

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JORGE LUIZ FLORIANO LIMA

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO PARA AS CÉLULAS DE
SOLDAGEM DO IFPI-CENTRAL TERESINA

TERESINA
2025

JORGE LUIZ FLORIANO LIMA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO PARA AS CÉLULAS DE
SOLDAGEM DO IFPI-CENTRAL TERESINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Federal do Piauí, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Me. Guilherme Alceu Costa
Borges

**TERESINA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Lima, Jorge Luiz Floriano

L732d Dimensionamento de um sistema de exaustão para as células de soldagem
do IFPI-Central / Jorge Luiz Floriano Lima. - 2025.
42 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Me. Guilherme Alceu Costa Borges.

1. Soldagem. 2. Eletrodo revestido. 3. Ventilação local exautora. 4.
Dimensionamento. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

JORGE LUIZ FLORIANO LIMA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO PARA AS CÉLULAS DE
SOLDAGEM DO IFPI-CENTRAL TERESINA**

Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia), apresentado como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,
Campus Teresina Central.

Aprovada em: 25/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Guilherme Alceu Costa Borges (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Armyston Goncalves Ferreira de Araujo
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Janiel Fontineles Silva
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois durante todo o curso vivi um período de grande proximidade com Ele. Sem Sua presença, força e direção, eu não teria conseguido chegar até aqui.

Agradeço, com todo o meu coração, aos meus pais, que foram e sempre serão meus maiores apoiadores. Em cada etapa da minha vida, em cada desafio enfrentado, sei que posso contar com o amor, o apoio incondicional e os ensinamentos que me moldaram até aqui. Este trabalho também é fruto de tudo o que eles fizeram por mim.

À minha namorada, Camila, que esteve ao meu lado em todos os momentos — nos dias bons e nos difíceis. Seu carinho, amor, incentivo e companheirismo fizeram toda a diferença mesmo que no fim dessa caminhada.

Aos meus amigos do curso, que tornaram essa jornada mais leve, divertida e enriquecedora. Levo comigo não só o aprendizado técnico, mas também todas as boas memórias que compartilhamos.

Ao meu orientador, Guilherme Alceu Costa Borges, por toda a dedicação, orientação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua ajuda foi essencial para a conclusão deste trabalho.

E, por fim, agradeço a todos que contribuíram, mesmo que indiretamente, para a realização deste trabalho. Cada gesto de apoio foi importante.

RESUMO

A soldagem por eletrodo revestido é amplamente utilizada na indústria e no ambiente acadêmico, sendo essencial para a formação técnica de estudantes. No entanto, esse processo gera fumos metálicos e gases tóxicos que oferecem sérios riscos à saúde ocupacional. Diante disso, este trabalho propõe o dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) para as cabines de soldagem do laboratório do Instituto Federal do Piauí – Campus Teresina Central, visando à melhoria das condições de trabalho e segurança dos usuários. O trabalho foi desenvolvido para um laboratório composto por nove cabines de soldagem, com os desenhos técnicos elaborados utilizando o software AutoCAD. A metodologia adotada envolveu a análise do layout do laboratório, dimensionamento dos captadores, dutos, perdas de carga, escolha do ventilador e seleção de filtro adequado para retenção de partículas ultrafinas. Os resultados demonstram que o sistema proposto atende aos requisitos normativos e técnicos, promovendo maior eficiência na captação dos contaminantes diretamente na fonte de emissão. Conclui-se que a implantação do sistema contribuirá significativamente para a preservação da saúde dos usuários e para a qualidade do ensino prático.

Palavras-chave: soldagem; eletrodo revestido; ventilação local exaustora; dimensionamento; laboratório de soldagem.

ABSTRACT

Shielded metal arc welding is widely used in both industry and academic environments and is essential for the technical training of students. However, this process generates metallic fumes and toxic gases that pose serious risks to occupational health. In this context, this study proposes the design of a local exhaust ventilation (LEV) system for the welding booths of the Federal Institute of Piauí – Teresina Central Campus, aiming to improve working conditions and ensure user safety. The project was developed for a laboratory consisting of nine welding booths, with technical drawings created using AutoCAD software. The adopted methodology included an analysis of the laboratory layout, sizing of hoods, ducts, pressure losses, fan selection, and appropriate filter choice for retaining ultrafine particles. The results show that the proposed system meets regulatory and technical requirements, providing greater efficiency in capturing contaminants directly at the emission source. It is concluded that the implementation of this system will significantly contribute to the preservation of user health and the quality of practical welding education.

Keywords: welding; coated electrode; local exhaust ventilation; sizing; welding laboratory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema respiratório e as dimensões das partículas	13
Figura 2 - Solda por eletrodo revestido	14
Figura 3 - Composição eletrodo revestido.....	16
Figura 4 - Máquina de solda LYNUS LIS-200 POWER.....	17
Figura 5 - Diferença entre VGD e VLE.....	17
Figura 6 - Influência da distância na vazão de exaustão	19
Figura 7 - Sistema de exaustão em processo de soldagem	20
Figura 8 - Perdas de carga localizadas.....	21
Figura 9 - Planta baixa do LS	22
Figura 10 - Velocidade do ar em canalizações	25
Figura 11 - Planta de locação das bancadas de soldagem	26
Figura 12 - Braços extratores standard	27
Figura 13 - Curva de perda de carga (Pa) por vazão (m ³ /h)	28
Figura 14 - Planta de locação dos trechos principais	30
Figura 15 - Valores de K para derivações de acordo com o ângulo	31
Figura 16 - Valores de K para reduções de acordo com o ângulo	32
Figura 17 - Planta de locação dos trechos secundários	33
Figura 18 - Coeficiente de atrito para curvas de 90°	33
Figura 19 - Perda de carga do FilterMax DF 80.....	35
Figura 20 - Dados do ventilador dimensionado.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade de captura em função da operação	24
Tabela 2 - Dados Técnicos dos braços extratores standard	27
Tabela 3 - Vazões para os trechos principais	29
Tabela 4 - Dimensionamento dos Trechos principais	29
Tabela 5 - Perda de carga dos trechos principais	30
Tabela 6 - Perda de carga dos trechos secundários (B)	32
Tabela 7 - Perda de carga dos trechos secundários (C)	34
Tabela 8 - Perda de carga total do sistema.....	35

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Vazão volumétrica de ar	m^3/s ou m^3/h
x	Distância entre o captor e a fonte contaminante	m
Ω	Área da seção de coleta	m^2
V_c	Velocidade de captura	m/s
d	Diâmetro do duto ou da seção de coleta	m
c	Velocidade do ar no duto	m/s
A	Área da seção transversal dos dutos	m^2
ΔP_d	Perda de carga distribuída	Pa
ΔP_l	Perda de carga localizada	Pa
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach	adimensional
l	Comprimento do duto	m
ρ	Densidade do ar	kg/m^3
K	Coefficiente de perda de carga localizada	adimensional
ε	Rugosidade absoluta do duto	mm
μ	Viscosidade dinâmica do ar	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Re	Número de Reynolds	adimensional
P_t	Pressão total a ser vencida pelo ventilador	Pa ou mmca
ΔP_i	Perda de carga na linha de insuflamento	Pa
ΔP_e	Perda de carga na linha de exaustão	Pa

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL.....	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3	JUSTIFICATIVA	11
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	SEGURANÇA DO TRABALHO	12
2.1.1	Riscos à Saúde.....	12
2.1.2	Prevenção Quanto aos Riscos	14
2.2	LABORATÓRIO DE SOLDAGEM	15
2.3	ELETRODO REVESTIDO	16
2.4	VENTILAÇÃO	17
2.4.1	Captadores	18
2.4.2	Dutos	19
2.4.3	Ventiladores	21
2.4.4	Filtro	21
3.	METODOLOGIA.....	22
3.1	DIMENSIONAMENTO.....	23
3.1.1	Captor	23
3.1.2	Dutos	24
3.1.3	Perdas de Carga.....	25
3.1.4	Ventilador	26
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	CAPTOR	26
4.2	DUTOS	28
4.3	FILTRO.....	34
4.4	VENTILADOR	35
5.	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS	37
	ANEXO 1 – DIAGRAMA DE MOODY-ROUSE.....	41
	ANEXO 2 – FICHA TÉCNICA LIS-200 POWER.....	42
	ANEXO 3 – CURVA CARACTERÍSTICA DO VENTILADOR LMS-630.....	43

1. INTRODUÇÃO

Hodiernamente o processo de soldagem é presente na grande maioria, senão em todas as instalações industriais no ramo de construção naval, aeronáutica, ferroviária, automobilística e civil, pois é utilizada em diversas situações, desde reparos simples até a construção de pontes e petroleiros.

Entretanto o processo em questão conta com riscos ou impactos diretos e indiretos à saúde do soldador, como exposição a ruídos, respingos e faíscas nos ouvidos, olhos ou pele, risco de choque elétrico, danos aos olhos e lesão na pele devido ao UV do arco de solda, e a exposição aos fumos de solda que se dispersam no ar (Nederman, 2010). Esta última, por se tratar de um risco indireto ao profissional se torna por muitas vezes esquecida, trazendo à tona doenças pela deposição de partículas de óxidos de ferro no pulmão como a siderose e a pneumoconiose benigna (BURGUESS, 1997).

Adianta-se que para determinados tipos de soldagem o risco em questão é variado, porém tanto o uso mais comumente de solda utilizado no mundo como o método de soldagem mais presente no laboratório do IFPI-Central é o eletrodo revestido, abrangendo mais a análise de riscos feita. Esta última citada se torna indispensável, pois é papel do engenheiro elaborar soluções eficazes para assegurar ambientes de trabalho saudáveis, incluindo o dimensionamento adequado de sistemas de ventilação industrial com base nos riscos associados aos poluentes presentes e a remoção eficiente de fumos diretamente na fonte de emissão.

Devido a insalubridade do processo o uso de EPIs é indispensável, e de acordo com a NR6 deve ser utilizado equipamentos de proteção para a cabeça e rosto, olhos, mãos e braços, pés, corpo, auditiva e respiratória; esta última quase sempre é relevada pela ausência da máscara apropriada ou negligência do soldador.

Desta forma é notório a necessidade de uma atenção a mais nos laboratórios de soldagem de universidades por muitas vezes formarem futuros profissionais da área e para garantir a segurança de diversos alunos

1.1 OBJETIVO GERAL

Dimensionar um sistema de exaustão de fumos de solda por eletrodo revestido (CSER) nas cabines de soldagem do laboratório do IFPI-Central, de forma a seguir as normas regulamentadoras.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenhar a planta baixa do laboratório de soldagem;
- Dimensionar os componentes do sistema;
- Calcular as perdas de carga nas tubulações e singularidades;
- Definir os componentes de acordo com as demandas.

1.3 JUSTIFICATIVA

A soldagem é um processo amplamente utilizado em setores como a construção civil, indústria metalúrgica, automotiva e de manutenção industrial. No entanto, apesar de sua relevância produtiva, essa atividade está associada à emissão de fumos metálicos, gases tóxicos e partículas ultrafinas que representam sérios riscos à saúde ocupacional, podendo causar doenças respiratórias, intoxicações e outros agravos à saúde do trabalhador.

Diante disso, a implementação de um sistema de ventilação/exaustão no laboratório de soldagem do IFPI – Campus Teresina Central é uma medida essencial não apenas para atender às exigências normativas de segurança do trabalho, como também para promover um ambiente de aprendizagem mais seguro, confortável e tecnicamente adequado.

Além de minimizar a exposição dos usuários aos contaminantes atmosféricos, a instalação do sistema contribuirá para a otimização das atividades didáticas, aumentando a eficiência e a qualidade do ensino prático de soldagem, ao permitir maior permanência no ambiente e melhor visibilidade durante os procedimentos. Assim, a proposta reforça o compromisso da instituição com a saúde dos estudantes e a excelência na formação técnica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No tópico em seguida será elaborado um conjunto de referências que estão de acordo e objetificam facilitar a compreensão do projeto de conclusão de curso em si, abordando conceitos como o tipo de soldagem realizada e suas especificações assim como o tipo de fuligem que se observa, normas regulamentadoras principalmente a respeito da segurança do trabalho, a estrutura do laboratório de soldagem com seus elementos fundamentais e um estudo de ventilação e exaustão.

2.1 SEGURANÇA DO TRABALHO

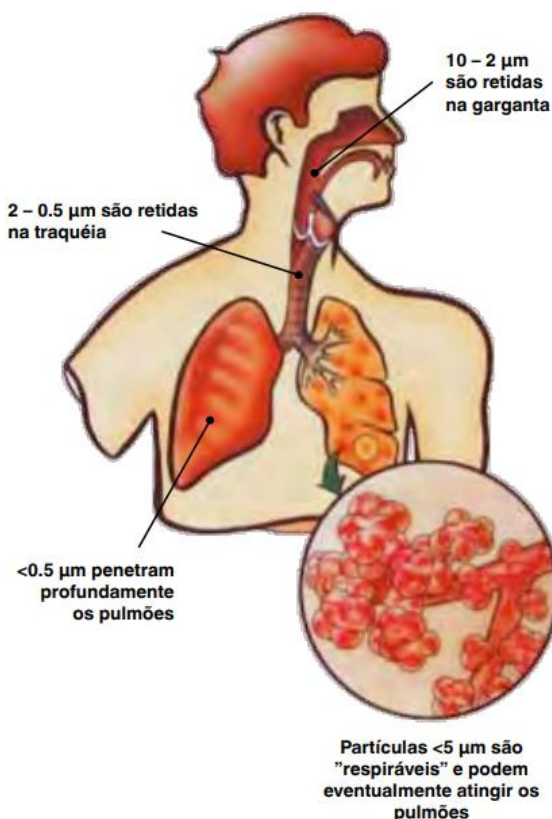
2.1.1 Riscos à Saúde

O processo de soldagem apresenta uma série de riscos ocupacionais que afetam diretamente a saúde do operador, especialmente quando não são adotadas medidas adequadas de segurança e controle ambiental. Entre os principais riscos estão os agentes físicos, como a radiação e os respingos de metal fundido, e os agentes químicos, como os fumos metálicos e gases tóxicos gerados durante a soldagem (ANSCHAU, 2010).

Os agentes físicos incluem a exposição a raios invisíveis, como ultravioleta (UV) e infravermelho (IV), que podem ocasionar vista cansada, dores de cabeça, catarata e até queimaduras de primeiro e segundo grau na pele (NIOSH, 2012). Outro risco físico são os respingos metálicos, pequenas gotas de metal fundido com temperatura que pode ultrapassar 1700°C, e que, ao entrar em contato com a pele, causam queimaduras, além de representar risco de incêndio, caso haja materiais combustíveis nas proximidades.

Entretanto, os riscos químicos são ainda mais preocupantes pela sua capacidade de causar doenças crônicas graves. Durante a execução da soldagem, especialmente nos processos com eletrodo consumível, como o MIG/MAG, ocorre a vaporização e derretimento do eletrodo, o que gera fumos metálicos — partículas ultrafinas sólidas, com diâmetro inferior a 1 µm, compostas por óxidos metálicos (LYTTLE, 1999).

Figura 1 - Sistema respiratório e as dimensões das partículas



Fonte: Nederman. 2010

Esses fumos, dependendo da composição do eletrodo ou do metal base, podem conter substâncias como manganês, cromo hexavalente (Cr (VI)), níquel e chumbo, reconhecidamente tóxicas e, em alguns casos, cancerígenas (IARC, 2018; NEDERMAN, 2010). A inalação é a via de entrada mais preocupante, visto que essas partículas, com tamanhos entre 0,01 a 1 µm, penetram profundamente no sistema respiratório, alcançando os alvéolos pulmonares, onde comprometem a troca gasosa e podem desencadear doenças pulmonares, neurológicas, cardiovasculares e, em casos mais graves, câncer de pulmão (GUEDES et al., 2017; SANTOLAIA; PINA, 2018).

A NR-9 (2019) classifica essas substâncias como agentes químicos nocivos, que podem entrar no corpo por inalação, ingestão ou absorção dérmica. A NR-15, em seus Anexos 11 a 13, estabelece os limites de tolerância para exposição ocupacional a agentes insalubres. Para determinadas substâncias cancerígenas listadas na norma, como o 4-Nitrodifenil e a benzidina, nenhuma exposição é considerada segura, sendo obrigatória a implementação de medidas preventivas rigorosas para garantir um ambiente de trabalho saudável (SANTOLAIA; PINA, 2018).

Além dos fumos, a radiação UV gerada durante a soldagem contribui para a formação de ozônio (O₃) no ar ao redor da poça de fusão. O ozônio, por sua vez, é um gás irritante altamente reativo, podendo provocar dores de cabeça, irritações nas vias respiratórias e danos aos pulmões. Sua formação é mais comum em processos com gases de proteção, como o MIG/MAG (GAREIS, 1994).

Ainda, os impactos ambientais e indiretos desses riscos não devem ser negligenciados. Os resíduos de fumos metálicos podem se depositar em superfícies e componentes eletrônicos sensíveis, causando falhas técnicas em equipamentos e prejuízos em processos de produção, incluindo robôs de soldagem e sistemas automatizados (NEDERMAN, 2010).

Diante de todos esses fatores, a ventilação adequada torna-se essencial. Ambientes de soldagem devem ser projetados para garantir a renovação do ar e a remoção eficiente dos contaminantes, seja por meio de sistemas de ventilação natural, ventiladores de exaustão ou sistemas de exaustão localizada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A negligência quanto a isso caracteriza uma condição de risco grave e iminente, conforme determina a legislação vigente.

Figura 2 - Solda por eletrodo revestido



Fonte: High Solutions, 2019

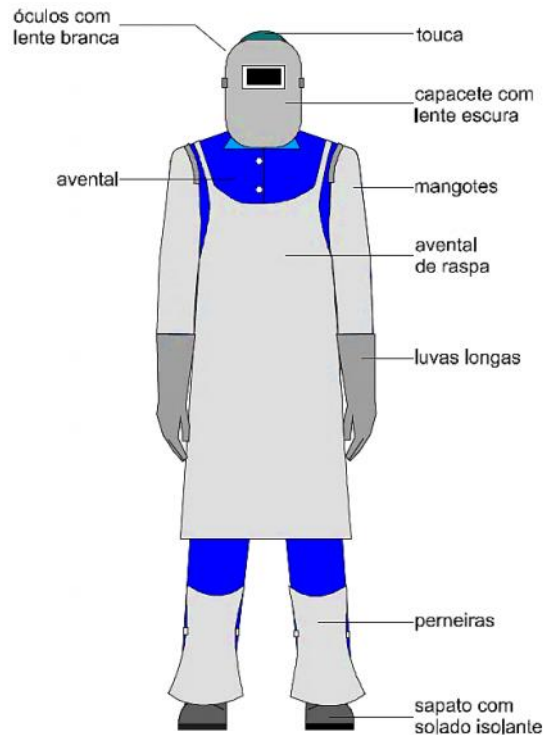
2.1.2 Prevenção Quanto aos Riscos

Para reduzir ou mitigar riscos à saúde é necessária adoção de boas práticas de trabalho, a presença de um sistema de exaustão funcional e principalmente o uso de equipamento de proteção individual (EPI's), são eles:

- **Máscara de soldador:** Fabricadas com material isolante térmico e elétrico, projetadas para serem leves e resistentes para proteção contra respingos, e acoplada a ela existe o filtro de luz que é responsável pela proteção contra a radiação, variando em 3 modelos recomendados: N° 10 para soldagens até 200 ampères, N° 12 para soldagens entre 200 e 400 ampères, N° 14 para soldagens acima de 400 ampères (ABNT NBR 16064:2012).
- **Luvras, avental, mangas e perneiras:** Todos fabricados com raspas de couro, para proteger o soldador do calor, de respingos e da radiação em si.

- Respiradores com filtro PFF2 ou PFF3: especialmente recomendados quando não há exaustão local eficiente.

Figura 2 – EPI's usados na pratica de soldagem



Fonte: Soldas Alegre, 2025

Além disso, o ambiente deve atender às exigências da NR-15 (Atividades e Operações Insalubres) e NR-6 (EPIs), garantindo condições adequadas de ventilação e proteção coletiva.

2.2 LABORATÓRIO DE SOLDAGEM

O laboratório de tecnologia em processos de soldagem é composto por uma infraestrutura especializada e uma equipe comprometida com o desenvolvimento de novas técnicas de soldagem. No contexto acadêmico, esses laboratórios são essenciais para as atividades de ensino, pesquisa, extensão e inovação. Situados em instituições de ensino superior, como universidades ou faculdades técnicas, os laboratórios de aplicação desempenham um papel crucial na formação acadêmica. Quando dotados de equipamentos de última geração, esses ambientes oferecem a oportunidade de aprender na prática com os dispositivos mais diversos utilizados pela indústria, como os processos MIG, MAG, eletrodo revestido, oxi-acetileno e TIG. Essa variedade de processos não apenas atende às necessidades das aulas práticas, mas também proporciona um espaço para a realização de atividades relacionadas ao ensino, incluindo inclusão, experiências e tratamentos térmicos (Univale, 2022).

No laboratório de soldagem (LS), existe a necessidade de ter cabines de soldagem espaçadas e isoladas umas das outras, com coloração escura e fosca para evitar a reflexão da radiação proveniente do arco elétrico. Além disso, essas cabines devem possuir ventilação adequada para que os gases e fumos liberados no processo não afetem a saúde do operador. De

acordo com a Norma Regulamentadora nº 12 (BRASIL, 2019), a instalação e layout das máquinas— incluindo os utilizados em processos de soldagem — devem ter:

- Espaço suficiente ao redor para operação, manutenção, limpeza e inspeção;
- Áreas para circulação garantindo acesso seguro e rápido;
- Fácil acesso aos dispositivos de emergência;
- Sinalizações de segurança visíveis, como placas, cores padronizadas e alerta sonoros.

Segundo essa mesa NR existe recomendações, mesmo que não fixa em metros, de distâncias de segurança no LS por necessitarem dos tópicos mencionados anteriormente, que são de terem no mínimo:

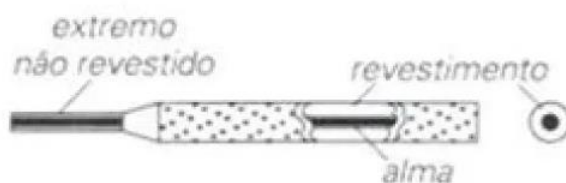
- 1,0m de distância entre máquinas ou cabines de solda garantindo a circulação e rota de fuga;
- 0,6m entre máquina de solda e parede para ventilação;
- 1,0m de área livre frontal ou traseira para manutenção ou operação;
- 1,2m para corredores entre cabines para evitar colisões e facilitar evacuação.

2.3 ELETRODO REVESTIDO

O processo de soldagem por eletrodo revestido, também conhecido como SMAW (Shielded Metal Arc Welding), é um dos métodos mais tradicionais e amplamente utilizados na indústria. Esse processo se baseia na utilização de um eletrodo metálico revestido que, ao entrar em contato com a peça e formar um arco elétrico, promove a fusão do metal de base e do próprio eletrodo.

O eletrodo é composto por um núcleo metálico (alma), geralmente de aço-carbono, envolto por um revestimento formado por uma mistura de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo ferro-ligas, óxidos, carbonatos, fluoretos e materiais desoxidantes. Esses componentes são unidos por um aglutinante, comumente silicato de potássio ou de sódio, e apresentados na forma de pó. O revestimento tem múltiplas funções: proteger a poça de fusão contra a contaminação atmosférica, estabilizar o arco, formar a escória e introduzir elementos de liga ao metal depositado. A espessura do revestimento pode variar entre fina, média ou grossa, conforme a aplicação e o tipo de soldagem desejada.

Figura 3 - Composição eletrodo revestido



Livro soldagem – Senai 1ª ed. 1997

O processo exige uma fonte de solda (máquina de solda) responsável por fornecer a corrente elétrica necessária para a formação do arco. Pode ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), com controle de amperagem ajustável.

Para atender as demandas necessárias foram adquiridas 10 máquinas de solda em abril de 2024, a mesma é observada na imagem 2 e sua ficha técnica no ANEXO 2, tornando o trabalho estudado mais viável.

Figura 4 - Máquina de solda LYNUS LIS-200 POWER



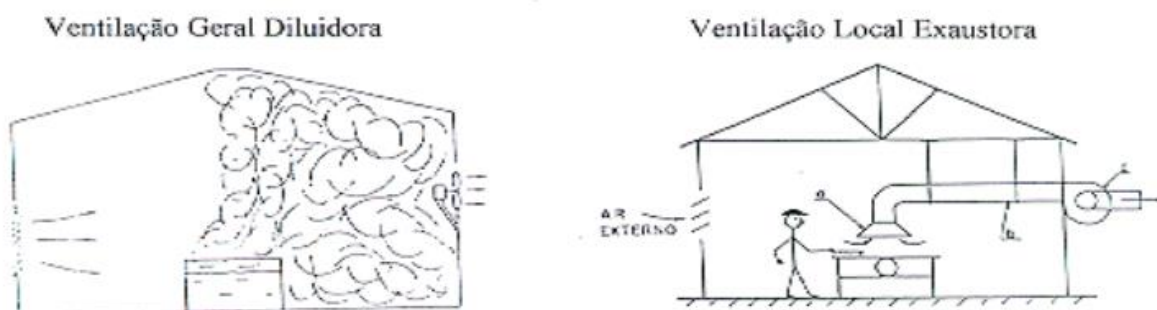
Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 VENTILAÇÃO

A ventilação pode ser definida, segundo a NBR 16401:2022, como o processo de movimentação do ar em um espaço objetivando a renovação do mesmo e o controle da temperatura, umidade, concentração de gases e odores e a eliminação de impurezas. Mais especificamente segundo Mesquita, Guimarães e Nefussi (1988), a ventilação consiste na movimentação de ar através de espaços confinados por meios naturais ou mecânicos, sendo denominada insuflação quando o ar entra no ambiente e exaustão quando é retirado. Costa (2005) reforça que a ventilação tem por objetivo controlar a pureza e o deslocamento do ar em ambientes fechados, sendo um método efetivo para o controle da poluição do ar em locais de trabalho. A aplicação correta da ventilação permite respeitar os limites estabelecidos em norma, além de promover ambientes de trabalho mais seguros (LISBOA, 2007).

Os sistemas de ventilação utilizados para controle de contaminantes atmosféricos em ambientes laborais podem ser classificados em dois tipos principais: Ventilação Geral Diluidora (VGD) e Ventilação Local Exaustora (VLE).

Figura 5 - Diferença entre VGD e VLE



Fonte: Filho e Melo, 1992

A VGD promove a renovação do ar de todo o ambiente, diluindo os poluentes por meio da introdução de ar limpo, e pode ocorrer de forma natural (através de aberturas como portas e janelas) ou mecânica (com ventiladores e exaustores). Segundo Macintyre (1990), a VGD pode

ser dividida em: insuflação mecânica com exaustão natural; insuflação natural com exaustão mecânica; insuflação e exaustão mecânica; e ventilação natural. Esse tipo de ventilação, contudo, não impede a emissão e inalação dos poluentes, sendo recomendada apenas quando as concentrações dos contaminantes não excedem a capacidade de diluição do sistema (COSTA, 2005; MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSE, 1988).

Já a VLE atua diretamente na fonte de emissão dos contaminantes, captando e removendo os poluentes no ponto de geração antes que se dispersem no ambiente. Ela opera criando uma corrente de ar com velocidade adequada (velocidade de captura), gerada por dispositivos denominados captadores (COSTA, 2005). Esse tipo de ventilação é mais eficaz para o controle da exposição ocupacional a agentes químicos (FUNDACENTRO, 2001; MENDES, 2013). Além disso é destacado que seu principal objetivo é a proteção da saúde do trabalhador ao evitar que os poluentes atinjam a zona de respiração.

Nederman (2010) observa que sistemas de ventilação geral ou coifas mal posicionadas não são eficazes e apresentam alto consumo de energia, ao contrário da VLE, que reduz significativamente a exposição a fumos metálicos. Assim, para máxima eficiência com custo reduzido e foco na saúde, o sistema deve conter os seguintes elementos:

- 1) Captadores;
- 2) Sistema de dutos;
- 3) Ventilador;
- 4) Dispositivo de controle de poluição do ar.

Esses componentes podem ser montados em sistemas fixos, móveis ou flexíveis. Sistemas fixos não permitem movimentação de elementos, apenas abertura de tampas. Sistemas flexíveis usam conexões ajustáveis para posicionar captadores em diferentes pontos. Já os sistemas móveis utilizam equipamentos portáteis que podem ser alocados livremente no ambiente de trabalho (GOODFELLOW; TAHTI, 2001).

A correta concepção, montagem e operação desses elementos são essenciais para garantir o desempenho adequado do sistema e a proteção da saúde dos trabalhadores. Em laboratórios de a VLE é a mais indicada, pois permite maior controle da exposição ocupacional. Com isso um conjunto de elementos faz-se presente para o correto funcionamento do sistema, são eles:

2.4.1 Captadores

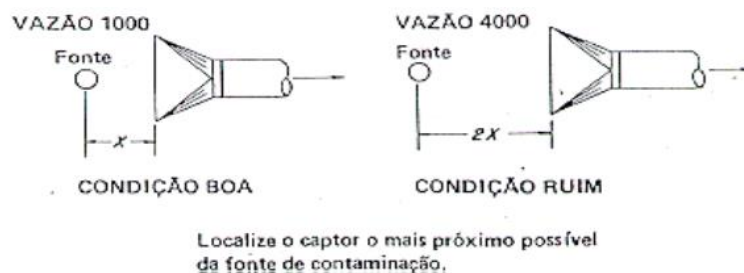
O captador em uma estação de soldagem é um elemento projetado para coletar diretamente os fumos, gases e partículas gerados durante o processo de soldagem, portanto sua localização é geralmente próxima a fonte emissora de gases (arco de solda). Sua função é minimizar a exposição dos trabalhadores a contaminantes nocivos, promovendo um ambiente de trabalho seguro e saudável, e para isso devem atender aos parâmetros de vazão e eficiência indicados em normas técnicas específicas para garantir a eficácia na captura de contaminantes incluídos na NBR 14787:2001.

A seleção do captador ideal em um sistema de ventilação local exaustora deve considerar diversos fatores para garantir eficiência e funcionalidade. De acordo com Assunção (1989), é fundamental levar em conta a localização da fonte poluidora, as restrições de espaço e as condições operacionais, de modo a evitar interferências na movimentação de pessoas, materiais e equipamentos. Além disso, deve-se priorizar captadores que apresentem menor perda de carga e que exijam menor vazão de captação, reduzindo assim os custos operacionais e do sistema como um todo. Complementando essa perspectiva, Costa (2005) destaca que as partículas

contaminantes, dependendo de sua natureza e toxicidade, devem ser induzidas a se deslocar até o captor por meio de uma velocidade específica, denominada velocidade de captura (V_c), que corresponde à velocidade do ar necessária no ponto onde as partículas se encontram para garantir sua eficiente remoção.

Os captadores utilizados no processo de soldagem são classificados como captadores receptores, que estrategicamente são colocados no caminho do fluxo natural dos gases visados para uma captação facilitada.

Figura 6 - Influência da distância na vazão de exaustão



Fonte: Lisboa, 2007

Em Lisboa 2007, ilustra a diferença na vazão necessária para captadores posicionados a uma distância de x e $2x$ da fonte. De modo geral, a vazão aumenta proporcionalmente ao quadrado da distância, ou seja, se a distância for dobrada ($2x$), a vazão requerida será quatro vezes maior do que na distância x . Além disso, quanto maior for a distância entre o captor e a fonte, maior será o impacto das correntes de ar transversais presentes no ambiente. Essas correntes podem dificultar o direcionamento dos poluentes para o captor, exigindo uma velocidade de captura mais elevada e, conseqüentemente, uma vazão maior para garantir uma captação eficaz.

2.4.2 Dutos

De acordo com MACINTYRE (1990), o sistema de dutos de ventilação nada mais é do que uma rede de tubos projetados para transportar ou ar com baixa pressão, de modo que a compressibilidade do ar pode ser ignorada, não ocorrendo os fenômenos termodinâmicos típicos das linhas de ar comprimido e vapor, por exemplo. No caso estudado podem ser classificados como equipamentos responsáveis pelo transporte do ar contaminado até a entrada do ventilador, e posteriormente para o exterior ou zona de tratamento.

Os dutos são diferenciados pelo material que é fabricado e sua geometria, primeiramente podem ser de aço galvanizado, aço inoxidável e PVC e quando a sua forma de seção circular, retangular ou flexível. Nos laboratórios de soldagem é comumente utilizando dutos de aço galvanizados de seção circular principalmente pela resistência térmica e menor perda de cargas.

Figura 7 - Sistema de exaustão em processo de soldagem



Fonte: Cca Contole Ambiental- Sistema de Exaustão

Para elevar o nível de equilíbrio e uniformidade em todas as células de soldagem é comumente feito um balanceamento de dutos que consiste em um processo que envolve o ajuste das válvulas e dos componentes do sistema para equilibrar o fluxo de ar nas diferentes partes do sistema de dutos, garantindo que a quantidade de ar fornecida seja adequada às necessidades de cada área. O balanceamento é essencial para otimizar o desempenho do sistema, melhorar a qualidade do ar e reduzir o consumo de energia. A maneira mais comum de realizar o balanceamento é ajustar a pressão e a vazão de ar em cada trecho do sistema, utilizando instrumentos como medidores de pressão e fluxo. Este processo não contribui apenas para a eficiência energética, mas também para o conforto térmico e a qualidade do ar interior.

Nesse elemento existem singulares que podem ser qualquer objeto que altere o fluxo de ar como: joelhos, cotovelos, extensões, junções etc. O dimensionamento dos dutos deve ocorrer para que a perda de carga seja a menor possível, ou seja, que seja utilizada a menor quantidade de singularidades possíveis. Além disso um alinhamento entre orçamento sempre tem que ser levado em consideração, fazendo necessário um estudo de mercado específico.

Figura 8 - Perdas de carga localizadas
(Equivalência em aço galvanizado ou em ferro fundido)

Ø Nominal		Cotovelos				Curvas						Tês				Cruzeiras		Tês de curva dupla		Luvas	Unões					
																										
mm	pol.																									
	1/4	0,23	0,22				0,16		0,10			0,04	0,34	0,42			0,05	0,34			0,01	0,01				
	3/8	0,35	0,33	0,16	0,61		0,24	0,25	0,15			0,06	0,51	0,62			0,08	0,50			0,01	0,01				
13	1/2	0,47	0,44	0,22	0,81	0,27	0,32	0,34	0,20	0,43	0,87	0,08	0,69	0,83	0,09	0,44	0,10	0,67	0,28	0,30	0,01	0,01				
19	3/4	0,70	0,67	0,32	1,22	0,41	0,48	0,50	0,30	0,65		0,12	1,03	1,25	0,13	0,66	0,15	1,01			0,01	0,01	0,01			
25	1	0,94	0,89	0,43	1,63	0,55	0,64	0,67	0,41	0,86		0,17	1,37	1,66	0,18	0,88	0,20	1,35			0,01	0,01				
32	1 1/4	1,17	1,11	0,54	2,03	0,68	0,79	0,84	0,51	1,08		0,21	1,71	2,08	0,22	1,10	0,25	1,68			0,01	0,01				
38	1 1/2	1,41	1,33	0,65	2,44	0,82	0,95	1,01	0,61	1,30		0,25	2,06	2,50	0,27	1,31	0,30	2,02			0,01	0,01				
50	2	1,88	1,78	0,86	3,25	1,04	1,27	1,35	0,81	1,73		0,33	2,74	3,33	0,36	1,75	0,41	2,69			0,01	0,01				
63	2 1/2	2,35		1,08		1,37	1,59	1,68	1,02			0,41	3,43	4,16	0,44	2,19					0,01	0,01				
75	3	2,82		1,30		1,64	1,91	2,02	1,22			0,50	4,11	4,99							0,01	0,01				
100	4	3,76		1,73		2,18	2,54	2,69				0,66	5,49	6,65							0,02	0,01				
125	5	4,70		2,16								0,83	6,86	8,32							0,02					
150	6	5,64		2,59				4,04				0,99	8,23	9,98							0,03					
Tê de redução			38 x 14	12 x 14	12 x 38	34 x 38	34 x 12	1 x 12	1 x 34	1 1/4 x 12	1 1/4 x 34	1 1/2 x 1	1 1/2 x 1 1/4	2 x 1	2 x 1 1/4	2 x 1 1/2	2 1/2 x 1 1/4	2 1/2 x 1 1/2	2 1/2 x 2	3 x 1 1/2	3 x 2	3 x 2 1/2	4 x 2	4 x 3		
			0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,14	0,13	0,14	0,17	0,15	0,17	0,21	0,20	0,23	0,28	0,25	0,29	0,35	0,30	0,34	0,42	0,46	0,56

Fonte: UF Goiás, Escola de Engenharia Civil

2.4.3 Ventiladores

Segundo Robert (2024) ventiladores são divididos principalmente entre axiais e centrífugos, neste primeiro o ar é movimentado paralelamente ao eixo do ventilador e oferece uma alta vazão a baixa pressão, são recomendados em casos de grade vazão em locais abertos; São divididos em: axial convencional, helicoidal, tubular e de alto rendimento, e no geral são usados para ventilação em armazéns ou em outros grandes ambientes como torres de resfriamento.

Outrossim nos ventiladores centrífugos o ar é direcionado para a periferia da hélice saindo perpendicularmente ao eixo de entrada, fornecem uma maior pressão com vazão reduzida e são divididos em: Pás curvadas para frente, sendo o de ventilação geral com maior vazão e baixo ruído; Pás radiais, projetado para ambientes com partículas em suspensão; E pás curvadas para trás quando se objetiva uma maior eficiência por fornecer maior pressão.

Em ambientes onde a abertura dos sistemas de ventilação local exaustora varia significativamente, causando flutuações na perda de carga, existe o risco de sobrecarregar os motores dos ventiladores. Para prevenir esse problema, recomenda-se o uso de ventiladores centrífugos com pás voltadas para trás (também chamados de “limit load”) ou, em alguns casos, ventiladores com pás radiais. Esses modelos são especialmente adequados para essa situação, pois, além de gerarem diferenças consideráveis de pressão, não apresentam um aumento significativo no consumo de potência em função das variações na perda de carga do sistema.

2.4.4 Filtro

Os filtros são responsáveis por reter partículas sólidas e fumos antes que o ar seja devolvido ao ambiente ou expelido à atmosfera. Conforme a ASHRAE Standard 52.2, os principais tipos incluem:

- Filtros mecânicos (grossos e finos): para partículas maiores;
- Filtros eletrostáticos: para partículas ultrafinas;
- Filtros HEPA: alta eficiência, usados em ambientes com exigência extrema de pureza;
- Ciclones: pré-filtros para partículas metálicas pesadas.

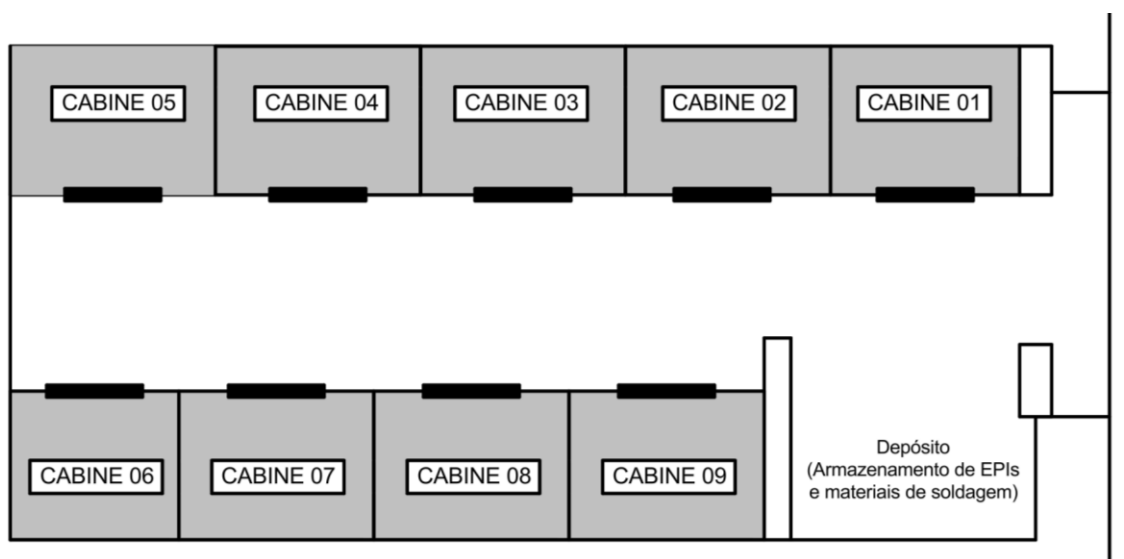
A escolha do filtro adequado depende da carga de poluentes, frequência de uso, propriedades do contaminante e da necessidade de recirculação ou exaustão externa. Além disso o equipamento deve ser considerado no cálculo da pressão necessária exigida no sistema, pois representam pontos de perda de carga (LISBOA, 2007).

3. METODOLOGIA

Este trabalho está inserido em uma pesquisa de natureza aplicada, com foco na probabilidade de utilizar os resultados obtidos para melhorar a segurança no ambiente de aprendizado. O estudo concentrou-se nas Cabines de Soldagem por Arco Elétrico (CSER), um componente essencial do Laboratório de Soldagem (LS) localizado no Prédio-A do Instituto Federal do Piauí, no Campus Teresina - PI.

As cabines de soldagem desempenham um papel crucial no processo de aprendizado técnico, principalmente no que se refere à soldagem com eletrodo revestido. A planta abaixo feita em CAD pode nos ilustrar a quantidade e disposição de cabines disponíveis no trabalho.

Figura 9 - Planta baixa do LS



Fonte: Elaborado pelo autor

O dimensionamento de sistemas de ventilação local exaustora (VLE) para ambientes de soldagem exige a consideração criteriosa de diversos fatores, como o layout físico, a geração de poluentes e a eficiência energética. No caso em estudo, a estação de soldagem é composta por nove bancadas, cada uma equipada com uma máquina de solda do tipo Eletrodo Revestido. Observa-se que, durante o período de operação, quase todas as bancadas costumam estar ativas simultaneamente, o que potencializa a emissão de fumos metálicos e requer um sistema de exaustão robusto e eficiente.

A partir da disposição física das bancadas, foi concebido um dimensionamento de ventilação voltado à otimização dos seguintes critérios: mínima potência instalada, padronização de componentes, baixa perda de carga e maior eficiência energética. A busca por um menor consumo de energia não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, como também favorece a viabilidade econômica do sistema proposto.

A metodologia aplicada para o dimensionamento baseia-se nos fundamentos descritos por Costa (2005), que propõe o uso de equações derivadas da mecânica dos fluidos e dos princípios de conservação de massa e energia. Essa abordagem tem sido referenciada por outros autores, como Santos (2015) e Antonietti (2020), em projetos similares de ventilação industrial, o que reforça sua validade técnica e aplicabilidade em diferentes contextos industriais.

3.1 DIMENSIONAMENTO

3.1.1 Captor

A etapa inicial do trabalho envolveu a escolha do tipo de captor mais adequado para a realidade da estação de soldagem. Foram considerados critérios essenciais para a eficiência do sistema: a capacidade de envolver adequadamente a fonte de emissão, a minimização da área de boca (visando menor vazão requerida), o aproveitamento do movimento inicial das partículas contaminantes, a não interferência com a operação do soldador e a facilidade de manutenção e limpeza. Com base nesses critérios, foi selecionado um captor com flange, o qual possibilita um bom desempenho de captura próximo à fonte.

A determinação da vazão necessária para cada captor é realizada a partir da equação apresentada por Macintyre (1990):

$$Q = (10x^2 + \Omega_0).Vc \quad (1)$$

Onde:

- Q = Vazão de ar requerida (m^3/s),
- x = Distância entre o captor e a fonte contaminante (m),
- Ω = Área da seção de coleta (m^2),
- Vc = Velocidade de captura (m/s), valor definido com base nas características da emissão.

Para determinar o diâmetro do duto tendo a vazão em mãos, visto que a fórmula anterior está em função da área é refeita a fórmula (01) para:

$$d = \sqrt{(4 \times Q) \div (\pi \times c)} \quad (2)$$

Onde:

- d = Diâmetro da seção de coleta (m),
- c = Velocidade no duto (m/s).

A definição da velocidade de captura segue as recomendações da ACGIH (1998), que estabelece valores adequados conforme o tipo de operação e a natureza do contaminante gerado. O órgão recomenda uma velocidade de captura de 0,5 a 1,0 segundo a tabela abaixo. Esses parâmetros são essenciais para garantir a eficiência do sistema e a segurança ocupacional dos operadores.

Tabela 1 - Velocidade de captura em função da operação

Operação	Vc (m/s)	Observação
Jatos Abrasivos	2,5	Em cabines
Enchimento de barris	0,4 a 0,5	No ponto de operação
Corte manual de granito	1,0	No ponto de operação
Esmerilhamento	1,0 a 2,0	Grelha de fluxo descendente
Pintura a pistola	0,5 a 1,0	Face da cabine
Solda de prata	0,5	Face da coifa
Solda elétrica	0,5 a 1,0	No ponto de operação

Fonte: Costa, 2005

3.1.2 Dutos

Por conseguinte é realizado o dimensionamento dos dutos, e para isso faz-se necessário calcular as perdas de cargas pelo arranjo físico do LS, por cada singularidade como extensões dos dutos bem como componentes e conexões indispensáveis ao funcionamento do sistema.

Com os valores de vazão obtidos nos captores, foi realizada a pré-seleção dos diâmetros dos dutos com base no princípio da continuidade de massa, de forma a garantir um escoamento eficiente. A velocidade do ar precisa ser compatível com o tipo e o comportamento das partículas transportadas, garantindo que os contaminantes sejam conduzidos de maneira adequada até os pontos de exaustão. Assim, determina-se a área da seção transversal em metros quadrados e, a partir dela, calcula-se o diâmetro correspondente para cada trecho da tubulação.

$$Q = A \cdot c \quad (3)$$

Onde:

- Q = Vazão de ar requerida (m³/s),
- c = Velocidade do ar nos dutos (m/s),
- A = Área da seção dos dutos (m²)

De acordo com recomendações técnicas, a velocidade mínima do ar nos dutos deve ser suficiente para evitar a deposição de partículas ao longo do percurso, especialmente em sistemas que transportam contaminantes particulados. Essa velocidade mínima varia conforme a densidade e o tamanho das partículas em suspensão. No caso específico da exaustão de fumos gerados por processos de soldagem, adota-se uma velocidade mínima de transporte de 10 m/s, valor coerente com as faixas recomendadas para esse tipo de aplicação, conforme apresentado na tabela abaixo.

Figura 10 - Velocidade do ar em canalizações

Material	c (m/s)
Vapores, gases, fumos, poeiras muito finas (< 0,05 µm)	10
Poeiras secas finas	15
Poeiras industriais médias	17,5
Partículas grossas	17,5 a 22,5
Partículas grandes, material úmido	> 22,5

Fonte: Costa, 2005

3.1.3 Perdas de Carga

As perdas de carga total são determinadas por um somatório de ΔP_d e ΔP_l , perdas de carga distribuída e localizada respectivamente, além da perda na entrada do captor, as siglas são destrinchadas em:

$$\Delta P_d = \frac{f \times l \times v^2 \times \rho}{(2 \times d)} \quad (4)$$

$$\Delta P_l = \frac{K \times v^2 \times \rho}{2} \quad (5)$$

Onde:

- ρ = Massa específica do ar;
- f = Coeficiente de atrito obtido com auxílio do número de Reynolds e diagrama de Moody;
- d = Diâmetro do duto (m);
- l = Comprimento da tubulação (m);
- v = Velocidade (m/s);
- K = Coeficiente de atrito das curvas.

Para encontrar o coeficiente de atrito “f” é necessário o cálculo do número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa da parede do duto para definirmos o tipo de escoamento no diagrama de Moody. Para isso é realizado o cálculo abaixo:

$$Re = \rho \cdot \frac{v \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

$$\frac{\varepsilon}{D} \quad (7)$$

Onde:

- Re = Número de Reynolds;
- μ = Viscosidade dinâmica (Pa.s);
- ε = Rugosidade absoluta (mm);

3.1.4 Ventilador

O dimensionamento do ventilador será a última etapa do dimensionamento, pois como a pressão total fornecida pelo mesmo é a somatória das perdas de cargas nas linhas de insulamento e exaustão, sua escolha se dará por meio de pesquisa em catálogo de fabricantes, buscando o modelo que mais se encaixa nos parâmetros determinados.

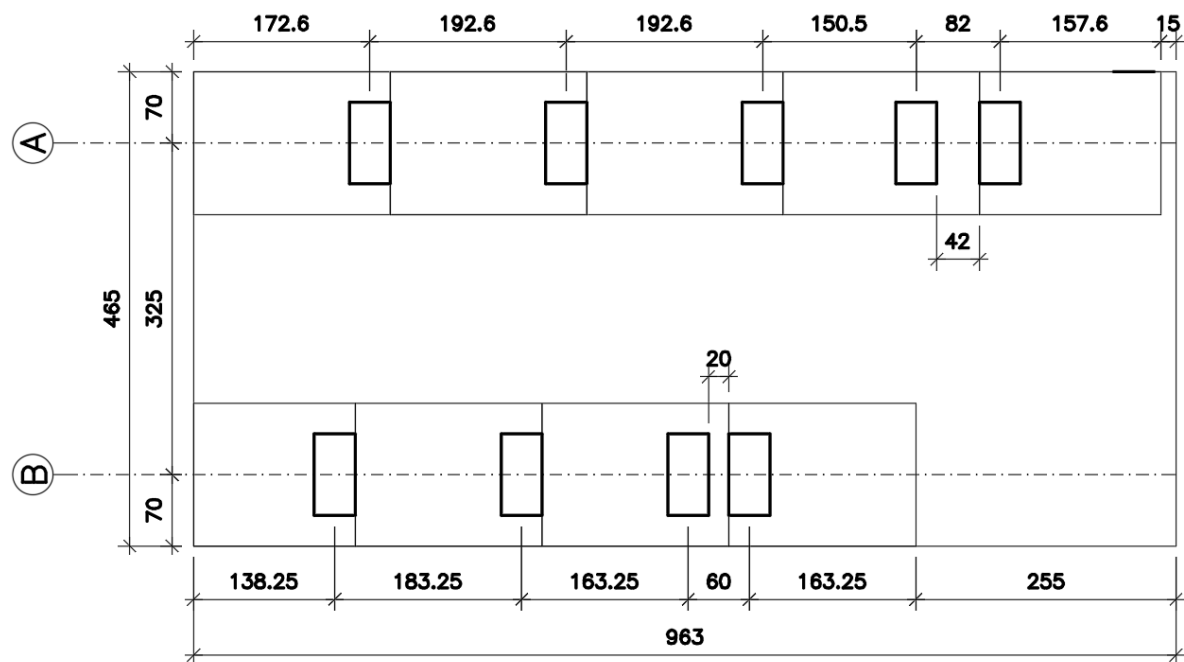
$$P_t = \Delta P_e + \Delta P_i \quad (8)$$

Onde:

- P_t = Pressão total a ser fornecida pelo ventilador;
- ΔP_i = Perdas de carga nas linhas de insulamento;
- ΔP_e = Perdas de carga nas linhas de exaustão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 11 - Planta de locação das bancadas de soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 CAPTOR

O captor tipo braço extrator foi escolhido para o sistema proposto pois é especialmente indicado para processos de soldagem com eletrodo revestido devido à sua área de captura reduzida e bem direcionada, o que permite uma extração localizada eficiente diretamente sobre a fonte de emissão. Essa característica evita a dispersão dos fumos no ambiente, garantindo maior proteção ao operador. Sua estrutura articulada proporciona alta flexibilidade,

possibilitando o posicionamento preciso do captor conforme a necessidade da soldagem, sem interferir na execução do trabalho. Além disso, o braço extrator é de fácil manutenção, o que favorece a limpeza regular e o bom funcionamento do sistema ao longo do tempo. O modelo abaixo para melhor visualização.

Figura 12 - Braços extratores standard



Fonte: Nederman, 2015

Tabela 2 - Dados Técnicos dos braços extratores standard

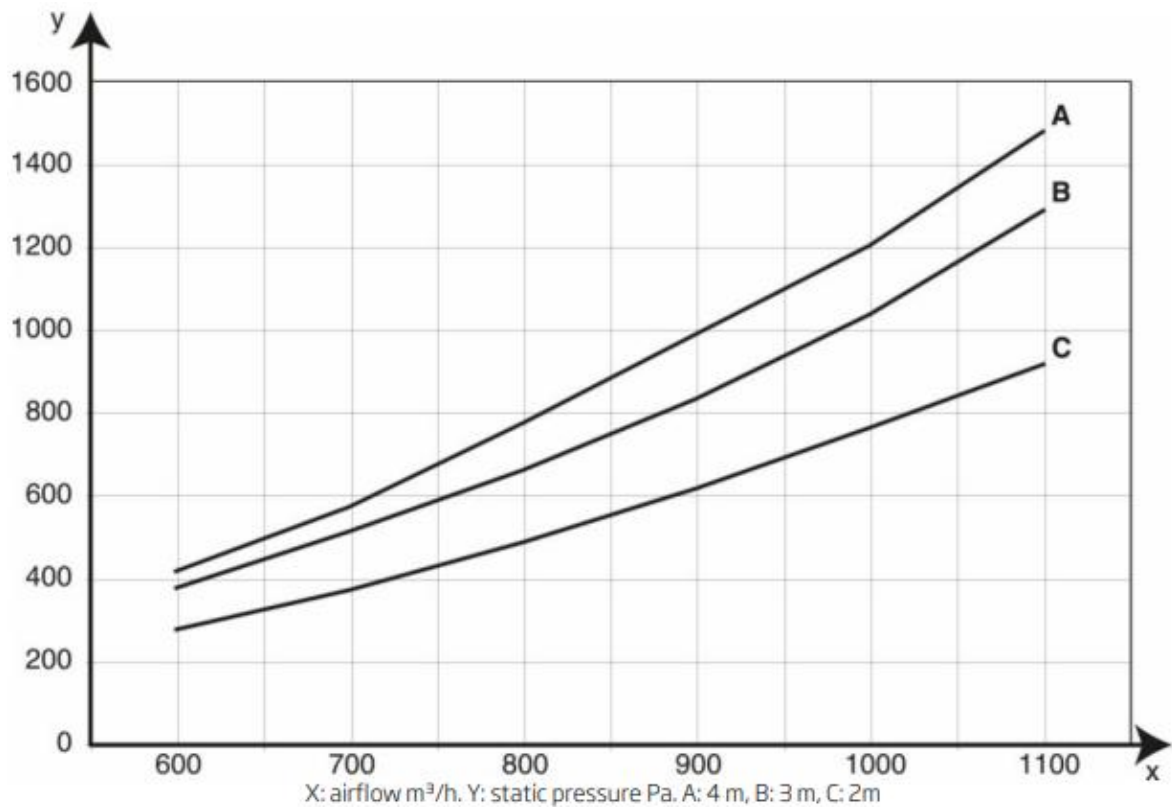
Dados técnicos		
Diâmetro da mangueira	Ø 160 mm	
Queda de pressão no ponto de ligação *	Consulte Figura 2	
Fluxo de ar recomendado **	600-900 m ³ /h	
Temperatura máxima do fumo	70 °C	
Temperatura ambiente	-20 - +60 °C	
Altura de montagem recomendada	Consulte Figura 1	
Nível de ruído ***	67 dB(A)	
Peso	2 m	11 kg
	3 m	13 kg
Recuperação de materiais	91% do peso	

Fonte: Nederman, 2015

Para este componente do sistema faz-se necessário o cálculo da vazão requerida e perda de carga, porém modelos atuais trabalham com uma faixa de vazão predeterminada como visto na imagem acima, e para o caso em estudo será usado a máxima recomendada $900 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

Perda de carga no captor também é consultado na fabricante, por uma tabela fornecida relacionando vazão com perda de carga. E para $900 \text{ m}^3/\text{h}$ têm-se uma perda de carga de 825 Pa para cada captor do sistema.

Figura 13 - Curva de perda de carga (Pa) por vazão (m^3/h)



Fonte: Nederman, 2015

4.2 DUTOS

Primeiramente é dividido dutos em duas classes, trechos principais (A) e secundários (B), pois como ocorrerá troca de seções transversais por todo o sistema serão necessárias derivações de dutos a fim de reduzir a perda de carga. Com isso é calculada a vazão para cada trecho da tubulação principal (A) com um simples somatório das vazões de cada captor.

Tabela 3 - Vazões para os trechos principais

trecho	Q(m3/s)
A1	0,25
A2	0,5
A3	0,75
A4	1
A5	1
A6	0,25
A7	0,5
A8	0,75
A9	1,75
A10	2
A11	2,25
A12	2,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Após o somatório é calculado o diâmetro mínimo de cada trecho principal, utilizando a velocidade nos dutos $c = 10\text{m/s}$ e a vazão necessária em cada trecho. O diâmetro é aproximado para mais em todos os trechos para não comprometer o sistema.

E por conseguinte, com o projeto CAD em mãos é medido o comprimento da tubulação para o cálculo das perdas de carga.

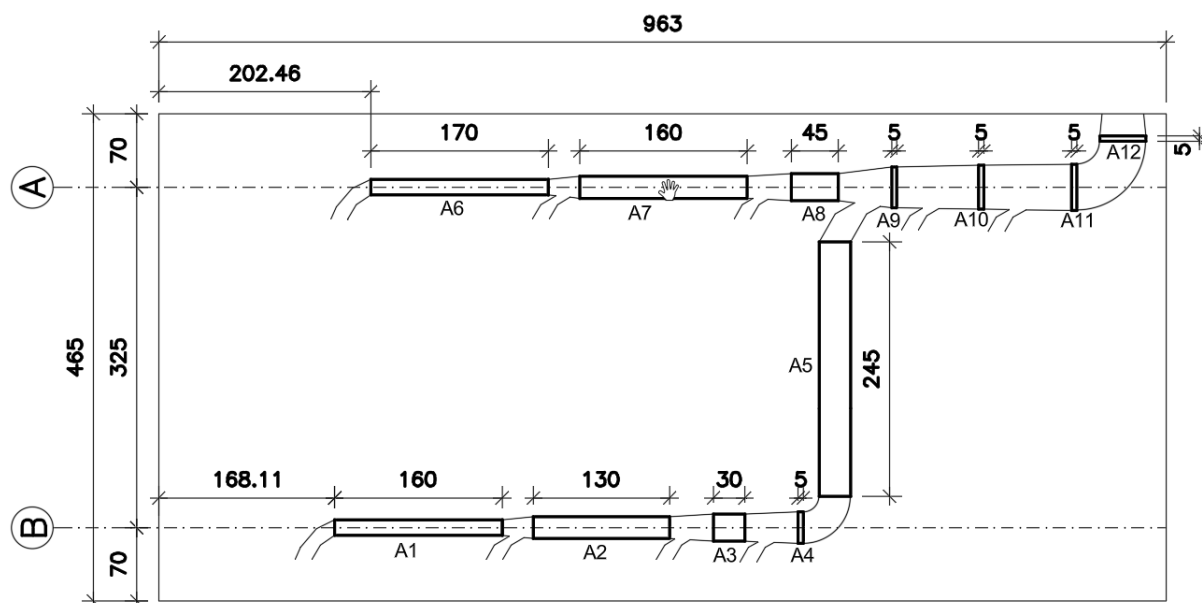
$$d = \sqrt{(4 \times Q) \div (\pi \times c)}$$

Tabela 4 - Dimensionamento dos Trechos principais

trecho	Q(m3/s)	Diâmetro min(m)	Diâmetro aprox+(cm)	Velocidade (m/s)	Comprimento(m)
A1	0,25	0,14567	15	15	1,6
A2	0,5	0,20601	21		1,3
A3	0,75	0,25231	26		0,3
A4	1	0,29135	30		0,05
A5	1	0,29135	30		2,45
A6	0,25	0,14567	15		1,7
A7	0,5	0,20601	21		1,6
A8	0,75	0,25231	26		0,45
A9	1,75	0,38541	39		0,05
A10	2	0,41203	42		0,05
A11	2,25	0,43702	44		0,05
A12	2,25	0,43702	44		0,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 - Planta de localização dos trechos principais



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo das perdas de cargas nos trechos principais primeiramente é escolhido o material dos dutos e a escolha do ferro galvanizado para o transporte de fumos metálicos se justifica pela sua alta resistência térmica, mecânica e à corrosão, características fundamentais em ambientes industriais onde há presença de fumos quentes e partículas potencialmente abrasivas, como os gerados por processos de soldagem. Diferente do PVC rígido, que seria a próxima opção viável, porém apresenta baixa tolerância ao calor e risco de acúmulo de carga eletrostática — podendo causar faíscas ou deformações —, o ferro galvanizado é mais seguro e durável, além de estar amplamente recomendado por normas técnicas como o manual da ACGIH (1998) e pelas diretrizes da NIOSH e ABNT. Essas fontes reforçam que dutos metálicos são os mais adequados para garantir a integridade do sistema e a proteção dos trabalhadores contra contaminantes perigosos no ar.

Dessa forma para o cálculo da perda de carga é realizado determinando o atrito por meio da comutação entre o número de Reynolds e a rugosidade específica, que segundo o diagrama de Moody (Anexo 1) a do ferro galvanizado é de 0,15mm. Com a formula X e Y os resultados são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 5 - Perda de carga dos trechos principais

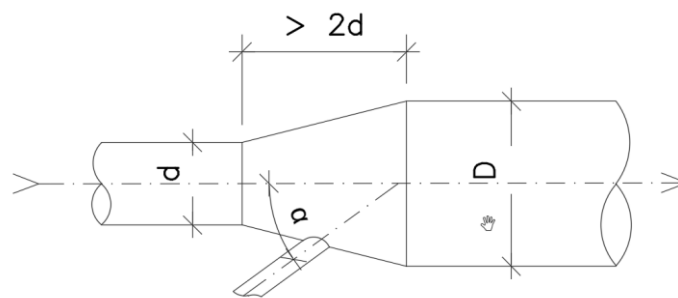
trecho	Diâmetro (m)	Comprimento(m)	Re	ϵ/D	f (tabelado)	ΔP_d (Pa)	ΔP_d total(Pa)
A1	0,15	1,6	140854,8387	0,001	0,022	30,74016	126,15
A2	0,21	1,3	197196,7742	0,000714286	0,0195	15,81296786	
A3	0,26	0,3	244148,3871	0,000576923	0,0185	2,796239423	
A4	0,3	0,05	281709,6774	0,0005	0,0185	0,40390125	
A5	0,3	2,45	281709,6774	0,0005	0,0185	19,79116125	
A6	0,15	1,7	140854,8387	0,001	0,0215	31,919115	
A7	0,21	1,6	197196,7742	0,000714286	0,0195	19,46211429	
A8	0,26	0,45	244148,3871	0,000576923	0,0185	4,194359135	
A9	0,39	0,05	366222,5806	0,000384615	0,0165	0,277104808	
A10	0,42	0,05	394393,5484	0,000357143	0,0165	0,257311607	
A11	0,44	0,05	413174,1935	0,000340909	0,0165	0,245615625	
A12	0,44	0,05	413174,1935	0,000340909	0,0165	0,245615625	

Fonte: Elaborado pelo autor

Outrossim os trechos secundários ao invés do fator de atrito possuem um coeficiente K , que por sua vez é tabelado conforme a geometria do mesmo. Vale ressaltar que o comprimento de cada derivação foi no mínimo igual ao dobro da menor seção como ilustra a imagem a baixo, tal parâmetro é fundamental para a junção de ramificações ter a mesma pressão estática e se tenha um sistema balanceado (LISBOA, 2007).

Além das derivações foi selecionada uma redução ao final da tubulação (B9), para a conexão ao filtro escolhido posteriormente.

Figura 15 - Valores de K para derivações de acordo com o ângulo

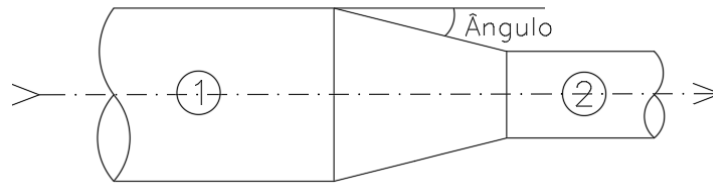


Secundário (derivação)

$\alpha (^{\circ})$	K
15	0.09
20	0.12
30	0.18
45	0.28
50	0.32
60	0.44
90	1.00

Fonte: Adaptado de MACINTYRE, 1990

Figura 16 - Valores de K para reduções de acordo com o ângulo



Ângulo em graus	$K = \Delta P / (P_2 - P_1)$
5	0.05
10	0.06
15	0.08
20	0.10
25	0.11
30	0.13
45	0.20
60	0.30

Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira (2009)

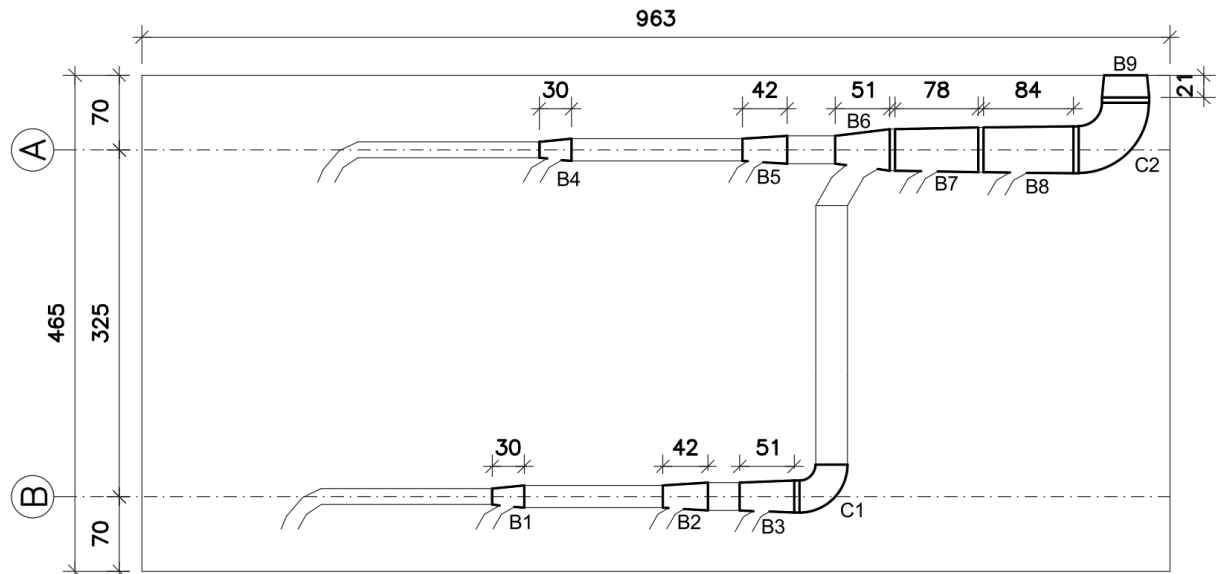
De acordo com a imagem acima e a fórmula 5, visto que os dutos dos captores foram instalados a um ângulo de 30° , é chegado no resultado apresentado na tabela abaixo.

Tabela 6 - Perda de carga dos trechos secundários (B)

trecho	K	Velocidade (m/s)	ΔP (Pa)	ΔP total (Pa)
B1-B8	0,18	15	23,5791	195,18255
B9	0,05	15	6,54975	

Fonte: Elaborado pelo autor

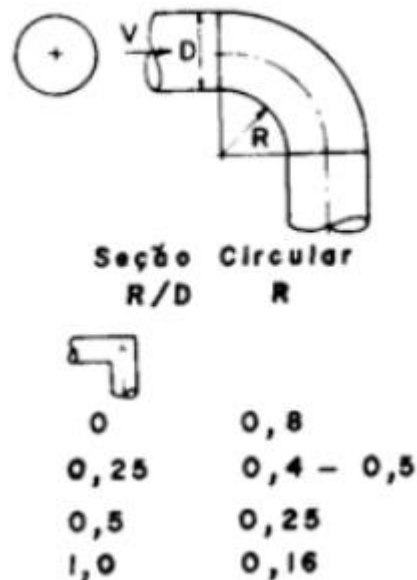
Figura 17 - Planta de locação dos trechos secundários



Fonte: Elaborado pelo autor

Além dos trechos representados por A e B o trabalho apresenta duas curvas de 90°, C1 para conectar A4 e A5 e C2 que conectam A11 e 12. Vale ressaltar que curvas lisas foram preferidas do que curvas em gomos pela menor perda de carga, além disso foram dimensionadas para se obter uma relação R/D igual a 0,5.

Figura 18 - Coeficiente de atrito para curvas de 90°



Fonte: MACINTYRE, 1990

Com o valor de K em mãos ao usarmos a fórmula 5 novamente é chegado ao resultado:

Tabela 7 - Perda de carga dos trechos secundários (C)

Curvas	R/D	K	V (m/s)	ΔP_l (Pa)	ΔP_l total (Pa)
C1 e C2		0,5	0,25	15	32,74875
					65,4975

Fonte: Elaborado pelo autor

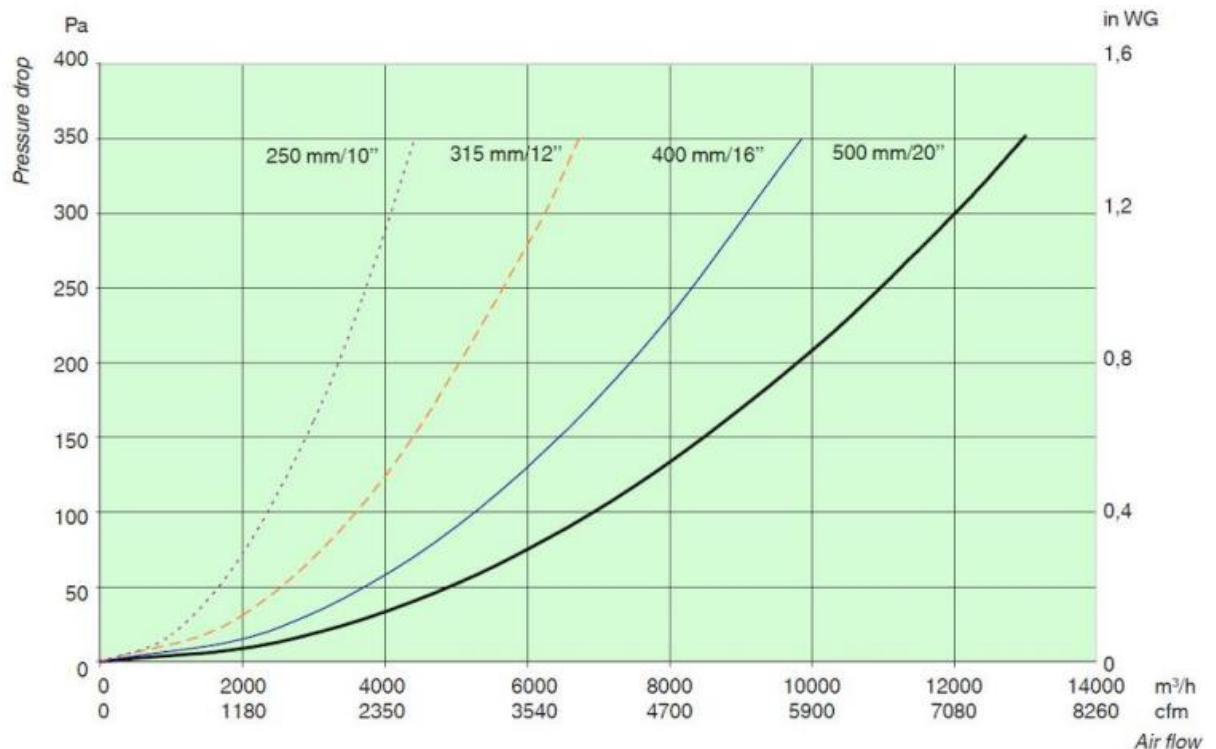
4.3 FILTRO

Para escolhermos um filtro adequado para o sistema, primeiramente é estudado quais partículas do fluxo serão retidas, e de acordo com Niosh (2007), as partículas dos fumos metálicos são $< 1 \mu\text{m}$ categorizadas como ultrafinas, além de atender a vazão máxima do sistema de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $8100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Após a análise dos parâmetros e um estudo de mercado foi elencado o FilterMax DF 80, da Nederman, com uma solução eficaz, pois é amplamente utilizada para o controle de fumos metálicos gerados em processos de soldagem, como o eletrodo revestido (SMAW), MIG/MAG e outros, atende a condição de a reter de partículas ultrafinas por sua construção robusta e modular, combinada com filtros de cartucho de alta eficiência – exatamente a faixa predominante nos fumos de solda. Além disso, o sistema pode ser equipado com o kit W3, que assegura conformidade com a norma EN ISO 15012-1, atendendo aos critérios mais rígidos de proteção à saúde do trabalhador exposto a partículas perigosas como cromo, níquel e manganês.

Do ponto de vista da capacidade de vazão, o FilterMax DF 80 é igualmente adequado. O modelo suporta um fluxo de ar de até $8.600 \text{ m}^3/\text{h}$, o que o torna compatível com a demanda de $8.100 \text{ m}^3/\text{h}$ sem comprometer o desempenho nem sobrecarregar o sistema. Isso é possível graças ao seu sistema de limpeza automática por pulso de ar (pulse jet), que mantém os filtros desobstruídos e prolonga sua vida útil, mesmo sob cargas altas de partículas. A eficiência do conjunto depende da correta seleção da área filtrante e da manutenção dos limites de velocidade de face nos filtros, mas o DF 80 já é dimensionado para aplicações industriais exigentes, oferecendo segurança e estabilidade no controle da poluição do ar.

Figura 19 - Perda de carga do FilterMax DF 80



Fonte: Nederman (2016).

Para o dimensionamento trabalhado foi escolhido o filtro com 400mm de diâmetro que possui uma perda de carga de 240Pa na entrada e 130Pa na saída.

4.4 VENTILADOR

E por fim para o dimensionamento do ventilador é realizada a soma de todas as perdas de cargas, tanto localizadas como distribuída de acordo com a tabela.

Tabela 8 - Perda de carga total do sistema

$\Delta P_{I \text{ total}} \text{ (Pa) Captores}$	$\Delta P_{I \text{ total}} \text{ (Pa) trechos (B)}$	$\Delta P_{I \text{ total}} \text{ (Pa) Curvas}$	$\Delta P_{d \text{ total}} \text{ (Pa) trechos (A)}$	$P_t \text{ FINAL (Pa)}$
7425	195,18	65,4975	126,15	7811,825716

Fonte: Elaborado pelo autor

Para pesquisa de mercado o valor da pressão é convertido para milímetros de coluna d'água (796.58 mmca) valor que serve como referência juntamente com a vazão máxima de 8100 m³/h para selecionar um ventilador que atenda adequadamente tanto à vazão exigida quanto à resistência do sistema. De acordo com Costa (2005), os tipos de ventiladores mais recomendados para esse tipo de aplicação — ventilação local exaustora — são os centrífugos com pás curvadas para trás (também conhecidos como limit load) e, em alguns casos, os ventiladores de pás radiais.

Figura 20 - Dados do ventilador dimensionado

Modelo	LMS - 630
Classe	IV
Potência (Hp)	50
Rotação (rpm)	3368
Vel. Periférica (m/s)	110
Vel. Descarga (m/s)	15

Fonte: Elaborado pelo autor

O ventilador foi selecionado com base no catálogo da linha LMS da Otam, categorizados como ventiladores centrífugos tipo limit load. E a seleção do modelo LMS – 630 se deu pelos parâmetros antes mencionados em sua curva característica pressão por vazão ($\text{mmca/m}^3/\text{h}$) mencionada no anexo 3.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos riscos ocupacionais associados aos fumos metálicos gerados durante o processo de soldagem por eletrodo revestido, foi possível comprovar a necessidade de um sistema de ventilação local exaustora (VLE) no laboratório de soldagem do IFPI – Campus Teresina Central. A proposta apresentada neste trabalho buscou não apenas atender às exigências normativas, mas também garantir a proteção à saúde dos usuários e a eficiência operacional do ambiente de ensino.

O trabalho foi desenvolvido com base em critérios técnicos consistentes, envolvendo o dimensionamento dos captosres, dutos, perdas de carga, ventilador e filtro. A escolha do ventilador LMS - 630 demonstrou-se adequado às exigências de vazão e pressão total do sistema, garantindo desempenho satisfatório na captação de contaminantes diretamente na fonte. O uso do software AutoCAD permitiu a elaboração precisa dos desenhos e da planta baixa, o que facilitou a visualização do sistema e o planejamento de sua implementação em um ambiente composto por nove cabines de soldagem.

Conclui-se, portanto, que a implantação do sistema proposto contribuirá significativamente para a melhoria das condições de trabalho no laboratório, promovendo um ambiente mais seguro, saudável e compatível com as boas práticas de engenharia. O dimensionamento por se mostrar viável tecnicamente, é válido como referência para futuras intervenções em ambientes similares de ensino ou industriais.

REFERÊNCIAS

- ANSCHAU, Léo Diel. *Análise de fumos de soldagem, sistemas de proteção e desenvolvimento de protótipo para estudo da emissão de fumos de soldagem para processo Mig/Mag*. 2010. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Panambi, 2010. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/server/api/core/bitstreams/6111bdd9-0798-4648-b419-1952be6cab21/content>. Acesso em: 15 maio 2025.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora NR-9: Programa de Prevenção de Riscos Ambientais*. Portaria SIT n.º 5.784, de 09 dez. 2019. Diário Oficial da União, Brasília, 2019.
- BRASIL. Ministério da Economia. *NR 12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos*. Portaria SEPRT n.º 916, de 30 de julho de 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12>. Acesso em: 28 jul. 2025.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora NR-15: Atividades e Operações Insalubres. Anexos 11–13*. Emenda publicada no DOU em 30 nov. 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Norma Regulamentadora NR-15: *Atividades e Operações Insalubres*. Anexo 11 a 13. Diário Oficial da União, Brasília, 2019.
- BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários*. Rio de Janeiro, 2020.
- BURGESS, William A. *Identificação de possíveis riscos à saúde do trabalhador nos diversos processos industriais*. Tradução de Ricardo Baptista. Belo Horizonte: Ergo Editora, 1997.
- ESCOLA ESTADUAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL. *Curso Técnico em Mecânica*. Ceará, 2012.
- EXPOSIÇÃO aos fumos de solda: entenda o que diz a norma. HO Fácil, 2018. Disponível em: <https://hofacil.com.br/blog/exposicao-aos-fumos-de-solda-entenda-o-que-diz-a-norma/>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- FILHO, Valle Pereira; MELO, C. *Ventilação industrial*. Apostila do curso de Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1992.
- FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO (FUNDACENTRO). *NHO 07 – Ventilação local exaustora em galvanoplastia*. Brasília: Fundacentro, 2001. Recurso eletrônico. Disponível em: <https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/centrais-de-conteudo/biblioteca/publicacoes-institucionais> . Acesso em: 10 jan. 2025
- GAREIS, Bernardo. *A soldagem, simples como ela é*. Recife: SACTES, 1994. 223 p. (Coleção Manuais Técnicos, n. 9).

GELESKI, André. *Dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora para fumos metálicos*. 2015. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Horizontina, RS, 2015. Disponível em: <https://fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2015/AndreGeleski.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

GOODFELLOW, Howard D.; TAHTI, Esko (orgs.). *Industrial Ventilation Design Guidebook*. 1. ed. San Diego – London: Academic Press, 2001. 1519 p. ISBN 0-12-289676-9.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). *IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Vol. 118: Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide*. Lyon: IARC, 2018. Disponível em: <https://publications.iarc.who.int/.../Welding-Molybdenum-Trioxide-And-Indium-Tin-Oxide-2018>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LISBOA, H. M. Controle da poluição atmosférica. In: LISBOA, H. M. *Ventilação industrial*. Florianópolis: ENS/UFSC, 2007. Cap. VI. Recurso eletrônico. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/CapVentilacaoIndustrial_GERAL.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

LYTTLE, Kevin. Decrease fume, increase productivity: optimized consumables selection for an improved working environment and reduced welding costs. *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, Roissy, v. 43, supl., 1999. Edição especial: *The Human Factor and Its Environment*. MACINTYRE, A. J. *Ventilação industrial e controle da poluição*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MACINTYRE, A. J. *Ventilação industrial e controle da poluição*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MESQUITA, Armando Luis de Souza; GUIMARÃES, Fernando de Araújo; NEFUSSI, Nelson. *Engenharia de ventilação industrial*. São Paulo: CETESB, 1988.

NEDERMAN DO BRASIL. *Riscos e soluções para os fumos de solda: manual de saúde para soldadores*. Jundiaí, SP: Nederman, 2010. Disponível em: <https://www.nederman.com/~media/nederman-br/folders---capas-e-arquivos/manual-de-saude-para-soldadores.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

NEDERMAN. *Braços Extratores Standard: product leaflet*. Jundiaí, SP: Nederman Holding AB, 2025. 6 p. Disponível em: https://www.nederman.com/catalog-images/resources/508294/original/pt-br_product%20sheet%20pdf_bra%C3%A7os_extratores_standard.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

NIOSH – NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. *The NIOSH Total Worker Health™ Program: working for a safer and healthier workforce*. Cincinnati, OH: NIOSH, 2012. (NIOSH Publication no. 2012-146). Recurso eletrônico. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2012-146/pdfs/2012-146.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ROBERT, Geoffrey. Ventiladores centrífugos x axiais: qual é a diferença? *AlibabaReads*, 2024. Disponível em: <https://reads.alibaba.com/pt/centrifugal-vs-axial-fans-whats-difference/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SANTOLAIA, Stella de Paiva Espíldora; PINA, Lucas Soares. Avaliação quantitativa dos agentes químicos presentes no processo de soldagem. In: MACHADO, M. W. K. (Org.) *A engenharia de produção na contemporaneidade: volume 4*. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2018. p. 115–123. Recurso eletrônico. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/4635> . Acesso em: 21 jan. 2025.

SANTOS, Matheus Henrique dos. *Análise de captores em sistema de ventilação local exaustora*. 2022. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23389/1/analisecaptorsistemaventilacaolocal.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2025.

SILVA, Castro. *Gráficos de perda de carga*. [s.d.]. Disponível em: https://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/FT/graficos_perda.pdf. Acesso em: 22 jun. 2025.

SOLER PALAU. *LMS-010-2020-J: product sheet*. Ripoll, ESP: Soler & Palau Ventilation Group, 2020. [formato PDF, 4 p.]. Disponível em: <https://solerpalau.com.br/biblioteca/produto/027/LMS-010-2020-J.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

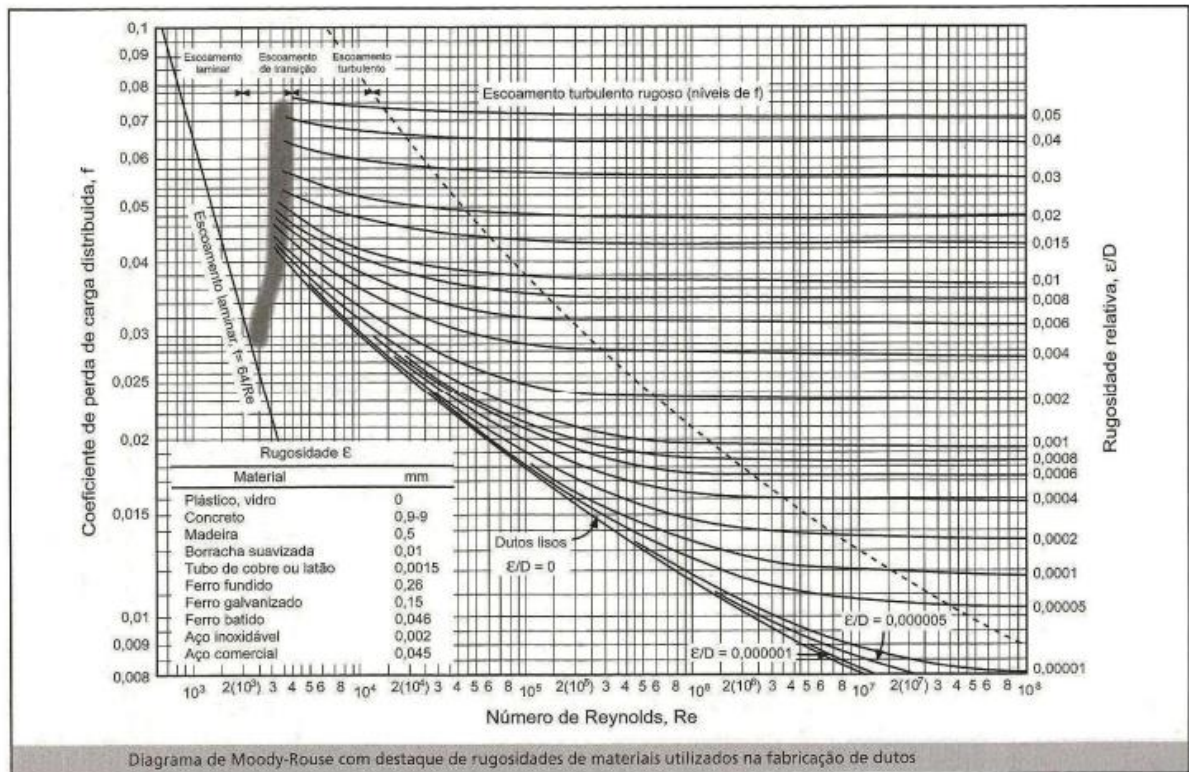
TURAZZI, G. *Dimensionamento de um sistema de exaustão local em uma indústria moveleira*. 2009. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24023/000742658.pdf?sequen>. Acesso em: 22 jun. 2025.

UNIVALI – UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ. *Laboratório de Tecnologia de Soldagem*. Itajaí, SC: Univali, 2022. Disponível em: <https://www.univali.br/laboratorios/laboratorio-de-tecnologia-de-soldagem>. Acesso em: 10 jun. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Escola de Engenharia Civil. *Perdas de carga localizadas (equivalência em metros de tubulação): conexões de aço galvanizado, ferro fundido e ferro maleável*. Goiânia: UFG, [s.d.]. Disponível em: <https://eec-ufg.tripod.com/IHSP/Perdas.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

VIEIRA, Janete V. *Solda: eletrodo revestido*. Instituto Federal Sul-rio-grandense – Campus Pelotas, 2011.

ANEXO 1 – DIAGRAMA DE MOODY-ROUSE



ANEXO 2 – FICHA TÉCNICA LIS-200 POWER

FICHA TÉCNICA	
LIS-200 POWER	 UMA VARIEDADE DE PRODUTOS PARA VOCÊ
CARACTERÍSTICAS	
	✓ Excelente ciclo de trabalho ✓ Bivolt automática ✓ Leve e portátil ✓ Proteção térmica ✓ Fácil abertura do arco ✓ Baixo consumo de energia ✓ Função tig através de tocha seca (Não acompanha tocha) ✓ Solda eletrodos de até 5mm; ✓ Sistema igbt
INDICADA PARA O USO:	Uso profissional, indústria, oficinas, serralherias, pequenos reparos, fabricação geral
GARANTIA:	Inversor: 12 meses contra defeito de fabricação.
Produto	Inversor de Solda LYNUS LIS-200 POWER
Código	00010968.5
Tensão	1 x 127Vac / 1 x 220Vac Automático
Frequência da rede	50/60 Hz
Ciclo de trabalho	60% @ 120A / 60% @ 160A
Fator de potência com corrente máxima	0,93
Eficiência com corrente máxima	85%
Grau de proteção da carcaça	IP21S
Potencia aparente máxima	6,3 KVA / 9,4 KVA
Faixa de corrente	20A - 120A / 20A - 200A
Tensão sem carga	75V
Engate	13mm
Display	Sim
Ventilação	Forçada
Norma	IEC 60974 -1
Tig	Sim
Abertura do arco tig	Contato
Anti stick	Sim
Hot start	Sim
Arc force	Sim

ANEXO 3 – CURVA CARACTERÍSTICA DO VENTILADOR LMS-630

