

VENTILACIÓN FORZADA EN PILOTES HINCADOS

Dilución de humos metálicos de soldadura en
espacios confinados durante la construcción
del Terminal Portuario San Martín, 2020



ANDRES EDUARDO BELLO SUAZO, JUAN CARLOS PALOMINO
BALDEON, JEAN CARLO REYES PINEDO



IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Ventilación Forzada en Pilotes Hincados

Dilución de humos metálicos de soldadura
en espacios confinados durante la
construcción del Terminal Portuario San
Martín, 2020

Editor



Andres Eduardo Bello Suazo

abellosuazo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-2649-9666>

Universidad Científica del Sur, Lima – Perú

Juan Carlos Palomino Baldeon

jpalomino@clinicadeltrabajador.com.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-7870-5391>

Universidad Científica del Sur, Lima – Perú

Jean Carlo Reyes Pinedo

jc.reyespinedo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7094-0992>

Universidad Científica del Sur, Lima – Perú

INDICE

RESEÑA	4
INTRODUCCIÓN	5
PARTE I	7
CAPÍTULO 1: ENFOQUE DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	8
1.1 Justificación del estudio	8
1.2 Objetivos	9
1.3 Alcances y limitaciones.....	10
PARTE II	12
CAPÍTULO 2: DISEÑO METODOLÓGICO	12
2.1 Contexto, diseño y criterios de elegibilidad de la población.....	13
2.2 Muestreo, tamaño de la muestra y variables de estudio	15
2.3 Instrumento de medición.....	15
2.4 Aspectos éticos.....	17
PARTE III	18
3.1 Parámetros evaluados	18
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES	35
4.1 Propuestas de mejora para futuras obras.....	35
4.2 Sugerencias para futuras investigaciones.....	36
REFERENCIAS	38

RESEÑA

Este libro presenta una investigación científica aplicada que aborda un problema crítico en las obras de infraestructura portuaria: la exposición a humos metálicos generados durante trabajos de soldadura en espacios confinados. Centrándose en el caso específico del Terminal Portuario General de San Martín (2020), el estudio evalúa la eficacia de un sistema de ventilación forzada como medida técnica de control ambiental y prevención de riesgos ocupacionales.

A través de una estructura metodológica rigurosa, el autor describe el diseño experimental, los criterios de muestreo, los instrumentos de medición y los procedimientos de análisis utilizados para cuantificar las concentraciones de metales en el aire, tales como aluminio, cobre, manganeso y zinc. Los resultados, obtenidos mediante espectrofotometría de absorción atómica, permiten contrastar las condiciones con y sin ventilación, y proporcionan evidencia objetiva sobre el impacto real del sistema implementado.

Lejos de limitarse a una comprobación técnica, la obra aporta reflexiones críticas sobre la aplicabilidad de estas soluciones en contextos reales de obra, e identifica las limitaciones del sistema evaluado. En ese marco, el libro ofrece recomendaciones concretas para ingenieros, profesionales de seguridad y salud ocupacional, y tomadores de decisiones, además de proponer líneas futuras de investigación que permitan optimizar las estrategias de ventilación en espacios reducidos.

Con un lenguaje técnico claro, respaldado por datos empíricos y análisis comparativos, este libro constituye un aporte relevante al campo de la ingeniería de seguridad, la higiene industrial y la gestión de riesgos en entornos de construcción de alta complejidad. Es una obra de consulta clave para quienes buscan mejorar las condiciones laborales mediante soluciones basadas en evidencia científica.

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de obras de infraestructura portuaria, uno de los desafíos más importantes —y a menudo invisibilizados— es la protección efectiva de la salud de los trabajadores que operan en condiciones extremas, especialmente en espacios confinados. Entre estas labores críticas se encuentran los trabajos de soldadura realizados al interior de pilotes hincados, donde la ventilación natural es casi inexistente y la acumulación de contaminantes en el entorno de trabajo constituye un riesgo significativo para la salud ocupacional.

Este libro nace de la necesidad de evaluar científicamente la eficacia de un sistema de ventilación forzada como estrategia de control ambiental para reducir la concentración de humos metálicos en dichos espacios. La investigación se centra en el caso real de la construcción del Terminal Portuario General de San Martín, ejecutado en el año 2020, lo que otorga al estudio un valor aplicado y contextualizado en condiciones operativas reales.

A través de una metodología cuantitativa rigurosa, que incluye muestreo, mediciones con equipos certificados y análisis en laboratorio mediante espectrofotometría de absorción atómica, se cuantificaron los niveles de exposición a metales como aluminio, cobre, manganeso y zinc. Estos datos permitieron comparar la calidad del aire con y sin la implementación del sistema de ventilación forzada, aportando evidencia empírica para evaluar su impacto.

Más allá de los resultados técnicos, el libro propone una reflexión crítica sobre las medidas comúnmente adoptadas para la mitigación de riesgos en espacios confinados, evidenciando las limitaciones de ciertas tecnologías cuando no se adaptan adecuadamente a las condiciones del entorno, donde no se aplica estudio y diseño de un sistema de ventilación forzada. Asimismo, se ofrecen recomendaciones prácticas y líneas de investigación futuras orientadas al desarrollo de soluciones más eficaces, sostenibles y replicables.

La obra está dirigida a profesionales de la ingeniería, seguridad y salud en el trabajo, así como a investigadores interesados en la gestión de riesgos en ambientes

laborales complejos. También constituye una herramienta útil para tomadores de decisiones, consultores y académicos que busquen incorporar evidencia científica en el diseño y evaluación de medidas de prevención.

En conjunto, este libro no solo documenta un estudio técnico, sino que también promueve una visión integral de la seguridad industrial basada en datos, análisis crítico y mejora continua, con el fin de proteger la vida y la salud de quienes construyen las grandes obras que sostienen el desarrollo.

PARTE I

FUNDAMENTOS DEL ESTUDIO

El desarrollo de proyectos de infraestructura portuaria plantea desafíos técnicos complejos que demandan soluciones integrales en materia de seguridad **y salud** ocupacional, control ambiental y eficiencia operativa. En particular, la ejecución de procesos de soldadura en espacios confinados —como el interior de pilotes hincados durante la construcción de terminales portuarios— representa un riesgo significativo para la salud de los trabajadores debido a la acumulación de humos metálicos en concentraciones peligrosas.

El presente estudio surge de la necesidad de evaluar la eficacia de un sistema de ventilación forzada diseñado para diluir y controlar los contaminantes generados por **el proceso de** soldadura al interior de pilotes hincados, tomando como caso de análisis el proyecto de construcción del Terminal Portuario General San Martín, desarrollado en el año 2020. Este contexto ofrece una oportunidad única para analizar en condiciones reales los parámetros críticos de ventilación, así como las concentraciones de metales como aluminio, cobre, manganeso y zinc, mediante técnicas de espectrofotometría de absorción atómica.

Esta primera parte del libro proporciona los fundamentos sobre los cuales se estructura la investigación. Se describe el contexto general del estudio, el diseño metodológico adoptado, los criterios de selección de la población objetivo y los aspectos éticos que guían la recolección de datos. Asimismo, se detallan los instrumentos, equipos y materiales utilizados en las fases de monitoreo y medición.

A través de este enfoque riguroso y sistemático, se busca establecer una base sólida para el análisis posterior de los resultados, permitiendo extraer conclusiones relevantes y formular recomendaciones aplicables a proyectos similares en entornos de alta complejidad técnica.

CAPÍTULO 1: ENFOQUE DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La exposición a humos metálicos de soldadura representa uno de los principales riesgos ocupacionales en el sector construcción, especialmente en tareas desarrolladas en espacios confinados como el interior de pilotes hincados. En estos ambientes, la ventilación natural es prácticamente nula, lo que permite la acumulación de gases y partículas metálicas en niveles potencialmente peligrosos para la salud humana. La evaluación e implementación de sistemas técnicos que mitiguen dicha exposición es clave para garantizar condiciones laborales seguras y sostenibles.

Este estudio se centra en el estudio de la aplicación de un sistema de ventilación forzada para reducir la concentración de humos metálicos generados durante la soldadura de anillos interiores en pilotes hincados en el Terminal Portuario General de San Martín (2020). Esta intervención tiene como propósito no solo evaluar su eficacia técnica, sino también contribuir con evidencia que pueda ser considerada en futuras normativas o protocolos de seguridad en obras similares.

Esta introducción constituye el punto de partida para comprender la necesidad de implementar soluciones técnicas eficientes en la gestión de la calidad del aire en entornos confinados, y sienta las bases conceptuales para el desarrollo metodológico y analítico de los capítulos siguientes.

1.1 Justificación del estudio

El sustento técnico para la implementación de medidas de seguridad y control de riesgos resulta esencial para diseñar mecanismos efectivos que contribuyan a eliminar o minimizar peligros en tareas de alta exposición. En el caso de trabajos realizados en espacios confinados, como el interior de pilotes, la única forma confiable de determinar si una atmósfera es segura o peligrosa es mediante el monitoreo directo de sus condiciones ambientales, ya que no es posible identificarlas visualmente (1).

Durante los trabajos de soldadura, las concentraciones de gases y metales emitidos varían en función de múltiples factores técnicos: tipo de soldadura utilizada (2),

naturaleza del material base, composición de los electrodos, y parámetros eléctricos como voltaje y corriente (3). Los humos generados pueden contener elementos tóxicos como manganeso, níquel, cromo, cobalto y plomo, además de gases como CO₂, CO, NO_x y O₃, todos ellos con efectos nocivos en la salud (4).

Las consecuencias pueden presentarse a corto plazo, tales como fiebre por humos metálicos, intoxicaciones agudas o asfixia química, consideradas muchas veces como accidentes laborales (5). A largo plazo, la exposición constante puede generar enfermedades profesionales de tipo sensibilizante, cancerígeno o incluso teratógeno (6)(7).

Particularmente, en la construcción del muelle del Terminal Portuario General de San Martín, los pilotes tubulares de acero son tratados mediante soldadura de anillos interiores, lo que requiere que los trabajadores ingresen a estos espacios confinados para realizar la tarea, exponiéndose a una atmósfera altamente contaminada por el propio proceso (8).

Las estadísticas oficiales del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo del Perú respaldan la urgencia de este tipo de investigaciones: solo en el primer semestre de 2019 se reportaron 11 casos de asfixia y 97 por intoxicación química (9), reflejando la importancia de establecer medidas preventivas efectivas.

Ante este panorama, la implementación de un sistema de ventilación forzada tiene como objetivo reducir las concentraciones de contaminantes y mantener un entorno de trabajo más seguro (10). Este trabajo busca aportar evidencia científica para sustentar dicha implementación en contextos similares.

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Determinar la diferencia de concentraciones de humos metálicos de soldadura con la implementación del sistema de ventilación forzada, aplicado en el interior de pilotes hincados durante la construcción del

Terminal Portuario General de San Martín (2020).

Objetivos específicos

- Evaluar los niveles de concentración de metales presentes en el aire interior de los pilotes antes y después de la implementación del sistema.
- Identificar los principales contaminantes metálicos generados por la actividad de soldadura.
- Analizar el impacto del sistema de ventilación forzada en la calidad del aire y el nivel de riesgo ocupacional.
- Establecer recomendaciones técnicas basadas en los resultados obtenidos.

1.3 Alcances y limitaciones

Este estudio se desarrolla en el contexto específico de la construcción del Terminal Portuario General de San Martín, tomando como caso de análisis los pilotes hincados que requirieron intervención mediante soldadura interior. El enfoque está centrado en evaluar la eficacia del sistema de ventilación forzada como estrategia para la dilución de humos metálicos en espacios confinados.

El alcance del estudio se limita a los parámetros medidos en un periodo de ejecución concreto, bajo condiciones controladas y con una población específica de trabajadores expuestos. No se evalúan otros riesgos asociados al entorno portuario ni otras fuentes de exposición. Además, los resultados están condicionados por las características de los equipos de medición y las variables operativas del proceso de soldadura.

A pesar de estas limitaciones, los hallazgos del estudio ofrecen una base técnica sólida para futuras investigaciones y posibles aplicaciones en políticas de prevención en entornos laborales de alto riesgo.

Este primer capítulo establece las bases conceptuales y técnicas del estudio, enfocándose en la problemática de la exposición a humos metálicos generados durante procesos de soldadura en espacios confinados, específicamente en el interior de pilotes

hincados durante la construcción del Terminal Portuario General de San Martín (2020). Se justifica la necesidad de implementar soluciones técnicas como la ventilación forzada para controlar los contaminantes en el aire y proteger la salud de los trabajadores.

Se presentan los objetivos generales y específicos de la investigación, centrados en determinar el impacto de dicha intervención sobre las concentraciones de metales en el ambiente laboral. Asimismo, se delimitan los alcances del estudio, reconociendo sus límites metodológicos y técnicos, pero destacando su valor como insumo para futuras políticas de prevención y mejora de condiciones en entornos de alto riesgo.

Este capítulo permite comprender el contexto del problema, la importancia de abordarlo desde una perspectiva científica, y la orientación de la investigación hacia la reducción de riesgos mediante evidencia técnica.

PARTE II

METODOLOGÍA Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La rigurosidad metodológica constituye un pilar fundamental en toda investigación científica, ya que garantiza la validez, fiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos. En el presente estudio, orientado a evaluar el impacto de un sistema de ventilación forzada sobre la concentración de humos metálicos en espacios confinados, se ha adoptado un enfoque técnico basado en mediciones cuantitativas, controladas y contextualizadas en condiciones reales de obra.

Esta parte del libro describe con detalle el diseño metodológico seguido, incluyendo el contexto operacional, los criterios de inclusión de la población evaluada, el procedimiento de muestreo, el tamaño de la muestra, las variables de estudio y los instrumentos utilizados para la recolección de datos. Asimismo, se presentan los equipos empleados en el monitoreo de higiene ocupacional, así como los procedimientos éticos considerados durante la ejecución de las actividades de campo.

La estructura metodológica aquí expuesta permite no solo comprender la lógica detrás del diseño experimental, sino también replicar o adaptar el estudio en escenarios similares. Cada uno de los elementos ha sido cuidadosamente seleccionado y documentado para responder a los objetivos planteados y asegurar que los resultados reflejen con precisión la realidad evaluada.

CAPÍTULO 2: DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico de este estudio ha sido estructurado para garantizar una evaluación precisa y representativa del comportamiento de los humos metálicos generados durante la soldadura en espacios confinados, y para analizar el efecto de un sistema de ventilación forzada sobre dichas concentraciones.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de tipo observacional,

con recolección de datos en condiciones reales de operación dentro del proyecto de construcción del Terminal Portuario General de San Martín. Se busca establecer comparaciones objetivas entre los niveles de exposición a contaminantes metálicos con y sin la presencia del sistema de ventilación forzada, mediante el uso de equipos de medición certificados y protocolos de monitoreo estandarizados.

En este capítulo se describen el contexto específico del estudio, el diseño adoptado, los criterios de elegibilidad de la población participante, y los procedimientos de muestreo aplicados. Además, se definen las variables de interés y se fundamenta la selección de los instrumentos y materiales utilizados en la recolección de datos ambientales.

El diseño metodológico ha sido concebido con criterios de rigurosidad técnica y ética, de modo que los hallazgos obtenidos puedan ser considerados confiables, comparables y útiles para otras investigaciones o intervenciones en entornos laborales similares.

2.1 Contexto, diseño y criterios de elegibilidad de la población

El sistema de ventilación implementado consiste en la colocación de un ventilador extractor, en la parte superior del pilote hincado, al cual se le ha adaptado un acople de tubería de PVC, la cual esta direccionada a la altura de la cabeza del soldador en el interior del pilote, este ventilador ha sido colocado sin sellar la apertura de ingreso del acople del ventilador tal como se muestra en las figuras 1 y 2. En este proceso solo se realiza la extracción de los humos metálicos generados, no se ha contemplado la inyección de aire. Las alturas dentro de las cuales se generan los humos metálicos están comprendidas entre 1 m y los 4.25 m.

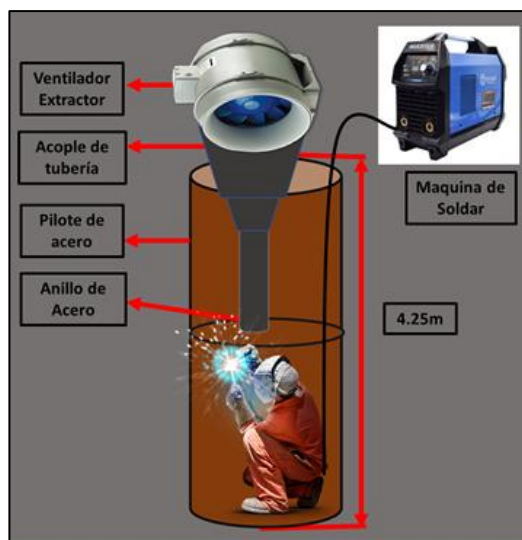


Figura 1: Sistema de Ventilación Utilizado



Figura 2: Sistema de Ventilación Utilizado

El presente estudio aplicativo corresponde a un diseño cuasi experimental del tipo pre-post, en el cual se evaluarán los niveles de humos metálicos sin el uso del sistema de ventilación y con el uso del sistema de ventilación en el interior de pilotes hincados. La metodología utilizada para el monitoreo de campo y el análisis químico es la especificada para evaluaciones de higiene ocupacional en ambiente de trabajo señalado por el “National Institute for Occupational Safety and Health”. +NIOSH 7301, ELEMENTS by ICP (humos metálicos).(11)

Se llevó a cabo un estudio transversal con dos tratamientos experimentales: uno con ventilador extractor y otro sin él. Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones, aplicadas a un total de ocho pilotes durante el mes de enero de 2020. La población objetivo fue finita, compuesta por un universo de 720 pilotes hincados en el Terminal Portuario General de San Martín. Los criterios de elegibilidad se definieron según las siguientes características: pilotes de acero de 30 metros de longitud y 914 mm de diámetro, método de soldadura por arco eléctrico, uso del electrodo SUPERCITO AWS E7018 y consideración del costo asociado al muestreo por cada pilote analizado.

2.2 Muestreo, tamaño de la muestra y variables de estudio

El tipo de muestreo usado fue el muestreo no probabilístico por conveniencia. Para lo cual se tuvo en cuenta los criterios de selección de la muestra dado que todos los pilotes que conformaban la población en estudio tenían las mismas dimensiones (720 pilotes de 30 metros de largo con un diámetro de 914 mm. e igual diseño), el costo por cada pilote a muestrear fue un factor determinante para la selección del número de muestras (Esto debido a que el análisis químico es relativamente caro y el costo de analizar un número elevado de muestras puede ser más alto todavía)(12)., esto debido a lo elevado de dicho costo, se eligió de forma conveniente trabajar con un tamaño de muestra igual al 1%, esto debido a que todos los pilotes que comprenden la población de estudio que tiene las mismas condiciones, siendo una población homogénea.

$$720 \times 0.01 = 7.2 \approx 8 \text{ Pilotes Hincados}$$

Variable independiente en el estudio es la concentración de los niveles de humos metálicos y variable dependiente la colocación del mecanismo de ventilación.

2.3 Instrumento de medición

En la obtención de muestra, se consideran dos tipos de personal involucrados:

Personal Tercero (Contratado para determinar las concentraciones de humos metálicos): Profesional técnico de la empresa especializada, responsable de instalar, en un lugar seguro y antes que se inicie los trabajos, los equipos de muestreo al soldador, garantizando que la instalación y calibración previa se realice de manera correcta(13).

Posterior a la toma de muestra, retira los equipos instalados y almacena los filtros para enviarlos a laboratorio para su análisis.

Soldador que llevará la bomba de succión y filtro para muestra: Personal de la empresa Consorcio Constructor Puerto de San Martín, quien tiene a cargo la tarea de soldadura de anillos interiores como parte de sus funciones. Para la toma de muestra es necesario instalar el equipo de medición en ellos, el cual por sus dimensiones no obstruye o modifica su desempeño.

Los equipos que se emplearon durante el monitoreo fueron como se muestra en la figura 3:

Bomba de muestreo:

- **Marca:** Gilian **Modelo:** Gilair-3 **Serie:** 20181201003
- **Marca:** Gilian **Modelo:** Gilair-3 **Serie:** 20181201004
- **Marca:** Gilian **Modelo:** Gilair-3 **Serie:** 20190101007

Calibrador de bomba de muestreo:

- **Marca:** TSI **Modelo:** 4146 Plus N° **Serie:** 41461346027

Material adicional para la toma de muestra:

- **Soporte de filtro.** Disco y soporte de celulosa de 37 mm de diámetro, que garantice la distribución uniforme del paso de aire durante la toma de muestras.
- **Porta filtros o cassette** de poliestireno de 2 ó 3 cuerpos, de 37 mm de diámetro, en los que se coloca el filtro sobre el soporte de celulosa.
- **Tubo flexible** de polietileno de 6.4 mm de diámetro interior y de 1 metro de longitud.

Un medidor de Flujo que permita determinar el caudal.



Figura 2: Instrumentos de Medición

2.4 Aspectos éticos

El estudio se centró específicamente en las concentraciones de humos metálicos generados por la soldadura de anillos en el interior del pilotes hincados, teniendo como finalidad la utilización de los resultados para mejorar el control de exposición al personal soldador, resultados que servirán de referencia para otras obras al momento de proponer medidas de control frente a los humos de soldadura, y así reducir el riesgo de exposición de los trabajadores a estos agentes químicos, de igual forma dentro de las mediciones de estas condiciones sin ventilador, el personal soldador que llevo consigo la bomba de succión para toma de muestras, permaneció en todo momento aislado del riesgo por inhalación de humos metálicos al ingresar con un equipo de respiración autónoma o más conocidos como SCBA por sus siglas en inglés (self-contained breathing apparatus) evitando el contacto directo con los humos metálico, de esta forma se eliminó el riesgo en su totalidad manteniendo en todo momento la integridad del trabajador.

Para la realización del estudio se contó con la carta de autorización de la empresa para uso de sus instalaciones y la información plasmada en los resultados del estudio, de igual forma se contó con la autorización del Comité de Ética de la UCSUR.

PARTE III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Esta parte del libro presenta los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas durante la aplicación del sistema de ventilación forzada en el interior de pilotes hincados, en el contexto de las labores de soldadura ejecutadas en la construcción del Terminal Portuario General de San Martín.

El análisis de resultados se ha centrado en la comparación de los niveles de concentración de metales presentes en el aire —principalmente aluminio, cobre, manganeso y zinc— antes y después de implementar el sistema de ventilación. Estas mediciones fueron procesadas mediante espectrofotometría de absorción atómica, permitiendo cuantificar con precisión la presencia de contaminantes y evaluar el impacto técnico de la intervención.

A lo largo de esta sección se describen los parámetros evaluados, se presentan las gráficas obtenidas en laboratorio, y se realiza un análisis interpretativo de los datos en función de los límites permisibles y del riesgo ocupacional asociado. El enfoque adoptado busca no solo evidenciar los cambios generados por el sistema, sino también ofrecer una lectura crítica sobre su eficacia, limitaciones y potencial de replicabilidad.

Este bloque constituye el núcleo analítico de la investigación, donde los datos adquieren sentido técnico y se transforman en conocimiento aplicable para la mejora de las condiciones laborales en entornos industriales confinados.

3.1 Parámetros evaluados

La metodología de análisis de los contaminantes químicos evaluados se muestra a continuación en la tabla número 1, los metales medidos en esta tabla corresponden a los indicados en la hoja de datos de Seguridad de los materiales o hoja MSDS (Material Safety Data Sheet) del electrodo de soldadura (SUPERCITO AWS E 7018.)(14)

Tabla 1: NIOSH 7301 (Humos metálicos)

Parámetro evaluado		Nº CAS (Chemical Abstracts Service)	Técnica Analítica / Método de Referencia
Humos metálicos	Plata	7440-22-4	Espectrofotometría de Absorción Atómica con Flama. NIOSH Nº 7301
	Aluminio	7429-90-5	
	Arsénico	7440-38-2	
	Bario	7404-39-3	
	Berilio	7440-41-7	
	Calcio	130578-8	
	Cadmio	7440-43-9	
	Cobalto	7440-48-4	
	Cromo	---	
	Cobre	7440-50-8	
	Hierro	1309-37-1	
	Potasio	---	
	Litio	---	
	Manganeso	7439-96-5	
	Níquel	7440-02-0	
	Fosforo	7723-14-0	
	Plomo	7439-92-1	
	Antimonio	7440-36-0	
	Selenio	7782-49-2	
	Estaño	7440-31-5	
	Estroncio	---	
	Titanio	---	
	Talio	7440-28-0	
	Vanadio	---	
	Zinc	1314-13-2	

Los resultados hallados en el laboratorio por la espectrofotometría de absorción atómica se detallan en las figuras 4 y 5.

Figura 4: Resultados del Laboratorio

Concentraciones encontradas para las muestras sin la implementación del sistema de ventilación					
Código de la muestra		P-E-32 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-F-31N CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-F-31D CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-F-29-01 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)
Humos metálicos	Plata	---	---	---	---
	Aluminio	0.058000000	0.082250000	0.040000000	0.146750000
	Arsénico	---	---	---	---
	Bario	---	---	---	---
	Berilio	---	---	---	---
	Calcio	---	---	---	---
	Cadmio	---	---	---	---
	Cobalto	---	---	---	---
	Cromo	---	---	---	---
	Cobre	0.016075000	0.017850000	---	0.121666667
	Hierro	---	---	---	---
	Potasio	---	---	---	---
	Litio	---	---	---	---
	Manganeso	1.371666667	1.722500000	0.265166667	4.631666667
	Níquel	---	---	---	---
	Fosforo	---	---	---	---
	Plomo	---	---	---	---
	Antimonio	---	---	---	---
	Selenio	---	---	---	---
	Estaño	---	---	---	---
	Estroncio	---	---	---	---
	Titanio	---	---	---	---
	Talio	---	---	---	---
	Vanadio	---	---	---	---
	Zinc	0.010458333	0.016658333	---	0.041975000

Figura 5: Resultados del Laboratorio

Concentraciones encontradas para las muestras con la implementación del sistema de ventilación					
Código de Muestra		P-F-32 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-D-32 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-F-29-02 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)	P-D-31 CONCENTRACIÓN (mg/m3)(Peso / Volumen)
Humos metálicos	Plata	---	---	---	---
	Aluminio	0.066250000	0.056000000	0.296000000	---
	Arsénico	---	---	---	---
	Bario	---	---	---	---
	Berilio	---	---	---	---
	Calcio	---	---	---	---
	Cadmio	---	---	---	---
	Cobalto	---	---	---	---
	Cromo	---	---	---	---
	Cobre	0.047150000	0.036275000	0.259333333	0.021216667
	Hierro	---	---	---	---
	Potasio	---	---	---	---
	Litio	---	---	---	---
	Manganeso	1.773333333	1.654166667	8.516666667	1.114166667
	Níquel	---	---	---	---
	Fosforo	---	---	---	---
	Plomo	---	---	---	---
	Antimonio	---	---	---	---
	Selenio	---	---	---	---
	Estaño	---	---	---	---
	Estroncio	---	---	---	---
	Titanio	---	---	---	---
	Talio	---	---	---	---
	Vanadio	---	---	---	---
	Zinc	0.014191667	0.008133333	0.114750000	0.006130000

(---): Valores por debajo del límite de detección de las pruebas de laboratorio.

En el análisis de laboratorio, los límites de detección del método nos muestran concentraciones significativas para solo 4 metales (Aluminio, cobre, manganeso y Zinc), el resto de los metales estudiados de acuerdo a la hoja de seguridad del electrodo SUPERCITO AWS E 7018 se encuentran por debajo del límite de detección del instrumento de medición, por lo que para el análisis estadístico que determinara si la aplicación del sistema de ventilación usado es determinante en la dilución de estos humos metálicos, los cálculos fueron centrados en la variación en las concentraciones de estas

muestras teniendo en cuenta las que se realizaron con el uso del extractor y sin el uso de este.

Análisis de los datos

Se utilizó el análisis de la varianza a analizado a través del software estadístico IBM-SPSS V.19 el cual permitió determinar si las diferentes muestras de cada uno de los 4 metales detectados en laboratorio presentaban diferencias significativas o por el contrario no difieren.

A continuación, se detalla cada uno de los análisis estadísticos Para los 4 metales.

Aluminio

Tabla 1 Análisis de varianza para el efecto principal (A) sistema de ventilación sobre el nivel de concentración de aluminio en el aire.

FV	GL	SC	CM	F	Sig.
Sistema de ventilación (A)	1	1.299E-5	1.299E-5	.001	NO
Error	6	0.06	0.010		
Total	7	0.060			

En el análisis de varianza se puede observar que la Sig. > 0.05, por lo tanto, no existe diferencia estadísticamente significativa entre el método de extractor con aire y el método sin extractor de aire en la concentración de aluminio en el aire, la cual también es corroborada por el estadístico de Levene con sig. > 0.05.

Coefficiente de variación =11.75%

Al realizar la transformación de variable y hacer el nuevo análisis de varianza y cálculo del coeficiente de variación, obtenemos un valor de CV= a 11.75%, el cual está dentro del porcentaje permitido, 20%. Un valor inferior al indicado nos refleja una mayor precisión del experimento.

Tabla 3: Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,433	1	6	,276

Prueba la hipótesis nula que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

Al observar la figura N° 6, vemos la existencia de residuos aleatorios cumpliéndose los supuestos de aleatoriedad, linealidad y normalidad de los datos al mismo tiempo observamos que la varianza es constante, y no existe diferencia significativa entre los tratamientos, lo que corroboraría lo comprobado en las pruebas ANOVA Y LEVNNE, las cuales nos indican igualdad de varianzas para este experimento.

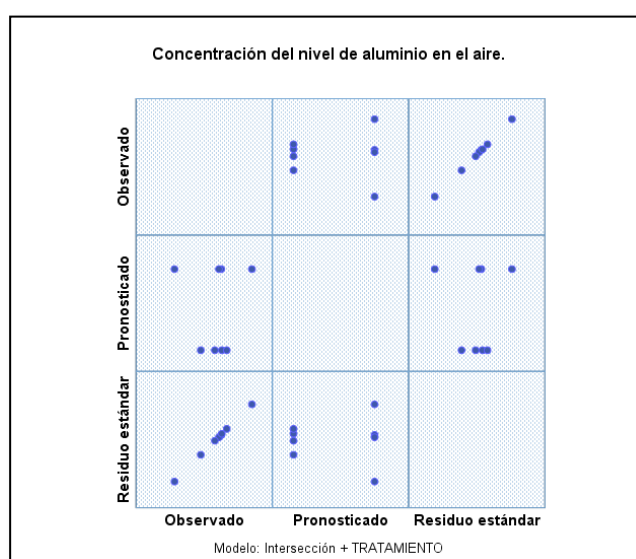


Figura 3 Concentración de nivel de Aluminio

Cobre

Tabla 2: Análisis de varianza para el efecto principal (A) sistema de ventilación sobre el nivel de concentración de Cobre en el aire.

FV	GL	SC	CM	F	Sig.
Sistema de ventilación (A)	1	0.005	0.005	510	NO
Error	6	0.055	0.009		
Total	7	0.060			

En el análisis de varianza se puede observar que la Sig. > 0.05, por lo tanto, no existe diferencia estadísticamente significativa entre el método de extractor con aire y el método sin extractor de aire en la concentración de cobre en el aire, la cual también es corroborada por el estadístico de Levene con sig. > 0.05.

Tabla 5 Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0,423	1	6	,540

Prueba la hipótesis nula que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

Coefficiente de variación = 10.71%

Al realizar la trasformación de variable y hacer el nuevo análisis de varianza y cálculo del coeficiente de variación, obtenemos un valor de CV= a 10.71%, el cual está dentro del porcentaje permitido, 20%. Un valor inferior al indicado nos refleja una mayor precisión del experimento.

Al observar la figura N° 7, vemos la existencia de residuos aleatorios cumpliéndose los supuestos de aleatoriedad, linealidad y normalidad de los datos Al mismo tiempo observamos que la varianza es constante, y no existe diferencia

significativa entre los tratamientos, lo que corroboraría lo comprobado en las pruebas ANOVA Y LEVNNE, las cuales nos indican igualdad de varianzas para este experimento.

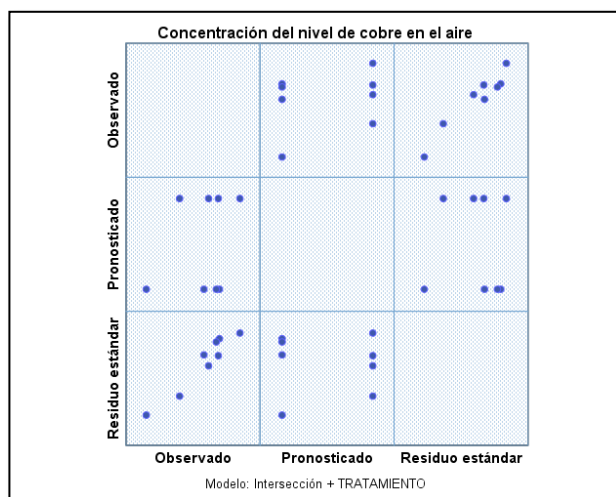


Figura 4 Concentración de nivel de Cobre

FV	GL	SC	CM	F	Sig.
Sistema de ventilación (A)	1	0.007	0.007	359	0.571(NO)
Error	6	0.122	0.020		
Total	7	0.129			

Manganeso

Tabla 3 Análisis de varianza para el efecto principal (A) sistema de ventilación sobre el nivel de concentración de Magnesio en el aire

En el análisis de varianza se puede observar que la Sig. > 0.05, por lo tanto, no existe diferencia estadísticamente significativa entre el método de extractor con aire y el método sin extractor de aire en la concentración de magnesio en el aire, la cual también es corroborada por el estadístico de Levene con sig. > 0.05.

Coeficiente de variación = 13.11%

Tabla 7: Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error

Estadístico de			
Levene	gl1	gl2	Sig.
0,001	1	6	0,980

Prueba la hipótesis nula que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

Al realizar la transformación de variable obtenemos el análisis de varianza y cálculo del coeficiente de variación, obtenemos un valor de CV= a 13.11%, el cual está dentro del porcentaje permitido 20%. Un valor inferior al indicado nos refleja una mayor precisión del experimento.

Al observar la figura N° 8, vemos la existencia de residuos aleatorios cumpliéndose los supuestos de aleatoriedad, linealidad y normalidad de los datos. Al mismo tiempo observamos que la varianza es constante, y no existe diferencia significativa entre los tratamientos, lo que corroboraría lo comprobado en las pruebas ANOVA Y LEVNNE, las cuales nos indican igualdad de varianzas para este experimento.

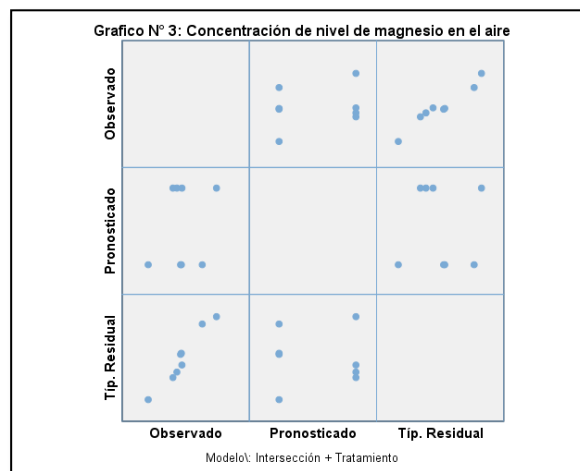


Figura 5 Concentración de nivel de Manganeso

Zinc

Tabla 4 Análisis de varianza para el efecto principal (A) sistema de ventilación sobre el nivel de concentración de Zinc en el aire

FV	GL	SC	CM	F	Sig.
Sistema de ventilación (A)	1	0.002	0.002	541	0.490(NO)
Error	6	0.020	0.003		
Total	7	0.022			

En el análisis de varianza se puede observar que la Sig. > 0.05, por lo tanto, no existe diferencia estadísticamente significativa entre el método de extractor con aire y el método sin extractor de aire en la concentración de zinc en el aire, la cual también es corroborada por el estadístico de Levene con sig. > 0.05.

Coeficiente de variación = 5.88%

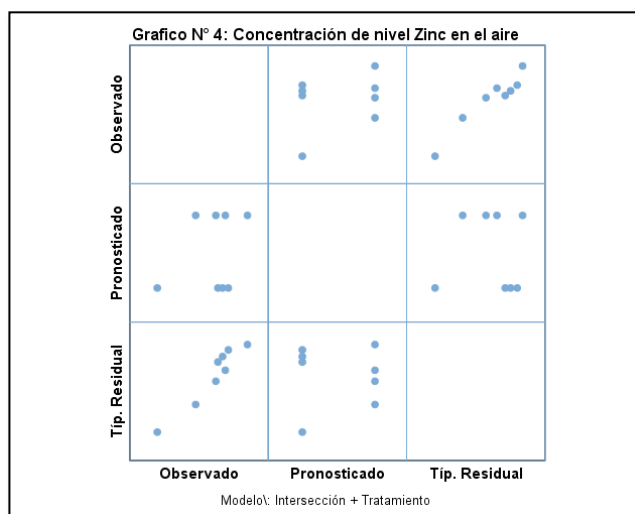
Al realizar la transformación de variable obtenemos el análisis de varianza y cálculo del coeficiente de variación, obtenemos un valor de CV= a 5.88%, el cual está dentro del porcentaje permitido 20%. Un valor inferior al indicado nos refleja una mayor precisión del experimento.

Tabla 9: Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error

Estadístico de			
Levene	gl1	gl2	Sig.
0,790	1	6	,408

Al observar el figura N° 9, vemos la existencia de residuos aleatorios cumpliéndose los supuestos de aleatoriedad, linealidad y normalidad de los datos Al mismo tiempo observamos que la varianza es constante, y no existe diferencia significativa entre los tratamientos, lo que corroboraría lo comprobado en las pruebas ANOVA Y LEVNNE, las cuales nos indican igualdad de varianzas para este experimento.

Figura 6 Concentración de nivel Zinc



Una vez obtenidos los datos experimentales mediante las mediciones en campo y el procesamiento en laboratorio, se procede a su análisis e interpretación con el objetivo de establecer conclusiones técnicas sobre la eficacia del sistema de ventilación forzada implementado.

Este capítulo profundiza en la lectura crítica de los resultados, comparando los niveles de concentración de contaminantes metálicos en condiciones con y sin ventilación. Se analiza el comportamiento individual de los metales evaluados — aluminio, cobre, manganeso y zinc—, considerando su toxicidad, los valores de referencia normativos y la exposición permisible según estándares de salud ocupacional.

El análisis estadístico y técnico de los datos permite identificar patrones, evaluar reducciones significativas y estimar el nivel de mitigación del riesgo logrado. Asimismo, se reflexiona sobre las implicancias prácticas de los hallazgos y su aplicabilidad en otras obras que impliquen trabajos de soldadura en espacios confinados.

Este capítulo constituye un eje central para la validación de la hipótesis del estudio y la generación de recomendaciones fundamentadas, aportando evidencia cuantificable al campo de la seguridad industrial y la ingeniería ambiental.

Este estudio no encontró diferencias significativas para las muestras tomadas en

los pilotes con la implementación del sistema de ventilación forzada (Ventilador Extractor) y los pilotes en los cuales se realizó los trabajos sin ningún tipo de intervención. La variación entre las dos muestras tomadas arrojó un porcentaje de variación no significativo, demostrando así la poca eficiencia de la aplicación de este método de ventilación.

Se analizó posibles factores a tener en cuenta en de implementación de un sistema de ventilación forzada, el cual puede servir como referencia para trabajos y actividades de igual o similar magnitud o condiciones. Evaluando como aporta un sistema de ventilación forzada en la dilución de humos metálicos de trabajos de soldadura en el interior de pilotes, según como haya sido implementado este.

Analizando el método de ventilación por extracción usado y estudiado en este trabajo se puede inferir que su poca o casi nula eficiencia podría deberse a que solo se consideró la extracción de los humos metálico y dado que un programa completo de ventilación debe incluir tanto impulsión como extracción, si la cantidad global de aire que se extrae de un local de trabajo es superior al aire que se aporta, la presión en el interior será más baja que la presión atmosférica lo cual produce una reducción de la eficacia de funcionamiento de los sistemas de extracción, lo cual puede dar lugar a una disminución del grado de control de los contaminantes y originar posibles riesgos a la salud. Prueba de estos fueron los resultados obtenidos al analizar las muestras obtenidas en campo.(15)

Este concepto no se aplicó dentro de la implementación del sistema ventilación por extracción tomado por el consorcio constructor del puerto de San Martín, en el cual solo se consideró la extracción de los humos metálicos con el ventilador extractor colocándolo en la parte superior del pilote dejando una apertura significativa y no sellando la entrada del todo, se direccionó la extracción a través de una manga de menor diámetro colocada a la altura de la cabeza del soldador emulando una extracción localizada(16), dejando de lado inyección de aire fresco. Esto debido a que inicialmente la implementación de los ventiladores extractores, fueron usado en trabajos de soldadura horizontal de los pilotes, cuando estos se encontraban sin hincar, teniendo como diferencia la apertura en un extremo del pilote y en el otro el ventilador, por lo que había una diferencia de presiones, posterior a esto los pilotes fueron hincados y se decidió

utilizar el mismo método con los ventiladores extractores.

Cuando extraemos aire de un local, hemos de prever una entrada de aire que sustituya al que hemos extraído, y cuando impulsamos aire en un local, hemos de prever su salida. En caso contrario, la ventilación es absolutamente ineficaz.(17)

Las campanas de aspiración acopladas a ventiladores móviles pueden resultar eficaces cuando se opera en grandes estructuras en astilleros, calderería pesada, etc. especialmente en el interior de piezas huecas, cisternas cubas y espacios confinados en general, donde normalmente es necesario introducir aire limpio mediante ventiladores soplantes complementarios para asegurar una renovación adecuada de su ambiente interior.(18)

Para mejorar el sistema de ventilación estudiado se sugiere contemplar su modificación y anexar a este un mecanismo de inyección de aire ya sea a través de la colocación de una línea de inyección la cual podría estar ubicada en la parte inferior del piso de trabajo del pilote, la cual garantizaría la inyección de aire fresco, de igual forma propiciaría la diferencia de presiones dentro del pilote de esta manera se previene el acolchonamiento de los humos metálicos en un tramo del pilote, garantizando que la ventilación sea lo más eficiente posible, tal como se puede apreciar en la figura N°10.

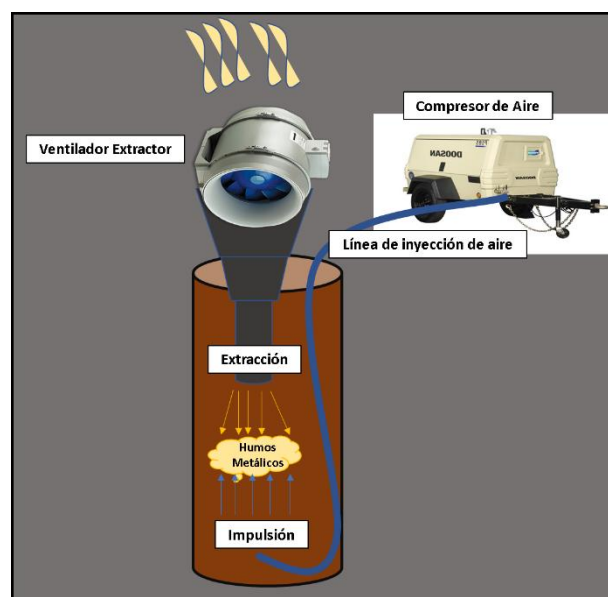


Figura 10 Propuesta de sistema de ventilación

Dentro de los trabajos de soldadura observados en el presente estudio, se verifico que el personal soldador ingresaba con su EPP correspondiente (Respirador de media cara con filtros metálicos), en el mercado si bien es conocido existen un sin número de tipos de respiradores y filtros para humos metálicos, la utilización de un sistema de ventilación forzada es ideal, dado que estos equipos si bien contribuyen a filtrar los humos metálicos emanados en los trabajos de soldadura su efectividad varía de acuerdo a muchos factores, tales como : utilización degaste y vida útil, tipo de agente químico a filtrar, humedad acción térmica, almacenamiento y limpieza y por último la utilización y su colocación por parte del usuario el cual debe garantizar su correcto sellado, respecto al tema del sellado este también se ve afectado según el tipo de rostro, presencia de barba, talla del respirador, por lo que resultada muy difícil un control eficiente utilizando solo este tipo de protección.(19), por lo que debería ser medidas de protección complementarias, sumado a esto la legislación nacional ley 29783 establece los equipos de protección personal como la última medida de prevención dentro de la gestión de seguridad, poniendo como prioridad la eliminación de los riesgos desde su origen al igual que el control a través de medidas técnicas y administrativas.(20)

Aunque no fue un objetivo de la investigación, algo que se pudo apreciar durante la toma de muestra sin la colocación del ventilador extractor, fue observar un ambiente un poco más cargado de humos metálicos, generando poca visibilidad dentro del área de trabajo, lo cual afecto la productividad de la tarea dificultando la correcta soldadura del anillo, esto también pudo mostrar un riesgo no contemplado dentro del análisis, la inadecuada visibilidad del trabajador podría conducir durante su salida del pilote a accidentes, al hacerlo propenso a golpes o caída por pisar en falso, esto podría ser un factor para investigar en futuros estudio los cuales podrían medir el grado de visibilidad en una comparativa con el método de ventilación usado.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de una investigación científica representan la síntesis de los hallazgos obtenidos y su relevancia frente a los objetivos planteados. En este estudio, centrado en la evaluación de un sistema de ventilación forzada para la dilución de humos metálicos en espacios confinados durante trabajos de soldadura, las conclusiones permiten valorar no solo la eficacia técnica de la intervención, sino también su contribución a la mejora de las condiciones laborales en contextos de alto riesgo.

Este capítulo presenta las ideas fuerza derivadas del análisis cuantitativo realizado, destacando los resultados más relevantes en cuanto a reducción de contaminantes, impacto en la calidad del aire interior y potencial de replicabilidad en obras similares. Se señalan además las implicancias prácticas del estudio en materia de prevención de riesgos laborales, salud ocupacional e ingeniería de control ambiental.

A partir de estos elementos, se establece un cierre argumentado que valida la importancia de incorporar soluciones técnicas como la ventilación forzada en entornos industriales confinados, especialmente en sectores como la construcción portuaria donde los riesgos por exposición a humos metálicos son particularmente elevados.

A partir del análisis detallado de los resultados obtenidos, se ha identificado que la mayoría de las muestras registraron concentraciones de metales por debajo de los límites de detección establecidos por el laboratorio, lo cual evidencia que en muchos casos los niveles de exposición son bajos o no cuantificables bajo las condiciones del estudio. No obstante, se identificaron cuatro metales con concentraciones significativas que permitieron realizar una evaluación más precisa del efecto del sistema de ventilación forzada sobre la calidad del aire en el interior de los pilotes.

Al comparar los datos obtenidos con y sin la implementación del sistema de ventilación, se concluyó que no existe una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de concentración de estos metales. Esto indica que, en las condiciones específicas del caso analizado, el uso del ventilador extractor no logró modificar de manera sustancial la presencia de contaminantes metálicos en el ambiente de trabajo. Por lo tanto, el método

de ventilación forzada evaluado no se considera idóneo si el objetivo principal es la reducción efectiva de la exposición de los trabajadores a humos metálicos generados durante la soldadura.

Pese a ello, el valor de esta investigación radica en su contribución metodológica y en la generación de datos útiles para el análisis comparativo de sistemas de control ambiental en espacios confinados. El estudio demuestra que es posible medir con precisión las concentraciones de humos metálicos en entornos reales de obra, y ofrece una alternativa técnica para evaluar la eficacia de diferentes sistemas de ventilación. Esta información resulta de gran utilidad para los profesionales encargados de la salud ocupacional, la ingeniería de seguridad y la planificación de actividades en ambientes de alto riesgo.

Además, los resultados invitan a reflexionar sobre la necesidad de evaluar integralmente las estrategias de control utilizadas en ambientes confinados, ya que no todas las soluciones tecnológicas disponibles generan los efectos esperados en condiciones operativas reales. Este hallazgo resalta la importancia de realizar pruebas de campo previas antes de implementar de manera definitiva cualquier sistema de ventilación, y de considerar tanto los factores técnicos como las condiciones específicas del entorno de trabajo.

Como proyección hacia futuras investigaciones, se plantea la necesidad de estudiar otros sistemas de ventilación con mayor capacidad de renovación de aire o con mecanismos de extracción localizada, que puedan ofrecer mejores resultados en la dilución de humos metálicos. Asimismo, sería pertinente incorporar un análisis de costo-beneficio que permita determinar no solo la efectividad técnica, sino también la viabilidad económica de distintas opciones de ventilación en obras similares. Incluir variables como el tiempo de exposición, la frecuencia de uso del sistema y el costo operativo podría enriquecer el análisis y orientar decisiones más informadas en contextos de planificación y prevención.

En resumen, aunque el sistema de ventilación forzada evaluado no produjo una mejora significativa en la calidad del aire interior en términos de concentración de metales, el estudio ofrece una base sólida para continuar explorando soluciones más

eficaces y adaptadas a los retos que plantean los trabajos de soldadura en espacios confinados. Contribuye así al avance del conocimiento técnico y al fortalecimiento de las prácticas de seguridad industrial en la construcción de infraestructura portuaria.

RECOMENDACIONES

Derivado del análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones formuladas, este capítulo presenta una serie de recomendaciones técnicas y estratégicas orientadas a mejorar las condiciones de trabajo durante labores de soldadura en espacios confinados, específicamente en el interior de pilotes hincados en obras de infraestructura portuaria.

Si bien el sistema de ventilación forzada evaluado no generó una disminución significativa en las concentraciones de humos metálicos, la experiencia recogida en campo permite formular propuestas concretas para optimizar los métodos de control de contaminantes, fortalecer la prevención de riesgos y orientar futuras intervenciones con mayor eficacia.

Las recomendaciones aquí expuestas se estructuran en función de tres enfoques: (1) recomendaciones técnicas sobre ventilación y monitoreo ambiental, (2) sugerencias para la mejora de protocolos de seguridad y salud ocupacional, y (3) orientaciones para futuras investigaciones aplicadas, considerando factores como costo, efectividad y adaptabilidad a distintos entornos de obra.

Este conjunto de recomendaciones tiene como finalidad servir como insumo para ingenieros, responsables de seguridad, gestores de proyectos y diseñadores de políticas públicas, promoviendo una gestión más eficiente de los riesgos asociados a la exposición de humos metálicos en espacios confinados.

4.1 Propuestas de mejora para futuras obras

A partir de la experiencia y los resultados de este estudio, se plantean las siguientes propuestas orientadas a mejorar las condiciones de trabajo en obras que involucren soldadura en espacios confinados, particularmente en pilotes hincados de infraestructura portuaria:

a. Evaluación previa del sistema de ventilación más adecuado: Antes de seleccionar un sistema de ventilación, se recomienda realizar pruebas piloto que permitan comparar distintos mecanismos (ventilación forzada general, extracción localizada,

sistemas mixtos) en condiciones reales de obra. Esto permitirá identificar el sistema con mayor eficiencia para reducir concentraciones de humos metálicos según el volumen, geometría del espacio y tiempo de exposición.

b. Incorporación de sistemas de extracción localizada: A diferencia de los ventiladores forzados generales, los sistemas de extracción localizada colocados cerca del punto de emisión pueden ofrecer mejores resultados en la captura directa de contaminantes antes de que se dispersen. Esta alternativa debe considerarse como una opción prioritaria en trabajos de soldadura en espacios estrechos.

c. Implementación de monitoreo ambiental continuo: Contar con sensores portátiles o sistemas de lectura en tiempo real dentro de los pilotes permitiría identificar rápidamente concentraciones peligrosas de metales o gases, y activar medidas de emergencia en caso de sobrepasar los límites permisibles. Esta acción preventiva puede marcar la diferencia en la protección efectiva del trabajador.

d. Capacitación continua y uso correcto de EPP: Además del control ambiental, se recomienda reforzar las capacitaciones en el uso adecuado del equipo de protección personal (EPP), como respiradores con filtros para partículas metálicas y gases. La protección individual sigue siendo clave cuando las medidas técnicas no garantizan por sí solas una exposición segura.

e. Diseño de protocolos operativos específicos para trabajos en pilotes: Desarrollar procedimientos estandarizados que incluyan tiempos máximos de permanencia, rotación del personal, verificación previa de niveles de oxígeno y contaminantes, así como mecanismos de ventilación y evacuación rápida, contribuirá a mejorar significativamente la seguridad en este tipo de labores especializadas.

4.2 Sugerencias para futuras investigaciones

Los hallazgos y limitaciones del presente estudio abren oportunidades para nuevas investigaciones que permitan avanzar en el desarrollo de soluciones más efectivas y adaptadas a las condiciones reales de obra. A continuación, se presentan algunas líneas de investigación recomendadas:

a. Evaluación comparativa entre distintos tipos de ventilación: Se sugiere desarrollar estudios experimentales que comparen la efectividad de diversos sistemas de ventilación (natural, forzada, localizada, combinada) en la reducción de humos metálicos en espacios confinados, utilizando metodologías similares para facilitar la comparación de resultados.

b. Análisis de variables operativas y condiciones ambientales: Investigar cómo influyen factores como la temperatura, la humedad, la duración del proceso de soldadura, el tipo de electrodo y el diseño geométrico del espacio sobre la generación y acumulación de humos metálicos. Esta información permitiría modelar escenarios de mayor precisión y riesgo.

c. Desarrollo de indicadores de exposición integrada por tarea: Diseñar indicadores que consideren no solo las concentraciones ambientales, sino también el tiempo de exposición acumulado por tarea, la posición del trabajador y la eficacia del EPP utilizado, permitiría contar con una visión más completa del riesgo real al que se enfrentan los operarios.

d. Estudios costo-beneficio de implementación de sistemas de ventilación: Más allá de la eficacia técnica, se recomienda realizar análisis económicos que permitan valorar la viabilidad de implementar sistemas de ventilación en función de su impacto en la salud, la productividad y la prevención de accidentes o enfermedades laborales.

e. Exploración de tecnologías emergentes en ventilación inteligente: El uso de sistemas automatizados que regulen el caudal de aire en función de sensores ambientales, inteligencia artificial o aprendizaje automático podría representar una vía innovadora y eficiente para el control ambiental en espacios de difícil acceso o geometría compleja.

REFERENCIAS

1. Vicu WU, Santos MM, Arnulfo M, Fierro M, Roberto C, Ar O. Guía básica para trabajar en espacios confinados. 2018. 86 p.
2. Flynn MR, Susi P. Neurological risks associated with manganese exposure from welding operations - A literature review. Int J Hyg Environ Health. 2009;212(5):459–69.
3. Zukauskaite A, Mickeviciene R, Kamauskaite D, Turkina L. Environmental and humane health issue of welding in the shipyard. Transp Means - Proc Int Conf. 2013;177–80.
4. Westerdal M, Rights A, Copyright I. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors – “Electric Arc Welding” (Vol. I). 1995. 1991;43(8):4320–7.
5. Español ML, Valero C, Castrillo LG. Fiebre del humo de los metales. Med Clin (Barc) [Internet]. 2002;119(1):39. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-7753\(02\)73308-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-7753(02)73308-3)
6. Perú M de salud del. RM 480-2010 MINSA Norma Técnica de Salud que establece el listado de enfermedades profesionales. Perú; 2008 p. 55.
7. Perú M de salud del. DS N°015-2005 S.A Aprueban Reglamento Sobre Valores Límite Permisibles Para Agentes Químicos En El Ambiente De Trabajo. Diario El Peruano-Normas Legales Perú: Diario El Peruano-Normas Legales; 2005 p. 16.
8. Harsem TE. Diseño de estructuras de Concreto Armado. 4ta Edició. Teodoro E. Harsem por Pontifica Universidad Católica del Perú, editor. Lima: Pontifica Universidad Católica del Perú; 2005. 689 p.

9. Estadística de Accidentes por Actividad Económica - Notificaciones Estadísticas _I_SEMESTRE_2019.
10. Cavallé Oller N, Hernández A. NTP 741 : Ventilación general por dilución. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. 2004.
11. Argon IC, Emission A. ELEMENTS by ICP (Aqua Regia Ashing). 2003;(1):1–8.
12. Alonso MB. Los riesgos de la soldadura y su prevención Los riesgos de la soldadura y su prevención. INSHT. 2012;13.
13. INSHT. Bombas para el muestreo personal de agentes químicos. 2006;18. Available from: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/MetodosAnalisis/Ficheros/CR/CR_001_A06.pdf
14. Soldexa. MSDS-205 Edición: 06. 2017. p. 1–7.
15. Ventilation C on I. Industrial Ventilation: Manual De Recomendaciones Prácticas Para La Prevención De Riesgos Laborales. 20th Editi. Ohio-USA: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc.; 1988. 416 p.
16. Xavier Guardino Solá CHC. NTP 672: Extracción localizada en el laboratorio. Barcelona; 2004.
17. SÁNCHEZ XB, VILELLA EC, SOLÀ XG. HIGIENE INDUSTRIAL. Primera Ed. UOC E, editor. Barcelona; 214AD. 487 p.
18. OSALAN (Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales). El soldador y los humos de soldadura [Internet]. Gobierno Vasco; 2009. Available from: www.osalan.net
19. Faciales A. Selección y Utilización de Protectores Respiratorios Guía Orientativa

– Area Higiene y Seguridad Selección y Utilización de Protectores Respiratorios.

:1–11.

20. Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo 29783.pdf. Perú; 2011 p. 13.