações (2 tubulações “a”, 2 tubos “b”, 1 tubo “c” e um tubo “d”), além e juntas e conexões do tipo curva e ‘T’ como mostra a Figura 01.

Sendo o comprimento de cada canalização:

- Tubulação “a”: 1 m;
- Tubulação “b”: 5 m;
- Tubulação “c”: 12 m;
- Tubulação “d”: 3 m.

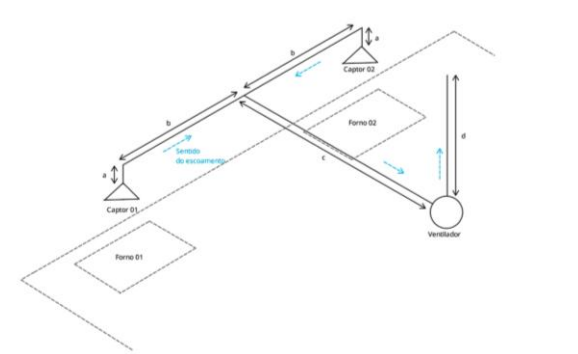


Figura 01. Esquema Ilustrado do Sistema de Ventilação. Fonte: Próprio Autor.

Dados de Entrada

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema consistiu na determinação da vazão de exaustão necessária em cada captor para manter o local seguro para trabalhadores, levando em conta a intensidade do processo e a taxa de liberação de poluentes pelos fornos.

Logo, os principais dados que são necessários para iniciar o dimensionamento do sistema de VLE são:

- Vazão ($Q_{vazão}$) necessária em cada captor (m^3/h);
- Velocidade mínima (V_{mim}) do fluido na tubulação (m/s);
- Coeficiente de perda de carga (K_{captor}) no captor;
- Coeficiente de perda de carga em cada conexão.
- Diâmetros de cada trecho de canalização, (m).

Cálculo da vazão em cada captor

De início, para calcular a vazão efetiva de ventilação ($Q_{vazão}$) (m^3/h) em cada captor, foi considerado a concentração limites de componente que é aceitável para a saúde humana. Dentre os principais poluentes emitidos no processo de fundição de alumínio destaca-se o monóxido de carbono (CO) e fumos.

Em relação à emissão de monóxido de carbono, a NR-15 define que a concentração limite tolerável é de 39 ppm e de acordo com a EPA (1992) o fator de emissão de monóxido de carbono (CO) para fornos *Plibrico Flue* (semelhante aos fornos do tipo cadinho) é de 0,064 kg de CO/mg de Al.

Considerando o forno operando com sua capacidade total de 800 kg de Alumínio. A geração de monóxido de carbono, em kg de CO/h é descrita pela Equação (01).

$$G = F \times M \quad (01)$$

Sendo,

- F o fator de emissão de monóxido de carbono, kg de CO/mg de Al;
- M a quantidade de material, Kg.
- G a geração de monóxido de carbono, Kg de CO/h.

Considerando o limite de tolerância de 39 ppm (39 mg/m³) para o CO, por meio da Equação (02) a vazão requerida para cada captor pode ser encontrada.

$$Q_{vazão} = G \times C \quad (02)$$

Sendo,

- $Q_{vazão}$ a taxa de remoção de cada captor, (m^3/h);
- G a geração de monóxido de carbono, (mg de CO/h);

Para emissões de fumos de alumínio não foram encontrados valores limites de tolerância especificados na NR-15. Logo a vazão encontrada pela Equação (02) será referente a apenas a vazão de sucção requerida em cada captor do sistema VLE de CO.

Cálculo da Vazão Total de Exaustão

Para determinar a vazão total, pode-se aplicar o princípio de conservação de massa ao sistema de ventilação, definindo um volume de controle adequado. No sistema analisado, esse volume abrange as tubulações “a” “b” e “c”, sendo “a” e “b” pontos de entrada onde ficam os captosres e a titulação “c” o ponto de saída do volume de controle (Figura 01).

Considerou-se o ar como um fluido incompressível, uma vez que o escoamento ocorre em baixa velocidade e sob pequena variação de pressão. Segundo Munson *et al.* (2013), para velocidades de escoamento abaixo de aproximadamente 100 m/s e em condições atmosféricas padrão as variações de densidade do ar são suficientemente pequenas para que o modelo de fluido incompressível seja aplicado com segurança. Além disso, White (2010) e Fox *et al.* (2012) reforçam que variações de pressão inferiores a 5% da pressão absoluta local raramente produzem mudanças significativas na densidade do ar, o que valida a aproximação.

Assim, com base nesses critérios e conforme Çengel e Boles (2013), pode-se aplicar a equação do balanço de massa para regime permanente e concluir que a equação da velocidade do fluido que percorre as tubulações redondas será dada pela Equação (03).

$$V = \frac{4 \times Q_{vazão}}{\pi \times D^2} \quad (03)$$

Dessa forma, a verificação da velocidade mínima em cada trecho do sistema depende da vazão local e do diâmetro interno da tubulação correspondente.

Para garantir o bom desempenho do sistema, a *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH, 2019) recomenda que, em processos de fundição, a velocidade mínima do ar nos dutos varie entre 3500 *fpm* (17,78 m/s) e 4000 *fpm* (20,32 m/s). A Figura 02 apresenta a tabela 3.2 extraída da ACGIH (2019) com recomendações de velocidade mínima para diferentes processos industriais.

TABLE 3-2. Range of Minimum Duct Design Velocities

Nature of Contaminant	Examples	Design Velocity
Vapors, gases, smoke	All vapors, gases, and smoke	Any desired velocity (economic optimum velocity usually 1000–2000 fpm)
Fumes	Welding	2000–2500
Very fine light dust	Cotton lint, wood flour, litho powder	2500–3000
Dry dusts & powders	Fine rubber dust, Bakelite molding powder dust, jute lint, cotton dust, shavings (light), soap dust, leather shavings	3000–4000
Average industrial dust	Grinding dust, buffing lint (dry), wool jute dust (shaker waste), coffee beans, shoe dust, granite dust, silica flour, general material handling, brick cutting, clay dust, foundry (general), limestone dust, packaging and weighing asbestos dust in textile industries	2500–4000
Heavy dusts	Sawdust (heavy and wet), metal turnings, foundry tumbling barrels and shake-out, sand blast dust, wood blocks, hog waste, brass turnings, cast iron boring dust, lead dust	4000–4500
Heavy or moist	Lead dusts with small chips, moist cement dust, asbestos chunks from transfer pipe cutting machines, buffing lint (sticky), quicklime dust	4500 and up

Figura 02. Velocidades mínimas recomendadas para diferentes processos industriais. Fonte: Adaptado de ACGIH (2019).

4.2.4 Dimensionamento dos Diâmetros das Tubulações

Após a determinação da vazão e da velocidade mínima recomendada para o fluido, torna-se necessário o

dimensionamento dos diâmetros das tubulações que atendam a vazão requerida em cada seção do sistema. Os valores de diâmetro externo podem ser obtidos por meio da Tabela B.9 da ABNT NBR 16401-1 (ABNT, 2008), que apresenta diâmetros para dutos circulares sem reforço. Os diâmetros internos são obtidos subtraindo-se a espessura da parede do duto, conforme especificado para o tipo de emenda.

Como referência para escolher o diâmetro externo, compara-se a velocidade real com a velocidade mínima recomendada. Caso a velocidade seja inferior, um novo diâmetro deve ser adotado e o processo repetido. O diâmetro externo que atende a velocidade mínima de 17,74 m/s para as tubulações “a” e “b” foi de 0,150 m e para as tubulações “c” e “d” foi de 0,200 m.

A espessura da parede (e), considerando emenda longitudinal para até 2500 Pa de pressão positiva, conforme Tabela B.9 da ABNT (2008), é de 0,00048 m. Assim, o diâmetro interno é dado pela Equação (04).

$$D_{int} = D_{ext} - 2e \quad (04)$$

Em seguida foi verificado se o diâmetro atendeu a velocidade mínima requerida.

Cálculo das Perdas de Carga

A determinação da perda de carga total de carga no sistema é obtida a partir das somas das perdas nos captadores, nos trechos canalizados “a”, “b”, “c” e “d”. O primeiro passo consiste na caracterização do fluido que escoar no sistema e definição de suas propriedades físicas.

Caracterização do fluido

A temperatura de fusão do alumínio é cerca de 660 °C e, em fornos do tipo cadinho, a temperatura de operação costuma estar entre 700 °C e 800 °C, para garantir a fluidez do metal. Os vapores e gases liberados podem apresentar temperaturas próximas à temperatura de fusão. Logo, para garantir a segurança do sistema de ventilação, será considerado que o fluido a ser transportado apresenta temperatura de 800 °C.

Serão consideradas as propriedades do ar atmosférico em temperatura de 800 °C a 1 atm ao nível do mar. Sendo que essas condições podem variar de acordo com as condições do projeto. Com auxílio do site Engineering Toolbox (2025), foram encontradas as informações descritas pela Equação (05) e pela Equação (06).

Para estimar a perda de carga no sistema é imprescindível calcular o número de Reynolds, na



Equação (07) para os trechos “a” e “b”, para esse cálculo, é necessário ter características como a viscosidade dinâmica (μ), a densidade (ρ) do fluido e a velocidade (V) do fluido.

$$\mu = 43,32 \times 10^{-6} \frac{kg}{m} \cdot s \quad (05)$$

$$\rho = 0,3289 \frac{kg}{m^3} \quad (06)$$

Sendo,

- μ a viscosidade dinâmica com margem de erro de +/- 0.1%, ($Pa \cdot s$);
- ρ a densidade com erro de +/- 0,2%, (kg/m^3).

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (07)$$

Onde,

- ρ é a densidade do fluido (kg/m^3);
- V a velocidade do fluido (m/s);
- D o diâmetro da tubulação (m);
- μ a viscosidade dinâmica do fluido (kg/ms).

A partir do número de Reynolds, torna-se possível calcular o fator de atrito nas tubulações utilizando a Equação (08), conforme Clezar e Nogueira (2009):

$$f = a + b \times Re^{-c} \quad (08)$$

Os coeficientes “a”, “b” e “c” são determinados pela Equação (09), Equação (10) e Equação (11), respectivamente.

$$a = 0,53 * \left(\frac{e}{D}\right) + 0,094 * \left(\frac{e}{D}\right)^{0,225} \quad (09)$$

$$b = 88 * \left(\frac{e}{D}\right)^{0,44} \quad (10)$$

$$c = 1,62 * \left(\frac{e}{D}\right)^{0,134} \quad (11)$$

O aço inoxidável foi considerado conforme recomendação do manual técnico “HVAC – How to Size and Design Ducts” da CED Engineering para sistemas de dutos para exaustão de cozinha, ar

carregado de umidade e exaustão de fumos industriais. As especificações para chapa de aço inoxidável são ASTM A167, Classe 302 ou 304, condição A (recozida), acabamento nº 4 para dutos expostos e Acabamento nº 2B para duto oculto. Ademais, o aço inoxidável apresenta elevado ponto de fusão para resistir ao fluido quente e à oxidação.

Após encontrar o fator de atrito, foi calculada a perda de carga nos trechos do sistema conforme a Equação (12), sendo λ_{captor} o coeficiente de perda de carga do captor, considerando o captor de boca bem arredondada, pois dentre os captos possíveis, este se destaca para compor em um sistema VLE em um processo de fundição de alumínio devido ao seu baixo coeficiente de perda de carga ($\lambda_{captor} = 0,04$), e sua alta eficiência de captação ($\mu = 0,98$). Para as conexões a ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment recomenda que a razão raio/diâmetro $\geq 1,5$ para curvas. Para melhor segurança e eficiência do sistema ao escolher as curvas, será adotado uma razão raio/diâmetro = 2 com coeficiente de perda de carga $\lambda = 0,15$. Para as ligações em formato de ‘T’ será adotado uma razão raio/diâmetro = 0, com coeficiente de perda de carga $\lambda = 0,87$, conforme Tabela 01.

Tabela 01: Coeficiente de atrito nas curvas das canalizações. Fonte: Adaptado de Costa (2005).

R/D	0	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
λ	0,87	0,73	0,38	0,26	0,17	0,15	0,14	0,14	0,16

$$\Delta P = \left(f * \frac{L1+L2}{D} + \lambda\right) * \frac{V^2 \rho}{2} \quad (12)$$

Onde,

- ΔP é a perda de carga total nos trechos analisados;
- λ é a soma dos coeficientes de perda de carga nos trechos analisados;
- V é a velocidade do fluido nas tubulações “a” e “b”, (m/s);
- ρ é a densidade do fluido, kg/m^3 ;
- L é comprimento da tubulação.

Finalmente, somando as perdas de carga incluindo a perda de carga dinâmica na saída que representa a energia cinética por unidade de volume (pressão dinâmica), pode-se obter a perda de carga total do sistema por meio da Equação (13).



$$\Delta P_T = \Delta P_{cd} + \Delta P_{ab} + \frac{V_{cd}^2 \rho}{2} \quad (13)$$

Construção da Curva do Sistema

Para determinar a curva do sistema foi construído um gráfico de perda de carga total ΔP_T em função da vazão Q , que representa a vazão no trecho final do sistema (tubulações “c” e “d”).

Contudo, a Equação (13) não está escrita diretamente em função da vazão. Dessa forma, é necessário substituir V_{cd} pela Equação (14).

$$V_{cd} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{cd}^2} \quad (14)$$

Substituindo e fazendo as devidas simplificações:

$$\Delta P_T = \Delta P_{cd} + \Delta P_{ab} + \frac{8Q^2 \rho}{\pi^2 D_{cd}^4} \quad (15)$$

A Equação (15) expressa a perda de carga total como função quadrática da vazão Q . Como esperado, a perda de carga cresce de forma não linear com o aumento da vazão, característica comum em sistemas hidráulicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do Sistema Dimensionado

O projeto considerou a geração de monóxido de carbono (CO) e fumos metálicos como principais poluentes, sendo adotado o limite de tolerância de 39 ppm para o CO, conforme estabelecido pela NR-15.

A partir dos dados de emissão e concentração aceitável, foi calculada a vazão mínima necessária para cada captor em 1312,82 m³/h totalizando uma vazão do sistema de 2625,6 m³/h. Os diâmetros internos das tubulações foram definidos de forma a garantir velocidades mínimas adequadas conforme recomendações da ACGIH, garantindo que os contaminantes permaneçam em suspensão e sejam eficientemente transportados.

O sistema projetado contempla dois captores, um ventilador centrífugo, e quatro trechos de tubulação (“a”, “b”, “c” e “d”), com conexões curvas e em “T”. As perdas de carga foram calculadas, incluindo perdas distribuídas e localizadas. A perda de carga total obtida foi de aproximadamente 426,73 Pa (43,515 mmca), valor considerado compatível com sistemas industriais desse porte.

A construção da curva característica do sistema permitiu a análise do ponto de operação ideal, possibilitando a seleção de um ventilador compatível, com maior eficiência energética.

Avaliação do Desempenho Energético

Utilizando o GNU Octave (código desenvolvido), foi possível plotar a curva do sistema (Figura 03) com base na Equação (14). O gráfico mostra claramente que a perda de carga total aumenta com a vazão, visto que o termo dominante da equação é quadrático.

No ponto de operação adotado para análise, em que a vazão é $Q = 0,7293 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $Q = 2625,6 \text{ m}^3/\text{h}$. E a perda de carga é $\Delta P_T = 426,73 \text{ Pa}$ ou $\Delta P_T = 43,515 \text{ mmca}$.

Este ponto será essencial para a próxima etapa, que trata da seleção do ventilador capaz de operar neste ponto com maior eficiência.

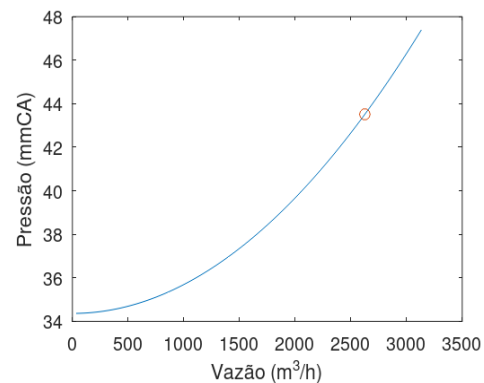


Figura 03. Curva Característica do Sistema. Fonte: Próprio Autor.

Seleção do Ventilador

Após análise de catálogos técnicos de fabricantes disponíveis no mercado, foi selecionado o ventilador LMS-500 da empresa OTAM – Soler & Palau Brasil Ventilação LTDA. Este ventilador foi selecionado, pois apresenta o maior rendimento para os valores de vazão e pressão requeridos, quando comparado com os demais ventiladores disponíveis.

Como ilustrado na Figura 04, o ventilador LMS-500 apresenta rendimento entre 78% e 80% para a faixa de operação analisada, sendo a opção mais adequada sob o ponto de vista de desempenho energético.

Vale ressaltar que para seleção do ventilador, foram avaliados catálogos de diferentes fabricantes, priorizando os seguintes critérios para seleção do ventilador:

- Capacidade de operação com vazão de aproximadamente $2625,6 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Capacidade de vencer a perda de carga próximo de $43,515 \text{ mmca}$;
- Eficiência máxima dentro da faixa de operação (maior rendimento energético).

O ventilador LMS-500 se destacou como a melhor alternativa ao apresentar maior eficiência para o ponto de funcionamento estabelecido com absorção de aproximadamente $0,55 \text{ cv}$ de potência.

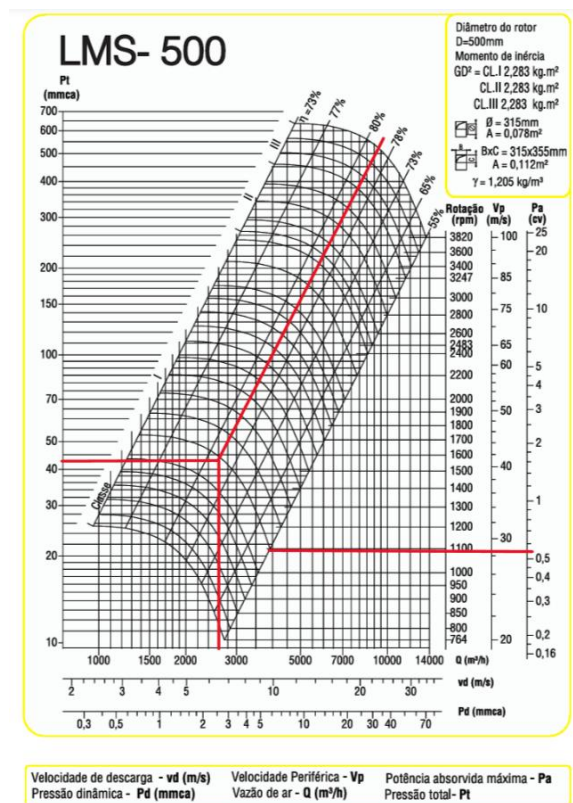


Figura 04. Curvas características do ventilador LMS-500. Fonte: Adaptado de OTAM (2025).

Determinação do Ponto de Operação e Potência

Para analisar com maior precisão a situação de funcionamento ideal do sistema, basta apenas determinar a rotação em que esse ventilador apresentará maior eficiência. Logo, observamos que o ponto de operação do ventilador para atender a vazão e a diferença de pressão total do sistema de tubulações está próximo dos pontos da vazão de $2600 \text{ m}^3/\text{h}$, e da diferença de pressão total de 45 mmCA e da linha de rendimento de 80% . Logo, utilizando o software Plot Digitizer, que permitiu extrair dados digitais das curvas do gráfico do catálogo, e tomando como referência a rotação de 1100 rpm , foi traçada uma nova curva no gráfico.

Com base na análise das curvas características do ventilador LMS-500, para a rotação de referência de 1100 rpm , foi possível identificar um ponto de operação correspondente a uma vazão aproximada de $2745,9 \text{ m}^3/\text{h}$. No entanto, o sistema exige uma vazão total de $2625,6 \text{ m}^3/\text{h}$, o que demanda ajuste da rotação do ventilador para atingir ponto ideal, correspondente a rotação n_{cd} e vazão Q_{cd} .

Esse ajuste pode ser feito por meio das relações de semelhança entre máquinas geometricamente semelhantes, de acordo com a Equação (16), conforme apresentado por Henn (2012).

$$\frac{Q_{1100}}{Q_{cd}} = \frac{n_{1100}}{n_{cd}} \quad (16)$$

Sendo,

- n_{cd} rotação ideal, rpm ;
- n_{1100} rotação de 1100 rpm ;
- Q_{cd} vazão ideal do sistema, m^3/h ;
- Q_{1100} vazão referente à rotação de 1100 rpm , m^3/h .

Portanto a rotação ideal para a vazão de $2625,6 \text{ m}^3/\text{h}$ será de $1051,8 \text{ rpm}$. A Figura 05 mostra o comportamento da vazão para as diferentes rotações.

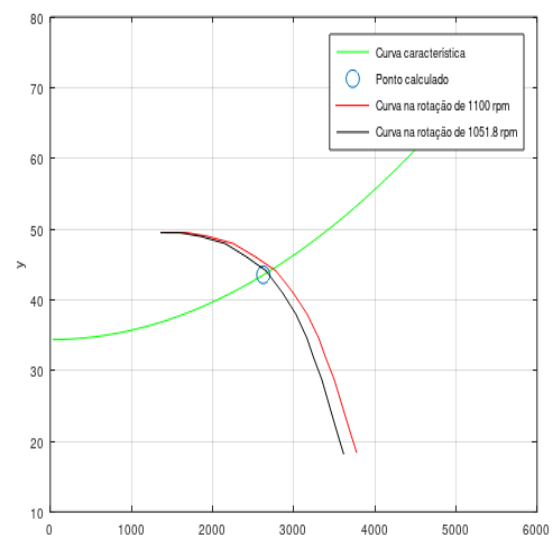


Figura 05: Vazão em Função da Rotação. Fonte: Próprio Autor.

Porém, normalmente a rotação real de funcionamento não necessita ser exatamente igual a rotação ideal, sendo adotado um valor próximo devido à possíveis padronizações dos ventiladores disponíveis no mercado. Para garantir que o sistema funcione corretamente, o Manual Técnico da OTAM



recomenda que a potência seja aumentada em até 20% acima do valor calculado para compensar eventuais perdas de cargas não previstas.

Cálculo da Potência Consumida

A potência de eixo Pe requerida para funcionamento do ventilador pode ser determinada por meio da Equação (17), conforme Henn (2012).

$$Pe = \frac{Q \times \Delta P_T}{n_T} \quad (17)$$

Sendo, Pe a potência de eixo (W), Q a vazão volumétrica do sistema (m^3/s), ΔP_T a perda de carga total (Pa) e n_T o rendimento total do ventilador.

A potência calculada para a vazão de $2.625,6 m^3/h$ e rotação ideal de $1051,8 rpm$ será de $0,536 cv$. Ao mesmo tempo, a potência para a vazão de $2745,9 m^3/h$ e rotação de $1100 rpm$ será de $0,579 cv$.

A potência com acréscimo de 20% conforme recomendado pelo Manual Técnico da OTAM será de $0,695 cv$.

Dessa forma, para a operação ideal de vazão e pressão, foi selecionado o ventilador modelo LMS-500, da empresa OTAM, com base em catálogos técnicos. O ponto de operação do sistema, de $2625,6 m^3/h$ e $43,515 mmca$, encontra-se dentro da faixa de maior eficiência do equipamento, com rendimento entre 78 e 80%.

A potência de eixo calculada para esse ponto foi de $0,5357 cv$, sendo recomendada a adoção de $0,695 cv$ (acrécimo de 20%) para compensar perdas não previstas, conforme orientação do fabricante.

Esse desempenho energético é satisfatório, especialmente considerando a alta temperatura do fluido, e as condições de contaminação do ambiente. O uso de ventilador com bom rendimento contribui para a sustentabilidade do processo, promovendo menor consumo energético e maior durabilidade do equipamento.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) para um processo de fundição de alumínio, com base nas normas NR-15, ABNT NBR 13982 e recomendações da ACGIH. A metodologia adotada englobou desde o levantamento dos dados de emissão de poluentes, até a seleção do ventilador, passando pelos cálculos de vazão, perdas de carga e escolha de materiais.

O sistema projetado mostrou-se eficiente ao manter a concentração de contaminantes abaixo dos limites de exposição ocupacional, promovendo segurança e salubridade ao ambiente de trabalho. Além disso, a seleção adequada do ventilador resultou em um sistema com desempenho energético satisfatório, contribuindo para a viabilidade operacional e ambiental da solução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação), FAPEMIG, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro; à UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), por meio do NEST – Núcleo de Excelência em Gestão Termelétrica e Distribuída e do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), pelo apoio técnico e institucional; e à UFVJM (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri), por meio do PET Estratégias, do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG), da Pró-Reitoria de Extensão e Cultura (PROEXC), do Laboratório de Modelagem e Experimento em Engenharia Térmica do ICT/UFVJM e do Projeto de Extensão “Promovendo a Ciência e Tecnologia: potencializando as oportunidades e o conhecimento da sociedade acadêmica e diamantinense”, pelo suporte acadêmico, científico e institucional.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13982:2011 – Ventilação industrial – Sistemas de exaustão local. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15>. Acesso em 05 maio de 2025.
- ACGIH. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial Ventilation : A Manual of Recommended Practice for Design*. Ed. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, Ohio, Estados Unidos da América. 2019. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1KeLIe0ZZBhI_-RToaioM6KLH8NN_sYav/view?usp=sharing. Acesso em: 16 abr. 2025.
- Assunção, J. V. Ventilação industrial: Ventilação local exaustora. 1999. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/bitstreams/1e9>



- e97df-2b74-48cb-bd62-b67d13ef9414/download.
Acesso em 04 de maio de 2025.
- Çengel, Y. A.; Boles, M. A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- Ennio Cruz da. Ventilação. São Paulo: Blucher, 2005.
- Engineering Toolbox. Air - Absolute and Kinematic Viscosity. 2025. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html. Acesso em: 18 abr. 2025
- Fox, R. W.; Mcdonald, A. T.; Pritchard, P. J. Introduction to Fluid Mechanics. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- Gioda, A.; Neto, F. R. A. Considerações sobre estudos de ambientes industriais e não-industriais no Brasil: uma abordagem comparativa. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 19, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/csp/v19n5/17811.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2025
- Henn, É. A. L. Máquinas de Fluido. 3 ed. Santa Maria: UFSM, 2012.
- Isaiq-Cib Tg 42. Performance criteria of buildings for health and comfort. CIB, nº 292, 2004. 68 p. Disponível em: <http://www.isiaq.org/publications/TG42-report.pdf>. Acesso em: 29 de abr. de 2025.
- Lee, J.; Strasman, S. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design. 29th ed.
- Munson, B. R.; Young, D.; Okiishi, T. H. Fundamentals of Fluid Mechanics. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- OTAM. Ventiladores centrífugos RFS/RFD. Disponível em: Acesso em: 01 Dez. 2018
- Shinzato, M.C.; Hypolito, R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents. São Paulo: Waste Management 25 (2005). 37-46 p.
- Teixeira, D. B.; *et al.* Síndrome dos Edifícios Doentes em Recintos com Ventilação e Climatização Artificiais: Revisão de Literatura. 2005. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/producao intelectual/obras_intelectuais/224_obraIntelectual.pdf. Acesso em: 29 de abr. de 2025
- EPA. United States Environmental Protection Agency (EPA). AP-42 Section 12.8 – Final Background Document for Secondary Aluminum. Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS), Technical Support Division, 1992
- White, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2010. 862 p.