

POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS, HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

PROPUESTA DE DISEÑO PARA LA
LÍNEA DE TRANSPORTE DE RELAVE
ASOCIADA AL SISTEMA DE DESCARGA
EN LA PLANTA MINERA DE COBRE DE
LA EMPRESA ECSA EN LA PROVINCIA
DE ZAMORA CHINCHIPE

AUTORES:

GABRIEL ANGEL ENCALADA SEMINARIO
ALFONSO ISRAEL JIMÉNEZ LITUMA

DIRECTOR:

NANCY VERÓNICA MORENO DIAGO

CUENCA – ECUADOR
2023

Autor(es):**GABRIEL ANGEL ENCALADA SEMINARIO**

Ingeniero Mecánico con mención en Producción
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en
Diseño De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la
Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
gencalada2891@gmail.com/gencalada@est.ups.edu.ec

**ALFONSO ISRAEL JIMÉNEZ LITUMA**

Ingeniero Mecánico con mención en Producción
Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en
Diseño De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la
Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
ajimenez@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**NANCY VERÓNICA MORENO DIAGO**

Ingeniera Mecánica
Máster en Ingeniería Mecánica Mención Materiales y Diseño
diagonv@gmail.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.
CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA
GABRIEL ANGEL ENCALADA SEMINARIO
ALFONSO ISRAEL JIMÉNEZ LITUMA

Propuesta de diseño para la línea de transporte de relave asociada al sistema de descarga en la planta minera de cobre de la empresa ECSA en la provincia de Zamora Chinchipe

DEDICATORIA

Dedicamos el resultado de nuestro esfuerzo a nuestro padre celestial que nos cuida y nos protege en todo momento. A nuestras madres y padres (Magaly Seminario y Angel Encalada) por habernos forjados como personas de bien. A nuestros hermanos (Jahir y Michelle) quienes nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos. Finalmente, a mi hija adorada (Emmie Valentina) quien es siempre mi fuente de inspiración para salir adelante.

Gabriel Angel Encalada Seminario

Dedicamos el resultado de nuestro esfuerzo a nuestro padre celestial que nos cuida y nos protege en todo momento. A nuestras madres y padres (Inés Lituma y Víctor Jiménez) por habernos forjados como personas de bien. A nuestros hermanos (Tocho y Milagros) quienes nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos.

Alfonso Israel Jiménez Lituma

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecemos a Dios por permitirnos culminar una nueva etapa en nuestras vidas profesionales. A la empresa Ecuacorriente S.A (ECSA) por facilitarnos los datos y poder realizar nuestro proyecto de titulación en sus instalaciones. De igual forma a todo el personal docente que nos inculcó de mejor manera los conocimientos. Finalmente a nuestras familias (Jiménez - Lituma y Encalada - Seminario) quienes fueron pilares fundamentales y guías para la culminación de nuestros estudios.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2.1 PROBLEMAS.....	16
2.1.1 PROBLEMA PRINCIPAL.....	16
2.1.2 PROBLEMAS SECUNDARIOS	16
2.2 OBJETIVOS.....	17
2.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	18
3.1 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO.....	18
3.1.1 LOS RELAVES MINEROS.....	18
3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES MINEROS	22
3.2 CONDICIONES OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MINERO.....	26
3.2.1 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MINERO.....	26
3.2.2 CONDICIONES OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES.....	29
3.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO DE LA TUBERÍA ASOCIADA AL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE.....	34
3.3.1 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE	34
3.3.2 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MEDIANTE LOS PLANOS ISOMÉTRICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TRAYECTO DE LA LÍNEA BASE DE CONSTRUCCIÓN.....	37
3.4 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN DE LA TUBERÍA DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE.....	40
3.4.1 MATERIALES USADOS PARA TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE.....	40

3.4.2	MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN EN TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE	43
3.5	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE	48
3.5.1	NORMAS DE DISEÑO PARA LAS TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE	48
3.5.2	MÉTODOS DE MINIMIZACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN DE TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE	52
4.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	58
4.1	HIPÓTESIS	60
4.1.1	HIPÓTESIS GENERAL	60
4.1.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	60
4.2	MARCO METODOLÓGICO	60
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
6.	CONCLUSIONES	108
	REFERENCIAS	109

PROPUESTA DE DISEÑO
PARA LA LÍNEA DE
TRANSPORTE DE
RELAVE ASOCIADA AL
SISTEMA DE DESCARGA
EN LA PLANTA MINERA
DE COBRE DE LA
EMPRESA ECSA EN LA
PROVINCIA DE
ZAMORA CHINCHIPE

AUTOR(ES):

ENCALADA SEMINARIO GABRIEL ÁNGEL
JIMÉNEZ LITUMA ALFONSO ISRAEL

RESUMEN

La minería es un factor de producción de alta relevancia para muchas naciones, representando una de las principales fuentes de sus ingresos económicos. Uno de los minerales de mayor explotación a nivel global es el cobre. En su extracción, durante el procesamiento del concentrado de cobre se generan residuos, para lo cual es indispensable contar con un sistema de bombeo y tuberías que permita el transporte de esos residuos hacia un depósito para su posterior tratamiento. Los residuos mineros o relaves se generan al final de todo el proceso de explotación.

El sistema de tuberías para el transporte de relave es uno de los componentes críticos del proceso por el material del que estas se constituyen, que debe adaptarse al trayecto en el cual vayan a permanecer. El problema estudiado, en el presente trabajo de investigación, corresponde a la empresa ECSA en su proyecto Mirador, que está ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe en la ciudad de Tundayme. El inconveniente se presenta cuando se direccionan los relaves y se generan radios de curvaturas debido a que el sistema de tubería para el transporte de residuos se encuentra instalado en un terreno irregular con pendientes y desniveles que exigen que el sistema tienda a cambiar de acorde a esas exigencias.

Luego de construir una base teórica y metodológica para la solución del problema, se ha propuesto una serie de criterios de diseño para el sistema de transporte de relave mediante la norma ASME B31.11 para el análisis de los puntos críticos de la tubería de descarga. Posteriormente se realizó una simulación computacional Ansys CFX para determinar la tasa de erosión, de la planta minera de cobre de la empresa ECSA en la Provincia de Zamora Chinchipe.

Palabras clave:

Relave minero, mina de cobre, tuberías de descarga.

ABSTRACT

Mining is a highly relevant production factor for many nations, representing one of the main sources of their economic income. Copper is one of the most widely exploited minerals globally. During its extraction, copper concentrate processing generates waste, for which it is essential to have a pumping and piping system to transport the waste to a deposit for subsequent treatment. Mining waste or tailings are generated at the end of the entire mining process.

The tailings transport piping system is one of the critical components of the process due to the material they are made of, which must be adapted to the route in which they will remain. The problem studied in this research work corresponds to the ECSA company in its Mirador project, which is located in the Zamora Chinchipe province in Tundayme city. The problem arises when the tailings are directed and curvature radii are generated due to the fact that the piping system for waste transport is installed in an irregular terrain with slopes and unevenness that require the system to tend to change according to these requirements.

After building a theoretical and methodological basis for the solution of the problem, a set of design criteria for the tailings transport system has been proposed, by analyzing the critical points accordingly of ASME B31.11 of the discharge pipeline, determining the erosion rate through computational simulation Ansys CFX for the mining copper plant of ECSA at Zamora Chinchipe province.

Keywords:

Mine tailings, copper mine, discharge pipes.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de relave en la minería a nivel mundial ha ocasionado múltiples inconvenientes en diferentes equipos y accesorios por diversas causas, uno de los principales problemas es el desgaste por erosión en tuberías debido a la modificación de los radios de curvatura que tienden a direccionar el flujo o el material a transportar (Sinha et al., 2017). Dando como resultado una gran pérdida económica para este tipo de empresas que se dedican al transporte de fluidos (Zdravecká et al., 2014).

A nivel Regional existen varios estudios en cuanto al desgaste por erosión en tuberías que transportan relave específicamente en la minería, lo cual lo hace muy común este tipo de problemas. Chile es el primer productor de cobre en el mundo, ya sea en el formato de cátodos o concentrados, la contribución de cobre equivale a un 11% como muestra en la Ilustración 1 (Marín Pérez, 2017). Existen estudios del comportamiento del relave de cobre chileno con diferentes concentraciones en peso con el objetivo de modelar el relave y analizar los efectos que tienen éstos en los cajones de concreto como se detalla en la Ilustración 2 (Martínez Candia, 2015).



Ilustración 1. Aporte de la minería al PIB Chileno.

Fuente: (Marín Pérez, 2017).

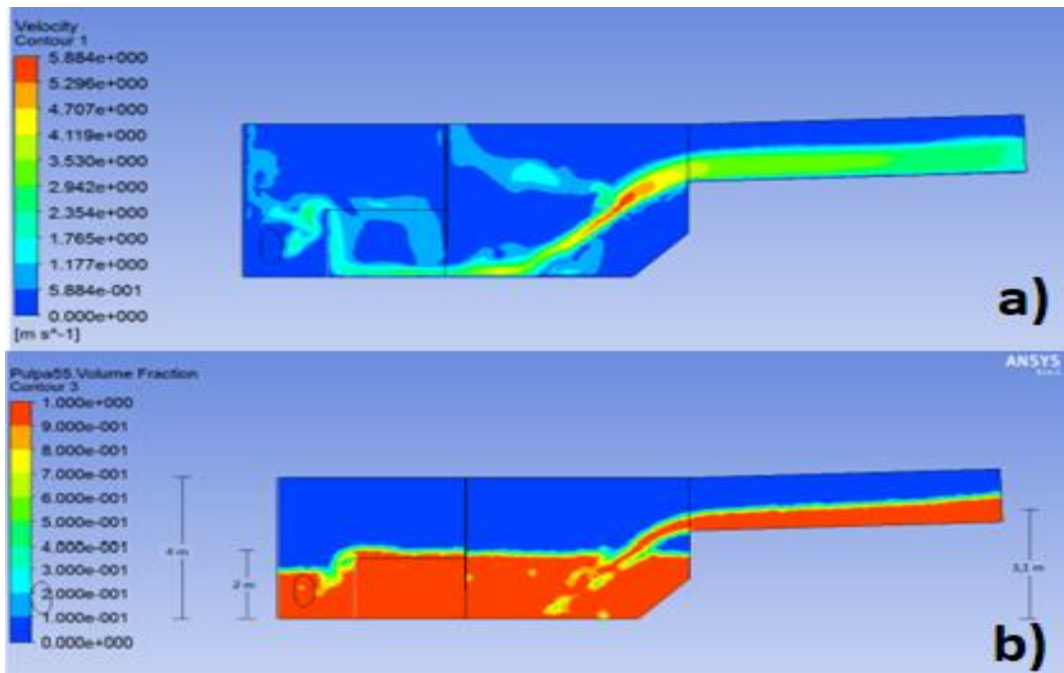


Ilustración 2. Modelamiento de relave. a) Contornos de velocidades y en b) alturas alcanzadas por el relave en el cajón de concreto.
 Fuente: (Martínez Candia, 2015).

Tomando como referencia este país con gran capacidad minera donde se han desarrollado varios estudios de índole referente al transporte de relave, se resalta un estudio que efectúa una simulación mediante elementos finitos, para determinar los posibles daños y generar soluciones en el transporte de concentrado de hierro en cañerías de acero, con el objetivo de predecir las zonas de desgaste en dichas cañerías y como resultado se obtuvieron valores de desgaste erosivo menores a 0.1 mm/año como se muestra en la Ilustración 3 (Leng Riquelme, 2021).

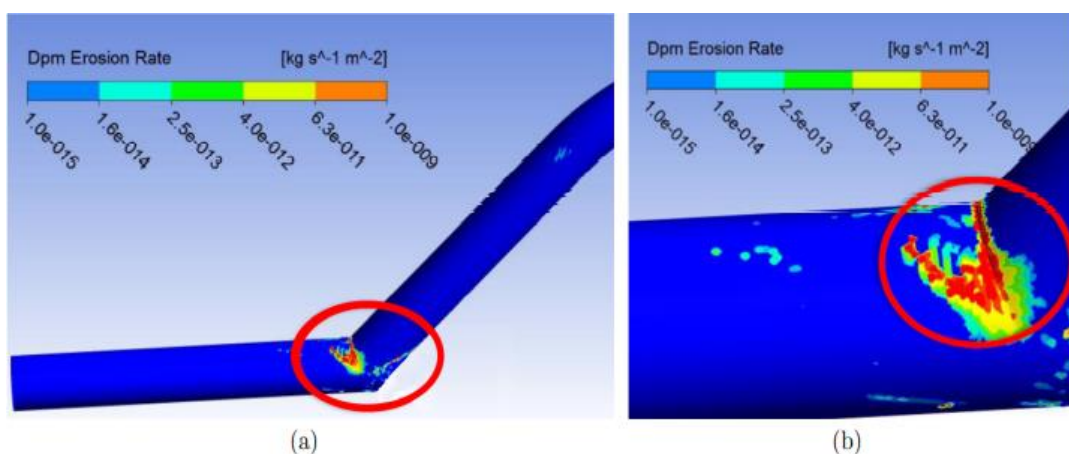


Ilustración 3. Desgaste por erosión del acero en escala logarítmica.
 Fuente: (Leng Riquelme, 2021).

En Perú que es otros de los países dedicados a la minería, se realiza un estudio en la universidad Nacional de Ingeniería sobre el transporte de sólidos en tuberías aplicadas en la minería, con el objetivo de emplear una técnica para mejorar el nivel de eficiencia en aplicaciones civiles, dragado, minería y las industrias químicas con fundamentación teórica basada en los principios generales de la física, ver Ilustración 4 (Meléndez Vidales, 1982).

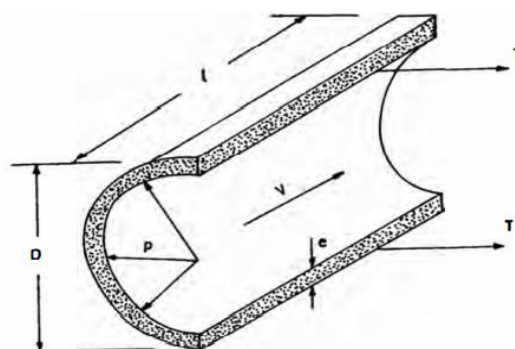


Ilustración 4. Planteamiento para el análisis en el interior de las tuberías.

Fuente: (Meléndez Vidales, 1982).

Vera Cevallos de igual forma nos afirma el incremento en base a su estudio de la minería desarrollado entre los años 2015 y 2019. Por medio de estadística muestra el crecimiento que tiene el sector minero, resaltando la producción de concentrado de cobre (Cu) en un 33.64% como se detalla en la Ilustración 5.

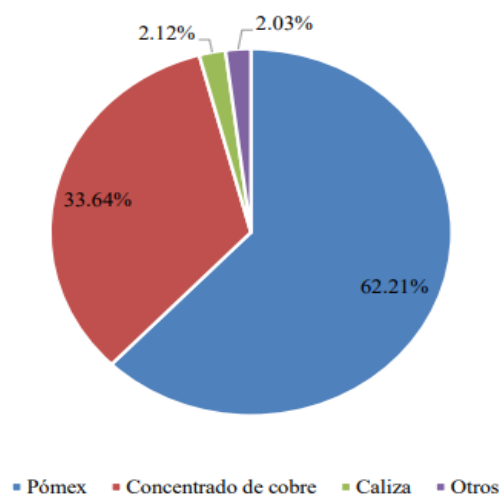


Ilustración 5. Participación de producción por minerales en el período 2015-2019.

Fuente: (Vera Cevallos, 2021).

En la actualidad dentro del Ecuador la industria minera se ha convertido en un elemento clave para la economía del país, apuntando especialmente a la explotación de minerales a través de algunos proyectos establecidos, uno de ellos es el proyecto Mirador que básicamente nace de una alianza entre Ecuador y China.

El proyecto Mirador está ubicado en la provincia amazónica de Zamora Chinchipe en la parroquia Tundayme. Este se encuentra a cargo de la empresa Ecuacorriente y es una de las más grandes del país; está a cargo de producir alrededor de 94.000 toneladas anuales de concentrado de cobre a cielo abierto, convirtiéndose en el primer yacimiento en el país andino a gran escala, en el año 2021 han generado más de 1125 plazas de empleo directo. Dentro del Ecuador ha generado un impacto positivo para la economía de más de 15 millones en inversión social desde enero del 2010 hasta agosto del 2022. Así como las adquisiciones de bienes y servicios de más de 35 millones a 430 proveedores y productores locales.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Para la producción del concentrado de cobre, en el proyecto Mirador, es indispensable contar con un sistema de bombeo y tuberías que permita el transporte del relave hacia su depósito (relavera), ver Ilustración 6.



Ilustración 6. Estación de la relavera de cobre.

El sistema está constituido alrededor de 5 kilómetros de tubería aérea. La tubería es de acero ASTM A53 de 800 mm de diámetro y cambios de sección con radios de curvatura que permiten que el sistema de tuberías se adapte a la irregularidad del terreno debido a su geografía, ver Ilustración 7.

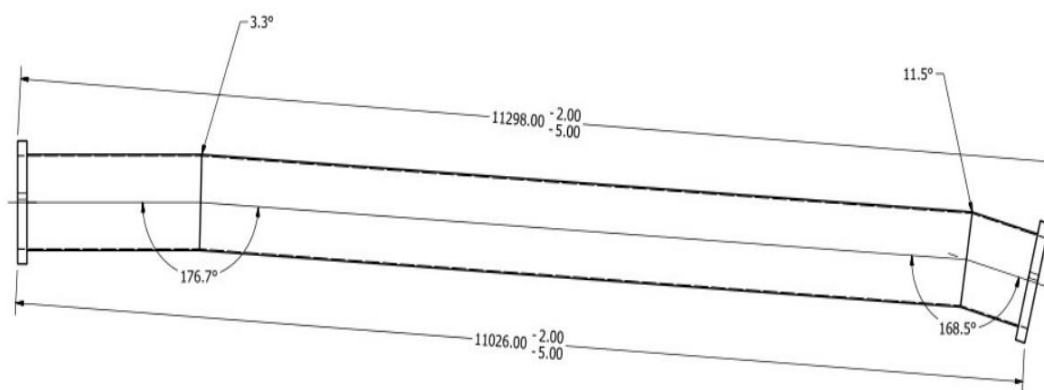


Ilustración 7. Tubería modificada con diferentes radios de curvatura.

Existe un único sistema de tubería que transporta relave en la planta ECSA, a lo largo del tiempo se han realizado varias modificaciones, la primera razón de modificaciones en la tubería es por el cambio en el diseño inicial de la línea de transporte de relave debido a las exigencias del terreno, lo cual genera fallas de desgaste por erosión en el interior de la tubería. En cada reparación se ha implementado el uso de la misma tubería DN800 PN40 con la diferencia que se debe de remover el recubrimiento de elastómero a lo largo de la sección donde va a hacer soldada y finalmente recubierta en el interior por un material epóxico cerámico Devcon 11470, ver Ilustración 8. Dichas modificaciones cambian las propiedades físicas disminuyendo la vida útil de la tubería, los mismos que derivan en paro de planta y daños ambientales, como se visualiza en la Ilustración 9.



Ilustración 8. Tubería modificada a) sin recubrimiento b) con recubrimiento epóxico cerámico.



Ilustración 9. Desgaste en el interior de la tubería que transporta relave DN800 PN40.

Uno de los mayores problemas que tiene la empresa ECSA es que dentro del Ecuador no existe una empresa que se dedique al diseño y fabricación de este tipo de tuberías especiales para el transporte de relave, por ende, se recurre a importar dichas tuberías y su tiempo de reposición es de al menos 6 meses e implican costos muy elevados.

2.1 PROBLEMAS

2.1.1 PROBLEMA PRINCIPAL

¿Cómo mejorar las condiciones operacionales del sistema de transporte de relave asociada a la tubería de descarga en la planta minera de cobre de la empresa ECSA en la Provincia de Zamora Chinchipe?

2.1.2 PROBLEMAS SECUNDARIOS

- ¿Qué propiedades físicas tiene el relave por transportar?
- ¿Cuáles son los parámetros de trabajo que influyen en las condiciones operacionales del sistema de transporte de relave?

- ¿Cuál debe ser el trayecto de la línea base de construcción para el que fue adaptado el diseño actual de la tubería asociada al sistema de transporte de relave?
- ¿Cuál es la magnitud del desgaste por erosión de la tubería de descarga que afecta el sistema de transporte de relave?
- ¿Cómo minimizar el desgaste por erosión de la tubería de descarga para la mejora del sistema de transporte de relave?

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer una propuesta de diseño para la línea de transporte de relave asociado al sistema de descarga en la planta minera de cobre de la empresa ECSA en la Provincia de Zamora Chinchipe.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el relave por transportar para la determinación de sus propiedades físicas.
- Describir las condiciones del sistema de transporte de relave para la identificación de los parámetros de trabajo.
- Analizar el diseño actual de la tubería asociada al sistema de transporte de relave para la identificación del trayecto de la línea base de construcción.
- Determinar el desgaste por erosión de la tubería de descarga para el análisis de los puntos críticos del sistema de transporte de relave.
- Establecer una propuesta de diseño para el sistema de transporte de relave que minimice el desgaste por erosión de la tubería de descarga.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El desgaste por erosión se observa a menudo en tuberías de calderas, turbinas, industrias petroleras, mineras y transportadores neumáticos. El deterioro del material de la tubería causado por el desgaste por erosión puede resultar en la falla de la tubería y también conduce a pérdidas económicas y plantea un problema de seguridad. Muchas industrias están adoptando modelos de erosión para predecir con precisión la ocurrencia de erosión y su efecto de falla en las tuberías para aumentar la productividad y la seguridad.

3.1 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO

3.1.1 LOS RELAVES MINEROS

La minería es uno de los factores productivos más importantes para el desarrollo de las ciudades y, en algunos casos, representa una de las principales fuentes de ingresos económicos. Los residuos mineros se generan al final de todo el proceso de explotación, estos materiales son los que quedan tras el proceso de separación de la fracción valiosa a la fracción no rentable de un mineral, los cuales se esparcen en depósitos o relaves (García-Troncoso et al., 2022).

De acuerdo con Gayana y Ram Chandar (2018) la industria minera comprende a un sector básico después de la agricultura. Los residuos generados por la minería incluyen residuos de sobrecarga, estériles y otros residuos procesados. La gestión de los residuos mineros puede ser de cierta importancia en muchos países en desarrollo donde la extracción y el procesamiento de minerales tienen un importante valor económico. Los residuos producidos generalmente se vierten fuera de la mina en forma de vertederos de sobrecarga. Estos vertederos ocupan una gran cantidad de terreno, que pierde su valor original y generalmente se degrada.

Además de que la extracción de diferentes metales genera grandes problemas medioambientales, la utilización de estos residuos está siendo estudiado por varios investigadores para diferentes propósitos como la construcción de materiales de construcción, pavimentos, rellenos, etc. Por lo tanto, una sustitución parcial de los agregados en el hormigón por roca estéril producida en las minas no sólo ahorra un dinero considerable en el manejo y el mantenimiento de los vertederos, sino que también reduce el coste de la construcción de carreteras. Además, reduce los problemas medioambientales en el emplazamiento de la mina. (Gayana & Ram Chandar, 2018)

Por tal motivo, Garcia-Troncoso et al. (Garcia-Troncoso et al., 2022) han efectuado estudios que examinan la viabilidad de los residuos mineros como agregados para la fabricación de materiales de construcción y permitan explorar la viabilidad técnica y económica de utilizar material de desecho minero o arenas de relaves como agregado fino sustituto en el diseño de hormigón convencional. Dichos estudios destacan resultados prometedores, indicando que los agregados de relaves mineros pueden ser una alternativa más sostenible que el agregado convencional, proporcionando un buen equilibrio entre la trabajabilidad y las resistencias. Así, esta alternativa podría servir como una solución medioambiental que reutilice los residuos mineros generados durante la extracción de metales.

Los residuos mineros son variados y sus características dependen del mineral específico extraído. Los estériles son los residuos resultantes del proceso de recuperación selectiva de determinados minerales. Una vez que las rocas con contenido mineral han sido trituradas y molidas, pasan por un conjunto de procesos físicos y químicos conocidos como concentración o beneficio para recuperar dichos elementos minerales útiles para la industria y el hombre. Una vez terminado, se obtiene el componente con valor, que es el concentrado, y, por otro lado, lo que queda es el relave o residuo (Anicama Acosta, 2011).

El material de desecho minero, más conocido como relaves, es pequeño, incluso de menor diámetro que la arena de río; combinados con el agua, forman un compuesto similar al lodo. De acuerdo con el material que se procesa, los relaves tienen sus

características, que serían útiles si se supiera que, al recibir el tratamiento adecuado, se almacenan para su posterior uso. (García-Troncoso et al., 2022)

Para Gayana y Ram Chandar (2018) los diferentes tipos de residuos mineros son:

Sobrecarga: La tierra y la roca removidas para acceder a los depósitos de mineral en las minas a cielo abierto se conocen como sobrecarga. Se apilan en la superficie de los emplazamientos mineros, donde no perturban la expansión de la explotación minera, ya que mover grandes volúmenes de material resulta costoso.

Roca estéril: La roca estéril es un material que contiene minerales en una concentración considerada demasiado baja para ser extraído económicamente. La roca estéril es adecuada para los movimientos de tierra en el emplazamiento durante operaciones mineras y como áridos para obras de hormigón.

Relaves: Los relaves son productos de desecho mineral y roca finamente molida de las operaciones de procesamiento de minerales. También contienen restos de productos químicos de procesamiento y se depositan en forma de agua en balsas de residuos. Los relaves son difíciles de utilizar debido a su tamaño de grano más fino, pero pueden utilizarse en la industria de la minería en operaciones selectivas. Según el tipo de balsa de residuos, el agua puede ser drenada para que los residuos restantes puedan ser secados.

La principal condición para la utilización de los residuos mineros es que los materiales satisfagan todos los criterios geotécnicos y sean respetuosos con el medio ambiente, estos criterios incluyen ciertos parámetros como la resistencia al corte, comprensibilidad, permeabilidad, granulometría, peso unitario, peso específico y plasticidad. Una caracterización exhaustiva de los residuos mineros es esencial debido al valor de la utilización de los residuos mineros para que pueda mejorarse sobre la base de las propiedades geotécnicas y las limitaciones medioambientales (Gayana & Ram Chandar, 2018). En términos generales esta caracterización del relave está constituida por la consistencia, plasticidad, textura, porosidad, granulometría, densidad real y aparente, aireación, fuerza de cohesión y adhesión expansión y contracción.

Según Gayana y Ram Chandar (2018), las posibilidades adecuadas para la utilización de la roca de residuos mineros son:

- Construcciones de carreteras y material de construcción para la industria de la construcción
- Material para vertederos y para terraplenes diseñados para mitigar el ruido del tráfico
- Material para estabilizar las paredes de los tajos o los túneles y para rellenar los rebajes y las galerías
- Material para el paisajismo y la estabilización durante el cierre de la mina
- Material en la neutralización de aguas subterráneas ácidas generadas en el tajo de la mina
- Presas de estériles y como abono o complemento para mejorar la calidad/fertilidad del suelo.

Las actividades mineras producen anualmente cerca de 25 millones de toneladas de residuos sólidos en diversas formas. Estas actividades incluyen la extracción, el procesamiento de minerales y la extracción metalúrgica. Las operaciones mineras subterráneas o a cielo abierto generan tres tipos principales de residuos sólidos: los residuos de roca en forma de fragmentos de roca que representan la parte no comercial de la roca extraída, los relaves de concentradores que consisten en ganga, agua y a veces aditivos químicos utilizados durante la fase de procesamiento del mineral y, por último, los lodos de tratamiento de aguas contaminadas (B. Lottermoser, 2010).

Además de los residuos de roca y los estériles, también se consideran residuos mineros a las tierras muertas excavadas durante las operaciones de extracción. Geológicamente heterogéneos, los residuos mineros son un material formado por rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas, suelos y sedimentos sueltos cuyo tamaño va desde partículas finas hasta cantos rodados. Además de ocupar grandes

extensiones, los residuos mineros causan graves problemas medioambientales e importantes alteraciones ecológicas si no se controlan adecuadamente. Representan una de las principales fuentes de residuos industriales que requieren una atención especial por parte de la comunidad científica debido a los enormes volúmenes que representan (Ahmari & Zhang, 2012); (Li et al., 2010). Cada vez se presta más atención a la utilización de los residuos en los materiales de construcción (Taha, 2017); (Thomas et al., 2013); (Lv et al., 2019). Esta aplicación está motivada por la agotabilidad de los recursos naturales y la promoción del desarrollo sostenible mediante el fomento de una economía circular.

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES MINEROS

En el estudio de Ally et al. (2021) se describe una metodología que se basa en una revisión exhaustiva de la investigación sobre el uso de los residuos mineros en los materiales de construcción, especialmente en los materiales cementosos para obtener una visión general del uso de los residuos mineros. Esta investigación pretende destacar los principales orígenes y tipologías de los residuos mineros y conocer algunas propiedades de los residuos mineros, en particular las propiedades físicas, las propiedades mecánicas, la composición química; el contenido de metales pesados y metaloides, la composición mineralógica, las propiedades geotécnicas y las propiedades medioambientales (prueba de lixiviación).

En la minería, los residuos mineralizados provienen de tres fuentes principales: la explotación minera, el procesamiento de minerales y el procesamiento metalúrgico. La tipología de los residuos mineros depende de su origen. En efecto, las ineficiencias debidas a múltiples factores en cada nivel provocan pérdidas de minerales en la roca estéril, los residuos, las escorias y el mineral lixiviado. El agua mineral, que entra en contacto con los residuos sólidos, ya sea de forma natural o por haber sido introducida durante una de las etapas de producción, también es un residuo minero. Cuando se utiliza, está cargada de metales disueltos y se caracteriza por su movilidad, contribuyendo así a la propagación de la contaminación ambiental (Lèbre et al., 2017).

De acuerdo con el estudio de Sánchez (2019) del relave minero de la planta de beneficio “Santa Lucía” en la provincia del Azuay, para la caracterización geoquímica y mineralógica del relave se deben realizar una serie de ensayos en diversos laboratorios para establecer el tipo de composición y los porcentajes de los minerales que resulten de los ensayos. Los principales factores por considerar en cuanto a la caracterización geoquímica son los factores geográficos, hidrológicos y geológicos; así mismo es importante tomar en cuenta los posibles y potenciales riesgos de contaminación entre ellos los derivados de un mal funcionamiento en el sistema de transporte de relaves.

Las propiedades físicas de los residuos mineros, como la distribución del tamaño de las partículas, la gravedad específica, la densidad aparente y la tasa de absorción de agua, son suficientes para confirmar su capacidad de uso en materiales de construcción para ser reconocidos. Por un lado, se puede resaltar que la distribución de las partículas de los residuos mineros va desde los finos hasta la grava, y por otro lado, la granulometría de los residuos mineros depende del tipo de residuo, del mineral extraído y del proceso utilizado para su obtención (Ally et al., 2021).

De las propiedades físicas se desprende que la distribución de las partículas de los residuos mineros va de finas a gruesas; la gravedad específica está entre 2,55 y 3,925 y la absorción de agua está entre 0,2% y 5,2%. Además, puede observarse que las propiedades físicas, en particular la granulometría, la densidad específica y la absorción de agua de los residuos mineros, están en función del tipo de residuo, del mineral extraído y del proceso utilizado para obtener el mineral. A su vez la resistencia al impacto y al desgaste está relacionada principalmente con la constitución mineralógica de los residuos mineros ensayados (Ally et al., 2021).

De las constituciones químicas se desprende que las propiedades químicas de los residuos y la naturaleza del mineral explotado, del tratamiento de los minerales y del tratamiento metalúrgico empleado. La composición mineralógica de los diferentes residuos mineros está estrechamente relacionada con la composición química, pero también depende de las condiciones de cristalización del mineral que se explota. Además, la composición mineralógica de los residuos de roca depende

del tipo de roca y de sus minerales primarios y secundarios asociados; la de los estériles y las escorias no sólo depende del mineral procesado, sino también de su grado de oxidación (exposición al agua, a las bacterias y al oxígeno). La evaluación de las propiedades geotécnicas depende de la granulometría de los residuos mineros (Ally et al., 2021).

El objetivo general de las pruebas de lixiviación es determinar el número de especies químicas presentes en los residuos o en los materiales basados en residuos en un lixiviado determinado. En otras palabras, la prueba de lixiviación es una prueba en la que un material se pone en contacto con un lixivante y se extraen determinados componentes del material. Las concentraciones de metales pesados y metaloides lixiviados son, en su mayoría, bajas y están por debajo de los umbrales establecidos para los residuos granulares. Además, se observa que la movilidad de las especies químicas presentes en los residuos mineros en un determinado lixiviado está directamente relacionada con el nivel de materiales pesados que lo contienen, pero también con el lixiviado utilizado. (Ally et al., 2021)

De los resultados de los estudios anteriores se desprende que los materiales cementantes ofrecen la posibilidad de absorber los residuos mineros, especialmente las rocas de desecho y los relaves en diferentes proporciones. Además, los resultados de diferentes estudios han demostrado que estos materiales (residuos mineros) deben someterse a pruebas de lixiviación para evitar la contaminación del suelo. Sin embargo, la mezcla de los residuos mineros con otros componentes, como los estabilizadores, es un factor que influye en el comportamiento de los rellenos de residuos mineros. La utilización de los residuos mineros y de las rocas de desecho en materiales cementantes ofrece resultados convincentes (Ally et al., 2021)

Por otro lado, el material en estudio de Garcia-Troncoso et al. (2022) proviene de la planta de beneficio de la empresa minera "GoldMins", ubicada en El Oro, provincia de Ecuador. Las muestras de relaves fueron recolectadas en sitios aleatorios en la etapa de descarga final y pre secado, marcados por una cantidad importante de arena de relaves mineros. Para caracterizar el material de desecho

minero o relave, se realizaron las pruebas de craqueo, granulometría, densidad relativa de absorción, masa unitaria suelta y compactada, y pruebas de impurezas (ASTM International, 2015).

El material se lavó utilizando el tamiz nº 200 para filtrar el material de impurezas y realizar las diferentes pruebas del material de desecho minero. El material se lava manualmente hasta que el agua salga clara del tamiz. Esto indica que el material ya no contiene impurezas inorgánicas ni material arcilloso. (García-Troncoso et al., 2022). Por otro lado, siguiendo el método de prueba estándar ASTM C128-01 (2015), se determinó que la densidad relativa en el SSD de la arena es de 2770,0 kg/m³, la densidad real es de 2780,0 kg/m³, y la densidad aparente es de 2280,0 kg/m³, y el porcentaje de absorción es de 0,46%. Además, se realizó un análisis granulométrico o prueba de gradación para obtener la distribución de las partículas del agregado por tamaño. Esta información es útil para determinar el cumplimiento de los requisitos de diseño y producción.

Es importante analizar los resultados químicos de los agregados mineros de relaves para conocer las sustancias potencialmente dañinas que puedan contener. En el laboratorio se realizaron pruebas mineralógicas. También se realizó una amplia revisión bibliográfica de las tesis y artículos disponibles sobre los minerales presentes en los relaves. Tras este análisis, se observó que la caolinita y el cuarzo eran los materiales predominantes. Además, no se observó la presencia de óxidos, sulfatos o sulfuros (Calderón et al., 2022); (Cecioni & Dick, 1992); (Melgarejo et al., 2010).

Esto según Calderón (2022) demuestra la evidencia de que los relaves pueden ser utilizados no generando drenaje ácido. Además, la combinación con agregados de relaves mineros y cemento desarrolla una inertización de las arenas de relave. Por lo tanto, el uso de esos agregados en el hormigón no causa un efecto perjudicial, como también se demostró en el uso de adoquines con esos agregados. En base a los resultados químicos favorables del uso de los relaves, éstos pueden ser utilizados en construcciones que tengan un impacto ambiental positivo.

3.2 CONDICIONES OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MINERO

3.2.1 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MINERO

La gestión de los residuos mineros es una tarea costosa y prolongada, pero inevitable. Los residuos mineros se crean inevitablemente durante la extracción, el procesamiento y el refinamiento de los minerales, denominados mena si la minería sirve para la producción de metales. La extracción consiste en retirar el mineral de las rocas que lo alberga, lo que suele hacerse mediante la pulverización. Este proceso es tosco y genera grandes cantidades de residuos, que incluyen el material que debe retirarse para acceder al recurso mineral (por ejemplo, la capa superior del suelo, la sobrecarga y la roca estéril), así como los residuos después de que los minerales se hayan extraído en gran medida de la mena. El volumen de residuos que se produce depende del tamaño de la mina, de los contrastes geológicos y geotécnicos entre el yacimiento y su roca huésped, y de la madurez técnica de la explotación minera (Nwaila et al., 2021).

Para Nwaila et al., (2021) el aumento de la demanda de los sectores de la electricidad y la energía y el crecimiento de las industrias de la alta tecnología y el transporte crean oportunidades para el mercado de la gestión de residuos mineros. A medida que se procesa el mineral y se separan los minerales valiosos, queda una arena mineral de grano fino como residuo que se denomina estéril. La cantidad de estéril que queda se controla en función de la calidad del mineral. Los residuos se suelen bombear en forma de lodo por tuberías para verterlos en una instalación de almacenamiento de residuos. Esta se construye, en especial, para almacenar los residuos y se diseña teniendo en cuenta la ubicación y la geología.

Los relaves, junto con el agua de proceso gastada, forman un líquido de baja densidad que fluye libremente. Para conservar y reutilizar el agua de proceso y concentrar la pasta, los residuos se suelen espesar mediante un proceso de

deshidratación hasta alcanzar una consistencia que permita bombear hacia la instalación de almacenamiento de residuos (Nwaila et al., 2021).

Los lodos de residuos pueden bombearse con un contenido de sólidos que oscila entre el 40% y el 50%. Esto equivale a un contenido de agua del 150% y del 100% respectivamente, lo que para la mayoría de los suelos representa un lodo con propiedades fluidas. Los lodos se transportan normalmente a la zona de embalse de los residuos por medio de tuberías, ya sea con la ayuda de bombas o por la fuerza de la gravedad. La velocidad de sedimentación de las partículas sólidas depende del método y la velocidad de descarga. En condiciones óptimas, las fracciones más gruesas de los residuos se depositan más cerca del punto de deposición, mientras que los materiales más finos se depositan más abajo en la playa (Dixon-Hardy & Engels, 2007).

Para establecer los parámetros de diseño del sistema de eliminación de residuos se evalúan características como: resistencia sísmica, capacidad de soportar inundaciones sin sufrir daños, capacidad de recoger y reutilizar toda el agua de los relaves que se filtre a través de la presa, procedimientos operativos que garanticen que las playas de relaves se mantengan húmedas para evitar la erosión por viento. Para el transporte y la distribución de los residuos Dixon-Hardy y Engels (2007), consideran que el flujo por gravedad es mejor que el bombeo porque requiere un mantenimiento mínimo, tiene un menor potencial de fallos y es mucho más fiable. El bombeo requiere sistemas adicionales sistemas adicionales, como estaciones de refuerzo y cuencas de regeneración de desbordamiento. Estos sistemas aumentan los riesgos potenciales, incrementan los costes de construcción y reducen la fiabilidad; además, las presiones y velocidades más altas conllevan a mayores costes de mantenimiento y explotación.

Las tuberías mineras de todo el mundo presentan una enorme variedad de longitudes, desde cientos de metros hasta más de 100 km. Las tuberías deben dividirse en "tramos homogéneos" en función de sus condiciones (pendientes, geología), entorno (uso del suelo, topografía, contención) y características

especiales (túneles, cruces de ríos, sifones, curvas cerradas, etc.) (Oboni & Oboni, 2020).

Para Oboni y Oboni (2020) cualquier sistema de minería, por complicado que sea, puede describirse como un sistema de nodos cuya granularidad se selecciona adecuadamente. De hecho, al principio los nodos pueden ser "macro", es decir, abarcar procesos complejos; por ejemplo, puede haber un macronodo llamado "molino". Cuando sea necesario, el nodo "molino" puede subdividirse en niveles de granularidad cada vez más finos, hasta llegar, por ejemplo, a un nodo conocido como "bomba de residuos".

La industria minera se ha esforzado por reducir las necesidades de agua dulce reciclando varios flujos de agua en el proceso; en la minería del cobre, el porcentaje medio de agua reciclada se acerca al 70%. Sin embargo, la industria minera debe reducir el consumo de agua, ya que las plantas mineras suelen estar situadas en lugares con escasez de agua (Araya et al., 2021).

La mayoría de las minas siguen utilizando el método convencional para la eliminación de los residuos, que consiste en transportar los lodos de la mina a través de tuberías hasta una instalación de almacenamiento de residuos o una presa de residuos. Una instalación típica de almacenamiento de estériles incluye una presa, una playa producida por la descarga de los lodos de estériles y los lodos de arena fina a limo y arcilla más alejados de la presa en una capa suficientemente impermeable para mantener una balsa superpuesta (Kempton et al., 2010). Este método requiere un alto porcentaje de agua, aproximadamente el 70%, pero se elige porque es rentable (Adiansyah et al., 2015).

Los relaves espesados (TT) y los relaves filtrados (FT) reducen el contenido de agua de estos, pero se consideran de alto consumo energético, por lo que son más caros. No obstante, la aplicación de estas tecnologías reduciría los costes del cierre de la mina (Fourie, 2012); (Franks et al., 2011). Diversos estudios indican que las tecnologías emergentes, como la TT y la FT, representan un gran avance en la industria minera, ya que dependen mucho más del agua reciclada y reducen el consumo de agua dulce (Moolman & Vietti, 2012).

Otras ventajas de la TT y la FT, en comparación con la eliminación convencional de los relaves, son una menor huella, un menor potencial de drenaje ácido de la mina, un menor riesgo de posible rotura de la presa y una mayor recuperación de reactivos (Boger, 2013).

El bombeo de los estériles a la instalación de almacenamiento también requiere mucha energía; depende del contenido de sólidos, ya que la pasta de estériles sólo puede bombear hasta un determinado porcentaje de sólidos. Los análisis reológicos son necesarios para determinar si los relaves pueden ser transportados. El límite elástico es un parámetro que indica el punto en el que un material comienza a deformarse plásticamente. Los residuos con alto contenido en sólidos (65 y 70% de sólidos en masa) tienen un límite elástico muy alto, lo que significa que son difíciles de bombear. Los sólidos de mayor masa deben ser transportados por otros medios, como por ejemplo mediante un filtro prensa (Adiansyah et al., 2016).

3.2.2 CONDICIONES OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES

El transporte por tuberías tiene muchas ventajas, como la escasa contaminación, el mayor ahorro de energía y la reducción de emisiones, un gran volumen de transporte y la falta de dependencia del clima (Chen et al., 2017). En el transporte de rellenos mineros suelen presentarse los siguientes problemas: formas espaciales complejas de las tuberías, características complejas de los fluidos transportados y tamaños complejos de las partículas de los materiales sólidos transportados (Gao et al., 2020).

La interacción entre el rendimiento de un fluido estructural y la tubería tiene una gran influencia en el efecto de transporte del fluido de relleno. Los estudiosos han revisado la ley de evolución de las propiedades reológicas en el proceso de transporte del fluido de relleno mediante el análisis teórico, el diseño experimental y la práctica de la ingeniería.

Leighton y Acrivos (1987) llevaron a cabo experimentos de cizallamiento de partículas en la suspensión concentrada para el lodo con características de

partículas, y obtuvieron la regla de migración de cizallamiento de partículas. Jana et al. (1995) calcularon el coeficiente de velocidad de deslizamiento aparente de la pared en una suspensión concentrada de alta concentración para determinar las características de las partículas no coloidales. Graham et al. (1991) emplearon un método de imágenes de RMN (resonancia magnética nuclear) para analizar la difusión inducida por el cizallamiento y la estructura de la suspensión concentrada que fluye a través de Couette (entre cilindros concéntricos en rotación), y obtuvieron la fórmula de deslizamiento y fluidez correspondiente (Mooney, 1931). Jastrzebski (1967) estudió el efecto del deslizamiento de la pared en un fluido estructural y sus características de viscosidad en suspensión (Gulmus & Yilmazer, 2005); (Soltani & Yilmazer, 1999).

Los estudios anteriores se aplican principalmente al análisis de la acción de la pared y de las características reológicas de cizallamiento de la lechada en condiciones de diferentes propiedades del material y de las partículas, y pueden aplicarse para analizar las características de resistencia y las leyes de erosión en el proceso de transporte de la tubería. Sin embargo, el transporte por tuberías de relleno cementado de relaves de procesamiento de minerales tiene diferentes propiedades de material, espacio de tuberías y propiedades reológicas. Hay algunas limitaciones en el análisis de los métodos anteriores, como el análisis de las características del fluido no newtoniano utilizado para los lodos de alta concentración, y la deficiencia en la resolución del problema del seguimiento del flujo no uniforme de una variedad de materiales. Es necesario utilizar métodos de investigación de análisis de experimentación y cálculo. De hecho, la reología del lodo contiene una variedad de problemas no lineales. La investigación existente utiliza modelos reológicos como Bingham, HB e YB para describir el comportamiento del flujo de los purines. Basándose en ellos, se realiza un análisis hidráulico para derivar la fórmula de resistencia al transporte (Kefayati, 2018); (He & Ji, 2019); (Yang, 2016). El análisis de los factores no lineales no es monótono, y tales modelos tienen ciertas limitaciones. En las últimas investigaciones, la geometría fractal, el cálculo fractal y el cálculo fraccionario se han convertido en temas de gran interés tanto en matemáticas como en ingeniería para las soluciones no diferenciales. La teoría fractal es la base teórica

del espacio tiempo fractal, de la teoría del infinito E de El Naschie y también de las ciencias de la vida (Cheng, 2016); (Sayevand, 2020); (El Naschie, 2018); (Glenny et al., 2020). El cálculo fraccionario se introdujo en la época de Newton, y se ha convertido en un tema muy importante en varios campos, especialmente en matemáticas e ingeniería para la reología (Tahir et al., 2017); (He & Ji, 2019); (Wang et al., 2018); (Wu & Hu, 2017); (Hu & He, 2016); (Pan et al., 2018); (Korpinar, 2018); (He & Ain, 2020); (Zhu et al., 2016); (He, 2020); (Yang, 2017).

A la luz de estos problemas, Gao et al., (2020) llevó a cabo un experimento de simulación del transporte por gravedad del relleno cementado de los residuos, basado en el análisis de las características de fluido estructural de la lechada de relleno y el cálculo del flujo de partículas. En combinación con el modelo de Bingham, se estableció la ecuación de resistencia del transporte de fluido estructural comparando el estado de fluidez de los lodos con diferentes concentraciones en un experimento de transporte por gravedad, y se calculó la resistencia al transporte de los lodos de relleno bajo la condición de transporte por gravedad. Al mismo tiempo, llevó a cabo un análisis del modelo de teoría fractal no lineal basado en los parámetros inciertos en la prueba de autoflujo. Aplicaron el modelo CFD de flujo denso de fases y partículas para construir un modelo de campo de flujo real de la tubería teniendo en cuenta la acción interfásica y la alta concentración del transporte de relleno. De acuerdo con el análisis del modelo de diferentes parámetros de transporte, se adquirió el esquema de transporte óptimo. El método de combinar las pruebas de laboratorio con las simulaciones numéricas presentó resultados fiables, ofreciendo un modelo de optimización eficiente de los parámetros de transporte de la tubería y proporcionando una base para la construcción del transporte por tubería de relleno cementado de los residuos del procesamiento de minerales.

El método de extracción adoptado actualmente por la mina de Gaofeng (Guangxi, China), es la extracción de relleno horizontal ascendente. El sistema de relleno cementado de estériles consta de una estación de preparación de mortero en superficie y un sistema de transporte por tuberías subterráneas. El sistema de

relleno incluye una estación de bombeo y una tubería de transporte de residuos, un espesador de cono profundo de alta eficiencia y adición de floculante, una piscina de arena de almacenamiento de residuos completa, fabricación de lodo y descarga de arena, mezcla de lodo de relleno, distribución de energía, control automático y una red de tuberías de relleno subterráneas, como se muestra en la Ilustración 10 (Gao et al., 2020).

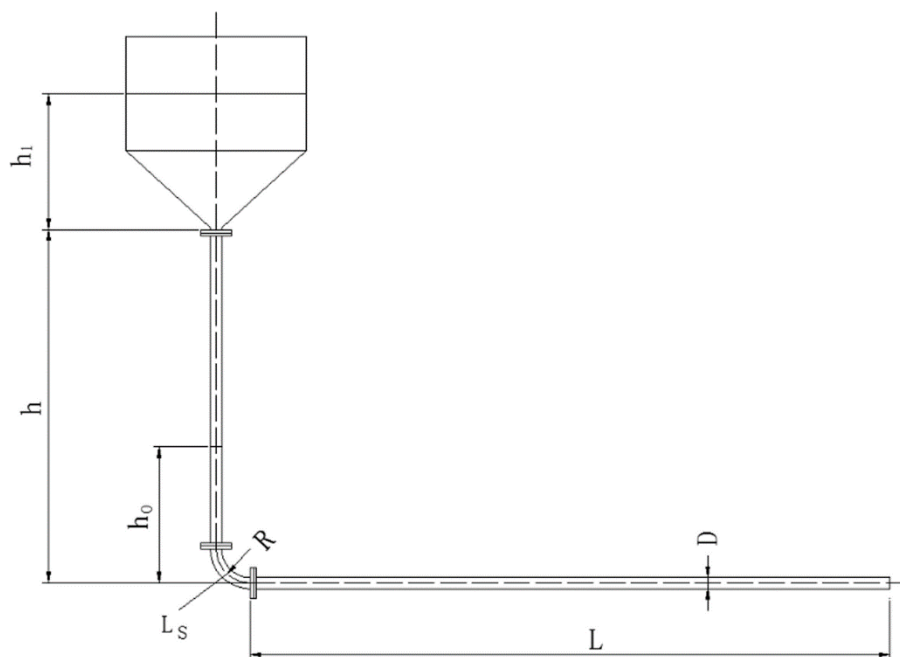


Ilustración 10. Esquema de la estructura del dispositivo de prueba de flujo por gravedad.

Fuente: (Gao et al., 2020)

Los residuos aplicados en el estudio fueron proporcionados por la mina Gaofeng (Guangxi, China), y las propiedades físicas y químicas de los residuos se analizaron en la Universidad Central del Sur (Hunan, China). Además de las propiedades físicas básicas de los estériles obtenidas mediante el ensayo en interiores, también se midió el tamaño de las partículas utilizando un difractómetro avanzado (XRD) Bruker AXS D8 y un clasificador de partículas MASTERSIZER 2000. La composición mineral de los relaves se determinó mediante difracción de rayos X. El contenido composicional afecta a las propiedades del material de relleno. Las diferencias en el tamaño de las partículas y la composición dan lugar a diferentes propiedades del

material. Para formar un material de pasta estable y adecuado para el transporte por tuberías, el contenido sólido de las partículas menores de 20 μm debe ser $>25\%$ (relación de peso) (Gao et al., 2020).

El estudio de Gao et al., (2020), se llevó a cabo la prueba de simulación de transporte de la tubería tipo L y se combinó el cálculo de la pérdida de resistencia con las características reológicas de la lechada para analizar la resistencia de transporte de la lechada in situ y proporcionar una referencia para el diseño del sistema de transporte de la lechada de relleno subterráneo. El dispositivo de medición de los parámetros reológicos se empleó en el experimento de transporte por gravedad del lodo de relleno mezclado para observar la forma de flujo del lodo y su estado después de fluir.

Para mejorar el sistema de transporte del relleno minero, la optimización de los parámetros de transporte se realiza mediante el método de verificación mutua de la simulación experimental y numérica. Las características de transporte de la lechada de relleno varían con la concentración. Los estados de flujo en diferentes esquemas muestran que cuanto mayor sea la concentración, mayor será la resistencia del transporte por tuberías. A menor concentración, la lechada de relleno mantiene un caudal elevado y sale en forma de spray, y salpica. A medida que aumenta la concentración, el estado de flujo de la lechada se altera sustancialmente. El caudal disminuye y el estado tiende a ser estable (Gao et al., 2020).

El flujo de fluido a lo largo de la tubería es sólo un deslizamiento a lo largo de la pared de la tubería. La práctica de la producción en masa confirma que cuando el lodo que contiene partículas finas se transporta a lo largo de la tubería, debido a la presión, el material del lodo y las partículas finas se exprimen hacia la capa exterior, formando así una capa lubricante en la pared de la tubería, y reduciendo significativamente la resistencia del transporte de la tubería (Gao et al., 2020).

La resistencia al transporte de la lechada de relleno está relacionada con los parámetros reológicos τ , η y la velocidad de flujo de la propia lechada de relleno. En

el proceso de transporte de lodos MPT, cuanto mayor sea la distancia de transporte, mayor será la pérdida de resistencia de la tubería. Al aumentar la distancia, la presión tiende a descender constantemente. La zona más erosionada fue la unión de la sección de curva y la sección recta aguas abajo. El flujo secundario generado en el interior de la sección de curvatura hace que las partículas sólidas se muevan con más violencia. Se desplazan desde el exterior hacia el interior e impactan en la pared interior de la sección de curvatura. Cuanto más cerca del centro de erosión, más significativo es el aumento de la tasa de erosión (Gao et al., 2020).

Los resultados de las pruebas y los análisis y cálculos teóricos mostraron que la resistencia al transporte de la lechada de relleno a lo largo de la tubería está relacionada con los parámetros reológicos, la velocidad de transporte y el diámetro de la tubería. El aumento de la concentración de la lechada acelerará la pérdida de resistencia del transporte, intensificará la turbulencia y el efecto de erosión de la plataforma de transporte en el codo, y destruirá las características originales de la distribución del tamaño de las partículas de la lechada MPT, lo que no favorece el mantenimiento de la integridad del transporte y del relleno (Gao et al., 2020).

3.3 ANÁLISIS DEL DISEÑO DE LA TUBERÍA ASOCIADA AL SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

3.3.1 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

El transporte de mineral es un proceso minero que se puede realizar a través de fajas transportadoras, camiones, transporte hidráulico, entre otras formas. Una de las tecnologías más desarrolladas y con mayor presencia es el transporte hidráulico a través de tuberías y que utiliza bombas centrífugas. Los factores que intervienen en diseño e instalación de dichas tuberías son complejos, se debe analizar la relación sólido-líquido, la densidad media de la pulpa, la densidad de los componentes sólidos, el análisis del tamaño y la forma de las partículas, y la viscosidad del fluido, entre otros (Wills, 2011).

Para Wills, (2011) La construcción de presas aguas abajo es el único método que permite el diseño y la construcción de presas de relaves según normas de ingeniería aceptables. El producto fino de la clasificación, es decir, los "lodos", puede deshidratarse parcialmente en tanques de sedimentación poco profundos de gran diámetro conocidos como espesadores y la pulpa espesada se bombea a la eliminación de residuos o, si contiene valores, se bombea directamente al proceso de concentración, eliminando así la carga de la sección de molienda.

En plantas de cualquier tamaño, la pulpa se mueve a través de tuberías mediante bombas centrífugas. Las tuberías deben ser lo más rectas posible para evitar la abrasión en las curvas. El uso de tuberías de gran tamaño es peligroso siempre que el movimiento lento pueda permitir que los sólidos se asienten y, por tanto, ahoguen la tubería. Los factores que intervienen en el diseño e instalación de las tuberías son complejos e incluyen la relación sólido-líquido, la densidad media de la pulpa, la densidad de los componentes sólidos, el análisis del tamaño y la forma de las partículas y la viscosidad del fluido (Mular & Bhappu, 1980). Las bombas centrífugas son baratas en coste de capital y mantenimiento, y ocupan poco espacio (Wilson, 1981). Normalmente se utilizan bombas de una sola etapa, que elevan hasta 30 m y, en casos extremos, 100 m. Su principal desventaja es la alta velocidad producida dentro de la cámara del impulsor, que puede provocar un grave desgaste del impulsor y de la propia cámara, especialmente cuando se bombea una arena gruesa (Wills, 2011).

Los tanques de caída del último tramo de la línea de tuberías están sellados para proporcionar la presión necesaria para cruzar el valle y elevar los purines hasta el centro de descarga. El diseño de cada presa de residuos debe desarrollarse para cumplir los requisitos específicos del proyecto minero en cuestión (Mohd. Azizli et al., 1995).

Debido a la topografía entre la planta de procesamiento y el área de residuos, el bombeo y las tuberías se utilizan para transportar los lodos de residuos. En general, los residuos mineros son aquellos productos de desecho que se originan, se acumulan y están presentes en las minas. Existen dos estrategias principales de

eliminación: la eliminación directa como es la eliminación de relaves en ríos o en el mar y la eliminación indirecta por medio de presas de relaves convencional, relaves en pasta y espesados, reutilización de relaves, reciclaje y reprocesamiento (B. G. Lottermoser, 2011).

La "reutilización" se define como el nuevo uso o aplicación de la totalidad de los residuos mineros en su forma original para un fin directamente sin ninguna reprocesamiento. Por otro lado, el "reciclaje" se refiere a la extracción de nuevos ingredientes de recursos valiosos, o a la utilización de los residuos como materia prima y convertir la totalidad de los residuos mineros en un nuevo producto o aplicación valiosa con alguna reprocesamiento. "Reprocesamiento" es utilizar los residuos mineros como materia prima para producir un producto valioso, como los minerales y metales recuperados. La pirámide de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar) se ha utilizado comúnmente en la jerarquía de gestión de residuos genérica y en el desarrollo de estrategias de gestión de residuos mineros en el mundo (Song et al., 2017).

En todo el mundo, la industria minera está avanzando hacia la introducción de una automatización significativamente para mejorar la productividad y la seguridad por lo que Moreau et al., (2021) propone un modelo de ECV (evaluación del ciclo de vida) para analizar los impactos ambientales, con respecto a la unidad funcional definida de extracción y procesamiento de una tonelada de mineral, desde todos los procesos centrales implicados a través de la extracción del mineral y las etapas de procesamiento del mismo hasta el transporte de los concentrados a las instalaciones de refinamiento fuera del sitio.

La distancia posterior a la fundición es el último paso del proceso considerado dentro del modelo de ECV. La distancia y el método de transporte difieren según la infraestructura de procesamiento de mineral in situ de la mina y la ubicación geográfica. El menor impacto de las operaciones en estas categorías reducirá la degradación del suelo y el agua en los alrededores. El resultado neto de la aplicación de la automatización es, por lo tanto, la posibilidad de que una mina tenga un menor

impacto ambiental operativo y también deje un entorno menos impactado después del cierre (Moreau et al., 2021).

3.3.2 SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVE MEDIANTE LOS PLANOS ISOMÉTRICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TRAYECTO DE LA LÍNEA BASE DE CONSTRUCCIÓN

En la actualidad, en las plantas de extracción y procesamiento, los sistemas de tuberías representan un elemento importante de la extracción (Melnik & Kozlov, 2017), el procesamiento de las materias primas minerales materias primas minerales (Drebenshtedt et al., 2018), y la preparación de compuestos de estiba (Krasnyukova et al., 2021).

El uso de tuberías como sistema de transporte de relaves es uno de los métodos más comunes adoptados por las empresas de minería del país. De acuerdo con Aleksakhin et al., (2021) los relaves en pasta tienen un contenido de sólidos de aproximadamente el 73% y se transportan por tuberías para ser depositados. En el diagrama de flujo de las empresas mineras, el transporte por tuberías es una de las prioridades debido a factores como la entrega continua e ininterrumpida y puntual del producto a la zona de consumo, la oportunidad de crear el camino más corto, el bajo coste del sistema de tuberías y corto periodo de amortización oportunidad de automatizar el proceso de transporte, la posibilidad de control exhaustivo del sistema de tuberías en su conjunto y de todos sus elementos y entre otros la facilidad de funcionamiento y fiabilidad.

Parisher y Rhea, (2022) consideran que el diseño adecuado de cualquier trazado y configuración de tuberías debe tener en cuenta las limitaciones de la propia tubería. Las tuberías de acero pueden fabricarse utilizando varias técnicas diferentes, cada una de las cuales produce una tubería con determinadas características. Estas características incluyen la resistencia, el grosor de la pared, la resistencia a la corrosión y las limitaciones de temperatura y presión. Por ejemplo, los tubos que tienen el mismo grosor de pared pero que se fabrican con métodos diferentes pueden variar en cuanto a resistencia y límites de presión.

El bombeo de los residuos para su deposición suele ser una de las principales operaciones de una planta minera. De acuerdo con Handbook (2009) el tipo más común de bomba para lodos de relave es, con mucho, la bomba centrífuga. La bomba centrífuga para lodos utiliza la fuerza centrífuga generada por un impulsor giratorio para impartir energía cinética a los lodos. El proceso de selección de bombas centrífugas debe incluir la consideración del tamaño del impulsor y el diseño para el paso de sólidos, las posibilidades de sellado del eje adecuadas y la selección de materiales óptimos y de larga duración.

El procedimiento debe tener en cuenta todas las características variables del lodo en particular y tener en cuenta las limitaciones impuestas ya sea por el tipo de bomba, velocidad de la bomba, y las opciones dentro de la gama de modelos disponibles. Entre los datos básicos necesarios para realizar una selección del tipo de material son: la granulometría de los sólidos a bombear, la forma y la dureza de estos sólidos, y las propiedades corrosivas del componente de transporte "líquido" del lodo a bombear (Handbook, 2009).

En las aplicaciones de bombas de lodos, el modo de desgaste dominante es la erosión. La erosión es una forma de desgaste que implica la pérdida de material de la superficie por la acción de las partículas arrastradas en el fluido. Para el bombeo de residuos, el volumen (o caudal) se determina por una correlación entre tres factores: la gravedad específica de los sólidos, el tonelaje de sólidos que debe bombearse, y la concentración de estos sólidos en la mezcla de lodos. Estos tres factores deben determinarse antes de seleccionar cualquier bomba de lodos. Otro requisito primordial para la evaluación de un sistema de bomba de lodos es la determinación de la longitud de la tubería que se utilizará en la aplicación. El lodo que pasa por una tubería crea fricción (o arrastre) contra las paredes de la tubería. Cuanto más larga sea la tubería, mayor será la fuerza de fricción que deberá superar la bomba de lodos. Antes de seleccionar una bomba, es imperativo establecer con la mayor precisión posible la longitud real de la tubería y los detalles de las curvas u otras variaciones de esta. La altura vertical real (altura estática) que debe superar el lodo debe determinarse con precisión antes de seleccionar una bomba. Las

variaciones en la altura vertical que normalmente son medidas desde el lado de entrada de la bomba hasta el punto de descarga pueden tener un efecto importante en el rendimiento de cualquier bomba central (Handbook, 2009).

En comparación con los laboriosos y costosos ensayos en planta, la simulación por ordenador ofrece claras ventajas para evaluar de los circuitos alternativos, la optimización del diseño y para estimar los caudales de los flujos del proceso. Esto puede utilizarse para analizar los equipos de manipulación de materiales (cintas transportadoras, bombas y tuberías). Siempre es necesario respetar el rango de funcionamiento en el que los modelos son válidos, así como los límites realistas que hay que poner al funcionamiento de los equipos, y la capacidad de bombeo (Aleksakhin et al., 2021).

En adición, el plano de disposición de tuberías es el dibujo más importante desarrollado por un diseñador de tuberías. Este plano, también conocido como plano de disposición de tuberías, es una de las principales fuentes de información utilizadas en la fabricación y el montaje de las instalaciones de tuberías. Y cuando se utiliza el método tradicional y manual de diseño, la información del dibujo de disposición ayuda a desarrollar el modelo de tuberías y los dibujos isométricos los cuales combinan las tres dimensiones del objeto en una sola vista para ofrecer una representación ilustrativa del objeto, como se puede observar en la ilustración 11 (Parisher & Rhea, 2022).

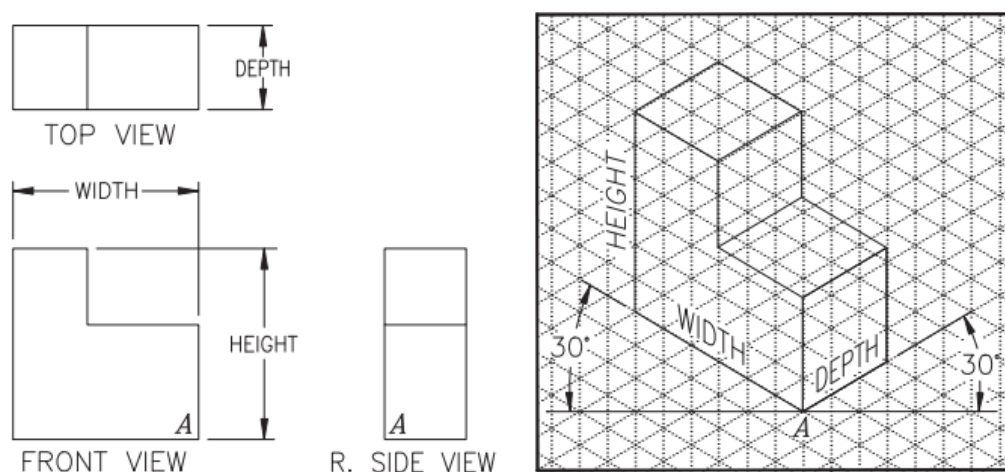


Ilustración 11. Vista isométrica

Los planos isométricos sirven de ayuda para la construcción y el montaje de la instalación, ya que proporcionan a los trabajadores las ubicaciones de los empalmes, las conexiones y las rutas. La mayoría de las empresas de ingeniería y construcción elaboran un isométrico de tuberías de cada configuración de tuberías que se vaya a instalar en la planta. Los isométricos de tuberías suelen crearse en una sola línea, independientemente del tamaño nominal de la tubería. Cada línea de tubería se dibuja o traza individualmente en una hoja de papel. En esa misma hoja se encuentra la lista de materiales con cada línea de tubería dibujada en una hoja separada, a veces con un fondo de cuadrícula isométrica. Los isométricos de tuberías también se crean como un esquema, lo que significa que no se dibujan a escala. Un símbolo isométrico común para accesorios, bridas y válvulas representará todos los tamaños de tuberías. No se intenta representar gráficamente el tamaño real de una tubería ni su peso. Esta información se transmite mediante el uso de anotaciones y notas, especialmente el número de línea, colocado en el dibujo (Parisher & Rhea, 2022).

3.4 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN DE LA TUBERÍA DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

3.4.1 MATERIALES USADOS PARA TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

La resistencia a la erosión con bajo ángulo de impacto es un requisito crítico de los materiales utilizados en bombas, tuberías, válvulas, boquillas, ciclones y otros componentes que transportan y procesan la mayoría de los lodos minerales. Con el tiempo, la selección de tuberías ha aumentado su complejidad, los métodos de fabricación de tubos se han ampliado para satisfacer los requisitos del proceso. Las tuberías, dependiendo del diámetro, se fabrican en los siguientes grosores: 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 160 pulgadas ("). El tercer sistema de categorización del grosor de las paredes consiste en medir el grosor en un valor fraccionario o

decimal. Independientemente del método de categorización del grosor de la pared de una tubería, éste no afectará al diámetro exterior de la misma. El diámetro exterior es un valor fijo que no cambiará. A medida que el grosor de la pared aumenta o disminuye, es el diámetro interior el que se ajusta. Se debe considerar que los tubos de 14" y mayores se identifican por su medida exterior real. La siguiente fórmula puede utilizarse para calcular el diámetro interior (DI) de una tubería: $ID = OD - (2 \times \text{Espesor de la pared})$ (Parisher & Rhea, 2022).

Parisher & Rhea, (2022) consideran que, antes de seleccionar una tubería, hay que estudiar cuidadosamente su material, la temperatura y la presión permitidas, la resistencia a la corrosión y la erosión. El ingeniero de procesos tendrá que prestar mucha atención a los requisitos de flujo de una tubería utilizada para un proceso concreto. Las presiones y temperaturas de un producto en una tubería pueden dictar su grosor de pared. Pero, con una tubería de pared gruesa, el diámetro interior puede no permitir los caudales necesarios para suministrar adecuadamente el producto a la velocidad y presión adecuada.

A la inversa, "sobrediseñar" con la tubería puede dar lugar a sobrecostos injustificados. La tolerancia a la corrosión es la cantidad de material superficial que se permite que sea erosionado por la materia prima dentro de la tubería mientras se permite que la tubería siga siendo utilizable para el servicio particular para el que se instala. En el caso de las tuberías de acero, estas incluyen una mayor resistencia, el grosor de la pared, resistencia a la corrosión y limitaciones en cuanto a temperatura y presión (Parisher & Rhea, 2022).

Los métodos de fabricación de las tuberías, incluyen los tubos sin costura, soldados a tope y soldados en espiral. Los tubos sin soldadura se fabrican perforando una varilla de acero maciza, casi fundida, con un mandril para producir un tubo sin costuras ni juntas. La tubería soldada a tope se forma alimentando la placa de acero caliente a través de moldeadores que la enrollan en una forma circular hueca. Al apretar los dos extremos de la chapa se produce una unión o costura fundida. Los tubos soldados a tope, por ejemplo, se forman a partir de una placa laminada que tiene un grosor de pared más uniforme y que puede inspeccionarse para detectar

defectos antes del conformado y la soldadura. Este método de fabricación es especialmente útil cuando se necesitan paredes finas y longitudes largas. Por lo general, los espesores de pared más amplios se producen con el método sin costura (Parisher & Rhea, 2022).

Para evitar la sustitución frecuente de los componentes de las tuberías en los sistemas subterráneos, los productos que fluyen a través de las tuberías subterráneas pueden ser sólo ligeramente corrosivos o las propias tuberías pueden tener márgenes especiales de corrosión para adaptarse a los productos que fluyen a través de ellas (Parisher & Rhea, 2022).

Generalmente en la transportación de relaves se producen dos efectos: de erosión y corrosión, los cuales actúan conjuntamente y a menudo son difíciles de identificar por separado. La erosión/corrosión es el resultado de la abrasión constante de una capa de óxido que se forma en la superficie interior del extremo líquido de la bomba. Esta capa de óxido protectora es la reacción química beneficiosa entre las piezas metálicas y el líquido de transporte de lodos. Protege las piezas metálicas de la corrosión; sin embargo, cuando se erosiona constantemente, esta descomposición expone el metal subyacente a las partículas y se produce la erosión/corrosión que elimina el metal (Handbook, 2009).

Los efectos adversos en el rendimiento de la bomba causados por los sólidos del relave se deben principalmente al deslizamiento entre el fluido y las partículas sólidas durante la aceleración y desaceleración del lodo al entrar y salir del impulsor. Este deslizamiento de los sólidos, y la pérdida de energía asociada, aumenta a medida que se eleva la velocidad de sedimentación de las partículas en el lodo. Otro efecto adverso es el aumento de las pérdidas por fricción en la bomba. Estas pérdidas aumentan con la densidad y la viscosidad aparente de los lodos (Handbook, 2009).

Un aumento de concentración de sólidos reduce la eficacia de la bomba. A altas concentraciones, esta reducción de la eficacia puede ser considerable. La potencia requerida por una bomba centrífuga que bombea una mezcla de lodos será mayor

que el valor indicado simplemente multiplicando el valor de la potencia del agua clara por la gravedad específica de la mezcla de lodos. El tamaño de la partícula bombeada tiene cada vez menos impacto en el rendimiento de la bomba a medida que aumenta el tamaño del impulsor (Handbook, 2009).

La erosión y la corrosión siempre se producen simultáneamente en las tuberías que transportan fluidos corrosivos que arrastran partículas sólidas (Jin et al., 2017); (M. Zhu et al., 2015). La pérdida total de metal causada por la erosión-corrosión se compone del componente de corrosión y del componente de erosión (Adiansyah et al., 2016) (ASTM International, 2015). La sinergia entre la erosión y la corrosión se convierte en uno de los principales factores que influyen en la degradación de los materiales de las tuberías (*Non-Faraday material loss in flowing corrosive solution - ScienceDirect*, s. f.); (Zeng et al., 2020).

Normalmente, se emplean técnicas electroquímicas junto con mediciones gravimétricas para cuantificar la tasa de corrosión y la tasa de erosión (J. Liu et al., 2017); (Xu et al., 2020). Mientras tanto, la pérdida total de metal inducida por la erosión-corrosión podría obtenerse a partir de las mediciones gravimétricas (Zeng et al., 2014); (J. Liu et al., 2017); (Y. Liu et al., 2021). Posteriormente, la pérdida de metal por erosión podría calcularse a partir de la diferencia entre la pérdida total de metal y la pérdida de metal por corrosión (ASTM International, 2015).

3.4.2 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN EN TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

La erosión y la corrosión siempre se producen simultáneamente en las tuberías que transportan fluidos corrosivos que arrastran partículas sólidas (Jin et al., 2017); (Sayevand, 2020). Sinergia entre la erosión y la corrosión se convierte en uno de los principales factores que influyen en la degradación de los materiales de las tuberías (*Non-Faraday material loss in flowing corrosive solution - ScienceDirect*, s. f.); (Zeng et al., 2020). En consecuencia, el sondeo en línea y la detección temprana de la erosión-corrosión son necesarios para la gestión de la seguridad de las tuberías (L. Liu et al., 2021).

Con el fin de medir en línea la pérdida total de metal inducida por la erosión y la corrosión en las tuberías, se utilizan sondas no electroquímicas como los sensores de resistencia eléctrica (ER) (Vieira et al., 2017); (Xu et al., 2017) y los sensores acústicos (Ukpai et al., 2013); (Owen et al., 2019). Los índices generales de erosión-corrosión podrían reflejarse bien a partir del cambio de resistencia o de la emisión acústica. Este proceso combina el método de la resistencia eléctrica (ER) y las mediciones EIS (espectroscopia de impedancia electroquímica) para sondear en línea el cambio dinámico de la erosión-corrosión. Al igual que las sondas ER (resistencia eléctrica) tradicionales (Vieira et al., 2017); (Orlikowski et al., 2013); (Xu et al., 2017); (L. Liu et al., 2019), el sensor de erosión-corrosión está formado por un elemento sensible y un elemento de compensación de temperatura.

La tasa de erosión se puede calcular a partir de la diferencia entre el W'_t y el W'_c :

$$W'_e = W'_t - W'_c \quad (1)$$

donde W'_t es la tasa de pérdida total de metal, W'_c es la tasa de corrosión, W'_e es la tasa de corrosión reforzada por la erosión (L. Liu et al., 2021).

El resultado de estos procesos sugiere que se evidencia una corrosión localizada cuando la velocidad del flujo fue superior. A su vez, la contribución de la erosión a la degradación del acero no puede ser ignorada en condiciones de alta velocidad de flujo. Debido al efecto sinérgico entre la erosión y la corrosión, las variaciones de la tasa de erosión y la tasa de corrosión presentan las mismas tendencias. Con respecto al sistema de sensores, tanto el componente de erosión como el de corrosión son bien sondeados y separados. Esto proporciona una nueva metodología para controlar en línea el inicio y la propagación de la erosión-corrosión, diseñado sobre la base de la combinación de mediciones de ER y EIS. Tanto la tasa de erosión como la tasa de corrosión pueden sondearse en línea y separarse de la tasa total de pérdida de metal (L. Liu et al., 2021).

Por otro lado, existe una nueva metodología basada en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Este procedimiento da lugar a una relación específica del material para el cálculo de las tasas de desgaste. El estudio de López et al., (2015)

presenta una comparación de un ensayo simulado con Ansys Fluent (Fluent) 15.0 y OpenFOAM 2.2.x. (OpenFoam) centrado en modelos de erosión.

Se ha desarrollado la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Este procedimiento produce una relación específica del material para el cálculo de los índices de desgaste. Fluent ofrece al usuario la posibilidad de añadir una nube de partículas y seguir su movimiento en cualquier punto. Todas las propiedades de las partículas, así como las plantillas utilizadas para recoger las variables necesarias en el momento del impacto, se definen a través de un diccionario que se lee al iniciar la simulación. Una vez obtenidos los valores en estado estacionario de las principales variables del campo de flujo, éstos se fijan como condiciones iniciales para las simulaciones transitorias. El usuario necesita primero definir cuáles son las fuerzas más relevantes que influyen en la partícula (López et al., 2015).

De acuerdo con el estudio de López et al., (2015) en Ansys Fluent, la fuerza de arrastre se designa como la única que actúa sobre las partículas. La fórmula de arrastre también se implementó y se probó en OpenFoam sin encontrar diferencias en lo que respecta a las condiciones de impacto. El resto de las fuerzas, incluida la gravedad, se ignoraron en esta simulación debido a su influencia insignificante en la fase discreta en comparación con la fuerza de arrastre. El balance de fuerzas se muestra en la siguiente ecuación.

$$F_p = m_p \frac{du_p}{dt} = F_D \quad (2)$$

La fuerza de arrastre sobre partículas esféricas tiene la forma de la ecuación 4 y el coeficiente de arrastre en OpenFoam se obtiene a partir de la ecuación 5, mientras que en Fluent se emplea la fórmula desarrollada por Morsi y Alexander en (Morsi & Alexander, 1972). La fórmula de arrastre de Morsi & Alexander, (1972) también fue implementada y probada en OpenFoam no habiendo encontrado diferencias en lo que respecta a las condiciones de impacto.

$$F_D = m_p \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u - u_p) \quad (3)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15Re_p^{0.687}) & 1 \leq Re_p \leq 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (4)$$

Para inyectar la misma masa de partículas, López et al., (2015) eligió la inyección superficial en OpenFoam y las inyecciones simples en Fluent. Una de las principales diferencias en cuanto a los modelos de inyección es que, aunque ambos programas utilizan el nombre de inyección superficial, difieren mucho entre sí. En Fluent, cuando se selecciona la inyección superficial, el número de partículas inyectadas por el paso de tiempo será igual al número de caras de la superficie seleccionada. Por esta razón, se eligen dos inyecciones individuales en dos lugares diferentes de la entrada, de forma que el número de partículas liberadas coincida con el de OpenFoam. Si se hubiera utilizado la inyección superficial en Fluent, el número de partículas habría sido mucho mayor. En este caso, se seleccionó en Fluent el llamado modelo de paseo aleatorio discreto.

Un estudio minucioso de las trayectorias de las partículas reveló que la modificación de la velocidad de entrada de las partículas no se percibía aguas abajo debido a la pequeña distancia que recorrían las partículas para acelerar cerca de la velocidad del fluido y la distancia comparativamente larga hasta la superficie del objetivo (López et al., 2015).

En Fluent, se creó una función definida por el usuario (UDF) que recogía la velocidad de las partículas, el ángulo de impacto de las partículas y la ubicación del impacto en términos de radio a lo largo del objetivo. Además, la función definida por el usuario termina la trayectoria de la partícula una vez que impacta en el objetivo, de modo que no se pueden considerar segundos impactos de la misma partícula. La misma condición se cumplió en OpenFoam. Sin embargo, este último requirió de un decodificador adicional llamado patchPostProcessing. Esta plantilla permite la impresión de las variables de las partículas deseadas en un archivo de texto, de modo que el radio, la velocidad y el ángulo de impacto fueron recogidos, calculados

y almacenados con éxito tan pronto como las partículas golpearon la superficie (López et al., 2015).

La erosión es un proceso muy complejo, en el que intervienen un gran número de variables. Existe un importante número de trabajos sobre la erosión, que contienen muchos enfoques diferentes sobre cómo predecirla. La tabla 1 muestra algunos de los factores que se han tenido en cuenta en la literatura divididos en tres bloques correspondientes a los que afectan a las partículas, a las superficies que intervienen en el proceso o al fluido portador (López et al., 2015).

Tabla 1. Factores que afectan a la erosión.

Para las partículas	Para las superficies	Para el fluido portador
1. Ángulos de impacto y rebote	1. Propiedades físicas	1. Estado de movimiento (laminar o turbulento)
2. Velocidades de impacto y rebote	2. Cambio de forma causado por la erosión	2. Velocidad
3. Rotación antes y después del impacto	3. Nivel de estrés	3. Temperatura
4. Forma y tamaño	4. Temperatura	4. Composición química y propiedades físicas
5. Concentración de volumen y flujo superficial	5. Presencia de revestimiento de óxido (u otros)	
6. Propiedades físicas (dureza, resistencia y densidad)	6. Aparición simultánea de corrosión	
7. Fragmentación		
8. Interacciones (con superficies, fluidos u otras partículas)		
9. Temperatura		
10. Presencia de aditivos		

Cada partícula al incidir en la superficie genera un valor de erosión. Todos los impactos se suman y se almacenan en un campo de escalares con un valor para cada cara de la frontera seleccionada. Al generar varias plantillas de erosión y durante el

tiempo de ejecución, la posibilidad de que la erosión sea calculada por diferentes fórmulas en la misma simulación está habilitada (López et al., 2015).

En general, en este estudio se pudieron encontrar pequeñas discrepancias entre Fluent y OpenFoam; sin embargo, se puede decir que ambos resultados son básicamente equivalentes. El nivel de acuerdo entre las tendencias de las velocidades de las partículas y los ángulos de impacto en ambos paquetes de software es muy bueno. Se puede concluir determinando que las condiciones de la simulación CFD se acercan lo suficiente a las del problema real.

3.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

3.5.1 NORMAS DE DISEÑO PARA LAS TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

Adiansyah et al., (2015) plantea que el concepto de gestión de relaves del DITR (Departamento de Industria, Turismo y Recursos de Australia) proporciona una visión general estructurada de los pasos para desarrollar un sistema conceptual de gestión de relave comienza por definir los parámetros operativos. Se trata de dos tipos de datos: técnicos y no técnicos. Los datos técnicos necesarios incluyen la topografía, la hidrología, la zona de captación, las precipitaciones, la evaporación, el volumen y las características de los relaves y los datos sísmicos. Los datos no técnicos incluyen la normativa y las preocupaciones de la comunidad. Una vez definidos todos los parámetros de operación, los sitios de almacenamiento de relaves deben determinarse teniendo en cuenta factores como la rehabilitación del sitio y la potencia de los impactos ambientales. La determinación de los lugares de almacenamiento de residuos irá seguida del cálculo del balance hídrico del emplazamiento.

Durante esta etapa, se evaluarán los impactos de las diferentes opciones de almacenamiento de relaves y métodos de eliminación, utilizando como variables

principales el suministro de agua y las precipitaciones. La siguiente etapa del concepto de gestión de relaves comprende la recogida de datos e información, evaluación y análisis, planificación, acción, seguimiento y revisión. El último paso se denomina evaluación final. Este paso combina todos los resultados de los pasos anteriores y genera la opción más preferida utilizando un análisis de clasificación para el transporte y almacenamiento de relaves. Además, el DITR señala que los parámetros no numéricos, como las preocupaciones de la comunidad, también deben considerarse durante esta etapa final (Adiansyah et al., 2015).

El sistema de transporte de relaves cuenta con un sistema de acogida a través de una cámara de recepción. Esta recibe y prepara los materiales de relave de manera uniforme, en concentración y distribución granulométrica, a través de una cámara aquietadora que atenúa las velocidades y presiones previas, de modo que garantice que el material de residuos conserve sus propiedades y su caudal de flujo sea constante. Esta cámara se entrega al sistema de transporte. Finalmente, la cámara de contingencia recibe los residuos en caso de ser necesario si las cámaras anteriores no funcionan correctamente.

Las tuberías por donde el relave es transportado suelen ser de metal o poliméricas. Es importante evaluar la resistencia mecánica donde fluyen los materiales del relave a través del espesor de pared; en cuanto a la resistencia abrasiva y corrosiva se determina por medio del PH del flujo, el tamaño de las partículas y la velocidad de flujo (*B31.11 - Slurry Transportation Piping Systems - ASME, s. f.*). Según la norma ASME B31.11 para sistemas de transporte de relaves, para determinar el espesor nominal de pared para una tubería recta, según la ecuación debe al menos e_n de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$e_n = e + A' \quad (5)$$

Donde:

e corresponde al espesor de pared calculado en función de la presión interna de diseño y las propiedades mecánicas de la pulpa de la tubería.

A' Se denomina a la suma de tolerancias por erosión, corrosión y ranurado.

Para calcular e se aplica la siguiente ecuación:

$$e = \frac{p_i \times D_0}{s \times S} \quad (6)$$

Donde:

p_i = Presión interna de la tubería (en MPa).

D_0 = Diámetro exterior de la tubería (en mm).

S = Esfuerzo aplicado admisible, de la ecuación 7 (en MPa).

$$S = 0.8 \times E' \times SMYS \quad (7)$$

Donde:

E' = Factor de junta soldada.

$SMYS$ = Esfuerzo específico mínimo de fluencia (en MPa).

La selección del material de tubería depende grandemente del tipo de material a transportar. En el caso del relave de minería, el sistema de tubería transporta material corrosivo por lo que este tipo de tubería es revestida en su interior por material cerámico o polimérico. Entre los materiales más usados para relaves mineros se encuentra el acero al carbono y el HDPE (*M55 PE Pipe - Design and Installation, Second Edition*, s. f.). La tabla 2 explicita este tipo de materiales sus propiedades y normas.

Tabla 2. Propiedades y normas del acero al carbono y el HDPE para tuberías.

Material	Norma	Propiedades
Acero al carbono	ASME B31.3 – B31.4	Recomendado en rutas pequeñas de relave.
Acero revestido con caucho	ASME B31.3	Usado para relaves corrosivos.
HDPE	AWWA M55	Relaves a bajas presiones.

Además de la tubería, los accesorios que permiten el curso y flujo del transporte de relaves se presentan en la siguiente tabla 3.

Tabla 3. Accesorios más comunes para un sistema de tuberías.

Accesorio	Aplicación	Tipo
Codo	Cambiar la dirección de flujo.	Radio largo y corto. De inglete. Ángulos de 11°, 22°, 30°, 45°, 90°.
Tes ²	Difusión perpendicular.	Reductor y recta.
Reducciones	Disminuir el diámetro de la tubería.	Concéntrico y excéntrico.
Uniones	Unir dos tuberías.	Universal, cople y niple.

Dependiendo de los requerimientos del sistema, se tienen tres tipos de uniones para acoplar las tuberías entre sí o con un accesorio; estas pueden ser bridadas, roscadas por acoplamiento o soldadas. En tuberías de tipo HDPE se aplica la unión por termofusión, que consiste en calentar a temperatura de fusión las superficies de las partes a juntar y unir las a presión sin el uso de algún otro elemento para unir las. Este procedimiento es más económico y permanente que otras técnicas. La tecnología de soldadura a tope puede ser un método excelente para realizar uniones robustas si las condiciones del proceso se diseñan con criterio (Lee et al., 2012). Este método se usa en tuberías de acero al carbono. Otro accesorio importante son las válvulas, estas pueden ser de tipo cuchilla y pellizco; esta última es útil en materiales corrosivos y abrasivos. Y ambas funcionan para regular el control del flujo del transporte de relave. En este sentido, es importante utilizar estaciones de choque para disipar la presión debido a la gravedad.

Un método alternativo consta de análisis de laboratorio, evaluación computacional, análisis de costes, revisión de la normativa y proceso de toma de decisiones. Todos estos elementos se combinan en marcos basados en la sostenibilidad. De acuerdo con este enfoque el trabajo de laboratorio desempeña un papel importante como proveedor de datos para los demás pasos. Los datos producidos por las pruebas de

laboratorio incluyen las características de los relaves, la reología y la energía de bombeo. Los datos de las características de los relaves darán una visión general de los componentes del interior de los relaves y esta información es importante para averiguar cómo manejar los relaves de la mina de forma eficaz (Jones & Boger, 2012).

3.5.2 MÉTODOS DE MINIMIZACIÓN DEL DESGASTE POR EROSIÓN DE TUBERÍAS DE DESCARGA DE RELAVES EN MINAS DE COBRE

En el proceso de transporte de relaves, según Gao et al., (2020) hay que tener presente que cuanto mayor sea la distancia de transporte, mayor será la pérdida de resistencia de la tubería. Al aumentar la distancia, la presión tiende a descender constantemente debido a la interacción en el campo de flujo, la tasa de flujo de partículas fluctúa, especialmente en las curvas, lo que muestra que la fricción de erosión del flujo de partículas en estas áreas es más evidente. La pérdida de resistencia a lo largo del transporte de relave puede calcularse por la diferencia de la presión estándar. Los resultados de estos cálculos reflejan que la zona más erosionada se encuentra en la unión de la sección de curva y la sección recta aguas abajo.

El flujo secundario generado en el interior de la sección de curvatura hace que las partículas sólidas se muevan con más violencia. Se desplazan desde el exterior hacia el interior e impactan en la pared interior de la sección de curvatura. Cuanto más cerca del centro de erosión, más significativo es el aumento de la tasa de erosión. Debido a la reducción de la frecuencia de impacto del flujo de partículas en fase densa, la tasa de erosión disminuye gradualmente a lo largo de la línea de base de la tubería hasta desaparecer (Gao et al., 2020).

Dado que la velocidad es un factor importante, deben comprobarse las velocidades reales de funcionamiento. No todos los sólidos son igualmente abrasivos, en el caso de los sólidos de minerías de cobre de acuerdo con el número de Miller (abrasividad mineral) este tipo de relave no se considera potencialmente abrasivo. Sin embargo es necesario conocer el funcionamiento del proceso en cuanto a las condiciones de

presión, caudal, rango de control y exigencias de precisión, etc para un manejo óptimo del sistema (Nesbitt, 2007).

El dimensionamiento de las tuberías se lleva a cabo inicialmente mediante el uso de directrices para las velocidades de fluido aceptables. Si las aproximaciones indican tamaños de tuberías que se ajustan a los principales equipos del proceso, se realizan cálculos detallados de pérdidas de presión para poder finalizar el diseño del proceso. Si las pérdidas de presión son demasiado elevadas, hay que aumentar el tamaño de las tuberías. Si las pérdidas de presión son muy bajas, puede ser posible utilizar tuberías de menor tamaño si el aumento de la velocidad del fluido no crea otros problemas. El aumento de la velocidad del flujo en un 32% duplicará al menos la tasa de erosión. Las mayores velocidades de los fluidos exigen un mejor diseño de las tuberías y una mayor calidad de fabricación y montaje. El mínimo número de conexiones, bien alineadas, como los accesorios de conexión con abrazadera, preservarán los buenos patrones de flujo (Nesbitt, 2007).

Nesbitt, (2007) considera que las pérdidas de flujo en las tuberías se producen por el efecto de la fricción interna. Las tensiones de cizallamiento surgen en cuanto existen gradientes de velocidad. Las pérdidas de flujo son altas donde los gradientes de velocidad son grandes. Las pérdidas de caudal en las tuberías pueden evaluarse convirtiendo los accesorios y curvas en longitudes rectas equivalentes de tubería. Este tipo de datos está disponible en muchos manuales de los fabricantes de válvulas, compresores y bombas.

El transporte de fluidos con materias sólidas como el relave, provoca una abrasión perjudicial en los componentes de la bomba. La reducción de la velocidad de flujo tiene un efecto de disminución del desgaste. Las partículas sólidas que se introducen en los fluidos pueden destruir la bomba. Se recomienda que, si hay materias sólidas de varios milímetros de diámetro en el fluido y tienen que ser bombeadas, se utilice una bomba especial de flujo libre con un impulsor abierto. Los diámetros de las tuberías y la velocidad del flujo influyen mucho en el grado de daños y la duración de la vida útil de la bomba. Cuanto mayor sea el diámetro de la

tubería y menor sea la velocidad del flujo (velocidad), menor será el daño y mayor será la vida útil (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

Se pueden elaborar simulaciones numéricas de flujo (CFD) para el registro de la tensión erosiva de las superficies de los componentes, de este modo se puede modelar el transporte de partículas en el fluido. Mediante la simulación transitoria de las condiciones de flujo, se evalúan los lugares donde se produce la erosión del material en el impulsor. Mediante la integración de la interacción partícula-pared durante el tiempo de ejecución del cálculo CFD, se pueden determinar cualitativamente las tasas de erosión en cada punto de la superficie del componente. De este modo, es posible diagnosticar los lugares especialmente cargados de desgaste durante la disposición de la bomba, y tener en cuenta tanto el material de forma técnica como constructiva. Para examinar los procesos de deformación dúctil para la simulación del desgaste, se establecen redes de elementos finitos. Esto permite investigar la deformación que predomina en el material a nivel de microestructura. Estas redes están dotadas de condiciones de contorno realistas, que permiten calcular la deformación local cuando impactan las cargas externas. Se pueden extraer conclusiones sobre los potenciales para la optimización del material (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

Mediante la evaluación de los ángulos de impacto, la velocidad de impacto y las condiciones de flujo imperantes es posible identificar las imágenes de daño, que corresponden a los mecanismos de daño que surgen en la instalación de prueba. Los exámenes mostraron que el desgaste depende principalmente del tipo de erosión de los parámetros de influencia: la velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y la ductilidad del material. Las imágenes de los daños en los componentes individuales son casi congruentes con los resultados de la simulación de flujo. Las simulaciones muestran muy bien los datos. Los cursos de flujo en la bomba y en el sistema de tuberías pueden describirse bien (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

Por los medios abrasivos, las turbulencias del flujo en el impulsor de la bomba producen desgaste. Cuanto mayor sea la velocidad del flujo, mayor será el desgaste

o la erosión del material. Los lugares con una mayor velocidad de flujo muestran los signos más fuertes de desgaste (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition*, s. f.). La simulación de desgaste es, por tanto, una buena oportunidad para predeterminar los daños que se esperan, por un desgaste abrasivo.

Dado que existe una relación directa entre la velocidad, el desgaste y el nivel de ruido, es necesario reducir la velocidad de flujo del fluido en el sistema de bombeo para la optimización del proceso. A su vez, son adecuados los usos de diferentes sistemas de recubrimiento de protección anticorrosiva como capas protectoras contra la corrosión. Recubrimientos orgánicos, inorgánicos o no metálicos difusivos. Sin embargo, antes de aplicar la capa respectiva, se requiere un tratamiento previo. La gama de frecuencias es suficiente desde la limpieza mecánica hasta los procesos térmicos (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition*, s. f.).

La erosión, la abrasión, el desgaste por adherencia, el frotamiento y la fricción crean una pérdida física de metal no sólo por la velocidad de los patrones de flujo de las partículas y el ángulo de incidencia, la rugosidad de la superficie, el desgaste por fricción, el tiempo y la temperatura, etc., sino también por una combinación de fuerzas de corrosión y fricción física (Eun, 2020).

Para Eun, (2020) la erosión generalmente se controla o minimiza mediante la reducción de la velocidad del fluido, la selección de materiales o los revestimientos de los mismos y la alteración del ángulo de contacto (evitando ángulos u obstrucciones en la corriente de flujo que puedan dar lugar a un flujo turbulento). Como medidas para la prevención de la erosión se pueden usar materiales de recargue como la soldadura por fusión, metalización o pulverización térmica.

Las capas de protección contra la corrosión pueden ser orgánicas, estas se aplican sobre la superficie metálica, sustancias de recubrimiento hechas de pigmentos, materiales sintéticos o sustancias bituminosas. Las capas inorgánicas, se aplican sobre la superficie metálica sustancias de recubrimiento similares a la pintura (por ejemplo, silicato de zinc y etilo), material de relleno y aglutinante a base de silicato de etilo o álcali. Recubrimientos cerámicos mediante pulverización térmica, se

aplican sobre la superficie del metal. Recubrimientos de óxido producidos térmicamente, por oxidación del acero en aire caliente o en fusión salina, surgen recubrimientos de óxido finos y azules. En los recubrimientos no metálicos difusos las capas protectoras de nitruración se producen mediante la incineración del metal en sustancias químicas que dan nitrógeno. Las capas de boro se producen con sustancias que dan boro (en forma de polvo, granulado o pasta). Se puede considerar siempre que los requisitos de resistencia lo permitan, la versión más segura para evitar la corrosión es utilizar bombas o piezas de bombas fabricadas con materiales sintéticos/plásticos (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

La resistencia a la corrosión del acero inoxidable viene determinada por el tipo de acero y el medio que entra en contacto con la superficie. El estado de la superficie desempeña un papel importante. Sin tratar, afilada o pulida, la resistencia a la corrosión puede mejorar. En principio, la capa pasiva que se forma de forma natural protege al acero de la corrosión. El cromo del acero, cuanto mayor sea el contenido de cromo, mayor será la resistencia a la corrosión. Cuanto más sofisticada es la superficie, más resistentes son las capas pasivas contra la destrucción o, si es necesario, se puede poner además un marco de acero inoxidable alrededor de la carcasa de la bomba (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

En todos los casos, el análisis del desgaste debe comenzar con la comprobación de los datos de la bomba, utilizando el certificado de finalización. Muchos daños ya están identificados en el esquema del sistema, por lo que se debe tener en cuenta este esquema. Si aquí no se reconocen errores, el siguiente paso es la investigación de daños con la interpretación de la imagen de daños. El examen de la imagen de los daños, realizado mediante una documentación con fotos/imágenes y bocetos, facilita mucho el trabajo. Es aconsejable llevar a cabo un examen de daños que tome en cuenta la descripción, el estudio de referencia, e hipótesis de los daños.

La descripción de la imagen de los daños debe realizarse, en efecto, mediante una documentación con la ayuda de la fotografía, los contornos, los datos numéricos y las mediciones en caso de ser factible. Deben registrarse e inspeccionarse los

componentes dañados. Las dimensiones, los detalles técnicos constructivos y de producción, así como los datos de instalación y detalles específicos (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

Si el daño por la abrasión es considerable y las razones no son muy plausibles de comprender, se recomienda realizar un análisis de flujo, mediante simulaciones numéricas de flujo, utilizando CFD (Computational Fluid Dynamics). Se debe disponer de tantos parámetros como sea posible y de información sobre las condiciones de contorno. Especialmente sobre el medio de entrega (fluido) deben conocerse los siguientes parámetros: viscosidad, cuota de sólidos, temperatura, caudal, presión de entrega, velocidad de flujo y, posiblemente, el factor de pH. (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*) En estas zonas, donde se produce un gran desgaste y erosión del material, se pueden verificar y comparar los resultados de la simulación con los daños reales, para decidir dónde y en qué componentes trabajar.

El análisis de las lecturas de la bomba y del nivel de ruido proporciona importantes conocimientos sobre el flujo del proceso y el estado de funcionamiento de la bomba. Parámetros como la presión, la temperatura, la velocidad, etc., pueden medirse con medidores móviles. Las fuertes fluctuaciones de los parámetros del sistema pueden ser comandadas por la monitorización y el control (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*). Efectuando un trabajo cuidadoso, realizado con precaución y sustitución de componentes, se pueden ahorrar costes directos.

Mediante un software especial de mantenimiento, se pueden indicar informaciones y sugerencias, como las medidas de mantenimiento hasta el suministro de piezas de repuesto. La supervisión, junto con la documentación de todas las medidas de mantenimiento, hace posible un funcionamiento casi sin problemas de los sistemas. Para el cálculo de la rentabilidad, el esfuerzo y los costes deben compararse con los costes por pérdida de producción y los daños resultantes. Dado que estos sistemas también registran las tendencias y las causas con respecto al futuro para evitar daños, a menudo el esfuerzo tecnológico está obviamente justificado (*Damages on Pumps and Systems - 1st Edition, s. f.*).

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

La erosión causada por el flujo multifásico de partículas-líquido es un fenómeno complicado de entender; además, es compleja la simulación del flujo multifásico y los experimentos para analizarlo. Sin embargo, la evolución de la dinámica de fluidos computacional (CFD) resulta muy útil para simular dicho flujo. Los modelos Multifase en CFD se basan generalmente en el enfoque de Euler-Lagrange. Partículas (generalmente arena) dispersas en el flujo golpean la pared objetivo y eliminan material de la pared, ver Ilustración 12 (Kannojiya et al., 2016).

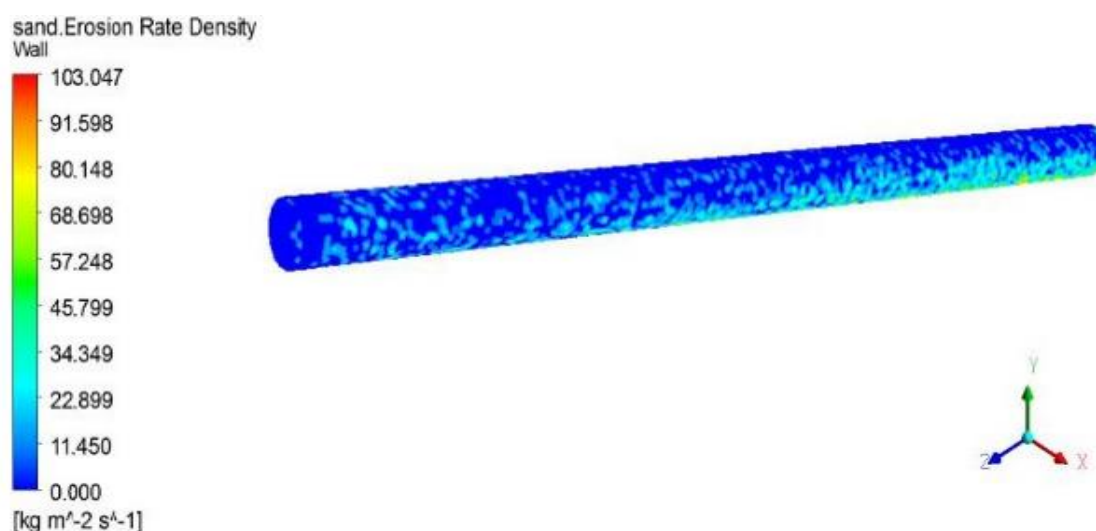


Ilustración 12. Simulación del flujo multifásico.

Fuente: (Kannojiya et al., 2016).

La erosión de una superficie por partículas abrasivas en un fluido inerte debe depender del número de partículas que golpean la superficie, su velocidad y su dirección relativa a la superficie. Estas cantidades están determinadas en gran medida por las condiciones de flujo y se pueden encontrar muchos ejemplos prácticos donde un cambio en las condiciones de flujo ha aumentado o disminuido considerablemente la erosión, ver Ilustración 13 (Finnie, 1960).

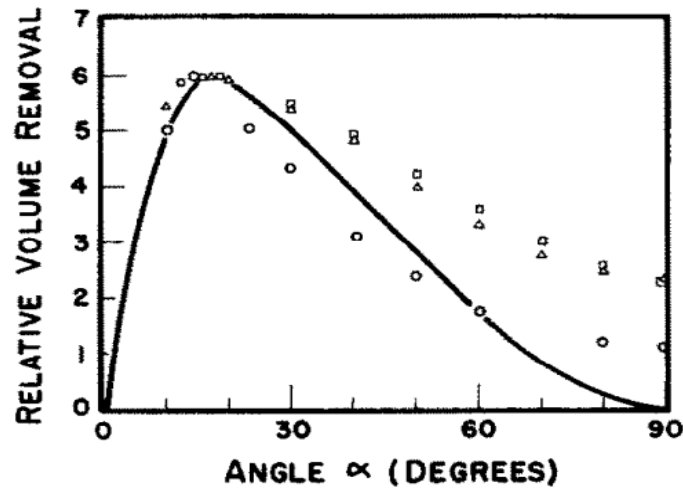


Ilustración 13. Variación predictiva del volumen removido con ángulo para un solo grano abrasivo.

Fuente: (Finnie, 1960).

Un aumento en la relación r/D por encima de 1,5 puede causar interacciones altas entre partículas, lo que da como resultado la recirculación del flujo. Una mayor recirculación del caudal provoca una acción de fuerza sobre las partículas y las dirige hacia la pared de la tubería, lo que provoca un mayor desgaste por erosión, como se muestra en la Ilustración 14 (Singh & Singh, 2021a).

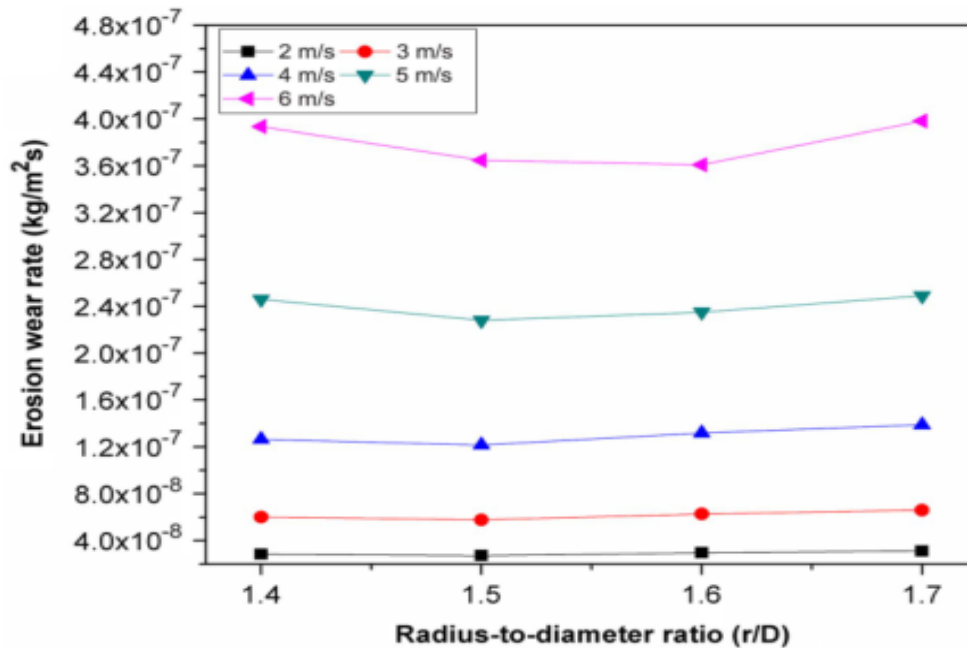


Ilustración 14. Efecto de la relación radio-diámetro en el desgaste por erosión. Fuente: (Singh & Singh, 2021a).

4.1 HIPÓTESIS

4.1.1 HIPÓTESIS GENERAL

Es posible mejorar, de forma significativa, el diseño del sistema de transporte de relave mediante el análisis de los puntos críticos de la tubería de descarga con una simulación computacional para la planta minera de cobre de la empresa ECSA en la Provincia de Zamora Chinchipe.

4.1.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Se puede caracterizar el relave por transportar mediante estudios de laboratorio para la determinación de sus propiedades físicas.
- Se pueden describir las condiciones operacionales del sistema de transporte de relave mediante la revisión de las especificaciones técnicas de fábrica para la identificación de los parámetros de trabajo.
- Se puede analizar el diseño actual de la tubería asociada al sistema de transporte de relave mediante los planos isométricos para la identificación del trayecto de la línea base de construcción.
- Se puede determinar el desgaste por erosión de la tubería de descarga mediante simulación computacional con Ansys CFX para el análisis de los puntos críticos del sistema de transporte de relave.
- Se puede establecer una propuesta de criterios de diseño para el sistema de transporte de relave a través de especificaciones técnicas adaptadas que minimicen el desgaste por erosión de la tubería de descarga.

4.2 MARCO METODOLÓGICO

En el presente estudio, se analiza un fenómeno de erosión de partículas sólidas para un relave de agua-cenizas en una tubería doblada utilizando CFD CFX versión 6.3. Para el desgaste por erosión se usa el modelo de Euler-Lagrange aplicado con un esquema de turbulencia de k-ε estándar y resolviendo el modelo de fase discreta (DPM) de desgaste por erosión en el codo de la tubería. Se realizaron simulaciones

numéricas de varios parámetros de influyentes para el diseño, como la relación r/D , diámetro de tubería (D), ángulo de la curvatura y desviación del radio de la curvatura. A continuación, en la Ilustración 15, 16 y 17 se detallan los resultados de esta investigación. (Singh & Singh, 2021b).

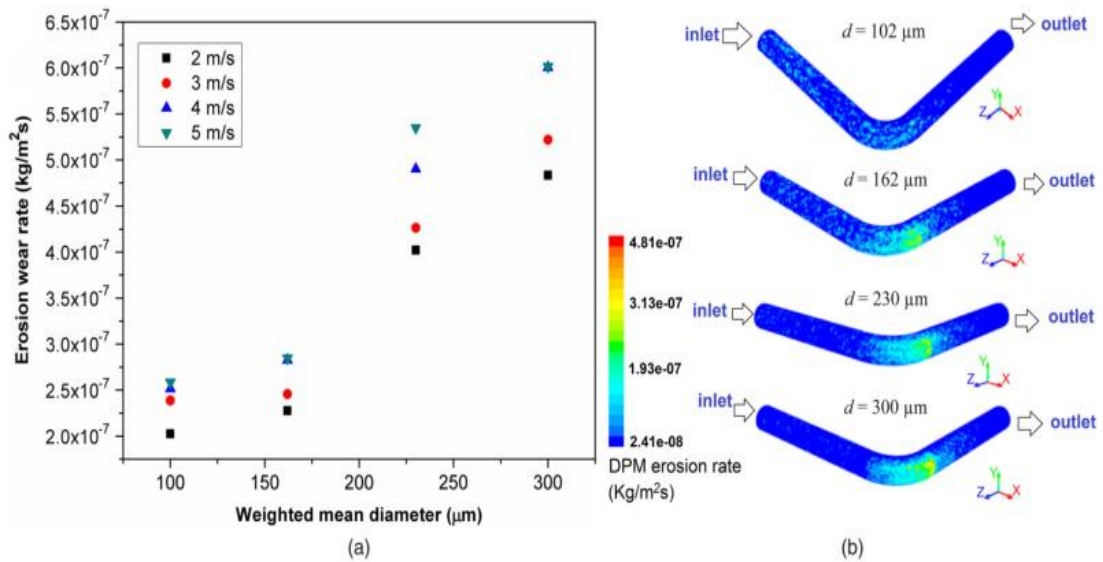


Ilustración 15. Efecto del diámetro de partículas en el desgaste por erosión en un codo de 90° .

Fuente: (Singh & Singh, 2021b, p. 202).

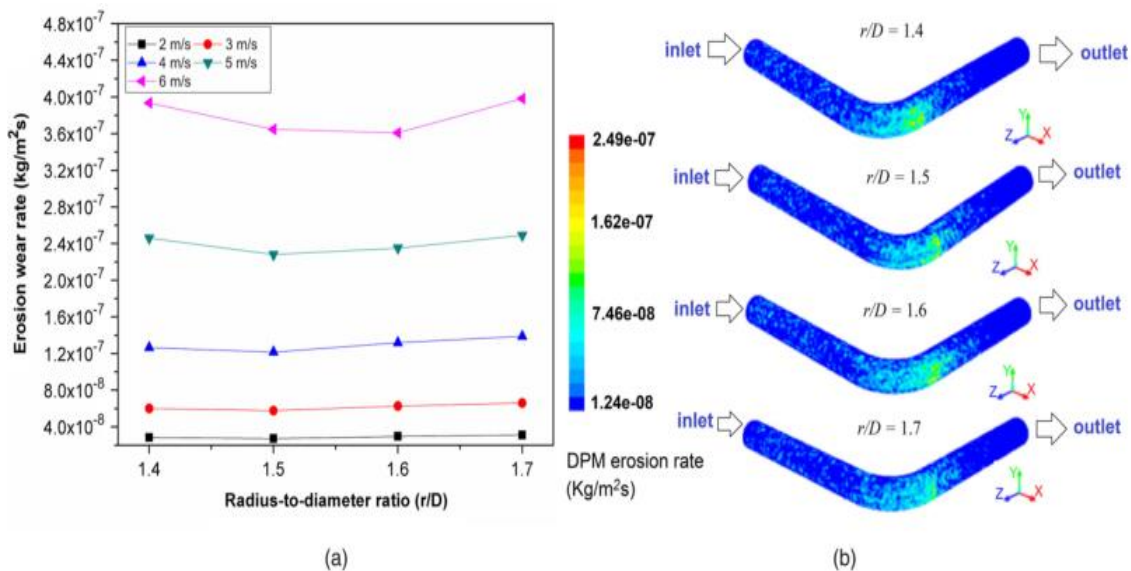


Ilustración 16. Efecto de la relación r/D del desgaste por erosión en un codo 90° .

Fuente: (Singh & Singh, 2021b, p. 202).

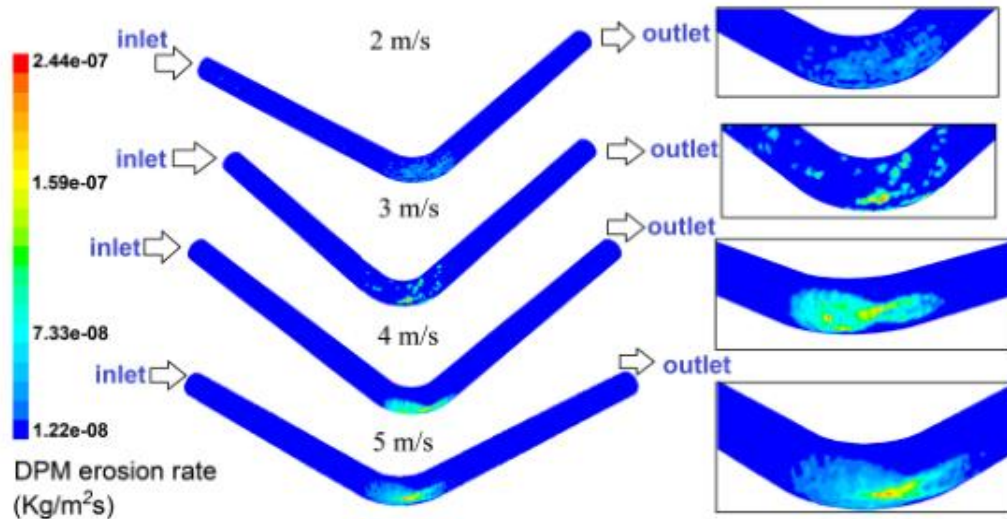


Ilustración 17. Erosión en un codo de 90° con variaciones de velocidades.

Fuente: (Singh & Singh, 2021b, p. 202).

También, existen trabajos donde se analiza que la erosión tiene lugar en áreas donde el fluido no llena la tubería, debido a que existe una mayor velocidad de flujo, así como a la posible cavitación en el punto donde la tubería cambia de flujo lento a una condición de flujo lleno. Esta falta de fluido ocurre cuando un fluido se bombea hacia arriba y hacia abajo sobre un terreno montañoso, ver Ilustración 18 (Lakzian & Ghanizadeh, 2016).

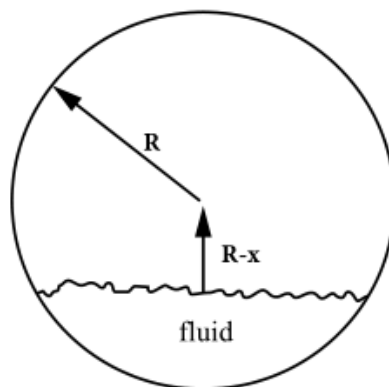


Ilustración 18. Falta de fluido en una tubería.

Fuente: (Lakzian & Ghanizadeh, 2016).

Se han desarrollado varios estudios experimentales validados utilizando la ecuación de Karabelas modificadas, que relaciona la tasa de erosión con la presión. Con esto

se demuestra que la erosión en las paredes de la tubería se intensifica en los puntos con curvaturas. Se debe tener esto presente, pese a que el impacto de las partículas del fluido con las paredes ocurre en todos los radios de las curvaturas (Lakzian & Ghanizadeh, 2016).

Usando las tablas 4 y 5 y para determinar la relación de entre la erosión y la presión se ajusta mediante una línea que se ajusta mejor con los datos obtenidos como se muestra en la Ilustración 19.

Tabla 4. Espesor de la pared de la tubería en diferentes puntos con ultrasonido.

	12 en punto	3 en punto	6 en punto	9 en punto
Punto 1	12.10	12.32	11.75	11.76
Punto 2	12.68	12.47	11.81	12.55
Punto 3	12.33	12.45	12.32	12.53
Punto 4	12.40	12.35	12.00	12.38
Punto 5	12.40	12.54	12.36	12.55
Punto 6	12.39	12.54	12.26	12.54
Punto 7	12.44	12.39	11.94	12.50

Tabla 5. Datos de presión en la tubería.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
Elevación	453	440	340	170	72	40	30
Presión	6510357.4	632352	4886361	2443180.5	1034758.8	574866	431149.5
$\ln(P)$	5	6	6	7	5	8	1

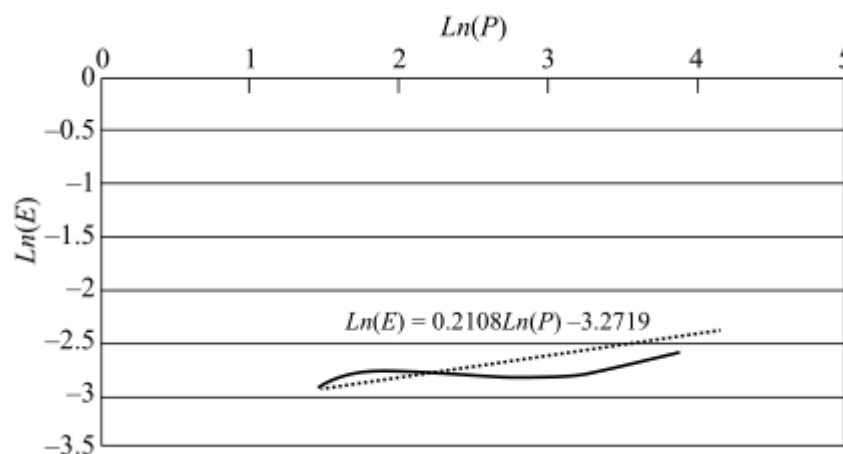


Ilustración 19. Erosión dependiendo de la presión a las 12.

Ecuaciones de Karabela modificadas en diferentes puntos:

$$E = 3.357 * d^{2.15} * U^{3.7} * P^{0.2108}$$

$$E = 2.763 * d^{2.15} * U^{3.7} * P^{0.1780}$$

$$E = 7.967 * d^{2.15} * U^{3.7} * P^{0.10739}$$

$$E = 1.467 * d^{2.15} * U^{3.7} * P^{0.3946}$$

Con los anteriores análisis se concluyó que la erosión de las tuberías depende de numerosos factores; algunos de estos tienen un efecto considerable sobre la erosión, lo que debe tenerse en cuenta en el diseño de las tuberías. En un estudio de Lakzian & Ghanizadeh se investigó el efecto de la presión sobre la erosión. Al comparar la tasa prevista de erosión de tuberías por la fórmula de Karabelas y los resultados de las pruebas de campo, se encuentra que la tasa de desgaste por erosión tiene una relación directa con la presión. Usando esta metodología de la ecuación de Karabelas modificada se obtiene como resultado que la seguridad de la tubería se ha mejorado. (Lakzian & Ghanizadeh, 2016).

Es posible desarrollar un análisis de criticidad del sistema de tuberías considerando el factor de flexibilidad, k , y el factor de intensificación de la tensión, i . De acuerdo con la norma ASME B31.11:2002, para los accesorios y las curvas a inglete (45°) de las tuberías, los factores de flexibilidad k y los factores de intensificación de esfuerzos i de la tabla se aplican a la flexión en cualquier plano y no serán inferiores a la unidad (< 1); y, los factores para la torsión son iguales a la unidad. Ambos factores se aplican sobre la longitud de arco efectiva (mostrada por las líneas centrales gruesas en los bocetos de la Tabla 6) para los codos curvos e ingletes, y al punto de intersección para las T's de las tuberías (Kannojiya et al., 2018).

Los valores de k e i pueden leerse directamente en la Ilustración 20 introduciendo con la característica h calculada a partir de las ecuaciones dadas, donde:

R es el radio de la curva del tubo o de la curvatura del codo de soldadura (en mm).

r es el radio medio de la tubería coincidente (en mm).

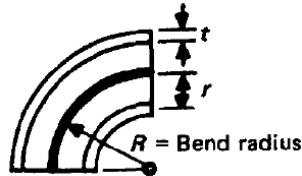
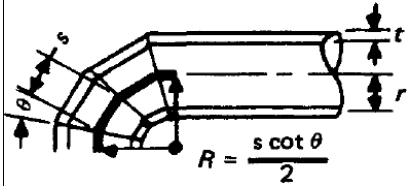
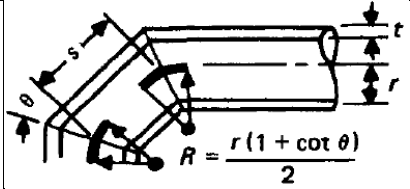
s es la separación de los ingletes y la línea central (en mm).

t es el espesor nominal de la pared de: la propia pieza, para los codos y curvas o codos a inglete; la tubería coincidente, para las t's de soldadura; el tramo o

cabecera, para las t's fabricadas (siempre que, si el espesor es mayor que el de la tubería coincidente, se mantenga un espesor mayor durante al menos un diámetro exterior (OD) del tramo a cada lado del OD del ramal).

ϑ es el ángulo medio entre ejes de inglete adyacentes (en grados sexagesimales).

- Tabla 6. Modelos de cálculo del factor de flexibilidad, k , y el factor de intensificación de la tensión, i .

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	Factor de intensificación de la tensión		Característica de flexibilidad (h)	Bosquejo
		En plano (ii)	Fuera de plano (io)		
<i>Codo de soldadura o del tubo</i>	$\frac{1,65}{h}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,75}{h^{2/3}}$	$\frac{t \cdot R}{r^2}$	
<i>Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$</i>	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,75}{h^{2/3}}$	$\frac{t \cdot s \cdot \cot \vartheta}{2 \cdot r^2}$	
<i>Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$</i>	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{0,75}{h^{2/3}}$	$\frac{t \cdot (1 + \cot \vartheta)}{2 \cdot r}$	

Fuente: ASME B31.11:2002.

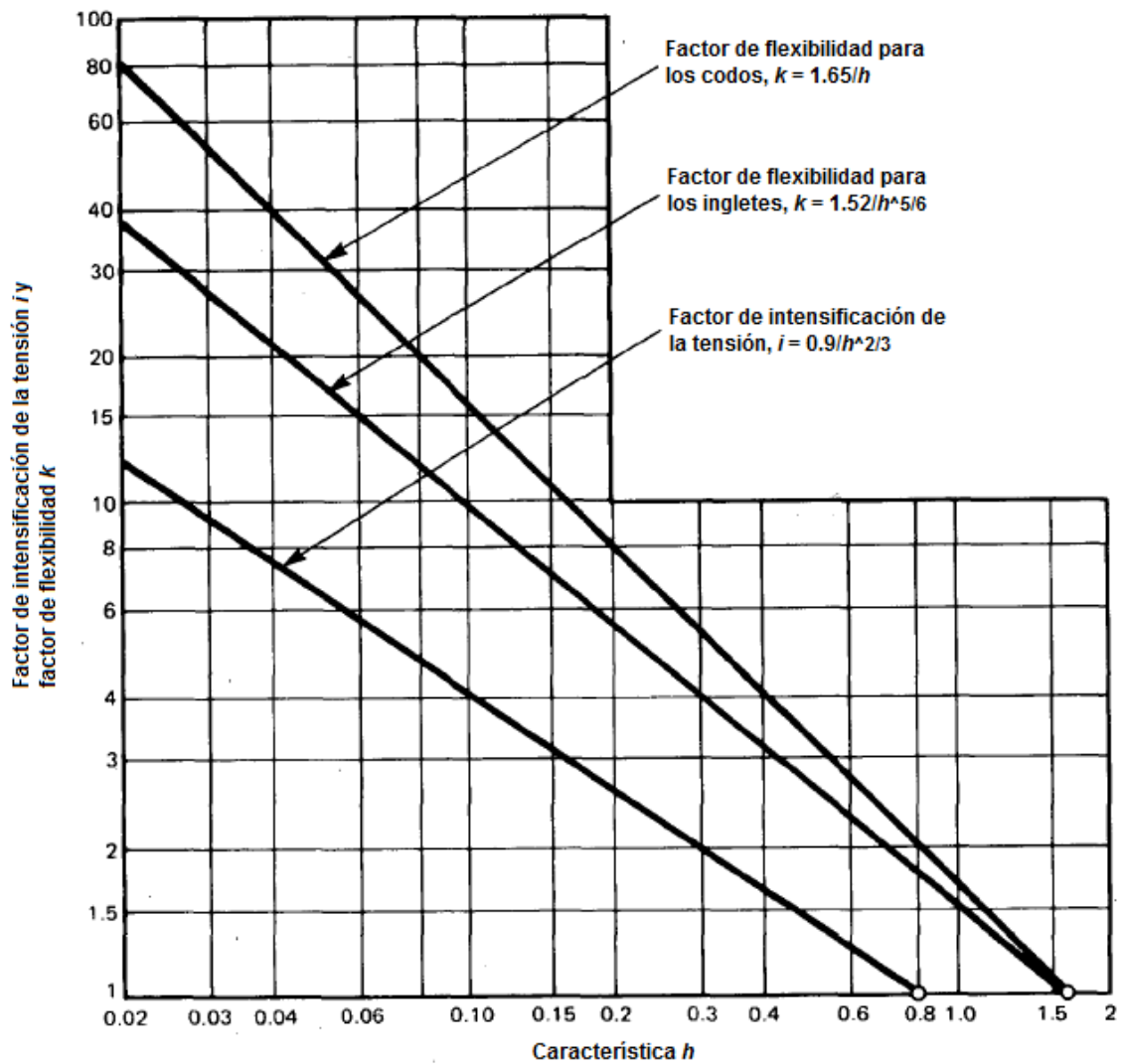


Ilustración 20. Característica de flexibilidad, h , según el factor de intensificación de la tensión i y factor de flexibilidad k .

Para determinar la prioridad del análisis de los tramos de las tuberías de transporte de relaves, se realizó una matriz de criticidad, de acuerdo con lo establecido en esta norma (ASME B31.11) considerando el factor de flexibilidad, k , y el factor de intensificación de la tensión, i . Para esto, se extraen las medidas de los tramos, clasificándolos según lo indicado en la norma.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la hipótesis específica 1: Se puede caracterizar el relave por transportar mediante estudios de laboratorio para la determinación de sus propiedades físicas. Con la colaboración del Centro Tecnológico de Tongling Nonferrous Metals Group Holdings Limited, se extrajeron datos de la granulometría de los relaves generados como parte del análisis de las propiedades físicas del compuesto.

La concentración de relaves transportados por el espesador de 100 metros es de entre 48 y 53%, y la composición granulométrica (del tamaño de las partículas) se muestra en la Tabla 7. Sobre las propiedades físicas de los relaves, según Gayana y Ram Chandar (2018), la caracterización del relave está constituida por la consistencia, plasticidad, textura, porosidad, granulometría, densidad real y aparente, aireación, fuerza de cohesión y adhesión expansión y contracción.

Tabla 7. Resultados del análisis granulométrico de relaves, en %.

Número de la granularidad/malla	Tasa de producción. <i>Retenido parcial, %.</i>	Tasa de producción acumulada. <i>Retenido acumulado, %.</i>
+60	1.31	-
-60+100	18.91	20.22
-100+160	15.55	35.77
-160+200	7.00	42.77
-200+325	9.79	52.56
-325	47.44	100.0
<i>Total</i>	<i>100.0</i>	

Fuente: (T. Anhui, comunicación personal, 27 de junio de 2022)

Las propiedades físicas de los residuos mineros, como la distribución del tamaño de las partículas, la gravedad específica, la densidad aparente y la tasa de absorción de agua, son suficientes para confirmar su capacidad de uso en materiales de construcción para reconocer los tipos de relave (Ally et al., 2021).

De acuerdo con los resultados obtenidos, para la posterior simulación del sistema de transporte, se utiliza mezcla de 55% de agua y entre 48 y 53% de composición del tamaño de las partículas del relave. Esta composición afecta la presión interna de los conductos por los que circulan los relaves. Para analizar este problema, Adiansyah et al (2016) en su artículo “Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management” realizan estudios de fluidez y un enfoque de modelización de sistemas como métodos.

Según la norma ASME B31.11 para sistemas de transporte de relaves, para determinar el espesor nominal de pared para una tubería recta, se considera el espesor de pared calculado en función de la presión interna de diseño y las propiedades mecánicas de la pulpa de la tubería y las tolerancias por erosión, corrosión y ranurado. Además, si se hacen juntas adicionales en las tuberías, se toma como datos de análisis los factores de junta de la soldadura y el esfuerzo específico mínimo de fluencia. La selección del material de tubería depende del tipo de relave (*B31.11 - Slurry Transportation Piping Systems - ASME, s. f.*).

Para la hipótesis específica 2: Se pueden describir las condiciones operacionales del sistema de transporte de relave mediante la revisión de las especificaciones técnicas de fábrica para la identificación de los parámetros de trabajo. Asimismo, con la colaboración del Centro Tecnológico de Tongling Nonferrous Metals Group Holdings Limited, se revisaron las especificaciones técnicas de operación del sistema de transporte de relaves. Mientras el sistema opera en condiciones operacionales normales, los parámetros de trabajo que se presentan son un caudal de 1777 m³/h con una presión de trabajo de 1.72 Mpa. En la siguiente Ilustración 21 se ve una captura de pantalla del sistema SCADA.

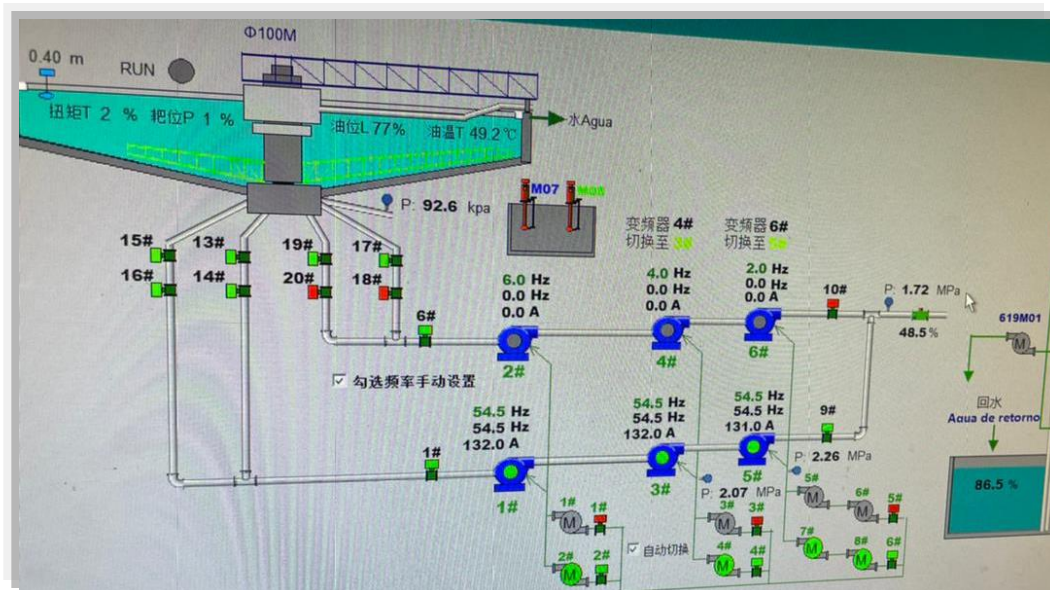


Ilustración 21. Condiciones operacionales del Sistema de Control Automático de la Planta del proyecto cuprífero Mirador.

Fuente: (T. Anhui, comunicación personal, 27 de junio de 2022).

Las especificaciones técnicas de fábrica de las partes del sistema de transporte de relaves exigen consideraciones específicas de diseño de las tuberías, para la inclinación de las tuberías y las curvaturas de las juntas. El sistema incluye un equipo de bombeo de los relaves para que circulen por las tuberías hasta la zona de embalse, donde los residuos se asientan por gravedad.

Todos los componentes del sistema de transporte de relaves del proyecto cuprífero Mirador se muestran en las siguientes ilustraciones 22, 23, 24, 25; además de los componentes del área de la molienda principal, según las especificaciones de fábrica en el momento de su emplazamiento y montaje. Esta información se usa para los controles de operación y la gestión de mantenimiento de las máquinas y equipos.

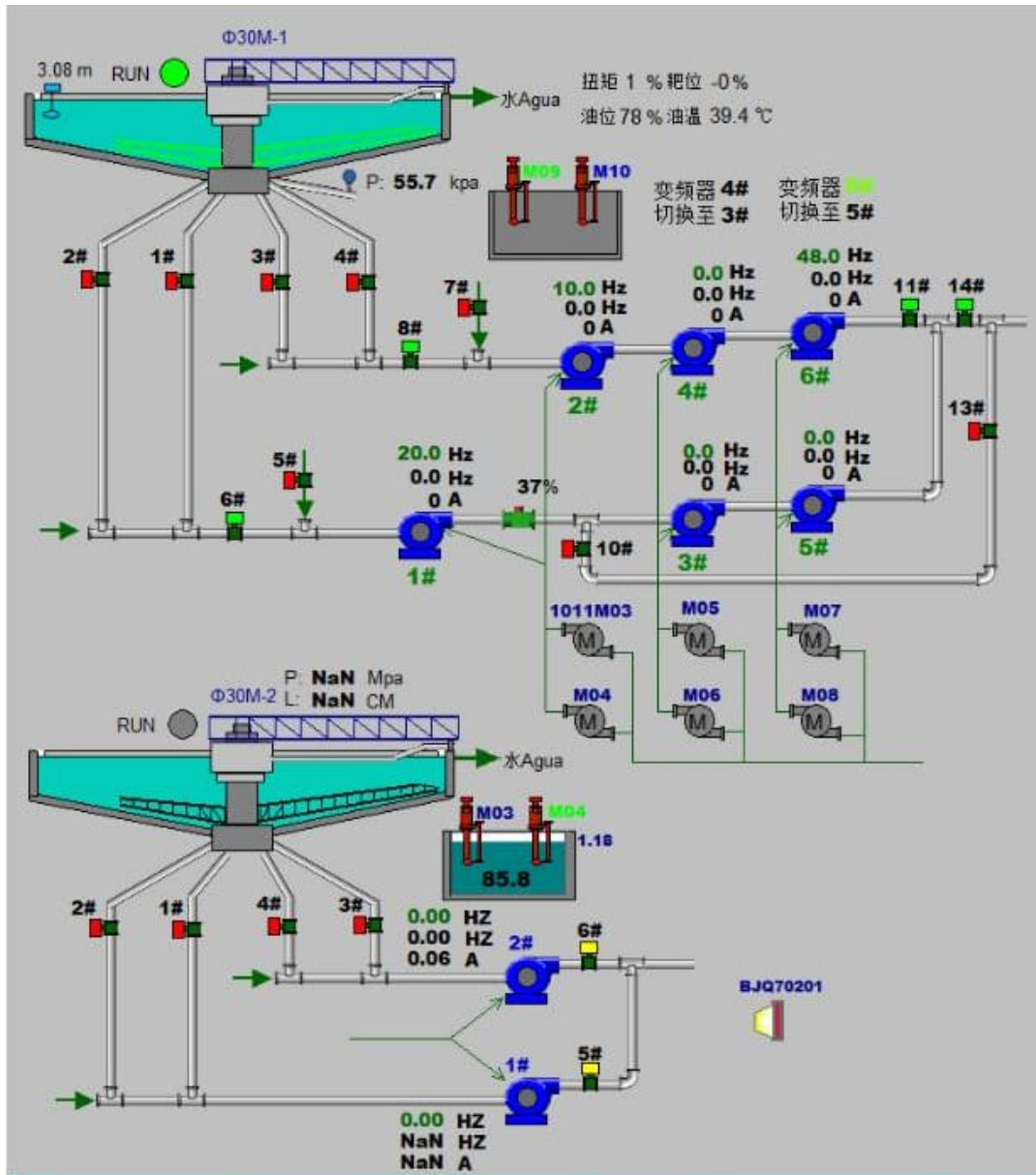


Ilustración 22. Componentes del Sistema de Control Automático de la Planta del proyecto cuprífero Mirador (parte 1/2).

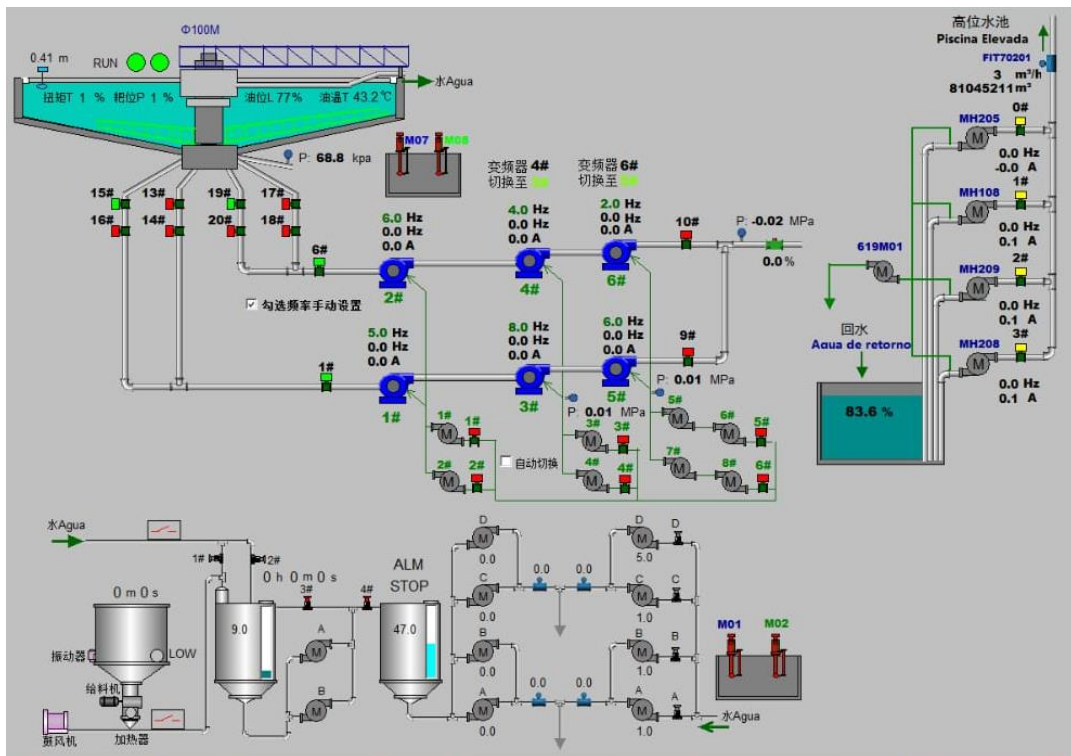


Ilustración 23. Componentes del Sistema de Control Automático de la Planta del proyecto cuprífero Mirador (parte 2/2).

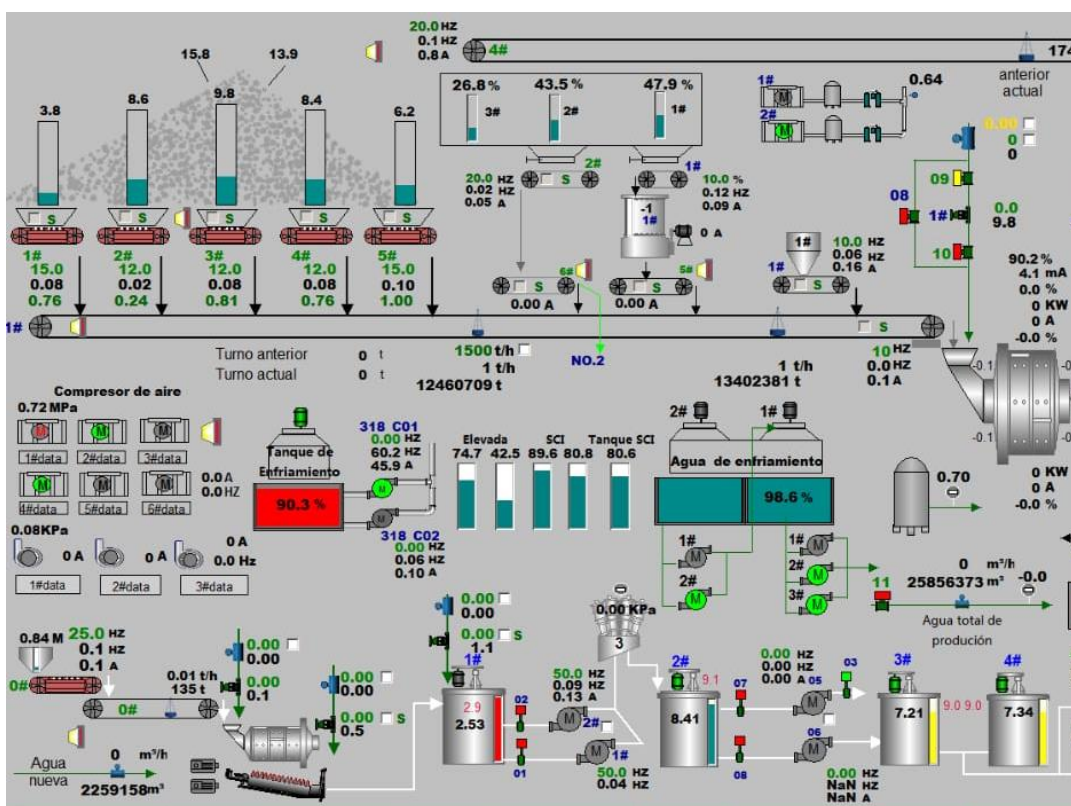


Ilustración 24. Componentes del Sistema de Control Automático de la molinera 1 de la Planta del proyecto cuprífero Mirador (parte 1/2).

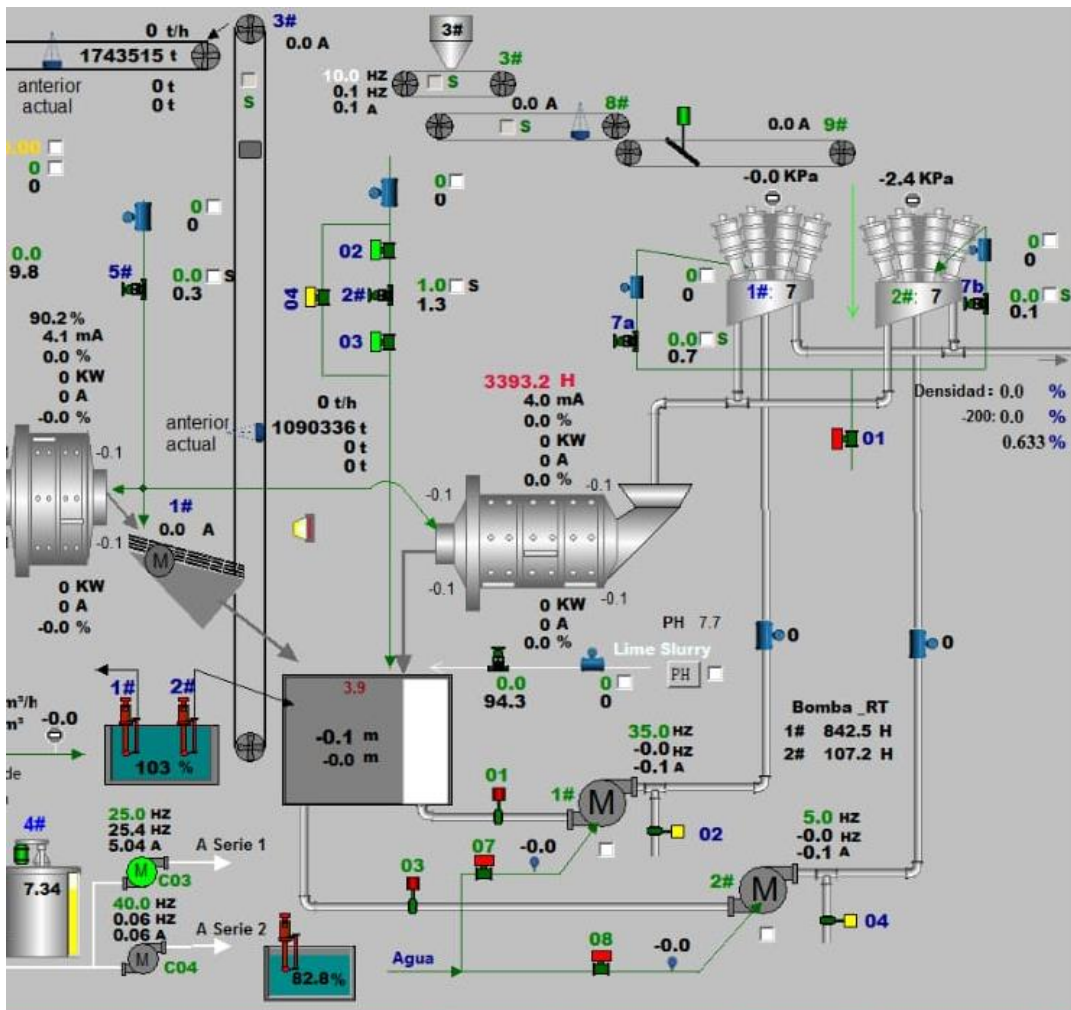


Ilustración 25. Componentes del Sistema de Control Automático de la molinera 1 de la Planta del proyecto cuprífero Mirador (parte 2/2).

Para la hipótesis específica 3: Se puede analizar el diseño actual de la tubería asociada al sistema de transporte de relave mediante la revisión de los planos isométricos para la identificación del trayecto de la línea base de construcción. Como parte del trabajo de investigación, se solicitaron los planos isométricos del diseño mecánico del sistema de transporte de relaves para hacer las modificaciones propuestas.

Para determinar la prioridad del análisis de los tramos de las tuberías se realizó una matriz de criticidad (ASME B31.11). Los resultados, con los respectivos cálculos, se muestran en la Tabla 8. Entendiéndose para los tipos de dobleces:

- Tipo 1: Codo de soldadura o del tubo

- Tipo 2: Curvatura de inglete estrechamente espaciada.
- Tipo 3: Curvatura de inglete ampliamente espaciada.

Tabla 8. Información de los tramos de las tuberías de descarga de relaves.

Descripción	Tipo de doblez	Factor de flexibilidad (k)	Factor de intensificación de la tensión		Característica de flexibilidad (h)	Datos requeridos:		Verificaciones:
			En plano (ii)	Fuera de plano (io)		t (mm)	r (mm)	
A plataforma (Tramo 1)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2210	0,1924	0,1604	10,1134	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 854,08
						r (mm)	810	
						S (mm)	3496,00	
						θ (deg)	3,115	
						R (mm)	32120,17	
A plataforma (Tramo 2)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2213	0,1927	0,1605	10,0972	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 861,46
						r (mm)	810	
						S (mm)	1555,00	
						θ (deg)	3,635	
						R (mm)	12238,70	
A (Tramo 1)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2218	0,1930	0,1608	10,0722	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 474,23
						r (mm)	405	
						S (mm)	2219,50	
						θ (deg)	9,70	
						R (mm)	6492,30	
A (Tramo 2)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	7,8755	3,3558	2,7965	0,1389	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 454,73
						r (mm)	405	
						S (mm)	559,45	
						θ (deg)	7,00	
						R (mm)	2278,18	
B	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2070	0,1826	0,1522	10,9431	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 410,30
						r (mm)	405	
						S (mm)	1126,00	
						θ (deg)	0,75	
						R (mm)	43007,58	
C (Tramo 1)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	124,1817	30,4799	25,3999	0,0051	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 451,88
						r (mm)	409,5550	
						S (mm)	17,5900	
						θ (deg)	5,90	
						R (mm)	85,11	
C (Tramo 2)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	86,1337	22,7461	18,9550	0,0079	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 437,48
						r (mm)	409,5550	
						S (mm)	18,0000	
						θ (deg)	3,90	
						R (mm)	132,02	
D	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2207	0,1922	0,1602	10,1306	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 443,28
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	1011,78	
						θ (deg)	5,40	
						R (mm)	5351,76	
E (Tramo 1)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	13,3910	5,1312	4,2760	0,0735	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 439,72
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	206,59	
						θ (deg)	4,90	
						R (mm)	1204,88	
E (Tramo 2)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	147,9118	35,0566	29,2138	0,0041	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 477,87
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	24,28	
						θ (deg)	10,20	
						R (mm)	67,47	
E (Tramo 3)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	62,0826	17,5043	14,5869	0,0117	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 435,00
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	32,64	
						θ (deg)	5,00	
						R (mm)	186,54	

Tabla 8. Información de los tramos de las tuberías de descarga de relaves
(continuación).

Descripción	Tipo de doblez	Factor de flexibilidad (k)	Factor de intensificación de la tensión		Característica de flexibilidad (h)	Datos requeridos:		Verificaciones:
			En plano (ii)	Fuera de plano (io)		t (mm)	r (mm)	
G	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	30,5630	9,9294	8,2745	0,0273	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 423,06
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	50,35	
						θ (deg)	3,30	
						R (mm)	436,61	
H MODIF 800	Codo de soldadura o del tubo	7,5167	2,4733	2,0611	0,2195	t (mm)	10	Tipo 1
						r (mm)	410	
						R (mm)	3690	
I MODIF DN800 (Tramo 1)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2217	0,1929	0,1607	10,0788	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 473,47
						r (mm)	410,00	
						S (mm)	673,73	
						θ (deg)	8,80	
						R (mm)	2176,02	
I MODIF DN800 (Tramo 2)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2157	0,1888	0,1573	10,4109	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 422,17
						r (mm)	410,00	
						S (mm)	8367,12	
						θ (deg)	1,70	
						R (mm)	140958,82	
Q (Tramo 1)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2213	0,1927	0,1606	10,0954	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 457,42
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	663,44	
						θ (deg)	7,38	
						R (mm)	2562,86	
Q (Tramo 2)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2215	0,1928	0,1606	10,0887	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 461,38
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	725,05	
						θ (deg)	7,93	
						R (mm)	2604,23	
Q (Tramo 3)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2215	0,1928	0,1607	10,0870	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 462,50
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	1008,78	
						θ (deg)	8,08	
						R (mm)	3552,92	
Q (Tramo 4)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2214	0,1927	0,1606	10,0907	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 460,12
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	571,71	
						θ (deg)	7,75	
						R (mm)	2100,42	
Q (Tramo 5)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2199	0,1916	0,1597	10,1766	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 433,32
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	964,44	
						θ (deg)	4,00	
						R (mm)	6896,07	
R (Tramo 1)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2196	0,1915	0,1595	10,1920	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 426,04
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	803,40	
						θ (deg)	3,73	
						R (mm)	6170,01	
R (Tramo 2)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2208	0,1923	0,1603	10,1239	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 440,35
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	587,40	
						θ (deg)	5,76	
						R (mm)	2911,64	
R (Tramo 3)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2196	0,1914	0,1595	10,1933	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 425,87
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	774,40	
						θ (deg)	3,70	
						R (mm)	5987,59	
R (Tramo 4)	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2160	0,1889	0,1574	10,3989	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 412,54
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	48795,40	
						θ (deg)	1,795	
						R (mm)	778511,35	

- Tabla 8. Información de los tramos de las tuberías de descarga de relaves (continuación).

Descripción	Tipo de doblez	Factor de flexibilidad (k)	Factor de intensificación de la tensión		Característica de flexibilidad (h)	Datos requeridos:		Verificaciones:
			En plano (ii)	Fuera de plano (io)		t (mm)	r (mm)	
S (Tramo 1)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	4,1237	1,9998	1,6665	0,3019	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 406,63
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	160,20	
						θ (deg)	0,95	
						R (mm)	4830,50	
S (Tramo 2)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	5,0765	2,3617	1,9681	0,2353	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 414,04
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	264,20	
						θ (deg)	2,01	
						R (mm)	3764,01	
S (Tramo 3)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	17,5787	6,3791	5,3159	0,0530	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 462,46
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	264,80	
						θ (deg)	8,88	
						R (mm)	847,91	
S (Tramo 4)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	13,7674	5,2462	4,3719	0,0711	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 443,10
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	245,00	
						θ (deg)	6,15	
						R (mm)	1136,87	
S (Tramo 5)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	16,6813	6,1172	5,0976	0,0564	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 466,94
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	302,20	
						θ (deg)	9,50	
						R (mm)	902,94	
S (Tramo 6)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	12,5313	4,8659	4,0549	0,0795	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 443,56
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	277,20	
						θ (deg)	6,22	
						R (mm)	1272,73	
S (Tramo 7)	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	12,8844	4,9753	4,1461	0,0769	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 442,11
						r (mm)	400,00	
						S (mm)	259,20	
						θ (deg)	6,01	
						R (mm)	1230,99	

A continuación, con el uso del software, por la reducida cantidad de datos agrupados por tipo de doblez, se determinaron sus medias aritméticas no ponderadas y los cuartiles para verificar aquellos puntos con los factores de flexibilidad y de intensificación de la tensión más reducidos. Estos valores, que se determinan a partir de la característica de flexibilidad de cada punto, permiten estimar la prioridad de análisis, identificándolos como más críticos cuanto más alejados estén del promedio (Chen et al., 2004). En el análisis estadístico el grupo Tipo 2 no se considera porque solo existe un dato de esta clase. Los resultados de las pruebas de normalidad, para los datos agrupados por tipo de doblez, fueron:

Shapiro-Wilk normality test:

data: Factor.de.flexibilidad..k.

W = 0.26367, p-value = 0.00000002215

data: FIT.en.plano..ii.

W = 0.26468, p-value = 0.0000000225

data: FIT.fuera.de.plano..io.

W = 0.26468, p-value = 0.0000000225

data: Característica.de.flexibilidad..h.

W = 0.32734, p-value = 0.00000006035

Dado que los datos no son normales no es necesario realizar pruebas de homocedasticidad y los límites de referencia serán la media y el tercer cuartil (puesto que la mediana típica estará por debajo de la media y se requiere un valor mayor para comparación). Los resultados agrupados por tipo de doblez de las medias y los cuartiles fueron los que se muestran en la siguiente tabla 9.

Tabla 9. Valores promedio y de tercer cuartil de los tramos de las tuberías por tipos de doblez.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (ii)	FIT fuera de plano (io)	Característica de flexibilidad (h)
<i>Promedio - Tipo 1</i>	7,5167	2,4733	2,0611	0,2195
<i>Cuartil 3 - Tipo 1</i>	7,5167	2,4733	2,0611	0,2195
<i>Promedio - Tipo 2</i>	42,0698	11,7533	9,7944	0,0772
<i>Cuartil 3 - Tipo 2</i>	62,0826	17,5043	14,5869	0,0769
<i>Promedio - Tipo 3</i>	0,6698	0,3775	0,3146	9,6136
<i>Cuartil 3 - Tipo 3</i>	0,2215	0,1928	0,1606	10,1920

Tomando como límites de referencia los valores de las medias y de los terceros cuartiles se identifican los tramos con valores menores a cada uno de estos límites. Se compilan los criterios y se obtienen los puntos críticos con mayor prioridad, desde nivel bajo según la media y bajo según el tercer cuartil, hasta el alto según la media y alto según el tercer cuartil. Los resultados se muestran en las siguientes tablas 10, 11 y 12. Entonces, se realizarán las simulaciones de las condiciones operativas de las tuberías de descarga de relaves de los puntos con prioridad de análisis alta-alta, media-alta y media-media.

Tabla 10. Prioridad de análisis en tramos de tuberías.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad por Media	Prioridad por Quartil 3
A plataforma (Tramo 1)	0,221	0,192	0,160	10,113	Tipo 3	Media	Alta
A plataforma (Tramo 2)	0,221	0,193	0,161	10,097	Tipo 3	Media	Alta
A (Tramo 1)	0,222	0,193	0,161	10,072	Tipo 3	Media	Baja
A (Tramo 2)	7,876	3,356	2,796	0,139	Tipo 3	Media	Baja
B	0,207	0,183	0,152	10,943	Tipo 3	Media	Media
C (Tramo 1)	124,182	30,480	25,400	0,005	Tipo 2	Baja	Baja
C (Tramo 2)	86,134	22,746	18,955	0,008	Tipo 2	Baja	Baja
D	0,221	0,192	0,160	10,131	Tipo 3	Media	Alta
E (Tramo 1)	13,391	5,131	4,276	0,073	Tipo 2	Media	Media
E (Tramo 2)	147,912	35,057	29,214	0,004	Tipo 2	Media	Media
E (Tramo 3)	62,083	17,504	14,587	0,012	Tipo 2	Media	Media
G	30,563	9,929	8,275	0,027	Tipo 2	Alta	Alta
H MODIF 800	7,517	2,473	2,061	0,220	Tipo 1	Baja	Baja
I MODIF DN800 (Tramo 1)	0,222	0,193	0,161	10,079	Tipo 3	Media	Media
I MODIF DN800 (Tramo 2)	0,216	0,189	0,157	10,411	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 1)	0,221	0,193	0,161	10,095	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 2)	0,221	0,193	0,161	10,089	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 3)	0,222	0,193	0,161	10,087	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 4)	0,221	0,193	0,161	10,091	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 5)	0,220	0,192	0,160	10,177	Tipo 3	Media	Media
R (Tramo 1)	0,220	0,191	0,160	10,192	Tipo 3	Media	Alta
R (Tramo 2)	0,221	0,192	0,160	10,124	Tipo 3	Media	Alta
R (Tramo 3)	0,220	0,191	0,160	10,193	Tipo 3	Media	Alta
R (Tramo 4)	0,216	0,189	0,157	10,399	Tipo 3	Media	Alta
S (Tramo 1)	4,124	2,000	1,667	0,302	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 2)	5,077	2,362	1,968	0,235	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 3)	17,579	6,379	5,316	0,053	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 4)	13,767	5,246	4,372	0,071	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 5)	16,681	6,117	5,098	0,056	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 6)	12,531	4,866	4,055	0,080	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 7)	12,884	4,975	4,146	0,077	Tipo 2	Alta	Alta

Tabla 11. Valores críticos de acuerdo con la media de cada tipo de doblez.

Descripción	Tipo	Factor de flexibilidad	FIT en plano (i)	FIT fuera de plano (i _o)	Característica de flexibilidad (h)
A plataforma (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
A plataforma (Tramo 2)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
A (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
A (Tramo 2)	Tipo 3	-	-	-	Crítico
B	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
C (Tramo 1)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
C (Tramo 2)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
D	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
E (Tramo 1)	Tipo 2	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
E (Tramo 2)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
E (Tramo 3)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
G	Tipo 2	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
H MODIF 800	Tipo 1	-	-	-	-
I MODIF DN800 (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
I MODIF DN800 (Tramo 2)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 2)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 3)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 4)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 5)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-

Tabla 12. Valores críticos de acuerdo con el tercer cuartil de cada tipo de doblez.

Descripción	Tipo	Factor de flexibilidad	FIT en plano (i)	FIT fuera de plano (i _o)	Característica de flexibilidad (h)
A plataforma (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
A plataforma (Tramo 2)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
A (Tramo 1)	Tipo 3	-	-	-	Crítico
A (Tramo 2)	Tipo 3	-	-	-	Crítico
B	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
C (Tramo 1)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
C (Tramo 2)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
D	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
E (Tramo 1)	Tipo 2	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
E (Tramo 2)	Tipo 2	-	-	-	Crítico
E (Tramo 3)	Tipo 2	Crítico	Crítico	-	Crítico
G	Tipo 2	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
H MODIF 800	Tipo 1	-	-	-	-
I MODIF DN800 (Tramo 1)	Tipo 3	-	-	-	Crítico
I MODIF DN800 (Tramo 2)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	-
Q (Tramo 1)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
Q (Tramo 2)	Tipo 3	-	-	Crítico	Crítico
Q (Tramo 3)	Tipo 3	-	-	-	Crítico
Q (Tramo 4)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
Q (Tramo 5)	Tipo 3	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico

En la ilustración 26 se muestra una vista panorámica de las instalaciones del proyecto cuprífero Mirador, incluidos los tramos que se componen de las tuberías. En las siguientes ilustraciones de la 27 a la 48 se muestran las modificaciones propuestas en cada punto crítico. Las gráficas se diseñaron con el software de diseño asistido por computadora (CAD) para modelado mecánico SolidWork.

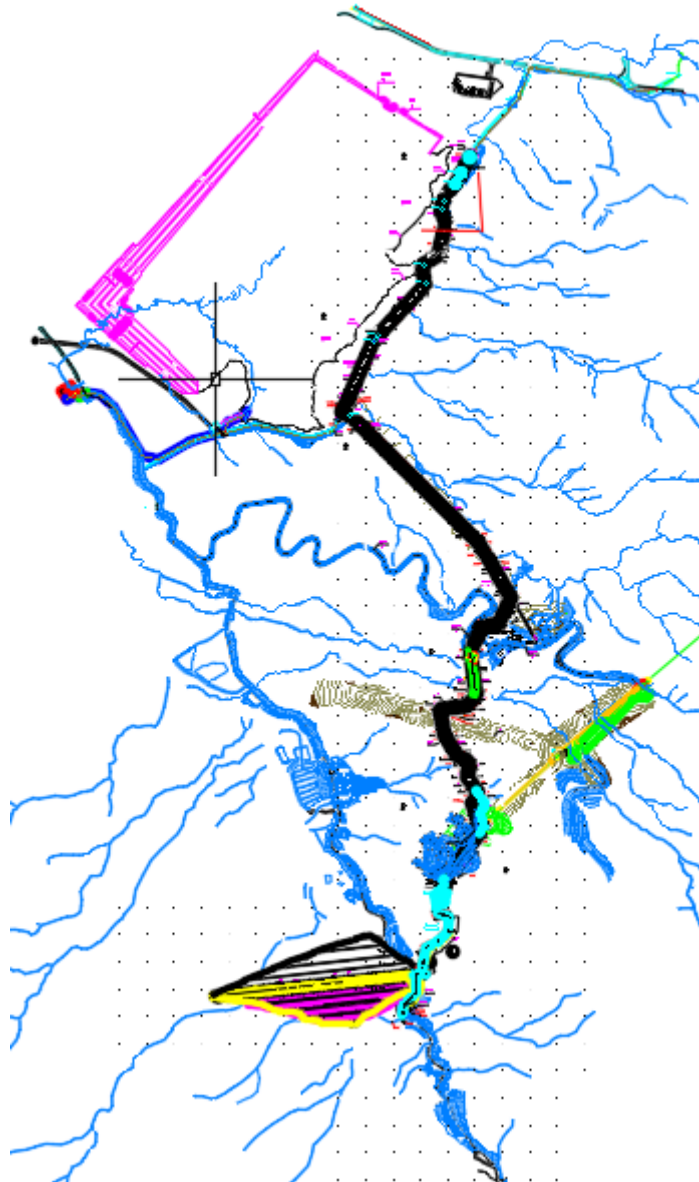


Ilustración 26. Vista panorámica computarizada de las instalaciones del proyecto Mirador.

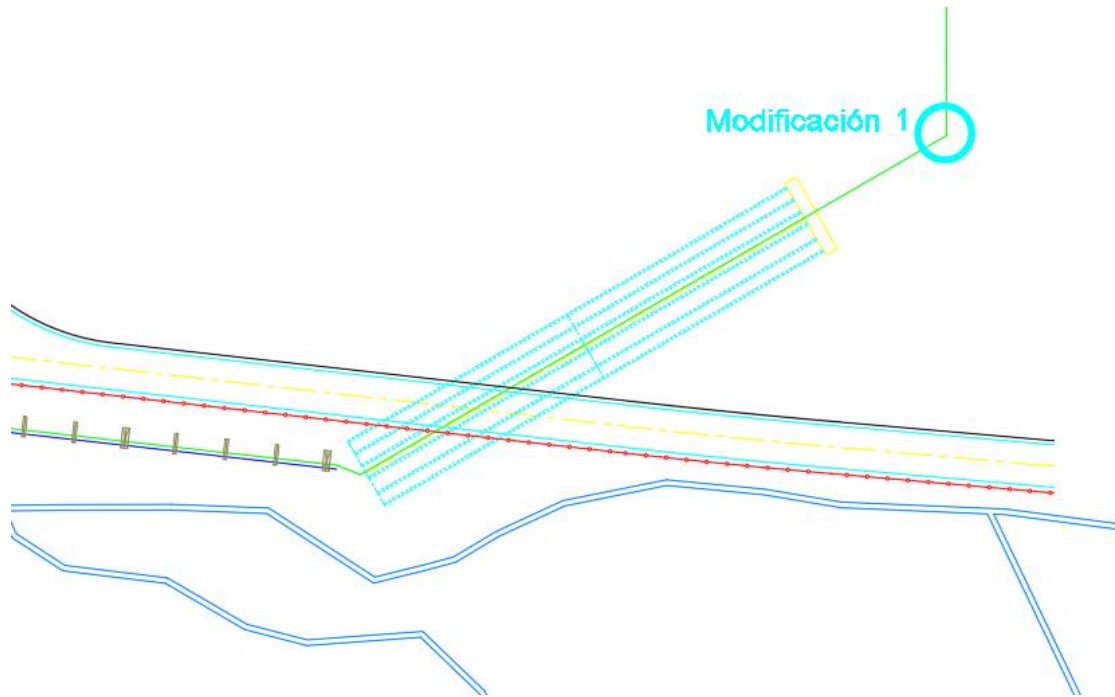


Ilustración 27. Imagen computarizada del punto crítico M1 ubicado en el kilómetro 0 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

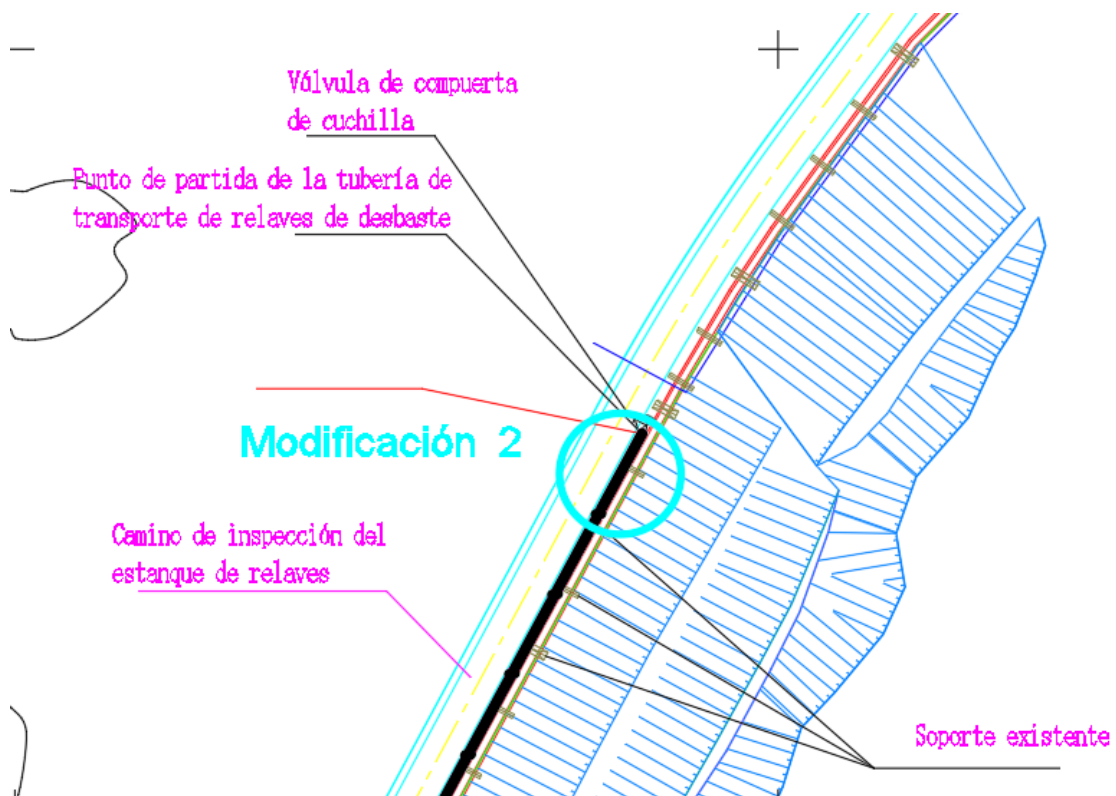


Ilustración 28. Imagen computarizada del punto crítico M2 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 29. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M2 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 30. Imagen computarizada del punto crítico M3 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 31. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M3 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

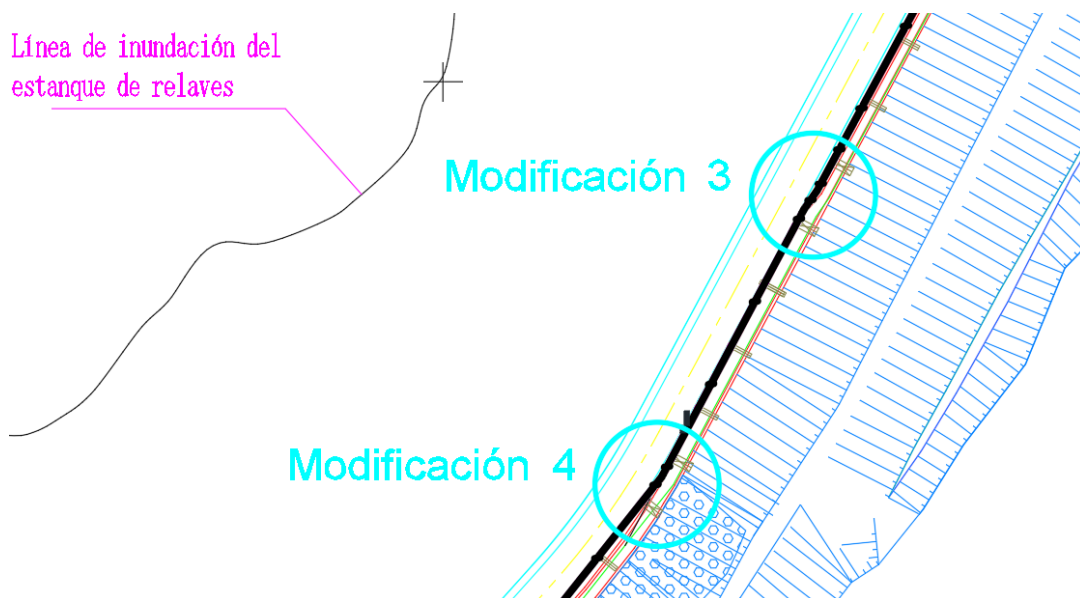


Ilustración 32. Imagen computarizada del punto crítico M4 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 33. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M4 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

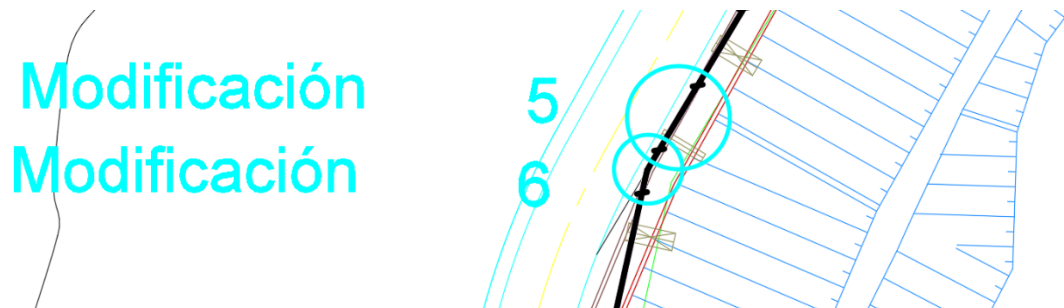


Ilustración 34. Imagen computarizada de los puntos críticos M5 y M6 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 35. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M5 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 36. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M6 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

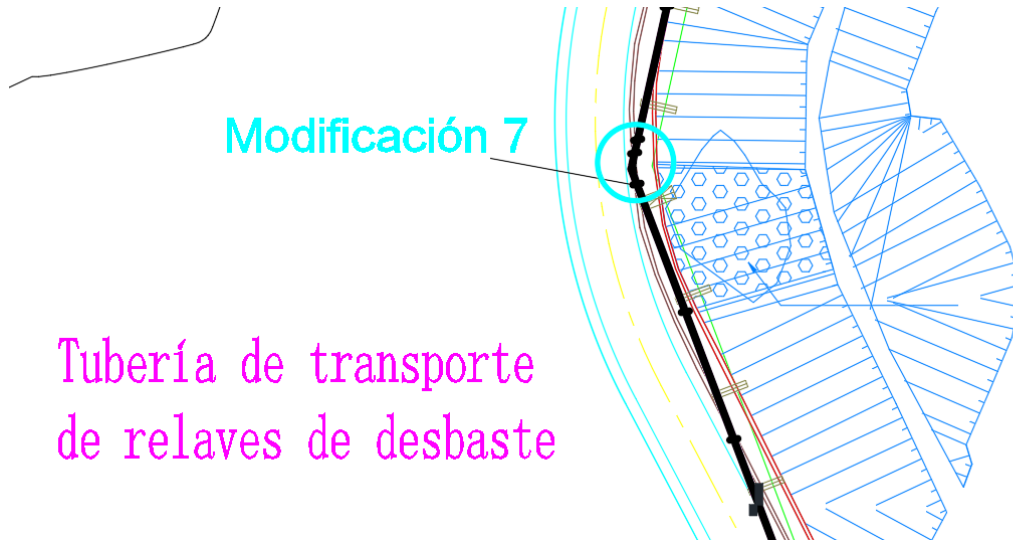


Ilustración 37. Imagen computarizada del punto crítico M7 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 38. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M7 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

Modificación 8



Ilustración 39. Imagen computarizada del punto crítico M8 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 40. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M8 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

Modificación 9



Ilustración 41. Imagen computarizada del punto crítico M9 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 42. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M9 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

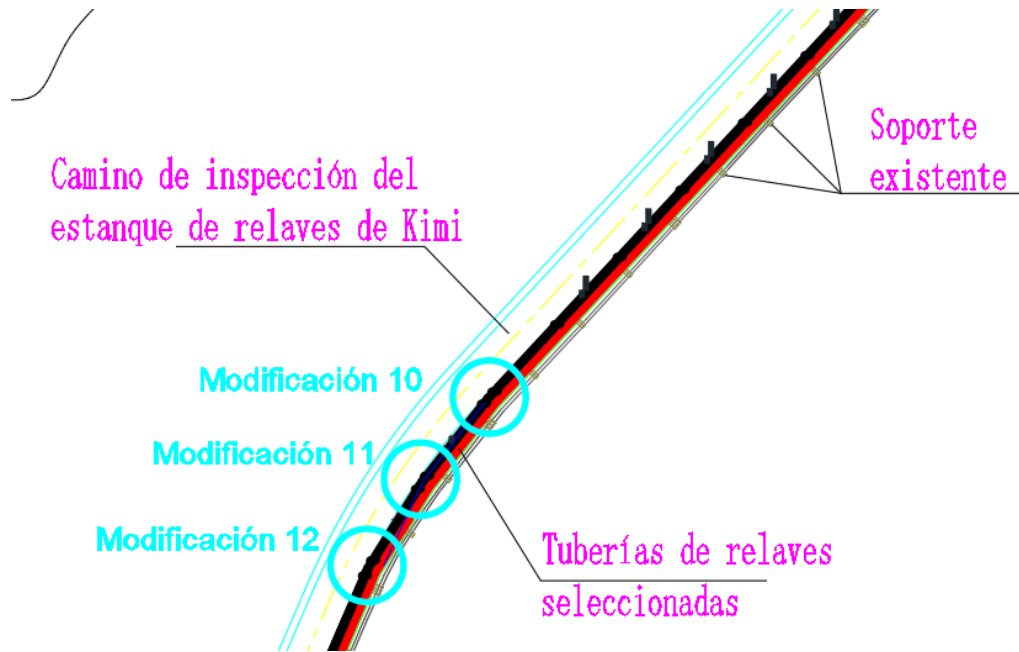


Ilustración 43. Imagen computarizada de los puntos críticos M10, M11 y M12 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 44. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M10 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 45. Fotografía de los tramos identificados como los puntos críticos M11 y M12 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

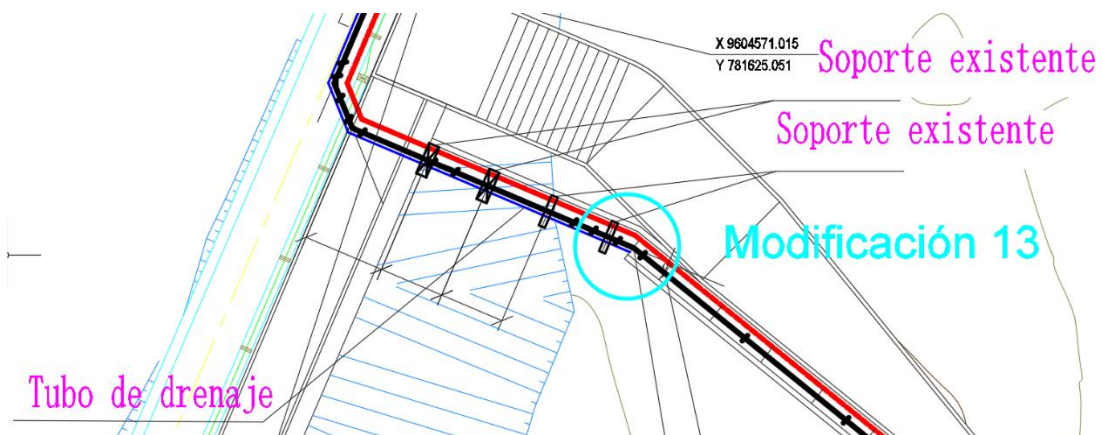


Ilustración 46. Imagen computarizada del punto crítico M13 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

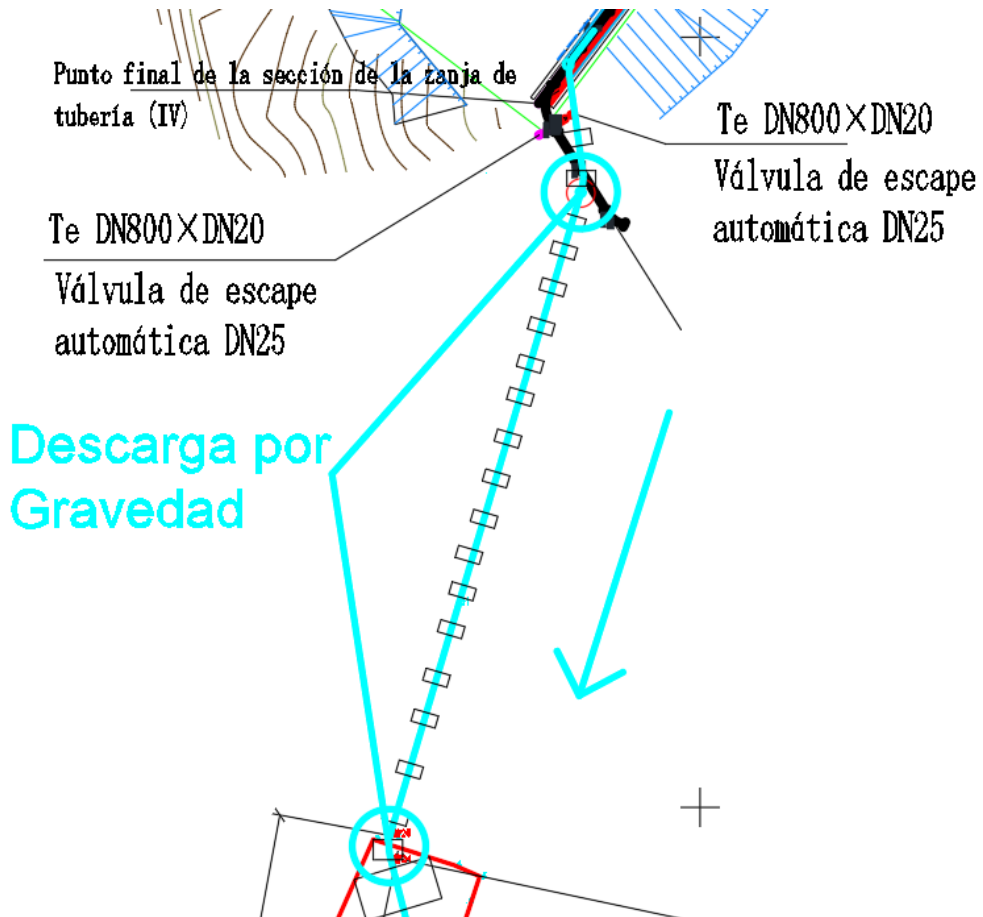


Ilustración 47. Imagen computarizada del punto crítico M14 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.



Ilustración 48. Fotografía del tramo identificado como punto crítico M14 de la tubería de descarga de relaves del proyecto Mirador.

El punto crítico identificado como M14 es donde el relave se descarga por gravedad; este tramo sufre varios daños, los cuales se analizaron mediante simulación con el software Ansys CFX. Cada año se realiza la reparación de al menos un tramo de la tubería. Los remplazos de cualquier tramo de la tubería son menos frecuentes, siendo máximo uno por año. Las normas para los materiales de las tuberías de descarga de relaves dependen de su tipo y, en función de eso, se estima el desgaste permisible. En el caso de las tuberías de HDPE, se debe cumplir las especificaciones de la norma internacional AWWA M55 propuesto por la American Water Works Association; sin embargo, sus requerimientos se sugieren para cuando los relaves se proyectan con presiones bajas (Chen et al., 2004).

Para la hipótesis específica 4: Se puede determinar el desgaste por erosión de la tubería de descarga mediante simulación computacional Ansys 2022 R1 módulo CFX empleando el modelo matemático de Euler-Lagrange con una turbulencia K- ϵ estándar para el análisis de los puntos críticos del sistema de transporte de relave, ver *Ilustración 49*.



Ilustración 49. Turbulencia K- ϵ .

Las condiciones iniciales para nuestro sistema es, como componente principal, agua y relave como se presentan en la *Ilustración 50*.

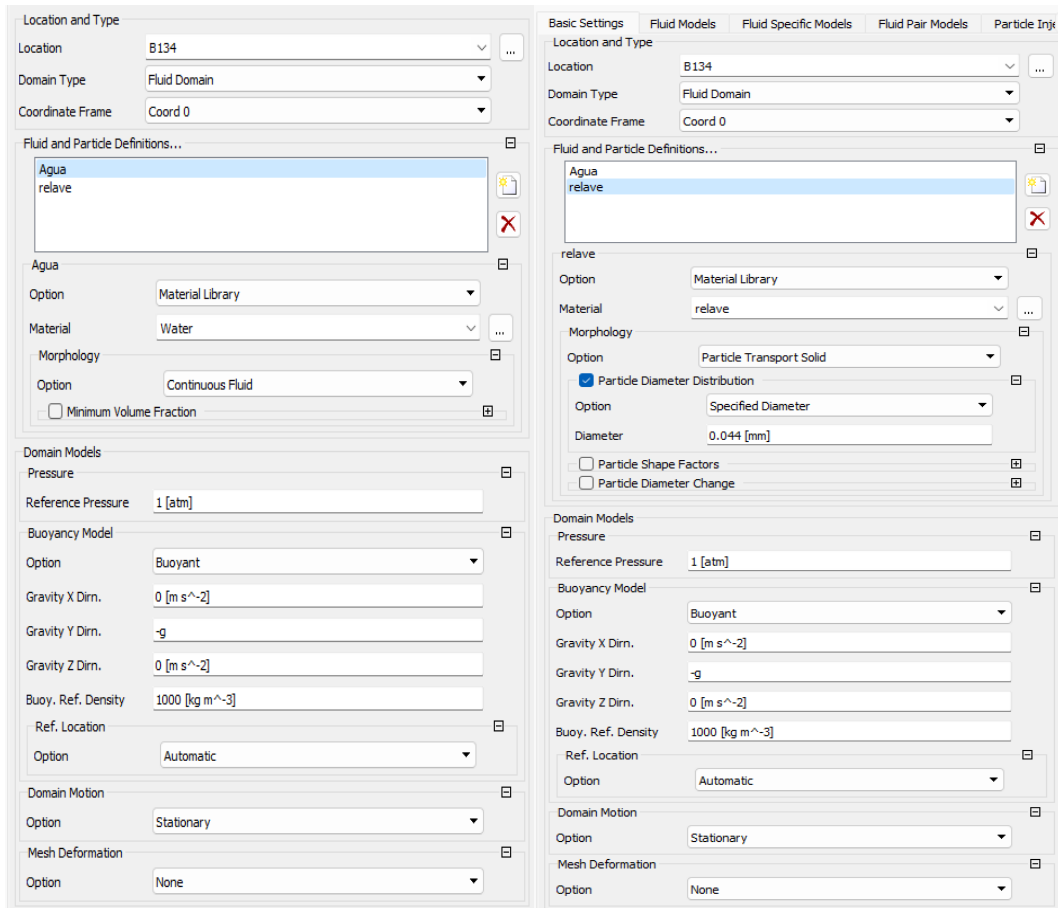


Ilustración 50. Condiciones iniciales de operación.

Luego se establecen las condiciones de borde o de frontera para nuestro sistema de tuberías; en nuestro caso comprenden entrada y salida, como se muestra en las Ilustración 51 a la 55.

Entrada (Inlet)

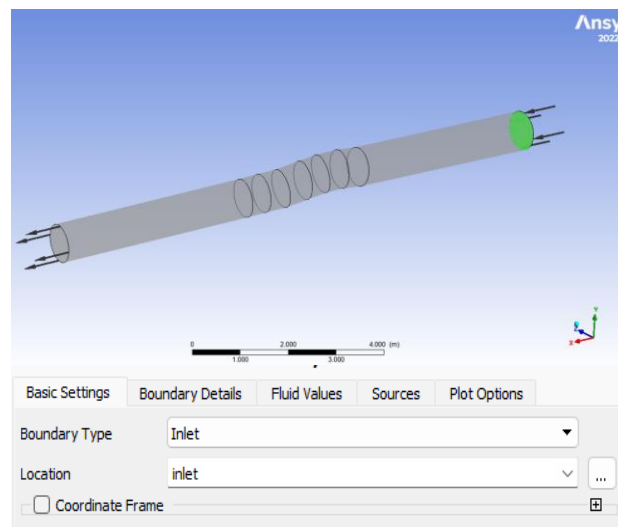


Ilustración 51. Configuración básica.

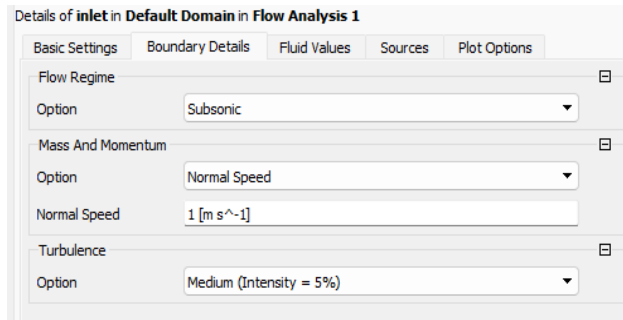


Ilustración 52. Detalles de los límites.

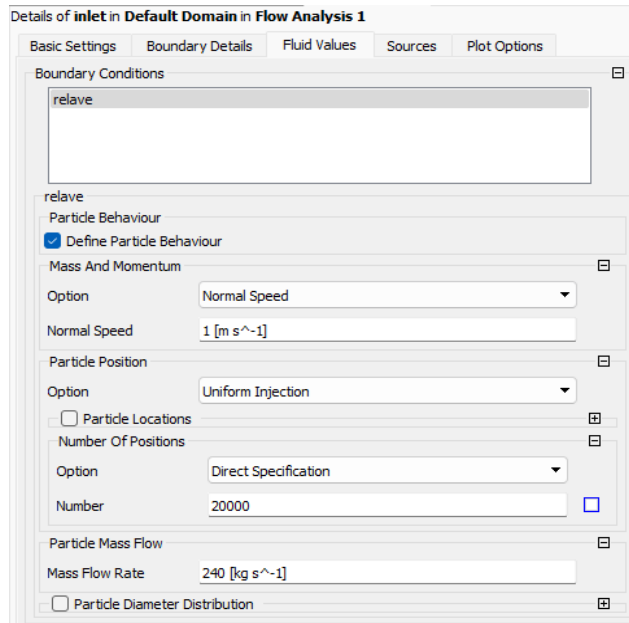


Ilustración 53. Valores del Fluido.

Salida (outlet)

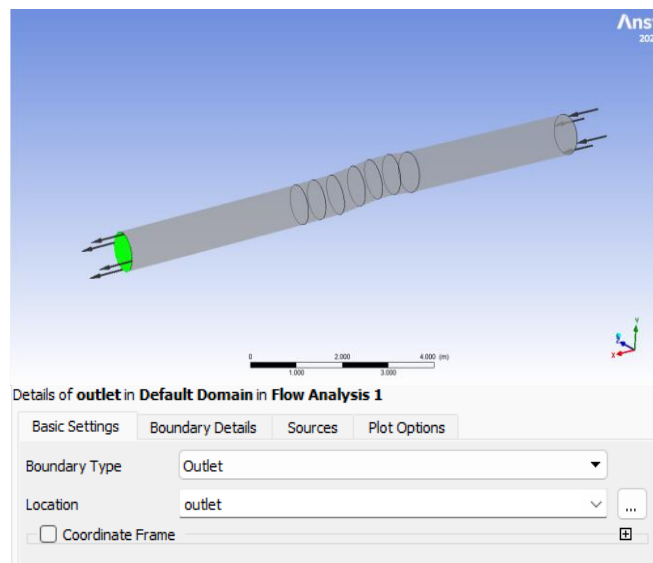


Ilustración 54. Configuración básica.

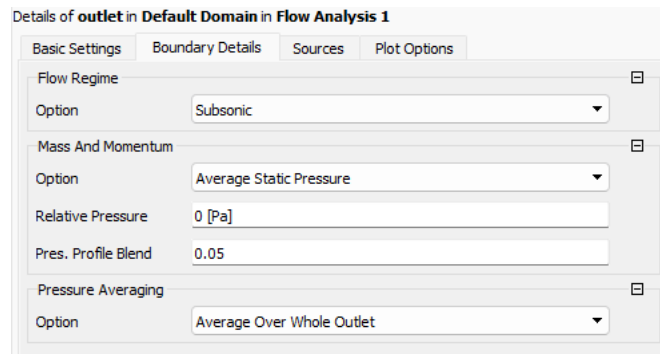


Ilustración 55. Detalles de los límites.

Para mejorar el tratamiento de la malla a nuestros elementos se aplicó el método de Inflation el mismo que nos permite un mayor refinamiento de la capa límite, la cual está sometido a altas concentraciones, ver Ilustración 56.

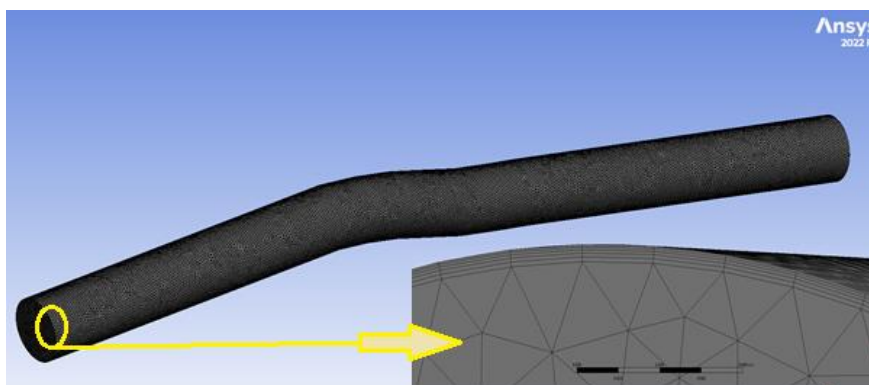


Ilustración 56. Modelo malla refinada.

Posteriormente se evaluó la malla con los métodos Skewness y Orthogonal Quality, ver Ilustración 57 y 58. Además se visualiza en la Tabla 13 un resumen del estado de la calidad de malla obtenido.

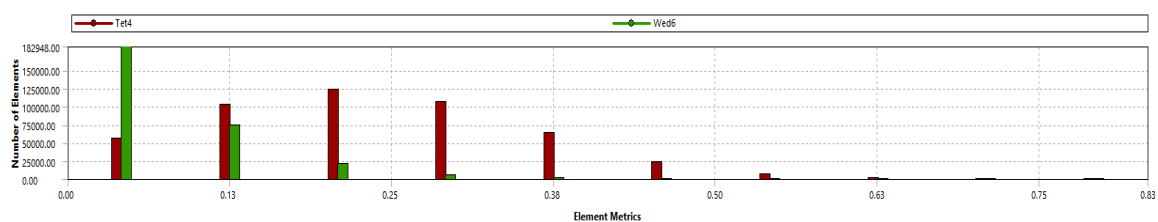


Ilustración 57. Calidad de malla promedio Skewness.

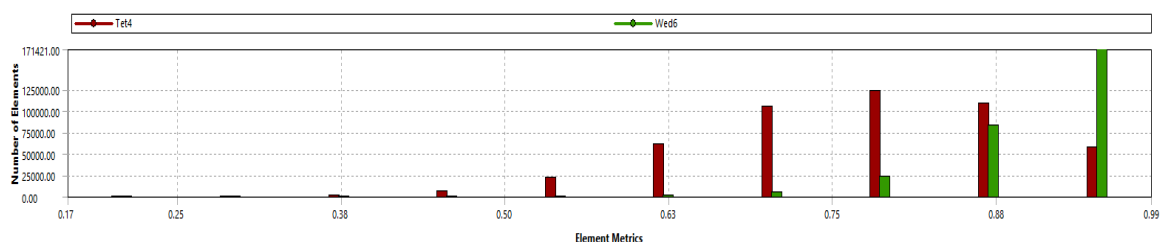


Ilustración 58. Calidad de malla promedio Orthogonal Quality.

Quality		
Mesh Metric	Average	Estado
Skewness	0,17322	Excelente
Orthogonal Quality	0,82267	Muy Bueno

Tabla 13. Estado de calidad de malla

En procedencia a los datos obtenidos se evaluó la convergencia de la malla, para Momento – Masa y Turbulencia, como se visualiza en las Ilustración 59 y 60.

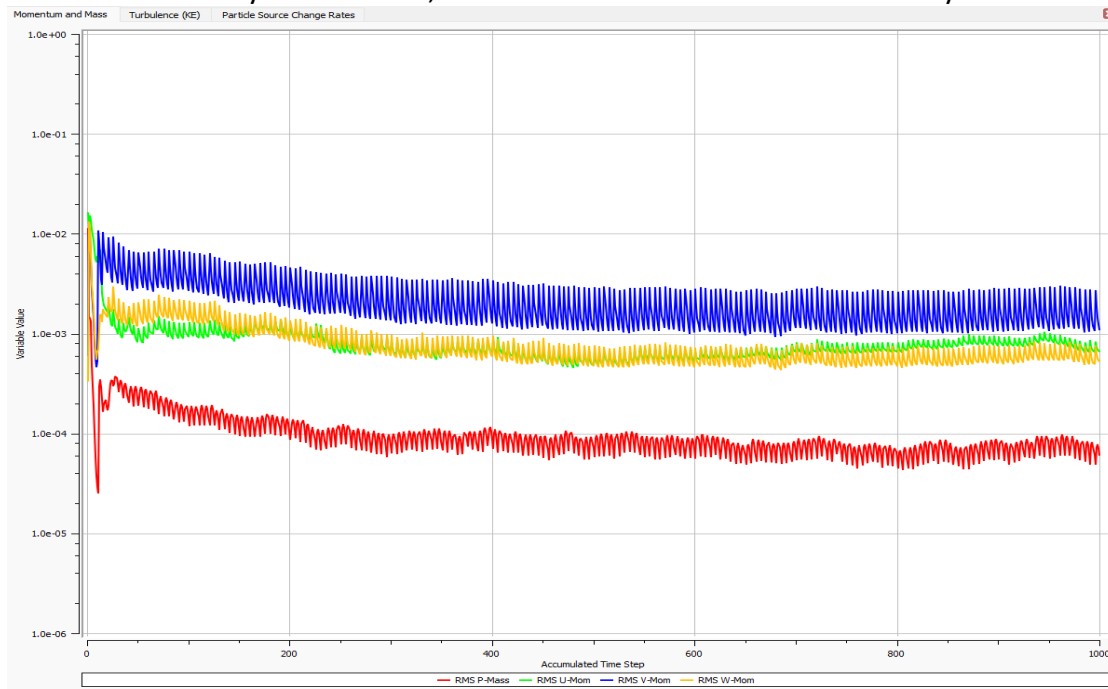


Ilustración 59. Convergencia de Momento y Masa.

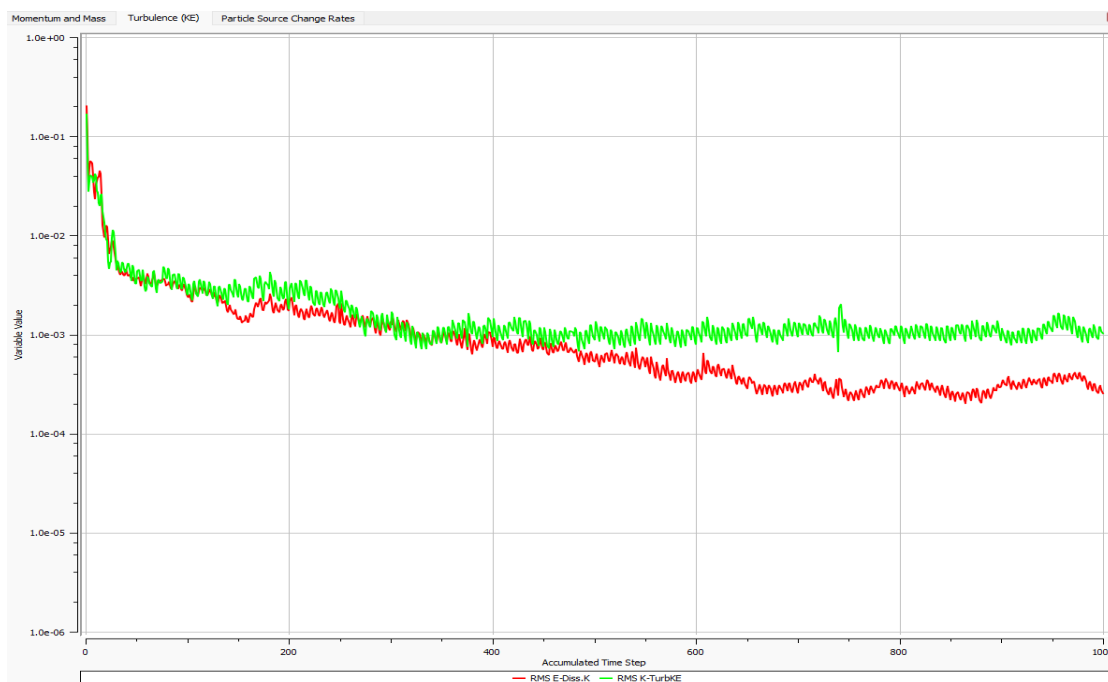


Ilustración 60. Convergencia de la Turbulencia.

Finalmente, ya definido el modelo matemático, las condiciones de borde y la calidad de la malla, se procedió a realizar las simulaciones del desgaste por erosión en 3 tuberías modificadas. Algunas de las capturas de pantalla de cada uno de esos puntos de monitoreo se muestran en las siguientes ilustraciones.

Tubería S (Modificación 14)

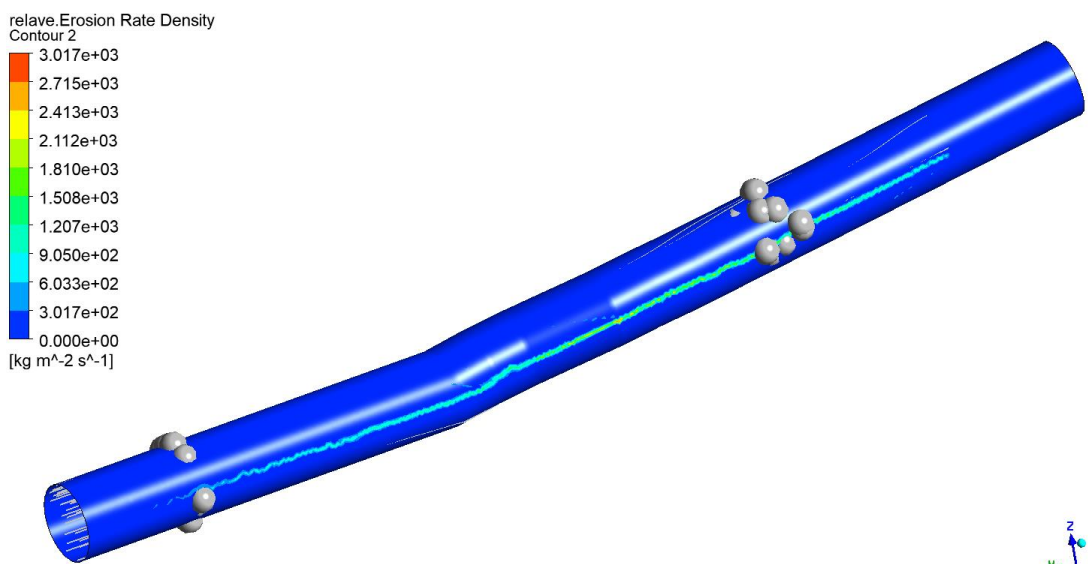


Ilustración 61. Tasa de densidad de la erosión por los relaves en el tramo Tubería S.

La modificación 14 denominado como “Tubería S” la tasa crítica de densidad de la erosión por los relaves se ubica entre 2112 y 3017 Kg/(m²× s⁻¹), ver Ilustración 61. Los valores críticos de la tensión proyectada en las paredes de las tuberías por acción de los relaves se ubican entre 2891 y 4130 Pa, como se muestra en la Ilustración 62. Los valores críticos de la energía cinética provocada por las turbulencias por los relaves están entre 0.06327 y 0.09037 (m/s)², como se detalla en la Ilustración 63. Los valores críticos de presión por los relaves se ubican entre 471.1 y 1381 Pa, como se visualiza en la Ilustración 64.

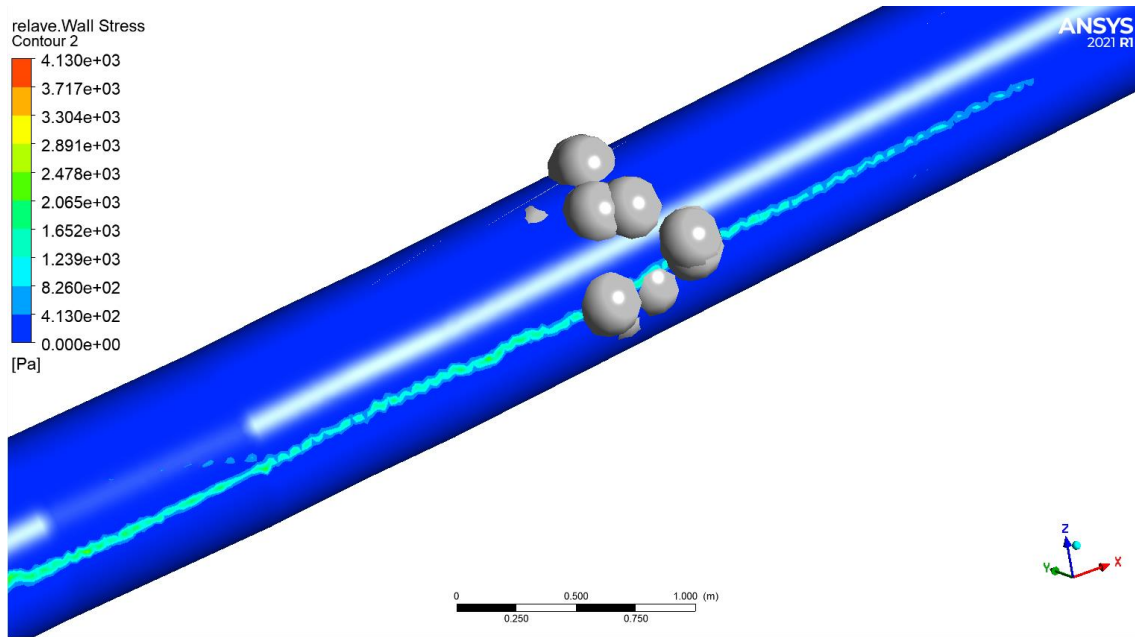


Ilustración 62. Tensión en las paredes por los relaves en el tramo Tubería S.

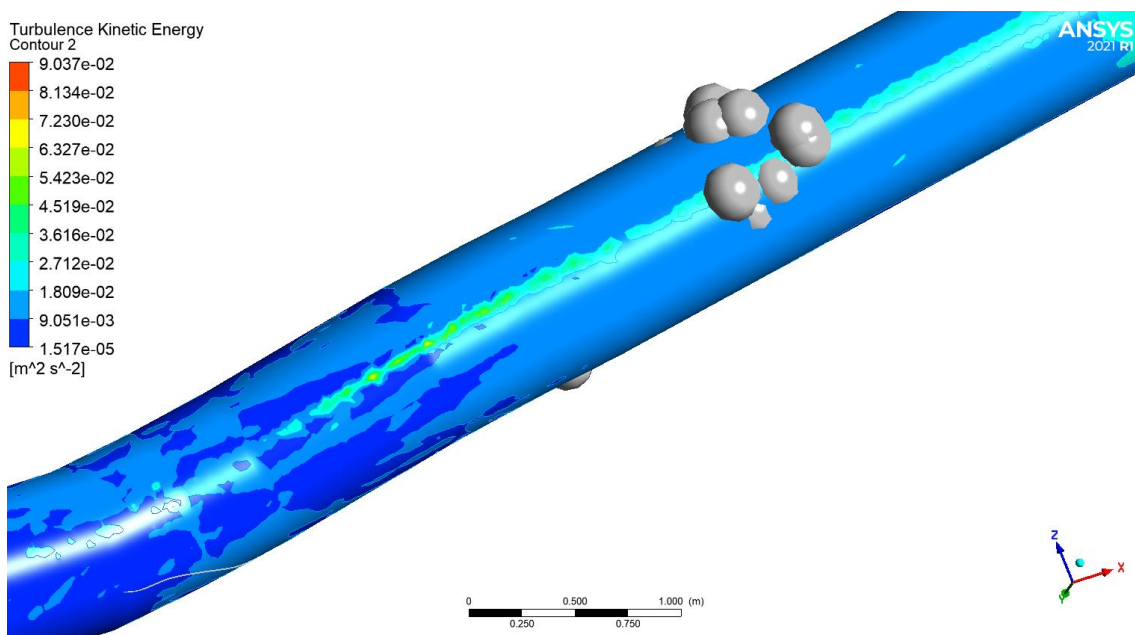


Ilustración 63. Energía cinética de las turbulencias por relaves en el tramo Tubería S.

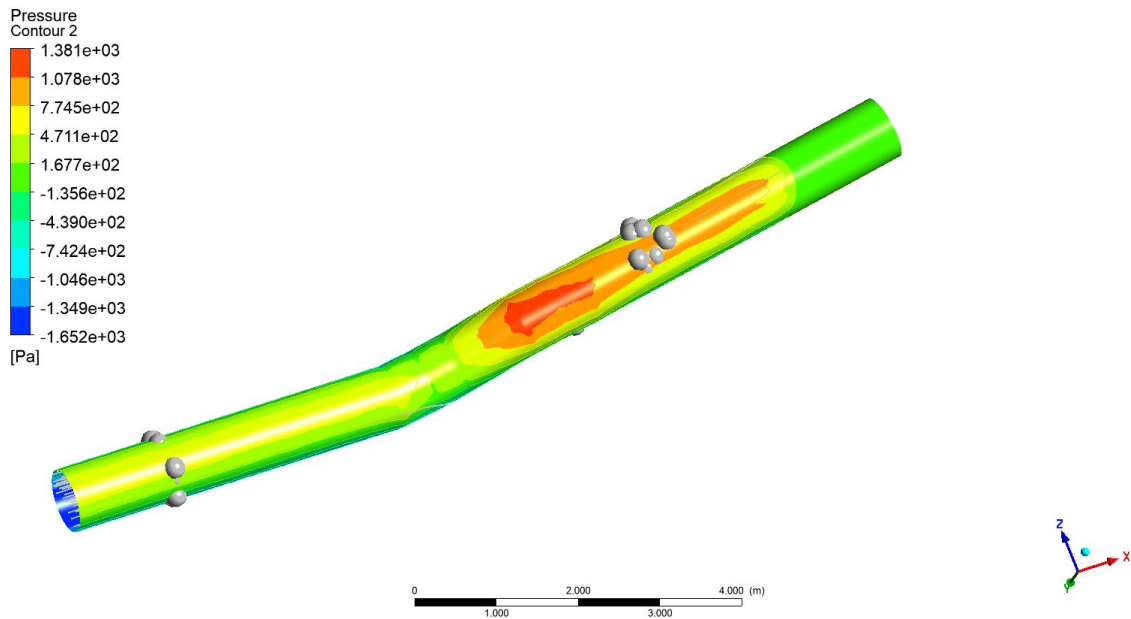


Ilustración 64. Presión por los relaves en el tramo Tubería S.

Tubería D (Modificación 3)

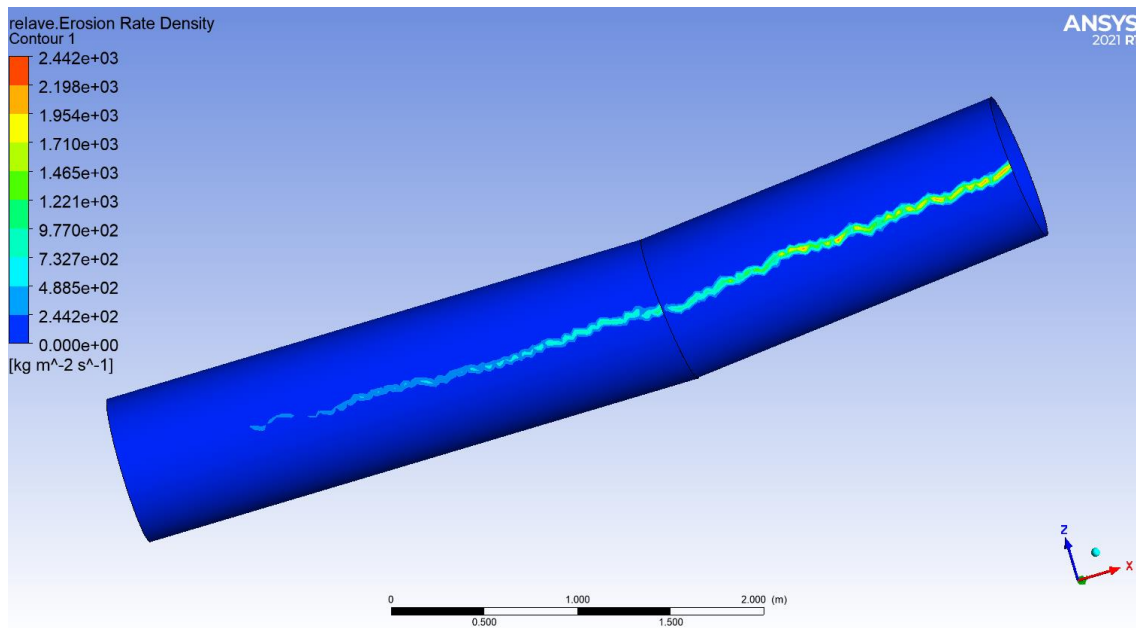


Ilustración 65. Tasa de densidad de la erosión por los relaves en el tramo Tubería D.

La modificación 3 denominado como “Tubería D” la tasa crítica de densidad de la erosión por los relaves se ubica entre 1710 y 2442 $\text{Kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{-1})$, ver Ilustración 65. Los valores críticos de la tensión proyectada en las paredes de las tuberías por acción de los relaves se ubican entre 3670 y 5244 Pa, como se muestra en la Ilustración 66. Los valores críticos de la energía cinética provocada por las turbulencias por los relaves están entre 0.07711 y 0.112 $(\text{m}/\text{s})^2$, como se detalla en la Ilustración 67. Los valores críticos de presión por los relaves se ubican entre 1048 y 1748 Pa, como se visualiza en la Ilustración 68.

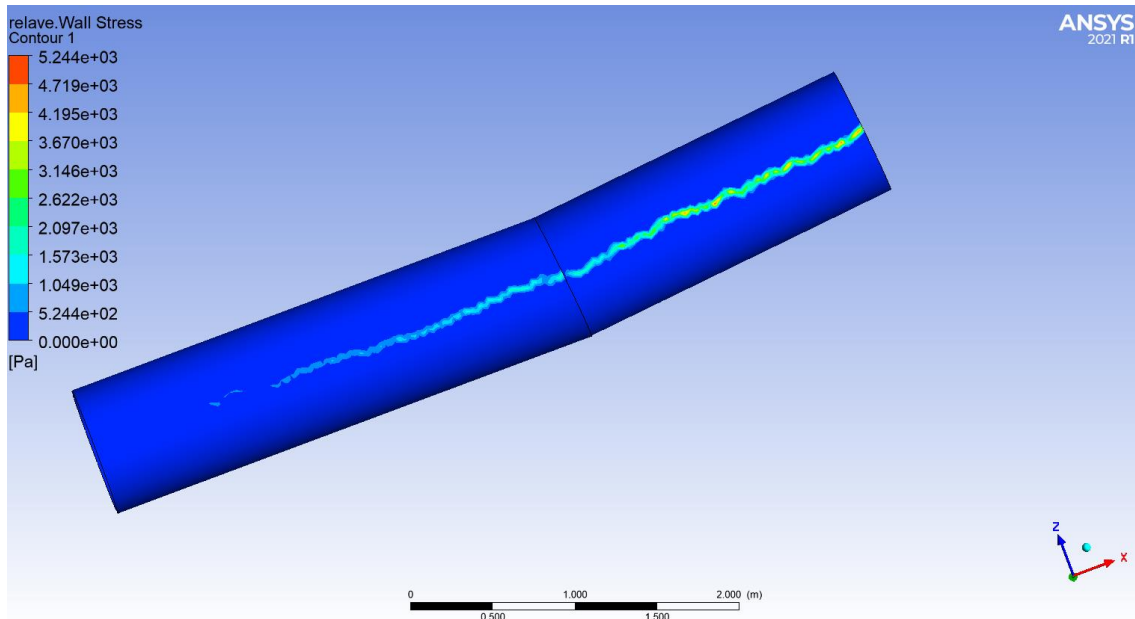


Ilustración 66. Tensión en las paredes por los relaves en el tramo Tubería D.

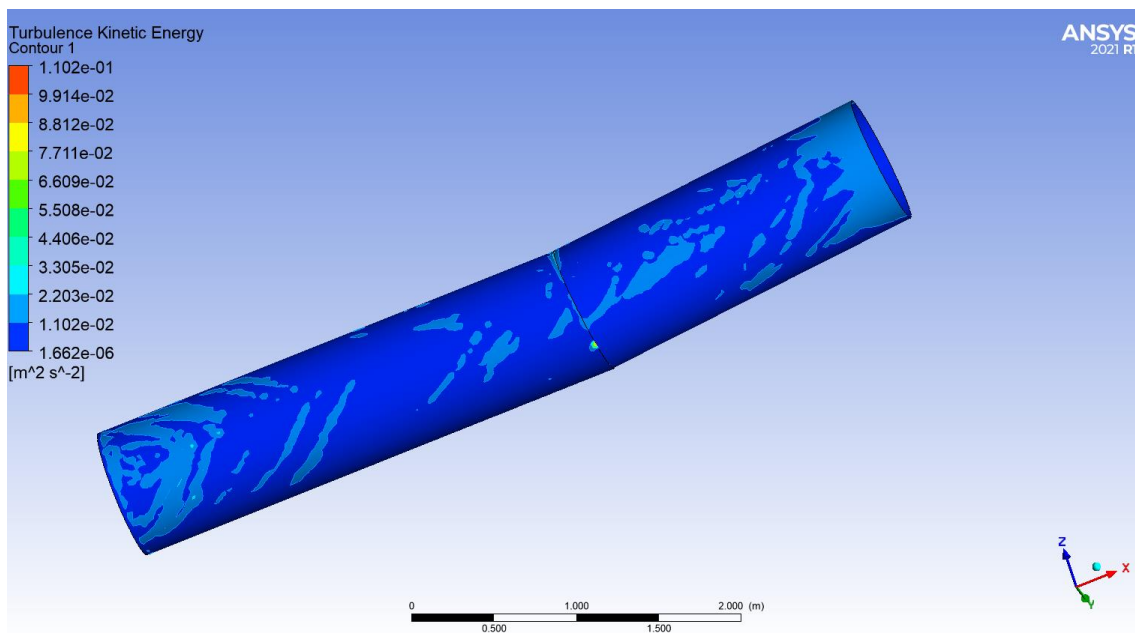


Ilustración 67. Energía cinética de las turbulencias por relaves en el tramo Tubería D.

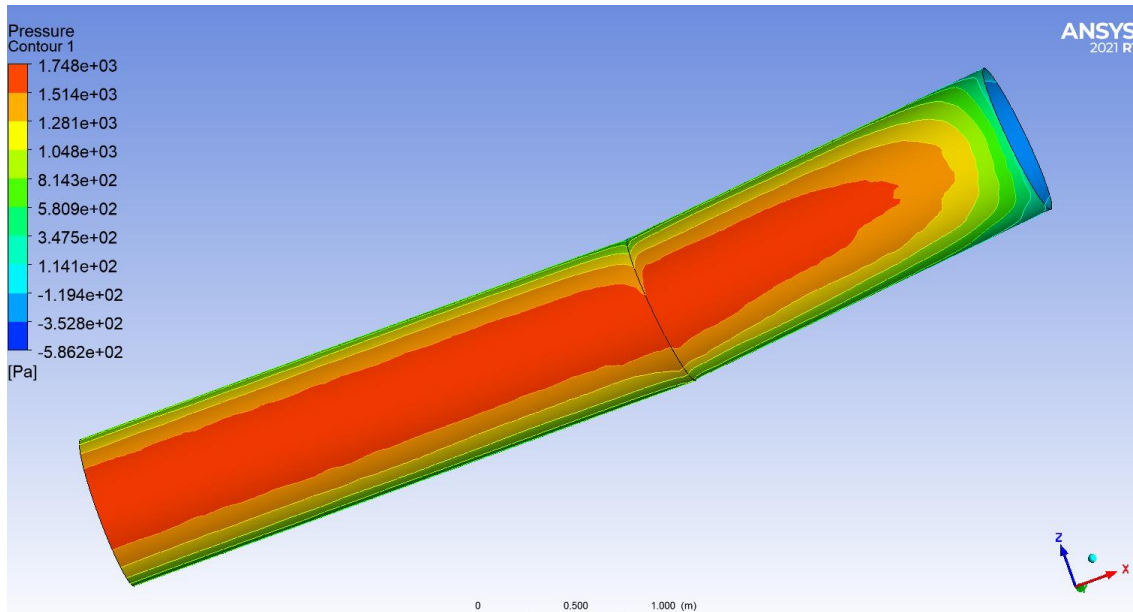


Ilustración 68. Presión por los relaves en el tramo Tubería D.

Tubería Q (Modificación 5)

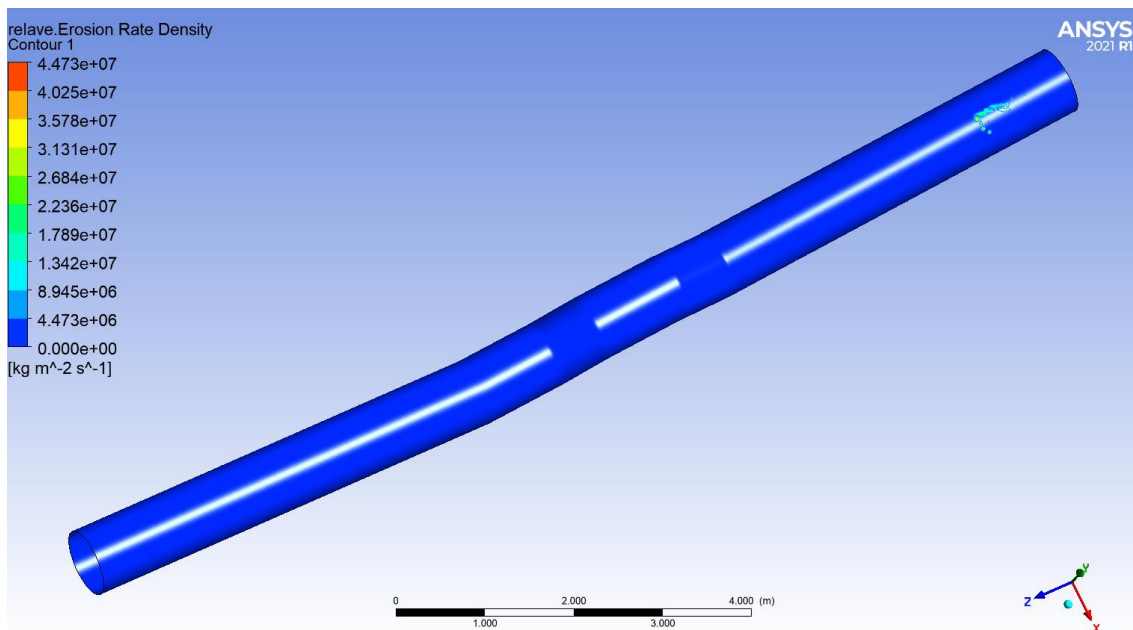


Ilustración 69. Tasa de densidad de la erosión por los relaves en el tramo Tubería Q.

La modificación 5 denominado como “Tubería Q” la tasa crítica de densidad de la erosión por los relaves se ubica entre 31.31 y 44.73×10^6 $\text{Kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{-1})$, ver Ilustración 69. Los valores críticos de la tensión proyectada en las paredes de las tuberías por acción de los relaves se ubican entre 109.1 y 155.9×10^6 Pa, como se muestra en la Ilustración 70. Los valores críticos de la energía cinética provocada por las turbulencias por los relaves están entre 1756 y 2508 $(\text{m}/\text{s})^2$, como se detalla en la Ilustración 71. Los valores críticos de presión por los relaves se ubican entre 2.073 y 3.967×10^6 Pa, como se visualizan en la Ilustración 72.

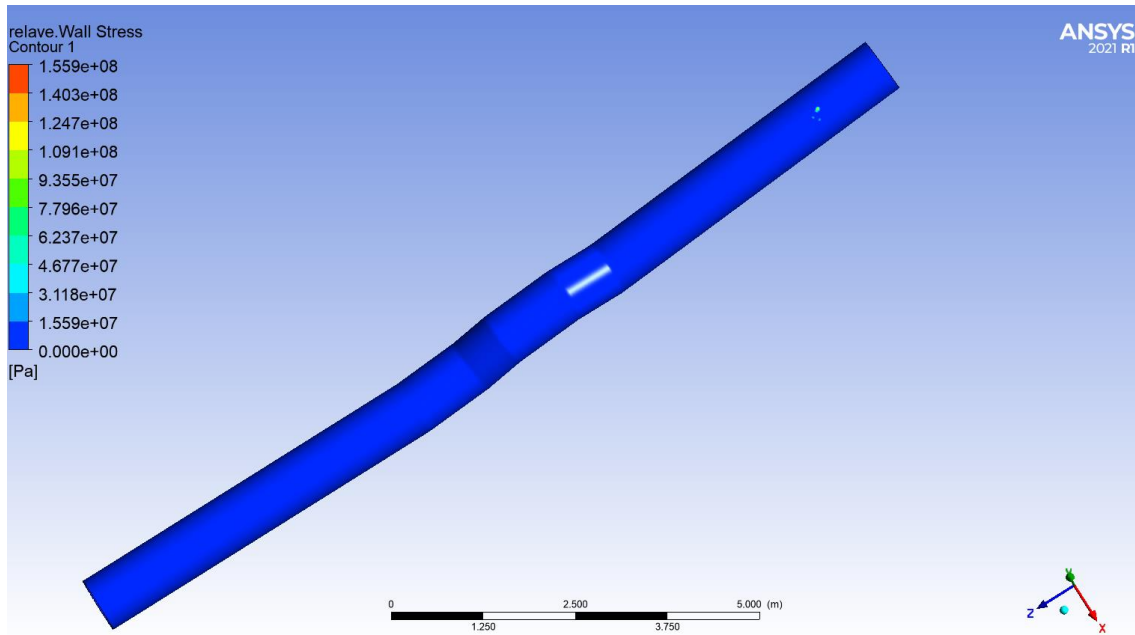


Ilustración 70. Tensión en las paredes por los relaves en el tramo Tubería Q.

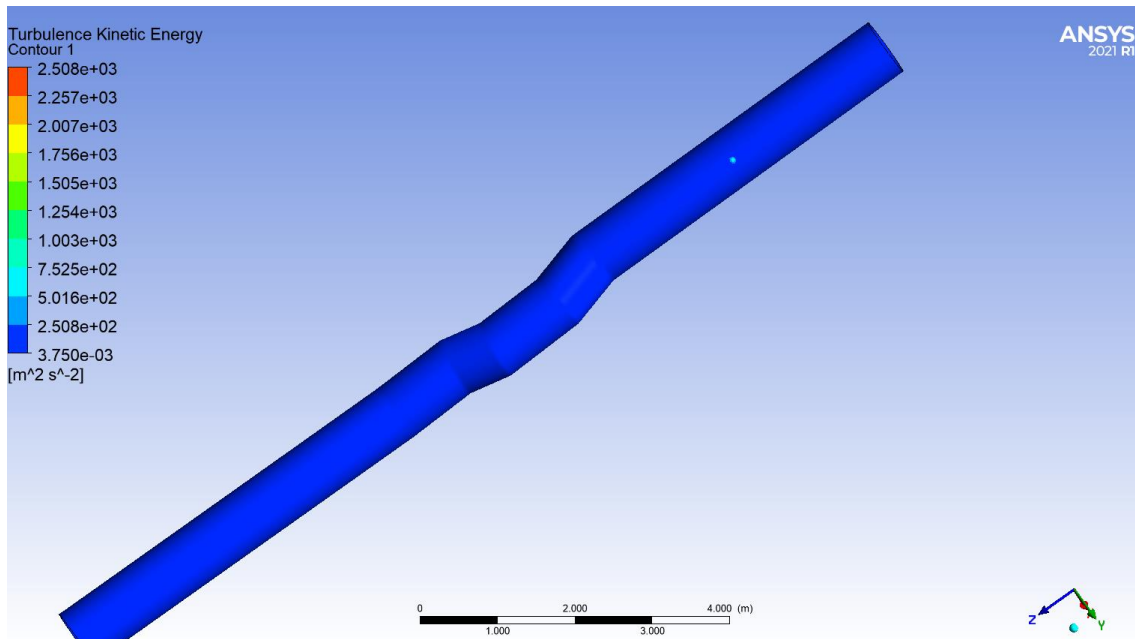


Ilustración 71. Energía cinética de las turbulencias por relaves en el tramo Tubería Q.

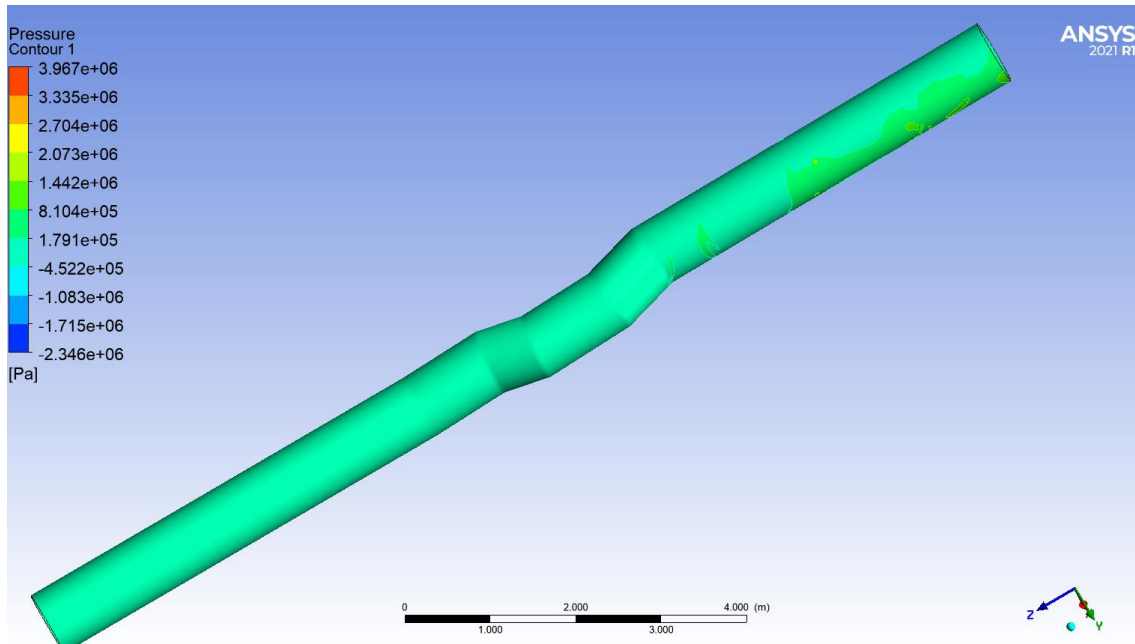


Ilustración 72. Presión por los relaves en el tramo Tubería Q.

A continuación se muestra el resumen de resultados de los tramos simulados, ver *Tabla 14*

Tabla 14. Tabla de resumen del análisis computacional.

Tubería	Prioridad por Media	Prioridad por Cuartil	Rango de densidad de la erosión Kg/(m ² × s ⁻¹), (Min-Max)	Rango de Tensión en las paredes Pa (Min-Max)	Rango de Energía cinética de las turbulencias (m/s) ² (Min-Max)	Rango de Presiones Pa (Min-Max)
Tubería S(M14)	Alta	Alta	2112-3017	2891-4130	0.06327-0.09037	471.1-31.81
Tubería D (3)	Media	Alta	1710-2442	3670-5244	0.07711-0.0112	1048-1748
Tubería Q (M5)	Media	Media	31.31 x10 ⁶ -44.73 x10 ⁶	109.1-155.9	1756 - 2508	2,073 x10 ⁶ -3,967 x10 ⁶

Para la hipótesis específica 5: Se puede establecer una propuesta de diseño para el sistema de transporte de relaves a través de especificaciones técnicas adaptadas que minimicen el desgaste por erosión de la tubería de descarga, mejorando la estabilidad de la estructura del sistema.

Para constituir una nueva propuesta de diseño se realiza en primer lugar el análisis de criticidad de acuerdo a la norma ASME B31.11 con los datos propuestos de flexibilidad, FIT (factor de intensificación de tensión), dando como resultado las siguientes modificaciones para cada tramo, ver Tabla 15 a la 21 e Ilustraciones 73 a la 78.

Tabla 15. Información de los tramos de las tuberías de descarga de relaves propuestos.

Descripción	Tipo de doblez	Factor de flexibilidad (k)	Factor de intensificación de la tensión		Característica de flexibilidad (h)	Datos requeridos:		Verificaciones:
			En plano (ti)	Fuera de plano (ic)		t (mm)	r (mm)	
S Tramo 1	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2217	0,1929	0,1607	10,0788	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 468,42
						r (mm)	405	
						S (mm)	2448,40	
						θ (deg)	8,900	
						R (mm)	7817,58	
S Tramo 2	Curvatura de inglete ampliamente espaciada. $s \geq r(1 + \tan \vartheta)$	0,2217	0,1930	0,1608	10,0738	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 472,77
						r (mm)	405	
						S (mm)	593,80	
						θ (deg)	9,500	
						R (mm)	1774,20	
S Tramo 3	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	0,2217	0,1930	0,1608	10,0738	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 472,77
						r (mm)	405	
						S (mm)	424,10	
						θ (deg)	9,50	
						R (mm)	1267,16	
D Tramo 1	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	4,2336	2,0424	1,7020	0,2925	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 421,97
						r (mm)	405	
						S (mm)	402,20	
						θ (deg)	2,40	
						R (mm)	4798,10	
D Tramo 2	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	0,2178	0,1902	0,1585	10,2946	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 421,97
						r (mm)	405	
						S (mm)	346,20	
						θ (deg)	2,40	
						R (mm)	4130,04	
D Tramo 3	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	8,7333	3,6451	3,0376	0,1227	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 441,15
						r (mm)	405,0000	
						S (mm)	359,2000	
						θ (deg)	5,10	
						R (mm)	2012,38	
Q Tramo 1	Curvatura de inglete estrechamente espaciada. $s < r(1 + \tan \vartheta)$	4,0899	1,9867	1,6556	0,3049	t (mm)	10	Tipo 3 $r(1 + \tan \vartheta)$ 446,14
						r (mm)	405,0000	
						S (mm)	1016,0000	
						θ (deg)	5,80	
						R (mm)	5001,17	
Q Tramo 2	Codo de soldadura R (Radio curvatura)	11,1010	3,2075	2,6729	0,1486	t (mm)	10	Tipo 1 $r(1 + \tan \vartheta)$ 504,48
						r (mm)	405,0000	
						S (mm)	18,0000	
						θ (deg)	13,80	
						R (mm)	2438,00	
Q Tramo 3	Codo de soldadura R (Radio curvatura)	0,2218	0,1930	0,1608	10,0700	t (mm)	10	Tipo 2 $r(1 + \tan \vartheta)$ 476,41
						r (mm)	405,00	
						S (mm)	399,80	
						θ (deg)	10,00	
						R (mm)	1133,69	

Tubería S (Modificación 14)

Tabla 16. Prioridad de análisis en el tramo “S” de tuberías.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad por Media	Prioridad por Quartil 3
S (Tramo 1)	4,124	2,000	1,667	0,302	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 2)	5,077	2,362	1,968	0,235	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 3)	17,579	6,379	5,316	0,053	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 4)	13,767	5,246	4,372	0,071	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 5)	16,681	6,117	5,098	0,056	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 6)	12,531	4,866	4,055	0,080	Tipo 2	Alta	Alta
S (Tramo 7)	12,884	4,975	4,146	0,077	Tipo 2	Alta	Alta

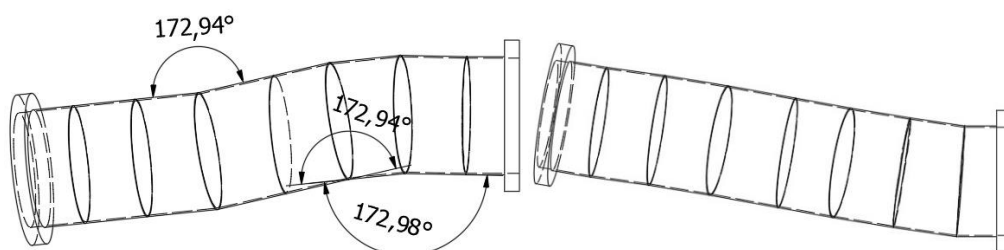


Ilustración 73. Tubería “S” actual implementada.

Tabla 17. Prioridad de análisis en el tramo “S” de la tubería propuesta.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad Tension	Prioridad Flexibilidad
S (Tramo 1)	0,222	0,193	0,161	10,079	Tipo 3	Baja	Baja
S (Tramo 2)	0,222	0,193	0,161	10,074	Tipo 3	Baja	Baja
S (Tramo 3)	0,222	0,193	0,161	10,074	Tipo 2	Baja	Baja

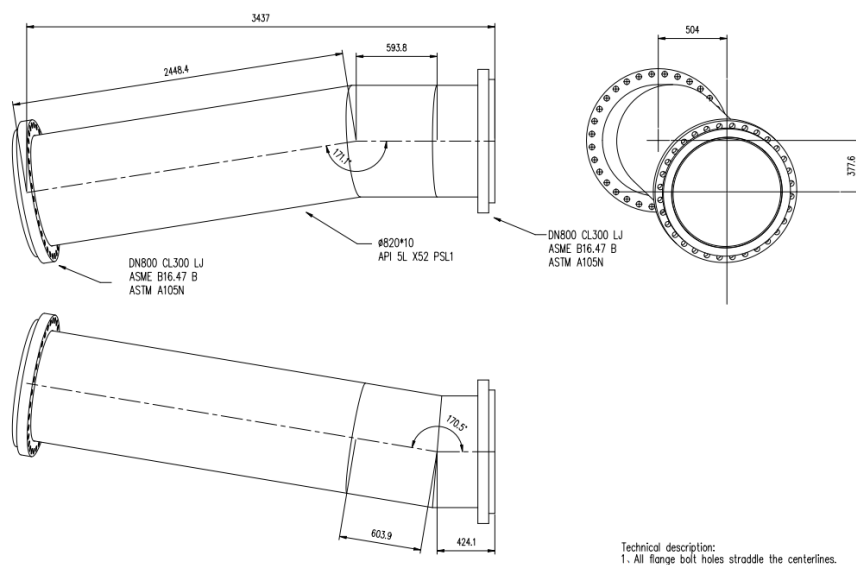


Ilustración 74. Tubería “S” propuesta de diseño.

Tubería D (Modificación 3)

Tabla 18. Prioridad de análisis en el tramo “D” de tuberías.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad por Media	Prioridad por Quartil 3
D	0,221	0,192	0,160	10,131	Tipo 3	Media	Alta

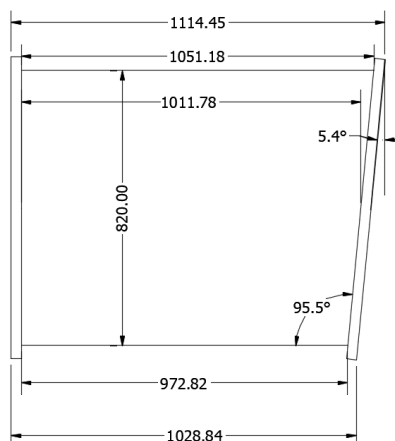


Ilustración 75. Tubería “D” actual implementada.

Tabla 19. Prioridad de análisis en el tramo “D” de la tubería propuesta.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad Tension	Prioridad Flexibilidad
D (Tramo 1)	4,234	2,042	1,702	0,293	Tipo 2	Baja	Media
D (Tramo 2)	0,218	0,190	0,158	10,295	Tipo 2	Baja	Baja
D (Tramo 3)	8,733	3,645	3,038	0,123	Tipo 2	Baja	Media

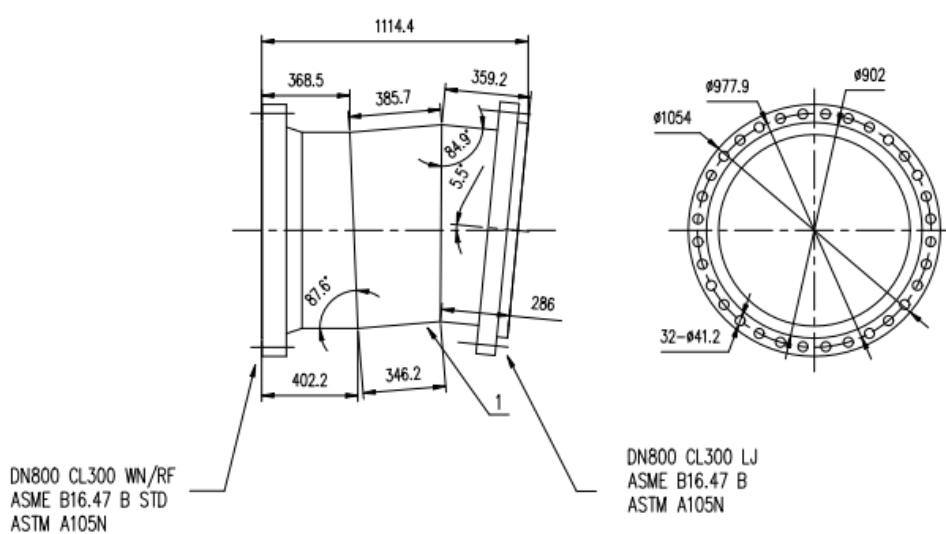


Ilustración 76. Tubería “D” propuesta de diseño.

Tubería Q (Modificación 5)

Tabla 20. Prioridad de análisis en el tramo “Q” de tuberías.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad por Media	Prioridad por Cuartil 3
Q (Tramo 1)	0,221	0,193	0,161	10,095	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 2)	0,221	0,193	0,161	10,089	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 3)	0,222	0,193	0,161	10,087	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 4)	0,221	0,193	0,161	10,091	Tipo 3	Media	Media
Q (Tramo 5)	0,220	0,192	0,160	10,177	Tipo 3	Media	Media

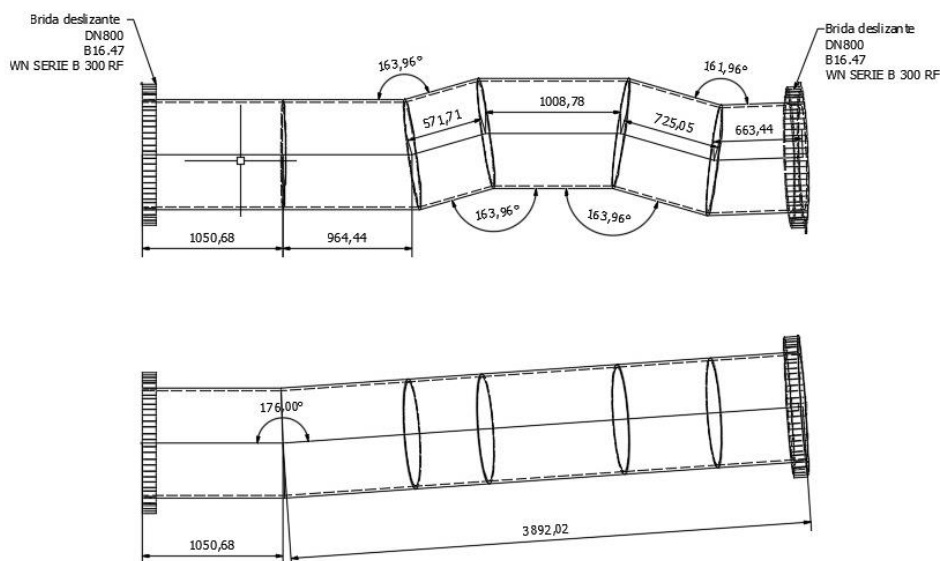


Ilustración 77. Tubería “Q” actual implementada.

Tabla 21. Prioridad de análisis en el tramo “Q” de la tubería propuesta.

Descripción	Factor de flexibilidad (k)	FIT en plano (i_i)	FIT fuera de plano (i_o)	Característica de flexibilidad (h)	Tipo	Prioridad Tension	Prioridad Flexibilidad
Q (Tramo 1)	4,090	1,987	1,656	0,305	Tipo 3	Baja	Media
Q (Tramo 2)	11,101	3,207	2,673	0,149	Tipo 1	Baja	Media
Q (Tramo 3)	0,222	0,193	0,161	10,070	Tipo 2	Baja	Baja

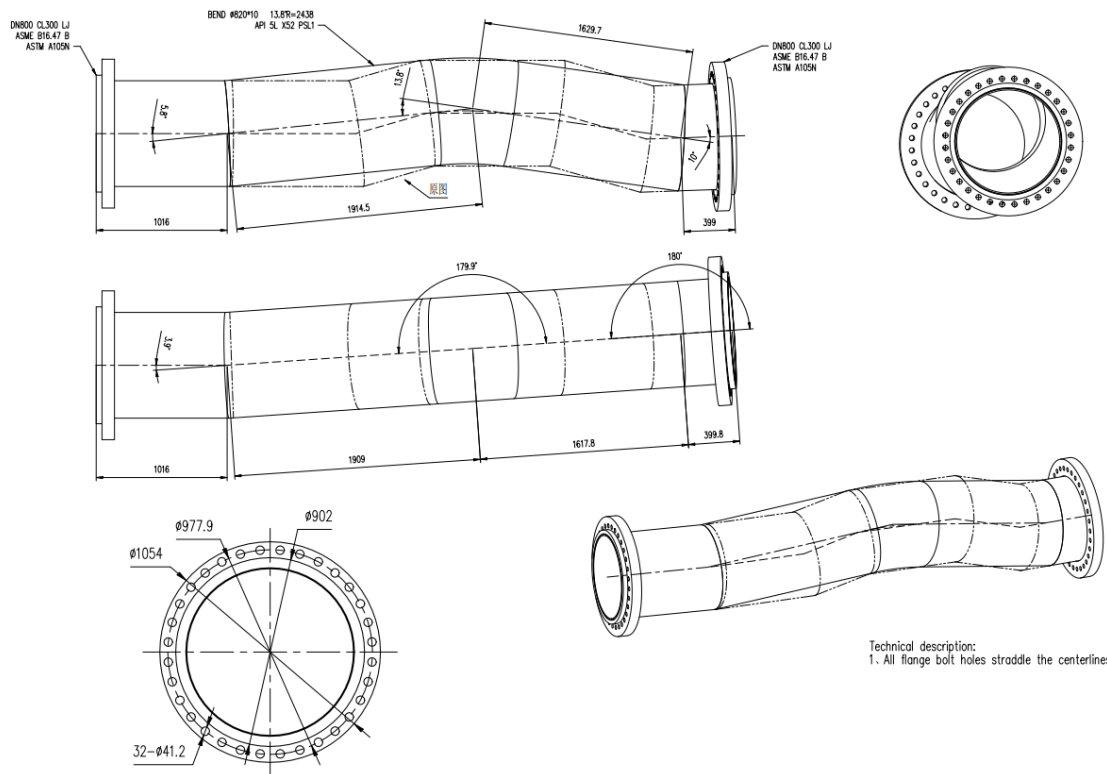


Ilustración 78. Tubería "Q" propuesta de diseño.

6. CONCLUSIONES

La caracterización del relave se obtuvo como resultado de la piscina de espesadores de 100m, un relave con un 55% de agua y entre 48-53% de partículas con una granulometría de 325 que representa el 47.44% del total del tamaño de partícula.

El sistema de bombeo de descarga de relave en la planta ECSA opera con un caudal de 1777 m³/h y a una presión de 1.72 Mpa.

Para el sistema de tubería de descargue de relave se identificaron 14 tramos con modificaciones en su diseño mecánico.

Basado en los resultados de la simulación computacional CFX y modelo de turbulencia K-ε realizada en 3 tuberías modificadas se obtuvo valores de densidad por erosión de $44.73 \times 10^6 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{-1})$, la tensión proyectadas en las paredes de $155.9 \times 10^6 \text{ Pa}$ y una energía cinética provocada por turbulencia de 2508 (m/s)^2 para la sección de tubería identificada como Q siendo esta la más crítica.

La propuesta de diseño para el sistema de tubería de descarga de relave basado en los criterios establecidos por la ASME 31.11 comprende tipos de materiales, tipos de ingleses, radios de curvatura mínimos para garantizar que flexibilidad y el FIT (Factor de intensificación de la tensión) este dentro de un rango con prioridad por tensión y flexibilidad media.

REFERENCIAS

- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of cleaner production, 108*, 1050-1062.
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., Keir, G., & Stokes, J. R. (2016). Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management. *Journal of Cleaner Production, 133*, 5-17.
- Ahmari, S., & Zhang, L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Construction and building materials, 29*, 323-331.
- Aleksakhin, A., Sala, D., Golovin, K., & Kovalev, R. (2021). Reducing energy costs for pipeline transportation. *Transportation Research Procedia, 57*, 24-32.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.021>
- Ally, A. N., Blanche, M. M., Nana, U. J. P., Grâce, M. M., François, N., & Pettang, C. (2021). Recovery of Mining Wastes in Building Materials: A Review. *Open Journal of Civil Engineering, 11*(4), Art. 4.
<https://doi.org/10.4236/ojce.2021.114022>
- Anhui, T. (2022, junio 27). *Proyecto cuprífero Mirador* [Personal].
- Anicama Acosta, G. A. (2011). Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios. *Pontificia Universidad Católica del Perú*.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/500>

- Araya, N., Ramírez, Y., Cisternas, L. A., & Kraslawski, A. (2021). Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*, 303, 117626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117626>
- ASTM International. (2015). *Standard test method for density, relative density, and API gravity of liquids by digital density meter*. ASTM international.
- Boger, D. V. (2013). Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 4, 239-257.
- Calderón, J. F. J., Morillo, D. S. B., & Romero, J. A. N. (2022). DESARROLLO DE ADOQUINES A PARTIR DE LOS RELAVES DE MINA. *Perfiles*, 1(27), Art. 27. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.151>
- Cecioni, A. J., & Dick, L. A. (1992). Geología del yacimiento epitermal de oro y plata Can Can, Franja de Maricunga, precordillera de Copiapo, Chile. *Andean Geology*, 19(1), 3-17.
- Chen, X., McLaury, B. S., & Shirazi, S. A. (2004). Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees. *Computers & Fluids*, 33(10), 1251-1272. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2004.02.003>
- Damages on Pumps and Systems—1st Edition*. (s. f.). Recuperado 2 de junio de 2022, de <https://www.elsevier.com/books/damages-on-pumps-and-systems/merkle/978-0-444-63366-8>
- Dixon-Hardy, D. W., & Engels, J. M. (2007). Guidelines and recommendations for the safe operation of tailings management facilities. *Environmental engineering science*, 24(5), 625-637.

Drebenshtedt, K., Golik, V., & Dmitrak, Y. V. (2018). The prospects of diversification of technology of extraction of metals in Republic of North Osetia-Alaniya.

Sustainable development of mountain territories, 1(10), 125-131.

Eun, J.-C. T. (2020). *Handbook of engineering practice of materials and corrosion*.

Springer Nature.

Fourie, A. (2012). Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for

surface deposition. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(11), 919-926.

Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M., & Mulligan, D. R. (2011). Sustainable

development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources policy*, 36(2), 114-122.

Gao, R., Zhou, K., Zhou, Y., & Yang, C. (2020). Research on the fluid characteristics of cemented backfill pipeline transportation of mineral processing tailings.

Alexandria Engineering Journal, 59(6), 4409-4426.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.07.047>

Garcia-Troncoso, N., Baykara, H., Cornejo, M. H., Riofrio, A., Tinoco-Hidalgo, M., &

Flores-Rada, J. (2022). Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01031.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01031>

Gayana, B. C., & Ram Chandar, K. (2018). *Sustainable use of mine waste and tailings with suitable admixture as aggregates in concrete pavements-A review*.

<https://idr.nitk.ac.in/jspui/handle/123456789/13175>

Handbook, S. P. (2009). *WARMAN*.

- Jones, H., & Boger, D. V. (2012). Sustainability and waste management in the resource industries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(30), 10057-10065.
- Kannojiya, V., Deshwal, M., & Deshwal, D. (2018). Numerical Analysis of Solid Particle Erosion in Pipe Elbow. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 5021-5030.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.080>
- Kempton, H., Bloomfield, T. A., Hanson, J. L., & Limerick, P. (2010). Policy guidance for identifying and effectively managing perpetual environmental impacts from new hardrock mines. *Environmental Science & Policy*, 13(6), 558-566.
- Krasyukova, E., Aynbinder, I., & Ivannikov, A. (2021). *A rational approach to the management of underground mining in complex hydrogeological and geomechanical conditions based on a risk assessment*. 684(1), 012006.
- Lèbre, É., Corder, G. D., & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, 107, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>
- Lee, B.-Y., Kim, J.-S., Lee, S.-Y., & Kim, Y. K. (2012). Butt-welding technology for double walled Polyethylene pipe. *Materials & Design*, 35, 626-632.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.014>
- Li, C., Sun, H., Yi, Z., & Li, L. (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1), 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.019>
- López, A., Nicholls, W., Stickland, M. T., & Dempster, W. M. (2015). CFD study of Jet Impingement Test erosion using Ansys Fluent® and OpenFOAM®. *Computer*

Physics Communications, 197, 88-95.

<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.07.016>

Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Science & Business Media.

Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes.

Elements, 7(6), 405-410. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.405>

Lv, X., Shen, W., Wang, L., Dong, Y., Zhang, J., & Xie, Z. (2019). A comparative study on the practical utilization of iron tailings as a complete replacement of normal aggregates in dam concrete with different gradation. *Journal of Cleaner Production*, 211, 704-715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.107>

M55 PE Pipe—Design and Installation, Second Edition. (s. f.). Recuperado 4 de junio de 2022, de <https://engage.awwa.org/PersonifyEbusiness/Store/Product-Details/productId/84701177>

Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.

Melnik, V., & Kozlov, V. (2017). Analysis of research and state of the hydraulic technology and process of coal mining. *Russ. Coal J*, 2, 16-17.

Mohd. Azizli, K., Tan Chee Yau, & Birrel, J. (1995). Design of the Lohan Tailings Dam, Mamut Copper Mining Sdn. Bhd., Malaysia. *Minerals Engineering*, 8(6), 705-712. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(95\)00031-K](https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00031-K)

Moolman, P., & Vietti, A. (2012). Tailings disposal: An approach to optimize water and energy efficiency. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Platinum*, 767-780.

- Moreau, K., Laamanen, C., Bose, R., Shang, H., & Scott, J. A. (2021). Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(6), 1159-1167. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.11.009>
- Mular, A. L., & Bhappu, R. B. (1980). *Mineral processing plant design*. Society for Mining Metallurgy.
- Nesbitt, B. (Ed.). (2007). 8—Valve and piping sizing. En *Handbook of Valves and Actuators* (pp. 193-213). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.1016/B978-185617494-7/50037-7>
- Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Frimmel, H. E., Tolmay, L. C. K., Rose, D. H., Nwaila, P. C., & Bourdeau, J. E. (2021). Valorisation of mine waste - Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example. *Journal of Environmental Management*, 295, 113013.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>
- Oboni, F., & Oboni, C. (2020). *Tailings dam management for the twenty-first century*. Springer.
- Parisher, R. A., & Rhea, R. A. (2022). Chapter 10—Piping Arrangement Drawings, Sections, and Elevations. En R. A. Parisher & R. A. Rhea (Eds.), *Pipe Drafting and Design (Fourth Edition)* (pp. 217-279). Gulf Professional Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822047-4.00003-0>
- Song, X., Pettersen, J. B., Pedersen, K. B., & Røberg, S. (2017). Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore

mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 164, 892-904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.021>

Taha, Y. (2017). *Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites: Évaluations technique et environnementale.*

Thomas, B. S., Damare, A., & Gupta, R. C. (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.075>

Wills, B. A. (2011). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.* Elsevier.

Wilson, G. (1981). Selecting centrifugal slurry pumps to resist abrasive wear. *Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States)*, 33(9).