

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**DISEÑO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS EN LA ESTRUCTURA
DEL SILO SANTA MARÍA POR EL MÉTODO ANALÍTICO**

PRESENTADO POR:

Br. JOSEPH JAHZEEL PAREDES CURASCO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

MG. PAOLA LY TRIVEÑO RAMOS

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS EN LA ESTRUCTURA DEL SILLO SANTA MARÍA POR EL MÉTODO ANALÍTICO

Presentado por: JOSEPH JANZBEL PAREDES CURASCÓ DNI N° 75936443

presentado por: DNI N°:

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO MECÁNICO

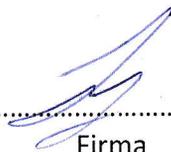
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 26 de AGOSTO de 2025



Firma

Post firma Paola Y. Taveño Ramos

Nro. de DNI 41915368

ORCID del Asesor 0000-0002-3693-9293

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:486960798

Joseph Jahzeel Paredes Curasco

TESIS TERMINADO 05-07-2025 (1) (1).pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:486960798

Fecha de entrega

25 ago 2025, 8:57 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

25 ago 2025, 9:02 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS TERMINADO 05-07-2025 (1) (1).pdf

Tamaño del archivo

10.8 MB

220 páginas

38.554 palabras

210.770 caracteres

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Ante todo, doy gracias a Dios Todopoderoso, fuente de sabiduría y fortaleza, por iluminar mi camino y permitirme alcanzar esta meta.

A mi padre, José Paredes García, por su apoyo incondicional y por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo honesto y la perseverancia.

A mi madre, Rosa Curasco Surco, por ser mi pilar fundamental, por sus sacrificios silenciosos y por infundirme la pasión por el conocimiento.

A mis hermanos, Gabriel y Areli, compañeros de vida y cómplices en cada sueño alcanzado.

A mi novia, Rosa, quien siempre está a mi lado en las buenas y en las malas apoyando que las adversidades que da la vida.

A mis destacados docentes, guías en mi formación profesional, quienes sembraron en mí las semillas del saber y la excelencia.

Este trabajo es el fruto de sus enseñanzas, valores y amor que han forjado al profesional y persona que soy hoy.

Joseph Jahzeel Paredes Curasco

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, elevo mi gratitud a Dios Todopoderoso, por ser mi guía y fortaleza, por iluminar cada paso de mi camino académico y profesional, y por bendecirme con la sabiduría y perseverancia para culminar este logro.

Un reconocimiento especial a mi asesora, Ing. Paola Ly Triveño Ramos, por su invaluable apoyo, paciencia y dedicación durante este proceso. Sus consejos, críticas constructivas y motivación fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, quienes, con su conocimiento, experiencia y pasión por la enseñanza, forjaron en mí las bases técnicas y éticas que hoy definen mi perfil profesional.

A la empresa Makyl ECS, por brindarme la oportunidad de aplicar y ampliar mis conocimientos en el campo minero, y por contribuir significativamente a mi crecimiento profesional. Cada experiencia adquirida durante mi trayectoria con ustedes ha sido un pilar fundamental en mi desarrollo.

Finalmente, a mis compañeros y amigos, por su apoyo incondicional, por los momentos de colaboración y por las risas que aliviaron los desafíos de este camino.

Este logro no sería posible sin cada una de las personas que, de una u otra forma, han dejado huella en mi formación académica y personal.

¡Gracias!

RESUMEN

Esta tesis titulada "Diseño de un Modelo de Análisis de Fallas en la Estructura del Silo Santa María Aplicando Ensayos No Destructivos por el Método Analítico" presenta una metodología innovadora para evaluar la integridad estructural del Silo Santa María, un componente crítico en la industria minera. El estudio emplea técnicas de ensayos no destructivos (END) para identificar y cuantificar defectos como corrosión localizada, pérdida de espesor en placas metálicas (hasta un 66.61% en zonas críticas) y discontinuidades en soldaduras (89% de los puntos inspeccionados presentaron defectos). Los métodos utilizados incluyen inspección visual (norma AWS D1.1), ultrasonido (ASTM E797), líquidos penetrantes (ASTM E165), partículas magnéticas (ASTM E709) y esclerometría (ASTM C805).

Además, se desarrolla un modelo analítico basado en simulaciones numéricas (SAP2000) que integra cargas operativas (material almacenado), ambientales (viento y sismo según normas peruanas E.020 y E.030) y propiedades mecánicas de los materiales. El modelo permite predecir el comportamiento estructural bajo diversas condiciones, identificando zonas de alto riesgo y proponiendo estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo. Los resultados demuestran que la implementación de este enfoque puede reducir costos de mantenimiento en un 30% y extender significativamente la vida útil del silo. La investigación se alinea con estándares internacionales como API 580 y ASME, destacando su aplicabilidad en la gestión de infraestructuras críticas.

Palabras clave: Ensayos no destructivos (END), evaluación de integridad, Simulación numérica y Mantenimiento predictivo.

ABSTRACT

This thesis, titled "Design of a Failure Analysis Model for the Santa María Silo Structure Using Non-Destructive Testing via the Analytical Method", introduces an innovative methodology to assess the structural integrity of the Santa María Silo, a critical component in the mining industry. The study employs non-destructive testing (NDT) techniques to identify and quantify defects such as localized corrosion, thickness reduction in metal plates (up to 66.61% in critical areas), and welding discontinuities (89% of inspected points showed defects). The methods used include visual inspection (AWS D1.1 standard), ultrasound (ASTM E797), liquid penetrants (ASTM E165), magnetic particles (ASTM E709), and sclerometry (ASTM C805).

Furthermore, an analytical model based on numerical simulations (SAP2000) is developed, integrating operational loads (stored material), environmental factors (wind and seismic loads according to Peruvian standards E.020 and E.030), and material mechanical properties.

Keywords: Non-destructive testing (NDT), flaw detection, integrity assessment, visual inspection, penetrant liquids, magnetic particles, structural corrosion, analytical model, numerical simulation, predictive maintenance and welding defects.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO I.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1 Descripción del problema	16
1.2 Formulación del problema	17
1.2.1 Problema general	17
1.2.2 Problemas específicos	18
1.3 Planteamiento de objetivos	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 Justificación.....	19
1.5 Variables.....	20
1.5.1 Variable Independiente	20
1.5.2 Variable Dependiente.....	21
1.5.3 Variable Interviniente	21
1.6 Hipótesis.....	22
1.6.1 Hipótesis General	22
1.6.2 Hipótesis Específicas.....	22
1.7 Limitaciones	23
1.7.1 Alcances	23
1.7.2 Limitaciones Técnicas.....	23
1.8 Metodología de estudio.....	23
1.8.1 Tipo y nivel de investigación.....	23

1.9	Método de la investigación	24
1.10	Diseño de la investigación	25
1.11	Técnicas e instrumentos de recolección de información	25
1.11.1	Técnicas	25
1.11.2	Instrumentos	25
CAPÍTULO II		26
MARCO TEÓRICO		26
2.1	Antecedentes analizados	26
2.1.1	Antecedentes Internacionales	26
2.1.2	Antecedentes Nacionales	28
2.2	Bases teóricas	30
2.2.1	Silos y recipientes de almacenamiento	30
2.2.1.1	Materiales utilizados en el diseño de silos	31
2.2.1.2	Configuración Estructural	31
2.2.1.3	Accesorios de los silos	32
2.2.2	Análisis de cargas debido al material almacenado en silos	33
2.2.2.1	Análisis de presiones internas y externas	33
2.2.3	Procedimientos de inspección de recipientes de almacenamiento	34
2.3	Ensayos no destructivos	35
2.3.1	Inspección Visual (VT)	36
2.3.1.1	Tipos de técnicas de inspección visual	36
2.3.1.1.1	Inspección visual Directa (IVD)	36
2.3.1.1.2	Inspección visual Indirecta o remota (IVD)	37
2.3.1.2	Instrumentación y herramientas para la inspección visual	37
2.3.2	Ensayos por líquidos penetrantes	38
2.3.2.1	Etapas por líquidos penetrantes	38
2.3.2.2	Tipos por líquidos penetrantes	39

2.3.2.2.1	<i>Tipos I Fluorescentes</i>	39
2.3.2.2.2	<i>Tipos II Visibles</i>	40
2.3.2.2.2.1	<i>Clasificación según el tipo de revelador</i>	40
2.3.2.2.2.2	<i>Métodos de inspección por líquidos penetrantes</i>	41
2.3.3	<i>Inspección por partículas magnéticas</i>	42
2.3.3.1	<i>Fundamentos del magnetismo</i>	43
2.3.3.2	<i>Métodos de magnetización de elementos</i>	43
2.3.3.3	<i>Histéresis magnética y desmagnetización</i>	44
2.3.4	<i>Ensayos por radiografías</i>	45
2.3.4.1	<i>Ensayos por termografías</i>	45
2.3.5	<i>Análisis de espesores de cilindros</i>	46
2.3.6	<i>Análisis de zonas críticas en el silo</i>	47
2.3.7	<i>Análisis de la velocidad de corrosión y espesores</i>	47
2.3.8	<i>Determinación de las fallas estructurales de los silos</i>	48
CAPÍTULO III		51
EVALUACION NO DESTRUCTIVA DEL ESTADO ESTRUCTURAL DEL SILO SANTA MARÍA		51
3.1	Caracterización de la estructura del silo Santa María	51
3.2	Análisis de las condiciones operativas y de servicio del silo	52
3.2.1	<i>Cargas operativas</i>	53
3.3	Identificación de posibles fallos y deficiencias estructurales	53
3.3.1	<i>Inspección Visual (Norma AWS D1.1)</i>	53
3.3.2	<i>Ultrasonido (Norma ASTM E797)</i>	65
3.3.3	<i>Líquidos Penetrantes (Norma ASTM E165) y Partículas Magnéticas (Norma ASTM E709)</i>	72
3.3.4	<i>Esclerometría (Norma ASTM C805)</i>	79
3.3.5	<i>Análisis estructural del silo</i>	82

CAPÍTULO IV.	104
DETERMINACION DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE FALLA	104
4.1 Evaluación de la necesidad de un modelo de análisis de fallas	104
4.2 Metodología para el diseño del modelo de análisis de fallas	105
4.3 Descripción de las técnicas y herramientas empleadas en el modelo	107
CAPÍTULO V.	136
DISEÑO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS	136
5.1 Proceso de desarrollo y construcción del modelo de análisis	136
5.2 Validación del modelo a través de estudios preliminares o simulaciones ...	138
5.3 Evaluación de la efectividad del modelo en la detección de fallas	139
5.4 Análisis Estadístico de los resultados de los Ensayo No Destructivos	143
5.4.1 Análisis de varianza (ANOVA)	143
5.4.2 Prueba de Fisher (LSD)	145
5.4.3 Estadístico Descriptivo por Zona	147
5.4.4 Discusión de Resultados	148
CAPÍTULO VI.	151
VIABILIDAD ECONÓMICA DEL MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS	151
6.1 Análisis de la aplicabilidad y escalabilidad del modelo	151
6.2 Consideración de factores económicos y técnicos en la implementación del modelo	152
6.3 Análisis de costos Detallado	156
6.3.1 Gastos operativos anuales	156
6.3.2 Análisis de Mercado y Precios Unitarios	157
6.3.3 Rentabilidad y Retorno de Inversión (ROI)	157
6.3.3.1 Cálculo de Beneficios vs. Costos	158
6.3.4 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)	159
6.3.5 Recomendaciones para Reducción de Costos	160

6.3.6 Factores Técnico-Económicos Clave.....	161
6.4 Discusión sobre los resultados obtenidos y posibles mejoras para futuras investigaciones.....	161
CONCLUSIONES.....	164
RECOMENDACIONES.....	166
BIBLIOGRAFÍA.....	168
ANEXOS	171
ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	171
ANEXO B: ENSAYO MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO	175
ANEXO C: MÉTODO POR LÍQUIDOS PENETRANTES Y PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	179
ANEXO D: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL FLEXOMETRO	181
ANEXO E: CERTIFICADO DE CALIBRACION DE LA GALGA BRIDGE CAM	183
ANEXO F: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL VERNIER	186
ANEXO G: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL YUGO MAGNETICO	188
ANEXO H: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL INDICADOR DE CAMPO MAGNETICO	190
ANEXO I: CERTIFICADO DE CALIBRACION SIUI ULTRASONIDO.....	192
ANEXO J: RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS ABSOLUTOS EN UNIONES SOLDADAS.....	195
ANEXO K: PLANOS DEL SILO SANTA MARÍA	217

Índice de tablas

eTabla 1. Evaluación de espesores de planchas.....	70
Tabla 2. Resumen de los puntos por Líquidos Penetrantes y Partículas Magnéticas.	76
Tabla 3. Datos y resultados del ensayo de esclerometría de los pedestales del silo de finos Santa María.	82
Tabla 4. Propiedad de los sólidos disgregados	87
Tabla 5. Definiciones de las superficies de pared.....	87
Tabla 6. Presiones en el silo en la zona intermedia.	88
Tabla 7. Presiones en el silo en la zona inferior.	89
Tabla 8. Factor de forma (C).....	92
Tabla 9. Factores de zona "Z"	93
Tabla 10. Clasificación de los perfiles de suelos.	95
Tabla 11. Factor de suelo "s"	95
Tabla 12. Periodos.....	95
Tabla 13. Categoría de la edificación.	96
Tabla 14. Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.....	97
Tabla 15. Desplazamientos máximos en las uniones de silo Santa María.	101
Tabla 16. Ratio de participación de las masas.	102
Tabla 17. Periodos y frecuencias de los modos analizados.....	102
Tabla 18. Clasificación de tipos y métodos de examinación penetrante.....	114
Tabla 19. Factores de zona "Z"	129
Tabla 20. Clasificación de los perfiles de suelos.	131
Tabla 21. Factor de suelo "s"	131
Tabla 22. Periodos.....	132
Tabla 23. Categoría de la edificación.	133
Tabla 24. Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.....	134
Tabla 25 Observaciones de los resultados de los END.	139
Tabla 26 Desplazamientos máximos en los pedestales.	141
Tabla 27 Espesores máximos y mínimos de las planchas metálicas.....	142
Tabla 28 Deformaciones máximas de las planchas metálicas.....	142
Tabla 29 Análisis de Varianza (ANOVA).....	144
Tabla 30. Prueba de Fisher – Comparaciones por pares.	146
Tabla 31. Estadísticas Descriptivas por Zona.....	147

Tabla 32. Resumen Análisis de Varianza ANOVA	148
Tabla 33 Cotización de los materiales utilizados.	152
Tabla 34 Materiales utilizados en la ejecución de los END.....	153
Tabla 35 Cotización de las herramientas utilizadas.....	153
Tabla 36 Herramientas utilizadas en la ejecución de los END.	154
Tabla 37 Cotización de los equipos utilizados.	154
Tabla 38 Equipos utilizados en la ejecución de los END.....	154
Tabla 39 Personal requerido durante la ejecución de los END.....	155
Tabla 40 Análisis de los gastos operativos anuales.....	156
Tabla 41 Comparativa de Costos con alternativas Existentes.....	157
Tabla 42 Cálculo de Beneficios vs. Costos.	158
Tabla 43 Retorno sobre la inversión desde el año 1 al año 5.	158
Tabla 44 Retorno sobre la inversión desde el año 5 al año 10.	158
Tabla 45 Inversión y utilidad desde el año 0 al año 5.	159
Tabla 46 Calculo del VAN y la TIR.....	160
Tabla 47 Factores Técnico-Económicos Clave	161
Tabla 48. Matriz de consistencia	171
Tabla 49. Operacionalización de las variables	174
Tabla 50 Desplazamientos absolutos en las uniones de silo Santa María.....	195

Índice de figuras

Figura 1. Inspeccion visual directa con ayuda de aumentos	36
Figura 2. Inspeccion visual indirecta.....	37
Figura 3. <i>Etapas del Ensayo de Liquidos penetrantes</i>	39
Figura 4. <i>Liquidos penetrantes Tipo I: fluorescentes</i>	40
Figura 5. Líquidos penetrantes Tipo II: Método C.....	42
Figura 6. Metodos de magnetizacion.....	43
Figura 7. Yugo magnetico inalambrico	44
Figura 8. Plano del silo Santa Maria.....	52
Figura 9 Ubicación de la zona de inspección parte superior.....	54
Figura 10 Corrosión de plancha y pintura en mal estado.	54
Figura 11 Puntos de corrosión en la base de soporte de la faja.....	55
Figura 12 Ubicación de la zona de inspección parte inferior.	55
Figura 13 Corrosión de plancha, forado y pintura en mal estado.	56
Figura 14 Desprendimiento del soporte a estructura de silo Santa María.....	56
Figura 15 Ubicación de la zona de inspección parte frontal.	57
Figura 16 Oxidación en plancha ASTM-A36 con pintura en mal estado.....	57
Figura 17 Desprendimiento de pintura en la parte inferior y superior del silo.	58
Figura 18 Ubicación de la zona de inspección parte central.	58
Figura 19 Corrosión y pintura en mal estado en la parte lateral del silo.....	59
Figura 20 Ubicación de la zona de inspección parte de la cúpula.....	59
Figura 21 Cúpula de la estructura del silo en mal estado con forados en la plancha.....	60
Figura 22 Ubicación de la zona de inspección parte de la estructura.	60
Figura 23 Pedestal metálico con presencia de oxidación y corrosión.....	61
Figura 24 Pedestal metálico con presencia de oxidación y corrosión.....	61
Figura 25 Ubicación de la zona de inspección pedestal P3.....	62
Figura 26 Arista del pedestal fracturado.....	62
Figura 27 Ubicación de la zona de inspección pedestal P6.....	63
Figura 28 Visualización de la malla armada del pedestal y sus aristas fracturadas.....	63
Figura 29 Ubicación de la zona de inspección parte inferior.	64
Figura 30 Deformación y corrosión de las aletas de conexión.	64
Figura 31 Perímetro del chupe de descarga con presencia de corrosión y forado en las planchas.....	65

Figura 32 Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona superior del silo SANTA MARIA.....	66
Figura 33 Zona Superior del silo, Spot en UTTK-01 y UTTK-02.	66
Figura 34 Zona Superior del silo, Spot en UTTK-06 y UTTK07.....	67
Figura 35 Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona media del silo SANTA MARIA.....	67
Figura 36 Zona Media del silo, Spot en UTTK-9 y UTTK-10.....	68
Figura 37 Zona Media del silo, Spot en UTTK-25 y UTTK-26.....	68
Figura 38 Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona inferior del silo SANTA MARIA.....	69
Figura 39 Zona Inferior del silo, Spot en UTTK-19 y UTTK-20.....	69
Figura 40 Zona Inferior del silo, Spot en UTTK-27 y UTTK-28.....	70
Figura 41 Esquema de puntos de Inspección en la cúpula del Silo	73
Figura 42 Esquema de puntos de Inspección en la zona Media e inferior del Silo.	74
Figura 43 Unión soldada (PT- 1) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador	74
Figura 44 Unión soldada (PT- 2) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador	75
Figura 45 Unión soldada (PT- 3) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.	75
Figura 46 Unión soldada (PT- 4) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.	75
Figura 47 Unión soldada (PT- 5) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.	76
Figura 48. Ubicación de la cimentación de pedestales del silo de Finos SANTA MARIA.	79
Figura 49 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del primer pedestal (P1).....	80
Figura 50 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del segundo pedestal (P2)..	80
Figura 51 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del tercer pedestal (P3).	80
Figura 52 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del cuarto pedestal (P4).	81
Figura 53 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del quinto pedestal (P5).....	81
Figura 54 Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del sexto pedestal (P6).....	81
Figura 55. Presiones en el cuerpo de un cilindro UNE-ENV 1991-4.....	84

Figura 56. Representación de cargas en la tolva	85
Figura 57. Distribución de las presiones en el silo en la zona intermedia.	88
Figura 58. Mapa eólico del Perú. Fuente: Norma E.020.....	91
Figura 59. Zonas sísmicas. Fuente: Norma E.030.....	94
Figura 60. Espectro de respuesta para el análisis estructural.	98
Figura 61. Modelo estructural del silo Santa María.	100
Figura 62. Esfuerzos en las planchas de acero del silo.....	101
Figura 63 No linealidad de un transductor dual.	112
Figura 64 Presiones en el cuerpo de un cilindro UNE-ENV 1991-4.....	122
Figura 65 Representación de cargas en la tolva.	124
Figura 66. Mapa eólico del Perú. Fuente: Norma E.020.....	126
Figura 67. Zonas sísmicas. Fuente: Norma E.030.....	130
Figura 68 Resistencia de los pedestales medidos por END.	141
Figura 69 Medias de espesor por zona con error estándar.	145
Figura 70 Diagrama Fisher LSD 95% para comparaciones pares de zonas	147
Figura 71 Ubicación de las intervenciones en la zona superior del silo Santa María.....	175
Figura 72 Ubicación de las intervenciones en la zona media del silo Santa María.	176
Figura 73 Ubicación de las intervenciones en la zona inferior del silo Santa María.	177
Figura 74 Ubicación de las intervenciones en la zona inferior del silo Santa María.	178
Figura 75 Ubicación de los puntos de Inspección en la cúpula del silo Santa María.	179
Figura 76 Ubicación de los puntos de Inspección en la zona Media e inferior del silo..	180
Figura 77 Ubicación de los pedestales de la cimentación del silo.	180

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En la industria minera y de almacenamiento a granel, los silos son estructuras críticas que deben garantizar seguridad y funcionalidad durante su vida útil. Sin embargo, debido a las cargas dinámicas, la corrosión, el desgaste por material almacenado y los esfuerzos cíclicos, estas estructuras están expuestas a fallas que pueden comprometer su integridad. Tradicionalmente, la evaluación de su resistencia estructural se ha realizado mediante ensayos destructivos (ED), los cuales implican tomar muestras del material, dañar secciones de la estructura o someterla a cargas extremas hasta provocar fisuras. Aunque estos métodos proporcionan datos precisos sobre las propiedades mecánicas del material, generan costos adicionales por reparaciones, tiempos de inactividad y riesgos operativos.

Frente a esta problemática, los Ensayos No Destructivos (END) han surgido como una alternativa eficiente, ya que permiten evaluar la integridad de las estructuras sin alterar su funcionalidad ni requerir intervenciones invasivas. Según INFINITIA (2020), los END son "pruebas usadas de forma inocua en los materiales, es decir, no perjudican su funcionamiento, su forma original ni su estructura". No obstante, su aplicación en silos industriales requiere modelos analíticos robustos que interpreten correctamente los datos obtenidos para predecir fallas sin subestimar o sobrestimar riesgos.

En la compañía minera donde se ubica el Silo Santa María—uno de los más utilizados en sus operaciones—, se ha dependido históricamente de ensayos destructivos para evaluar su resistencia. Esto ha generado:

- Costos elevados por reparaciones posteriores a los ensayos (transporte de materiales, mano de obra y paradas técnicas).

- Riesgo de daños acumulativos, ya que cada intervención destructiva debilita zonas críticas de la estructura.
- Limitaciones en la frecuencia de evaluación, pues los ED no pueden realizarse de manera continua sin afectar la operatividad del silo.

La problemática específica de esta investigación radica en la falta de un modelo analítico confiable que permita evaluar las fallas en el Silo Santa María mediante END. Dado que este silo almacena materiales valiosos y debe cumplir con normativas de seguridad estrictas, es crucial implementar una metodología que:

- Minimice el impacto económico al eliminar daños colaterales por ensayos.
- Garantice precisión en la detección de fisuras, corrosión o deformaciones.
- Sea reproducible para evaluaciones periódicas sin interrumpir operaciones.

La propuesta de este estudio es diseñar un modelo de análisis de fallas basado en END (como ultrasonido, líquidos penetrantes o emisiones acústicas) combinado con métodos analíticos (ej: simulación por elementos finitos), que permita predecir y gestionar riesgos en el silo de manera más eficiente que los métodos tradicionales.

1.2 Formulación del problema

Por las anteriores consideraciones el presente proyecto pretenderá responder la siguiente interrogante:

1.2.1 Problema general

¿Cómo se puede desarrollar un enfoque efectivo para identificar y analizar posibles fallas en la estructura del silo Santa María utilizando métodos de ensayos no destructivos, tales como la inspección visual, medición de espesores por ultrasonido, inspecciones por líquidos penetrantes, inspecciones por partículas magnéticas y las inspecciones por esclerometría?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué fundamentos teóricos y técnicos (normativas, modelos de falla y parámetros de diseño) son necesarios desarrollar o adaptar para realizar un análisis confiable de fallas en la estructura del silo Santa María?
- ¿Cuáles son los posibles fallos y deficiencias estructurales presentes en la estructura del silo Santa María que podrían comprometer su seguridad y funcionamiento?
- ¿Como diseñar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María?
- ¿Cómo se podrá elaborar por medio de ensayos no destructivos un modelo de análisis de fallas en silos?
- ¿Como comprobar la viabilidad económica del modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María?

1.3 Planteamiento de objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar el diseño de un modelo de análisis de fallas en la estructura en el silo Santa María aplicando ensayos no destructivos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer los fundamentos teóricos y técnicos necesarios para el análisis de fallas en la estructura del silo Santa María.
- Realizar una evaluación no destructiva del estado estructural del silo Santa María mediante la caracterización detallada de su diseño, materiales de construcción y condiciones operativas, con el fin de identificar posibles fallos y deficiencias estructurales que puedan afectar su seguridad y funcionamiento.

- Determinar por medio de ensayos no destructivos el modelo de análisis de fallas en silos.
- Diseñar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María.
- Evaluar la viabilidad económica del modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María

1.4 Justificación

La presente investigación se justifica debido a los procesos de evaluación y desarrollo de los análisis de trabajos en silos, ya que actualmente solo se trabaja en función de técnicas de análisis mediante ensayos destructivos. Este es un proceso muy accidentado, ya que se espera que las fallas se presenten de forma visible en la estructura del silo para tomar acciones correctivas.

Por esta razón, se está realizando la presente investigación, con el objetivo de diseñar un modelo para la determinación y análisis de fallas en silos mediante la aplicación de ensayos no destructivos (END).

El análisis de fallas en silos mediante END es fundamental por varias razones, siendo la seguridad una de las más importantes. Los silos son estructuras críticas en la industria agrícola y en otras áreas donde se almacenan materiales a granel. Las fallas en estos silos pueden provocar accidentes graves, como colapsos estructurales o fugas de materiales peligrosos. A través de los END, es posible detectar defectos incipientes o problemas de integridad estructural antes de que ocurran fallas catastróficas, lo que permite tomar medidas preventivas.

Por ello, los ensayos no destructivos que se realizarán en este proyecto serán: la inspección visual (AWS D1.1), la medición de espesores por ultrasonido (ASTM E 797), las inspecciones por líquidos penetrantes (ASTM E 165), las inspecciones por partículas

magnéticas (ASTM E 709) y las inspecciones de la resistencia mediante el ensayo de esclerometría (ASTM C 805).

La detección temprana de fallas a través de ensayos no destructivos puede ayudar a evitar costosos tiempos de inactividad y reparaciones mayores. Identificar y corregir problemas en etapas tempranas resulta más económico que enfrentar fallas totales o realizar reemplazos completos de las estructuras.

Asimismo, los datos obtenidos mediante END pueden proporcionar información valiosa sobre el comportamiento estructural de los silos, lo que puede contribuir a la optimización del diseño y mejorar su durabilidad y resistencia ante futuras cargas.

La relevancia de esta investigación se basa en el auge de nuevas tecnologías de ensayos no destructivos, que permiten realizar diferentes tipos de evaluaciones en las estructuras, mejorando la calidad de los análisis de los resultados obtenidos de los componentes y de este modo extendiendo la vida útil de los elementos analizados.

1.5 Variables

1.5.1 Variable Independiente

Aplicación de los ensayos no destructivos

Definición operacional. Se define la presente variable, por los análisis que se presentan en la estructura de componentes ya sean metálicos o de concreto, que se realizan sin la necesidad de extraer muestras por medio de procesos mecánicos destructivos, en cambio se analizan por medio de instrumentos y técnicas, que evalúan la constitución del material del componente, sus propiedades que trabajan y como estas están variando en función al trabajo realizado, presentando fallas en el proceso y siendo registradas para su posterior evaluación y cuantificación.

Dimensión. Las dimensiones de la presente variable son:

- Fallas en la estructura

- Discontinuidades en la soldadura

Indicadores. Los indicadores por analizar en la presente variable son:

- Fallas visuales
- Puntos de corrosión y desgaste
- Numero de componentes desgastados

1.5.2 Variable Dependiente

Estructura del silo Santa María

Definición operacional. Se define la presente variable a partir de los componentes y las estructuras metálicas que conforman el silo Santa María. Estos serán analizados mediante los ensayos no destructivos, y se elaborará un modelo de análisis de fallas. Además, se evaluarán sus dimensiones y las propiedades del material constructivo.

Dimensión. Las dimensiones de la presente variable son:

- Dimensiones del silo
- Capacidad de almacenaje
- Factores de almacenamiento (tipo de material a almacenar, propiedades corrosivas)
- Discontinuidades en las uniones del silo

Indicadores. Los indicadores por analizar en la presente variable son:

- Fallas visuales
- Puntos de corrosión y desgaste
- Numero de componentes desgastados

1.5.3 Variable Interviniente

Diseño del modelo de análisis de fallas

Definición Operacional. Se define la presente variable a partir del modelamiento de un análisis con la finalidad de evaluar las fallas que pueda presentar el silo Santa Maria,

utilizando los resultados de los ensayos no destructivos. Dichos resultados serán registrados con el objetivo de obtener un modelo más exacto y permita mejorar la evaluación de fallas en los silos.

Dimensión. Las dimensiones de la presente variable son:

- Evaluación de fallas
- Análisis de fracturas
- Evaluación de espesores

Indicadores. Los indicadores por analizar en la presente variable son:

- Fallas visuales
- Puntos de corrosión y desgaste
- Numero de componentes desgastados
- Registro de fallas en la estructura del silo

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Se podrá realizar el diseño de un modelo de análisis de fallas en la estructura en el silo Santa María aplicando ensayos no destructivos.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- Al realizar una evaluación por ensayos no destructivos de la estructura del silo Santa María, se puede identificar posibles fallos y deficiencias estructurales que puedan afectar su seguridad y funcionamiento.
- Se puede diseñar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María
- Se puede elaborar por medio de ensayos no destructivos el modelo de análisis de fallas en silos

- El modelo de análisis de fallas en la estructura del silo Santa María es viable económicamente.

1.7 Limitaciones

1.7.1 Alcances

Se ejecutó en el Silo Santa María aplicando ensayos no destructivos por el método analítico.

1.7.2 Limitaciones Técnicas

La asignación de fondos para la investigación y aplicación de ensayos no destructivos en la estructura del silo Santa María está sujeta a las limitaciones presupuestarias de la compañía minera. Por lo tanto, este proyecto se desarrolla únicamente con la tecnología de ensayos no destructivos ya existente en la empresa.

La principal limitación técnica del presente trabajo de investigación es que la adquisición de datos se basa únicamente en ensayos no destructivos. Aunque estos métodos ofrecen ventajas importantes en términos de preservación de la integridad estructural y permiten realizar análisis sin dañar la estructura del silo, también presentan ciertas limitaciones que pueden afectar la precisión de los datos recopilados.

1.8 Metodología de estudio

1.8.1 Tipo y nivel de investigación

- Tipo de investigación

Como señala Borja Suarez (2016), los estudios pueden categorizarse según sus objetivos. Entre las distintas clasificaciones, se encuentra la investigación tecnológica, orientada a resolver problemas concretos mediante el desarrollo o mejora de herramientas aplicables en contextos reales. Por ello, este trabajo se enmarca dentro de dicha categoría, ya que busca diseñar un modelo para el análisis de fallas, empleando los principios de los ensayos no destructivos.

- Nivel de la investigación

De acuerdo con Hernández (2010), los estudios pueden clasificarse según su enfoque metodológico. En este contexto, se encuentra la investigación cuantitativa, la cual se basa en el análisis de variables mediante la evaluación de parámetros específicos, permitiendo establecer resultados en función de las modificaciones aplicadas. Por tal razón, este trabajo adopta un enfoque cuantitativo, ya que se evaluará la variable del silo Santa María a través de mediciones y datos numéricos.

Sera evaluado y variado en función a las variables del análisis de las estructuras, en este caso variables del comportamiento de su material base y las fuerzas que se verán afectadas en él.

1.9 Método de la investigación

La metodología que se aplicara a la presente investigación, según lo analizado por (Borja Suarez, 2016), se clasifica por el tipo no experimental de la subclase Explicativa, ya que este tipo de metodología, se analiza las causas de la investigación y como estas van a afectar el proceso de la evaluación y desarrollo de la investigación, determinando el efecto entre las variables.

Por este motivo la presente investigación será de este tipo, ya que se va a diseñar un modelo de análisis de fallas para mejorar la calidad del proceso de inspección en la estructura del silo Santa María, siendo este la causa del desarrollo de la presente investigación y marcara la relación entre las técnicas de la evaluación de los ensayos no destructivos.

Para realizar la evaluación de los análisis de fallas al ser aplicado el método de ensayos no destructivos, va a tener que ser aplicado un análisis basado en un modelo analítico y matemático, que será aplicado en la forma de una simulación del Silo Santa María, donde se van a demostrar que los análisis de fallas en función a los ensayos serán correctos.

1.10 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación, según lo analizado por (Borja Suarez, 2016) y (Hernández, 2010) , se caracteriza por ser del tipo no experimental, ya que se va a realizar el diseño de un equipo, donde no se realizará ningún proceso aleatorio, sino un desarrollo metodológico y directo aplicando los principios del diseño de modelos de análisis de fallas.

1.11 Técnicas e instrumentos de recolección de información

1.11.1 Técnicas

Las técnicas de recolección que se utilizaron en la presente investigación serán las siguientes:

- Técnica documental

Se analiza según la investigación de manuales de aplicación de los ensayos no destructivos, los materiales de selección y utilización de los componentes para su construcción y análisis de los procesos de fallas

- Técnica de observación

Se analizará el desarrollo de la inspección en el campo, los procedimientos de mantenimiento y detección de fallas en el silo, como estos van a ser evaluados para determinar el proceso de mantenimiento más correcto.

1.11.2 Instrumentos

Los instrumentos de recolección que se han tomado en la presente investigación son:

- Base de datos de las dimensiones del silo a evaluar
- Planos de la ubicación
- Manuales de diseño
- Tablas de datos para analizar los valores de seguridad en la estructura y su validación según el proceso de soldadura y diseño.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes analizados

2.1.1 *Antecedentes Internacionales*

Castillo (2021), esta investigación tiene como primordial objetivo realizar una serie de pasos (procedimiento) para el layout de silos de cemento, precisando los indicadores específicos que se van a estudiar para obtener datos sustanciales para la investigación, estos indicadores son capacidades, el tipo de material en los silos, la geometría de los silos, el transporte requerido, la ubicación exacta donde se realizara la adquisición de las cargas, la selección del flujo y la clase de fondo, y por último las características intrínsecas del cemento, obteniendo resultados de los silos importantes en cuanto a soporte de las estructuras de 80 toneladas y de 160 toneladas. Por lo tanto, el investigador concluyo que esta técnica para calcular es viable y factible, ya que, si puede desenvolverse para cualquier clase de silo o cualquier tipo de pared respecto al almacenamiento de cemento, fundamentándose estrictamente en la normativa del diseño y también en las teorías comparadas dentro del rubro de construcción de silos para el almacén granular. También esta herramienta de cálculo permite satisfactoriamente obtener las cargas que repercuten en los silos, así como jerarquizar la geometría de estos silos para obtener un efecto de descarga másico, para así poder evitar la inestabilidad de los silos mediante la cuantificación y verificación del espesor de este mismo, ya que debe ser el más adecuado y aceptado posible. También otra conclusión importante del investigador es que esta herramienta de cálculos permite destacar al técnico las tensiones a las que tiene que estar sometida las paredes, para poder identificar e inspeccionar más a fondo el soporte de las estructuras del silo, sus placas

de anclaje y la distribución correcta de las cargas para que no superen la presión máxima requerida.

Jaramillo y Reyes (2019), la presente investigación tiene como objetivo fundamental reestructurar y escoger el tipo de material para el anillo y la tapa, para la parte de arriba del silo de forraje, para ello tendrán que examinarse tres clases de materiales para cambiar lo mencionado anteriormente, mediante el enfoque que da la normativa técnica API 650. Se efectuaron exámenes y análisis químicos para verificar la composición del forraje, de esta manera se podrá establecer que componentes son los que posibilitan y potencializan el procedimiento de corrosión. Mediante estas pruebas se obtuvieron resultados en cuanto a las tres clases de acero: El primero sería el acero AISI 1045, este tiene una aleación al carbono, el segundo sería un acero inoxidable 316L y el tercero es otro acero inoxidable 3Cr12. Este acero más principal es el requerido AISI1045, ya que posee una vida útil de hasta 20 años y es un buen indicador para la empresa, ya que se necesita duración y calidad; y también está dentro de la familia AISI1040, que es un acero al carbono que no alterará la concepción química de la estructura del anillo.

Los investigadores concluyeron, que en la tapa para el forraje del silo, muestra un incremento de agua lo que ocasionó un deterioro muy fuerte en el metal, se dice que el fluoruro de hidrógeno es un elemento altamente corrosivo, y se realizaron pruebas y análisis obteniendo que este compuesto estuvo presente de manera diluida, ya que propiamente tanto el forraje sólido como líquido de la tapa no poseía este compuesto, por lo tanto, se necesita muchas revisiones e inspecciones en cuanto a los componentes corrosivos del agua, ya que estos deterioran los aceros, es decir, es imprescindible evitar mayores deterioros de los aceros para que sus estructuras se mantengan estables y tengan una vida útil adecuada.

Miño (2020) desarrolló una investigación basada en el código *AWS D1.1*, enfocada en la detección, clasificación y evaluación de discontinuidades en soldaduras de estructuras

metálicas. Su metodología combinó enfoques descriptivos, cuantitativos y cualitativos, siguiendo los lineamientos del Artículo 9 del Código ASME Sección V y estándares ASTM, aplicables en ingeniería estructural.

Para validar los resultados, se emplearon probetas de acero A-36, fabricadas conforme a *AWS D1.1*. Los ensayos demostraron una alta efectividad en la detección de defectos, con los siguientes porcentajes de precisión:

- 90,10% en inspección visual vs. líquidos penetrantes visibles.
- 91,07% en partículas magnéticas vs. líquidos penetrantes fluorescentes.
- 100% en ultrasonido.
- 97,86% en líquidos penetrantes visibles vs. radiografía.

Los resultados confirmaron que estos métodos no destructivos son altamente confiables para identificar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, superando en todos los casos el 90% de efectividad al compararse entre sí.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Berroa (2019) desarrolló una investigación aplicada cuyo objetivo principal consistió en implementar sistemas de control de calidad durante las etapas de limpieza superficial y aplicación de recubrimientos en tanques de almacenamiento de líquidos. El estudio adoptó una metodología explicativa y correlacional, mediante la cual se evaluó la relación entre los procedimientos de control de calidad y los resultados operacionales obtenidos. Los principales hallazgos demostraron que la estandarización de procesos según normativas nacionales e internacionales, junto con la implementación de guías técnicas específicas, permitió optimizar significativamente la ejecución de los trabajos. Como resultado estratégico, se logró el compromiso de la alta dirección para alinear estos protocolos con los objetivos organizacionales, identificando y documentando los procesos

críticos que contribuyen al cumplimiento de la misión empresarial. La aplicación sistemática de diversos ensayos de control de calidad tanto en campo como en laboratorio - especialmente en las fases de preparación superficial y recubrimiento- evidenció impactos operativos concretos: eliminación de reprocesos, reducción de quejas y reclamos, así como cumplimiento en los tiempos de entrega. La investigación concluyó que la implementación rigurosa de estos controles, incluso en sus requisitos mínimos, permite reducir a cero las no conformidades y mejorar sustancialmente la eficiencia operativa en este tipo de procesos industriales.

Peralta (2018), en su trabajo de investigación de grado el cual desarrolla como objetivo principal la aplicación de los líquidos penetrantes es una buena alternativa como técnica no destructiva para evaluar la calidad de la soldadura en los tanques de envejecimiento con refuerzo en los anillos superiores, la metodología empleada fue de tipo experimental, descriptiva, donde utiliza conceptos básicos y definiciones relacionados a la soldadura como son los códigos aplicables, los ensayos no destructivos-tintes penetrantes (Superficiales) y las imperfecciones comunes (fisuras, falta de fusión, falta de penetración, inclusiones sólidas, gaseosas, quemones y las discontinuidades de forma), obteniéndose como resultado que tanto la inspección visual y tintes penetrantes son capaces de localizar defectos superficiales, cuya corrección inmediata antes de la puesta en marcha del sistema genera una disminución en los costos; concluyéndose así que en el proceso de soldadura de tanques la norma API 650, 653 establece variables esenciales y de haber algún cambio en el valor de una de las variables conlleva a la emisión de un nuevo procedimiento de soldadura (WPS).

En su investigación académica, Ttito (2017) desarrolló un estudio centrado en evaluar la efectividad de los ensayos no destructivos (NDT) aplicados a tuberías de acero utilizadas para el transporte de diésel B-5. El trabajo demostró que estos métodos de

inspección representan la alternativa más confiable para identificar defectos y prevenir posibles fugas en este tipo de instalaciones. La metodología empleada combinó aspectos descriptivos con componentes experimentales, fundamentándose en normativas internacionales de soldadura y procedimientos de control de calidad estandarizados. El análisis incluyó diversos tipos de discontinuidades, clasificándolas en superficiales (como fisuras y falta de fusión) e internas (incluyendo falta de penetración e inclusiones de diversa naturaleza). Un aspecto fundamental del proceso fue la implementación previa de documentos técnicos como los Procedimientos de Soldadura (WPS), Registros de Calificación de Procedimiento (PQR) y Calificaciones de Soldadores (WPQ), que establecieron los parámetros base para la ejecución del trabajo. Los resultados obtenidos evidenciaron que los NDT permiten detectar anomalías tanto en las soldaduras como en el material base de las tuberías, facilitando correcciones inmediatas que reducen costos operativos. La investigación concluyó que la aplicación sistemática de estas técnicas de inspección, particularmente la combinación de métodos superficiales y volumétricos, constituye una estrategia esencial para garantizar la integridad estructural en sistemas de transporte de hidrocarburos, al permitir la identificación temprana de defectos que podrían comprometer la seguridad operativa de las instalaciones.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 *Silos y recipientes de almacenamiento*

Los silos son estructuras o recipientes fijos que sirven para depositar y mantener materiales en condiciones de temperatura, húmeda y presiones determinadas, además son parte integrante de un ciclo de acopio, por lo general son estructuras circulares totalmente cerradas con un fondo cónico truncado, se utilizan de manera vertical y poseen alturas que superan más de dos veces su diámetro. Actualmente este tipo de diseño se ha adaptado a otros usos que puede requerir la industria, utilizándose silos, para depósitos de materiales

como cemento, así mismo también ha sido utilizado por el área militar empleándose como depósito de misiles, por lo que se debe de presentar instalaciones apropiadas para su conservación, recepción rápida, limpieza y secado, si se va a utilizar para largos periodos de tiempo (Williams & Gracey, 2016).

2.2.1.1 Materiales utilizados en el diseño de silos

Los silos pueden ser construidos en hormigón armado, aluminio o aleaciones de acero inoxidable. El hormigón destaca por su alta resistencia a los esfuerzos de compresión, aunque su desempeño a la tracción es limitado, aproximadamente diez veces menor, por lo que su uso masificado se realiza en combinación con el acero, formando el hormigón armado, que ofrece buena resistencia tanto a los esfuerzos de compresión como a los de tracción (Díaz et al., 2017).

Por otro lado, los silos de acero presentan ventajas estructurales muy marcadas en relación al concreto armado, como una alta resistencia por cada unidad de peso, soldabilidad, ductilidad y facilidad de montaje. Aunque los silos de acero inoxidable requieren unos procesos de fabricación más complejos, poseen elementos aleantes que mejoran considerablemente su resistencia a la corrosión (Ramos, 2018).

2.2.1.2 Configuración Estructural

Para los autores Cevallos y Peralta (2019), son varios los miembros estructurales con los que cuenta un silo, los cuales en grupo poseen la capacidad de almacenaje en su interior de materias primas, así también se posibilita su fácil extracción sin presentar ningún tipo de dificultad, la forma de un silo requiere una tolva la cual en su parte inferior permite que se muevan los materiales los cuales se encuentran en el interior, es importante señalar que cada parte integrante del silo se encuentra edificado del mismo material, siendo cada uno único además de contar con una forma específica que asegura el cumplimiento de sus funciones.

Placas. Son elementos que forman el cuerpo del silo por lo que si se compara el largo y su ancho su espesor es muy pequeño, para almacenar diferentes materias primas se construirá una tolva y un cilindro hueco ambos, por lo que las placas serán unidas a través de cordones de soldadura vertical y horizontal por su mayor volumen por lo que en la mayoría de los casos no es factible construir las paredes del silo, utilizando una sola placa.

Soportes. Los soportes se ubican alrededor de un silo, dotan de estabilidad por ende son simétricos, reciben la cantidad de peso de la estructura y también del material que se va a almacenar, esta cantidad de peso se va a transmitir por las soldaduras y por los soportes por lo que estos, se apoyan en una base la cual se encuentra debidamente soldada a esta.

Base. Es la parte donde los soportes descansan y la cual está formado elemento de estructura como son perfiles del tipo W, así también tubos de sección circular los cuales se encuentran unidos a través de una soldadura obteniéndose un rectángulo, que es donde finalmente los soportes descansan

Tapas. Conformado por placas circulares las cuales poseen un espesor igual o mayor a las utilizadas en las placas del cuerpo del silo, se caracterizan por ser removibles, aseguran el acceso al silo tanto para introducir materia prima como para desalojar el material, están unidas a las estructuras mediante un número específico de tuercas y pernos.

2.2.1.3 Accesorios de los silos

Dentro de los accesorios que sirven para esta clase de recipientes se puede observar manjoles, válvulas que sirven de seguridad, y para ciertos casos elementos que permiten conocer la cantidad de cierto material que se almacena, no obstante los silos cuentan con estructuras que permiten a cierto personal a tener acceso a sus áreas superiores, permitiendo la fácil ejecución de sus trabajos ya sea de mantenimiento o de inspección, por lo que estos elementos móviles como escaleras deben de cumplir con la seguridad necesaria para que el operador realice y cumpla sus actividades (Asprilla, 2021).

2.2.2 Análisis de cargas debido al material almacenado en silos

Es de acuerdo al diseño y al análisis que se va realizar a un silo que las cargas pueden variar, además existen otras razones entre ellas el lugar donde está ubicado el silo, el destino que va cumplir o la función que va realizar el mismo, también importante mencionar la estructura que va poseer, por lo que en consideración a estos factores es que se va lograr identificar los distintos estados de carga que se deben analizar y diseñar en el silo, no obstante podemos señalar que la carga de presión interna es ocasionada ya sea por el material líquido o sólido que se procura almacenar en el silo, empero estas varían teniendo como referencia las dimensiones del silo ya sea el diámetro o la altura, además de las propiedad que presente el material en almacenaje (Calero y Gonzales, 2021).

2.2.2.1 Análisis de presiones internas y externas

En el caso de silos cilíndricos, las presiones normales, así como los esfuerzos a manera de fricción es decir verticales que sufren debido al material que se almacena en su interior, varían por la altura del silo, dicha presión normal provoca que los esfuerzos se den a lo largo de la circunferencia que posee el silo además de manera longitudinal tanto en el cilindro como en la tolva, produciéndose también una fricción vertical que origina la compresión de las paredes (Vallejo, 2018).

Para el almacenaje en silos podemos observar dos estados, sin distinción en cualquiera de estas formas se puede cargar o descargar el material almacenado así mismo también se puede mantener el material, por lo que va resultar diferente el análisis de las presiones que ejercen al material sobre la pared de los silos, dentro de la primera forma se puede observar al material que se mantiene almacenado que es cargado o descargado pero sin la intervención de un fluido de aire o de algún adicional que facilite su movilidad o disminuya su cohesión, es así que la materia almacenaje observa un comportamiento distinto a un fluido, por lo que las teorías aplicadas a cada caso, consideran esta situación como punto

de partida para formular ecuaciones de calculo; la segunda forma se da en el caso que el material es mantenido, cargado o descargado con la participacion de un fluido, el cual va permitir su movimiento y por ende se va rebajar la cohesion y la friccion en las determinadas paredes del silo, es asi que la materia se comporta como un fluido observandose presion hidrostatica pero con la existencia de una diferencia con los liquidos esto debido a la friccion, cohesion, y asi tambien menor al de un material pulverizado (Vallejo, 2018).

2.2.3 Procedimientos de inspección de recipientes de almacenamiento

Para garantizar la seguridad en los requerimientos que presenten los silos, se evaluara el estado de los recipientes a través de ensayos no destructivos los cuales esclarecerán si los recipientes se encuentran aptos para proseguir con su funcionamiento normal, así mismo también se identificara si es necesario reparaciones o si de manera definitiva se indica que se encuentra fuera de operación, no obstante estos procedimientos permitirán iniciar la proyección del tiempo de una posterior inspección (Revenet , 1992).

Es el Código API 510 el que exige la selección del método o si fuera el caso el conglomerado de métodos que se van a utilizar los cuales van a depender de requerimientos establecidos en el código, esto para la inspección de recipientes sometidos a presión, por lo que antes se lleva a cabo un examen de las zonas críticas detallándose cuales son los lugares que pueden encontrarse futuras fallas en los recipientes analizados.

Para realizar la inspección de los recipientes y según los parámetros establecidos en el Código API 510 primero se tendrá en cuenta el estado físico en el que observan los recipientes así mismo el ambiente donde operan, de acuerdo con estos datos es que se utilizaran técnicas END para la inspección de los recipientes. Así mismo tanto el tamaño, como la ubicación, orientación y el tipo de defectos que causan el rechazo de un elemento se encuentran establecidos en el Código ASME Sección VIII División I.

Previo al inicio de la inspección, es fundamental asegurar que el recipiente se encuentre completamente evacuado, sin rastros de sustancias almacenadas, fluidos o presión residual, verificando meticulosamente estas condiciones antes del acceso. El personal inspector debe equiparse obligatoriamente con indumentaria de protección integral que incluya vestimenta técnica especializada, gafas de seguridad, casco protector, guantes industriales y botas de seguridad certificadas. Paralelamente, se requiere la verificación funcional de todos los equipos de medición e instrumentos de inspección que serán utilizados durante el proceso.

Es imprescindible establecer un protocolo de comunicación previa que informe detalladamente a todo el personal involucrado sobre las actividades programadas, especificando el número exacto de operarios que ingresarán al espacio confinado. Adicionalmente, se debe implementar un sistema de alerta bidireccional que permita notificar inmediatamente al equipo interno sobre cualquier actividad externa que pueda generar interferencias acústicas o vibratorias durante las labores de inspección.

Para los casos que requieran acceso a zonas elevadas superiores a dos metros o áreas de alcance restringido, es obligatorio disponer plataformas de trabajo seguras, sistemas de escalamiento certificados y equipos de protección contra caídas, garantizando así las condiciones óptimas para la ejecución segura de todas las tareas de evaluación. Este protocolo integral asegura el cumplimiento de los más altos estándares de seguridad industrial durante los procesos de inspección en espacios confinados y trabajos en altura.

2.3 Ensayos no destructivos

Los métodos de evaluación no destructiva (END) permiten analizar materiales y estructuras sin afectar su uso. Detectan fallas como grietas o corrosión, miden características físicas y aseguran calidad, manteniendo intacto el componente evaluado.

2.3.1 Inspección Visual (VT)

Dentro de ellos podemos mencionar a la Inspección Visual, la cual es una técnica que permite detectar una variedad de defectos superficiales como son la contaminación, la corrosión, el acabado superficial y además si se presenta discontinuidades en uniones, siendo este el método con el que iniciará la inspección de los silos y el cual se encuentra por encima de cualquier otro método, detallándose su alcance de la siguiente manera (Revenet , 1992)

Para cada recipiente se deberá inspeccionar de manera visual externa es preferible que dicha operación se realice por lo menos en un tiempo de 6 meses, por lo que la inspección comprenderá, la condición de las escaleras, los soportes, las reparaciones externas, finalmente la alineación general de soportes y todos los elementos estructurales que los conforman.

2.3.1.1 Tipos de técnicas de inspección visual

Existen dos tipos de inspección visual:

2.3.1.1.1 Inspección visual Directa (IVD)

Se denomina Inspección Visual Directa (IVD) cuando existe una línea de visión despejada entre el área evaluada y el inspector. Este método se ejecuta principalmente a simple vista, aunque puede complementarse con instrumentos ópticos como espejos o lupas para ampliar o redireccionar el campo visual cuando sea necesario.

Figura 1.

Inspeccion visual directa con ayuda de aumentos



2.3.1.1.2 Inspección visual Indirecta o remota (IVD)

La Inspección Visual Indirecta (IVD) es una técnica de END que permite evaluar componentes o estructuras en lugares de difícil acceso o condiciones peligrosas, utilizando dispositivos ópticos o sistemas de adquisición de imágenes sin necesidad de observación directa.

Figura 2.

Inspeccion visual indirecta



2.3.1.2 Instrumentación y herramientas para la inspección visual.

1. Proyectores de perfiles

Facilitan el examen detallado de componentes de reducidas dimensiones

2. Sistemas endoscópicos

Posibilitan la observación interna de cavidades y estructuras de acceso restringido

3. Dispositivos de aumento

- Lupas convencionales: Amplifican la visión superficial

- Comparadores: Analizan diferencias en acabados superficiales mediante patrones de referencia

4. Instrumentos dimensionales

- Cintas métricas y reglas: Verifican conformidad geométrica
- Galgas especializadas: Controlan parámetros de soldaduras
- Falsas escuadras: Chequean alineación y posicionamiento de elementos

5. Termometría industrial

Registra valores térmicos durante operaciones de precalentamiento y procesos entrepasos.

2.3.2 *Ensayos por líquidos penetrantes*

Técnica no destructiva de amplio uso industrial que permite identificar imperfecciones abiertas en la superficie de componentes metálicos, independientemente de sus características magnéticas. El procedimiento emplea un líquido colorante de alta penetrabilidad que contiene un pigmento rojo brillante, diseñado para infiltrarse en cualquier discontinuidad superficial accesible.

2.3.2.1 *Etapas por líquidos penetrantes*

Las cinco etapas siguientes se ejecutan en el ensayo por Líquidos Penetrantes.

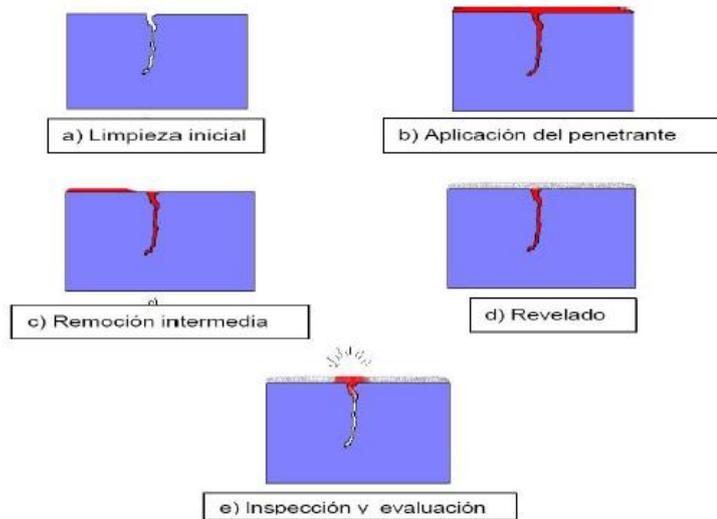
- a. Limpieza inicial: se remueve la suciedad de la superficie de la pieza y del interior de los defectos.
- b. Penetración: se aplica un penetrante (líquido con alta capilaridad) sobre la pieza a ser examinada y se lo deja penetrar dentro de los defectos.
- c. Limpieza intermedia: se remueve el exceso de penetrante de la superficie de la pieza.
- d. Revelado: se aplica un revelador blanco a la superficie de la pieza que extrae el

penetrante de los defectos.

e. Observación: se observan las indicaciones de los defectos bajo luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en el caso de los penetrantes fluorescentes.

Figura 3.

Etapas del Ensayo de Líquidos penetrantes



2.3.2.2 Tipos por líquidos penetrantes

2.3.2.2.1 Tipos I Fluorescentes

Los líquidos penetrantes fluorescentes se emplean para mejorar significativamente la detección de discontinuidades superficiales. Su propiedad distintiva es la capacidad de emitir fluorescencia al ser excitados por luz ultravioleta (UV), lo que genera un marcado contraste para identificar defectos.

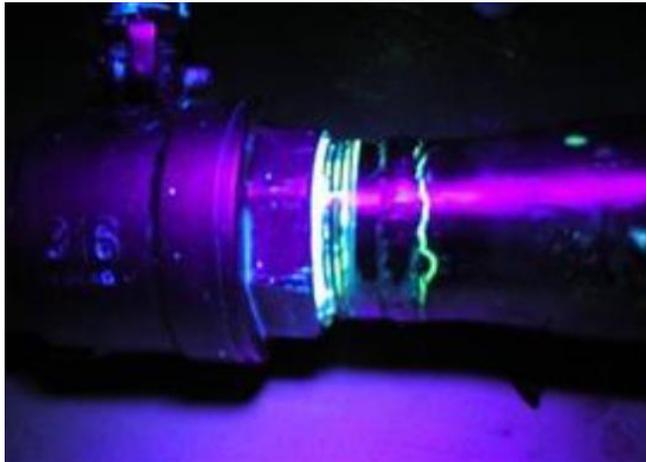
Estos penetrantes, que generalmente presentan coloración verde bajo luz UV, se categorizan en cinco niveles según su capacidad de detección:

- Nivel ½ - Sensibilidad ultra baja
- Nivel 1 - Sensibilidad baja

- Nivel 2 - Sensibilidad media
- Nivel 3 - Sensibilidad alta
- Nivel 4 - Sensibilidad muy alta

Figura 4.

Líquidos penetrantes Tipo I: fluorescentes



2.3.2.2.2 Tipos II Visibles

Los penetrantes visibles se distinguen por su coloración roja intensa, siendo claramente perceptibles bajo condiciones normales de iluminación. En cuanto a su capacidad de detección, estos materiales presentan una sensibilidad comparable al nivel 1 de los penetrantes fluorescentes.

2.3.2.2.2.1 Clasificación según el tipo de revelador

Los reveladores cumplen la función esencial de evidenciar y amplificar las discontinuidades superficiales. Existen cuatro variedades principales:

- **Forma A:** Polvos secos, principalmente empleados con penetrantes fluorescentes (Tipo I)

- **Forma B:** Soluciones hidrosolubles, compatibles con ambos tipos de penetrantes (I y II), especialmente formulados para materiales no hidrosolubles
- **Forma C:** Suspensiones acuosas, aplicables a inspecciones con penetrantes Tipo I y II
- **Forma D:** Preparaciones no acuosas de elevada sensibilidad, adecuadas para ambos tipos de inspección

2.3.2.2.2 Métodos de inspección por líquidos penetrantes

La clasificación de los métodos de inspección se establece según el procedimiento de eliminación del penetrante:

- Método A (Hidrosoluble): Permite la remoción directa con agua tras la inspección. Aunque favorece la rapidez del proceso, su composición química limita su sensibilidad de detección (Carrión Viramontes et al., 2003).
- -Método B. Emulsión, base aceite. Luego de aplicar el líquido penetrante sobre la superficie, se coloca una emulsión a base de aceite, que únicamente actúa en el excedente, lo que lo hace fácil de remover con agua y evitando eliminar el líquido de las grietas. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)
- Método C. Penetrante, base solvente. El funcionamiento es igual que el líquido soluble en agua, a diferencia que este usa un solvente. La ventaja que tiene en comparación con el primer método es que tiene mayor sensibilidad, pero es más complicada su preparación. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

- Método D. Emulsión, base agua. Es igual al método B, con la diferencia que la emulsión que se aplica al excedente del líquido penetrante soluble en agua. Con este método se puede obtener una muy alta sensibilidad. (Carrión Viramontes, Lomelí González, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003)

Figura 5.

Líquidos penetrantes Tipo II: Método C.



2.3.3 Inspección por partículas magnéticas

Este método resulta ser un complemento a la inspección que verifica las condiciones en las que se presentan las soldaduras las cuales unen los accesorios de los recipientes, dicho método permite un mayor alcance en la detección de defectos así como una mayor rapidez de resultados en comparación con el método de tintas penetrantes, su procedimiento consiste en evaluar el material que ya se encuentra inspeccionado, definir exactamente el método a utilizar, ver la condición de la superficie, definir la instrucción de limpieza y remoción de la pintura u otro tipo de elementos que presente, definir iluminación el equipo y los instrumentos a utilizar, detallar las zonas donde se realizara el análisis, definir la secuencia de pasos por los cuales se va realizar la inspección y finalmente la interpretación así como la evaluación de las discontinuidades (Revenet , 1992).

2.3.3.1 Fundamentos del magnetismo

El comportamiento ferromagnético se explica mediante el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, donde los electrones en rotación generan momentos magnéticos. La polaridad depende del sentido de giro electrónico:

- **Materiales no magnéticos:** Presentan momentos magnéticos opuestos que se anulan
 - **Materiales ferromagnéticos:** Mantienen momento magnético neto distinto de cero
- El **magnetismo inducido** se produce mediante:

1. **Proceso electromagnético:** Aplicación de corriente eléctrica que genera campo magnético
2. **Inducción inversa:** Campo magnético externo induce corriente en conductores

Figura 6.

Metodos de magnetizacion.



2.3.3.2 Métodos de magnetización de elementos

Yugos magnéticos:

Generan campo magnético mediante corriente alterna/directa o imanes permanentes para una detección óptima cuando las discontinuidades son perpendiculares a las líneas de campo

- Tipos:

- **Permanentes:** Autónomos energéticamente, pero limitados en potencia y capacidad de desmagnetización
- **Electroimanes:** Bobinas electrificadas para campo magnético ajustable

Figura 7.

Yugo magnetico inalambrico



Otros métodos:

- **Bobinas:** Inducción longitudinal sin contacto directo con la pieza
- **Conductores centrales:** Para piezas huecas, generando campo magnético circular
- **Contacto directo:** Alta corriente aplicada a la pieza para magnetización completa
- **Puntas de contacto:** Detección de grietas perpendiculares al campo generado

2.3.3.3 Histéresis magnética y desmagnetización

Los materiales ferromagnéticos conservan magnetización residual post-inspección, requiriendo procesos de desmagnetización cuando:

- Interfieren con nuevas magnetizaciones (suma vectorial no deseada)
- Afectan operaciones posteriores (maquinado, soldadura, recubrimientos)
- Generan interferencia con equipos adyacentes

2.3.4 Ensayos por radiografías

Técnica volumétrica avanzada que utiliza radiación ionizante (Rayos X/gamma) para evaluar discontinuidades internas. La radiografía digital amplía sus aplicaciones mediante software especializado, permitiendo:

- Medición de espesores en tuberías aisladas
- Análisis cuantitativo de defectos
- Procesamiento mejorado de imágenes

Mecanismo operativo:

1. La radiación atraviesa el material con absorción variable según discontinuidades
2. La película radiográfica registra diferencias en intensidad
3. La revelada evidencia la localización precisa de anomalías internas

2.3.4.1 Ensayos por termografías

Es importante señalar que este tipo de ensayo no genera ningún tipo de alteración o de daño de manera permanente al objeto a inspeccionar, por lo que la termografía es un estudio que sirve para observar la temperatura de un determinado objeto, así mismo permite captar la información de una manera inmediata viendo está en una base de datos la cual va a permitir que se realice un seguimiento de evolución en la temperatura de una manera mucho más fácil. Esta técnica es empleada de manera habitual para el mantenimiento predictivo ya sea de maquinaria industrial, instalaciones eléctricas y detección de gases y fugas por lo que se puede obtener un mejor conocimiento de las instalaciones realizadas en cuanto a su estado térmico, también se pueden ubicar fugas y puntos de actuación así evitar postergar los procesos de producción además se podrá reducir los tiempos de reparación y las operaciones de mantenimiento como también se logrará mayor eficiencia energética y se

podrá alargar la vida útil del equipo (The American Society of Mechanical Engineers, 2013).

2.3.5 Análisis de espesores de cilindros

Para calcular el requerimiento mínimo de espesores en las paredes de los silos se ejercen presiones en las paredes de los mismos, además según las fórmulas del código ASME Sección VIII División I - Recipientes a presión (2013), por lo que en consideración a estos valores se pueden modificar los cálculos de los factores de junta y los del espesor por corrosión. Asimismo, el Código ASME Sección VIII División I, se utiliza por su alcance el cual desarrolla generalidades de recipientes a presión, expidiendo lineamientos no solo sobre la calidad de los materiales si no del diseño de los mismos que formaran parte integrante del recipiente, también señalan los caracteres de la soldadura a utilizar, dichos factores van a permitir aumentar la seguridad y modificar los esfuerzos ya que se va poder inspeccionar durante la fabricación del mismo y posteriormente cuando sea puesto en servicio, siendo entonces este análisis fundamentado, y necesario ya que le permitirá el propietario y al usuario del recipiente, usar de manera segura y confiada estos elementos en el proceso productivo.

Así también podemos indicar que si el grosor es chico en cotejo con las otras extensiones, las placas o membranas, las cuales son sometidas a esfuerzos de tracción y compresión y resultan en una mayor presión ejercida sobre ellas, estos esfuerzos de membrana son esfuerzos promedio, los cuales son estimados uniformes cuando actúan en dirección tangencial a su superficie y en la sección transversal de las paredes del recipiente por lo que se observa que las paredes de los recipientes brindan resistencia a la flexión si los esfuerzos son considerados.

2.3.6 *Análisis de zonas críticas en el silo*

Se considera una zona crítica de un silo, al área que se establece como superficie total ya sea el área interna o externa del recipiente, siendo que presenta menores márgenes de seguridad debido a que presenta mayores deformaciones o esfuerzos en comparación con otras áreas del silo, un análisis mediante un programa computacional va permitir optimizar la identificación de las zonas críticas, ya que estas solo se harán en las zonas donde el silo es más propenso a fallar, no obstante si el silo presenta una variación en la condición de su diseño como pérdida de material por motivo de corrosión o incremento de presión, se presentaría una posibilidad menor de afrontar esta variación si la comparamos con otras zonas que presentan mayor seguridad (Calero Perez & Gonzales Rojas , 2021).

2.3.7 *Análisis de la velocidad de corrosión y espesores*

En cuanto a la velocidad de corrosión que se presenta en los recipientes esta se pueda dar debido al contacto en el que se encuentran las superficies con elementos orgánicos o inorgánicos así pueden ser contacto con agua contaminada, limpia o con la atmosfera, así también las formas de deterioro suelen ser químicas, electroquímicas, mecánicas o puede presentar una combinación de las tres, es importante señalar que este deterioro puede acelerarse debido a la temperatura, a las vibraciones o al flujo del (Vallejo Sagastequi, 2018)

Otro aspecto es la corrosión la cual es la principal causa del deterioro en los recipientes que se encuentran cerrados, por lo que esta figura se presenta en cualquier parte del recipiente, que el deterioro sea severo esta influenciado por la resistencia que presenta a la corrosión este debido al material por el cual está construido el recipiente. Puede presentarse corrosión si existe un proceso de carga y descarga de elementos como cemento de manera adicional también puede presentar erosión, esto debido al movimiento del cemento al interior de este recipiente, así mismo también puede existir estos dos fenómenos,

pero separadamente (Servicio de Innovación y Apoyo Técnico a la Docencia y a la Investigación UMH, 2016)

Los silos y recipientes están sujetos a procesos de degradación principalmente causados por la humedad del material almacenado y el flujo de aire durante las operaciones de carga y descarga. Estos factores generan corrosión, la cual produce una pérdida progresiva de material que se manifiesta significativamente en períodos prolongados.

Además de la corrosión, existe el fenómeno de erosión, que consiste en el desgaste mecánico de las superficies debido al impacto continuo de partículas sólidas o líquidas. Este tipo de deterioro es particularmente común en zonas de flujo turbulento, como cambios de dirección o áreas con alta velocidad de partículas. La erosión suele presentarse en áreas localizadas, mostrando superficies brillantes e irregulares al tacto, lo que dificulta su detección temprana.

Un tercer mecanismo es la cavitación, caracterizada por la formación de cavidades, agujeros redondeados y ondulaciones en la dirección del flujo. A diferencia de la erosión general, la cavitación produce patrones morfológicos específicos que permiten identificarla durante las inspecciones.

Estos tres procesos -corrosión, erosión y cavitación- actúan de manera combinada, acelerando el deterioro estructural. Mientras la corrosión es de naturaleza electroquímica, la erosión y cavitación son mecánicas, aunque todas comprometen la integridad de los equipos de almacenamiento a mediano y largo plazo (Adaptado de Miguel, 2021).

2.3.8 Determinación de las fallas estructurales de los silos

Dentro de las fallas estructurales que podemos observar encontramos la de material defectuoso, ya que es a raíz de este que se puede presentar problemas en el funcionamiento de los silos, o también puede ser que presente una no correcta fabricación. Podemos observar los problemas de fugas, fisuras, corrosión excesiva, puede darse el caso que los defectos en

los recipientes no sean visibles durante su fabricación por lo que al momento de ponerlos al servicio podrían aparecer grietas y ampollas, estos problemas pueden prevenirse siempre y cuando se apliquen los requerimientos establecidos por el Código ASME Sección VIII División I para el control de calidad de los materiales previo a la fabricación. No obstante, si existe un error en la utilización y selección del material las fallas aparecerán debido a que el material se encontrara expuesto y se evidenciara su incompatibilidad con el ambiente (Berroa Huarachi, 2019).

Otro de los factores es la fabricación defectuosa, la cual consiste en una mala soldadura, fabricación con dimensiones fuera de las tolerancias permitidas por el Código ASME tratamientos superficiales inadecuados, , instalación incorrecta del equipo interno, ajuste incorrecto de los elementos, por lo que la falla de elementos así como generar concentradores de esfuerzos solo producen las técnicas incorrectas de fabricación, dichas errores significan poco cuidado en las técnicas de soldadura o de falta de penetración, fusión, fisuras, inclusiones de escoria, porosidad, posteriormente sea cualquiera de estas casusa las que producirán fisuras en el material o completas fallas.

Entonces la corrosión puede producir una uniforme perdida de material o una forma de picadura irregular, la cual es difícil de ubicar, siendo una medición de espesores vital para su precaución, los pasos y criterios a realizar en una evaluación de espesores que deberán tomarse en cuenta son los que a continuación se cita ¹

- Serán tomadas las lecturas de los espesores en sentido longitudinal cuando los esfuerzos circunferenciales que se presentan en los recipientes son mayores a los longitudinales.

- Los espesores serán tomados en sentido circunferencial cuando el esfuerzo longitudinal evidenciado en el recipiente es mayor a los circunferenciales.
- Para calcular el valor del espesor utilizado de los recipientes se deberá observar el promedio de espesores los cuales son medidos en un área corroída la cual es de considerable tamaño, y en donde se tomará la lectura de los espesores espaciada igualmente.
- Si se observa un área corroída de considerable tamaño, se tomará en cuenta para el cálculo del espesor promedio primero los recipientes con diámetros interiores menores o iguales a 150 cm (60 in), la longitud debe ser la mitad del diámetro o 50 cm (20 in), la que sea menor. segundo el diámetro interior mayor a 150 cm (60 in), la longitud debe ser una tercera parte del diámetro o 100 cm (40 in). Tercero el total del área donde las picaduras son más profundas que el espesor permisible para la corrosión, no debe ser mayor a 7 pulgadas cuadradas (45 cm²) dentro de cualquier círculo de 8 in (20 cm) de diámetro (7% del área del círculo).

CAPÍTULO III.

EVALUACION NO DESTRUCTIVA DEL ESTADO

ESTRUCTURAL DEL SILO SANTA MARÍA

3.1 Caracterización de la estructura del silo Santa María

El Silo Santa María es una estructura de almacenamiento industrial diseñada para contener materiales a granel utilizados en procesos mineros. Su configuración estructural está compuesta por un cilindro metálico de gran altura, soportado por una cimentación de concreto reforzado. La estructura presenta una cúpula en la parte superior y una tolva cónica en la base, facilitando la descarga controlada del material almacenado.

La estructura metálica del silo está construida con acero estructural ASTM A36, con placas soldadas y reforzadas en puntos críticos. Las uniones soldadas cumplen con la normativa AWS D1.1, mientras que la cimentación de concreto armado sigue las especificaciones de la norma ACI 318. El silo está expuesto a condiciones ambientales que incluyen variaciones de temperatura, humedad y cargas dinámicas asociadas a los procesos de carga y descarga de material.

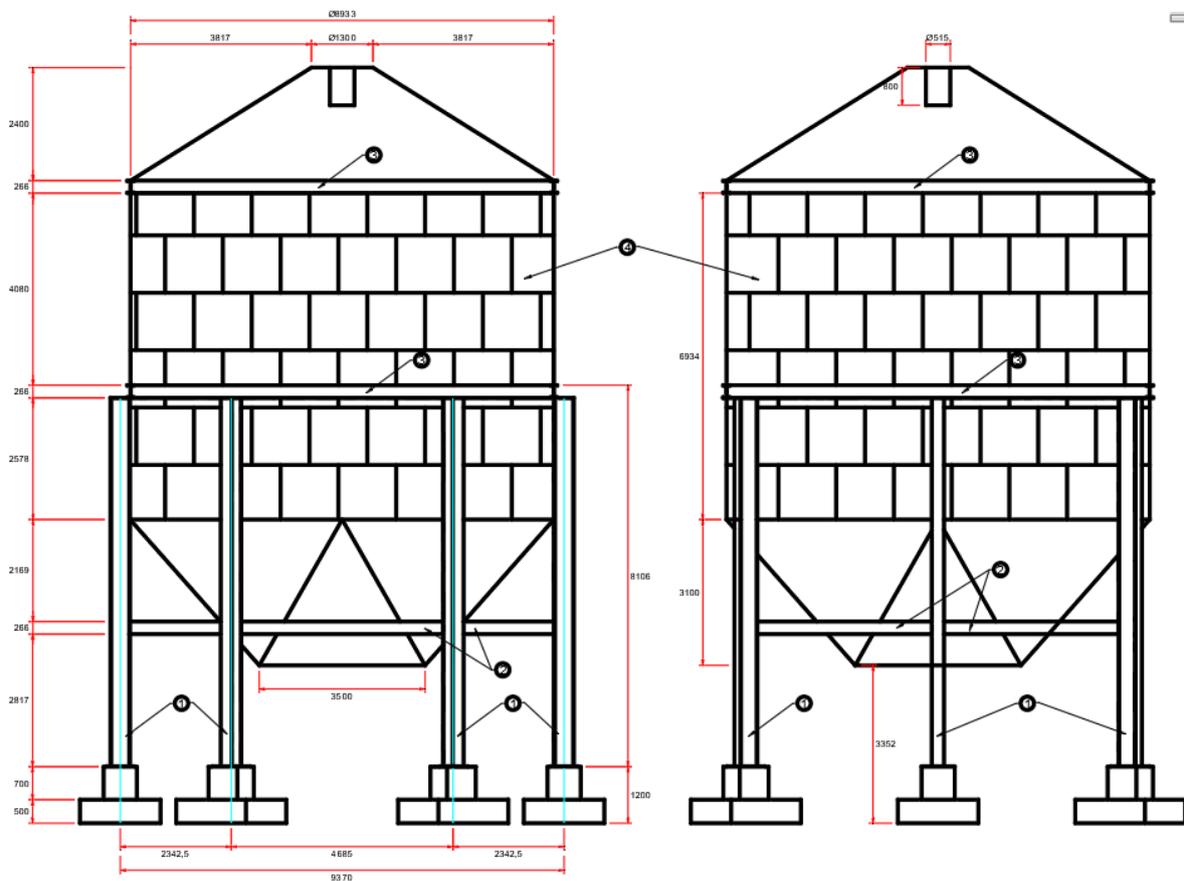
Los principales elementos estructurales del silo incluyen:

- Cilindro principal: responsable del almacenamiento de material, sometido a cargas axiales y presiones internas.
- Tolva de descarga: Diseñada para garantizar un flujo controlado del material almacenado.
- Cimentación: Estructura de concreto reforzado que proporciona estabilidad y soporte.

- Anillos de refuerzo: Elementos estructurales distribuidos a lo largo del cilindro para evitar deformaciones excesivas.
- Escaleras y plataformas de acceso: Componentes auxiliares que permiten la inspección y mantenimiento del silo.

Figura 8.

Plano del silo Santa Maria.



3.2 Análisis de las condiciones operativas y de servicio del silo

El Silo Santa María está sometido a diversas condiciones operativas que influyen en su desempeño estructural y funcionalidad. Estas condiciones incluyen factores como las cargas dinámicas durante el proceso de llenado y vaciado, la exposición a agentes corrosivos y el impacto de variaciones ambientales en su integridad estructural.

3.2.1 Cargas operativas

Las cargas operativas del silo incluyen:

- *Carga del material almacenado:* Genera esfuerzos internos en la estructura, afectando la resistencia de las placas de acero y los refuerzos estructurales.
- *Cargas dinámicas:* Ocurren durante el proceso de carga y descarga, causando vibraciones y posibles impactos en la estructura.
- *Cargas externas:* Como viento y sismo, que pueden inducir esfuerzos adicionales en la estructura.

3.3 Identificación de posibles fallos y deficiencias estructurales

Los ensayos no destructivos (END) realizados en el silo Santa María permitieron identificar deficiencias críticas que comprometen su integridad estructural. A continuación, se detallan los hallazgos clave, organizados por técnica de inspección y respaldados por las normas y datos de los ensayos realizados:

3.3.1 Inspección Visual (Norma AWS D1.1)

Para el desarrollo del ensayo de inspección visual se inicia con la preparación de la superficie mediante la eliminación de contaminantes como fluidos, grasas y suciedad mediante disolventes o métodos mecánicos. Posteriormente, se inspeccionará el silo, sus vigas de soporte y los pernos, identificando zonas críticas con herramientas de magnificación como lupas y espejos.

Durante la inspección, se identificaron ocho puntos críticos:

Punto 01: Se observó la presencia de corrosión por picadura y pintura en mal estado como se puede observar en las siguientes figuras.

Figura 9
Ubicación de la zona de inspección parte superior.

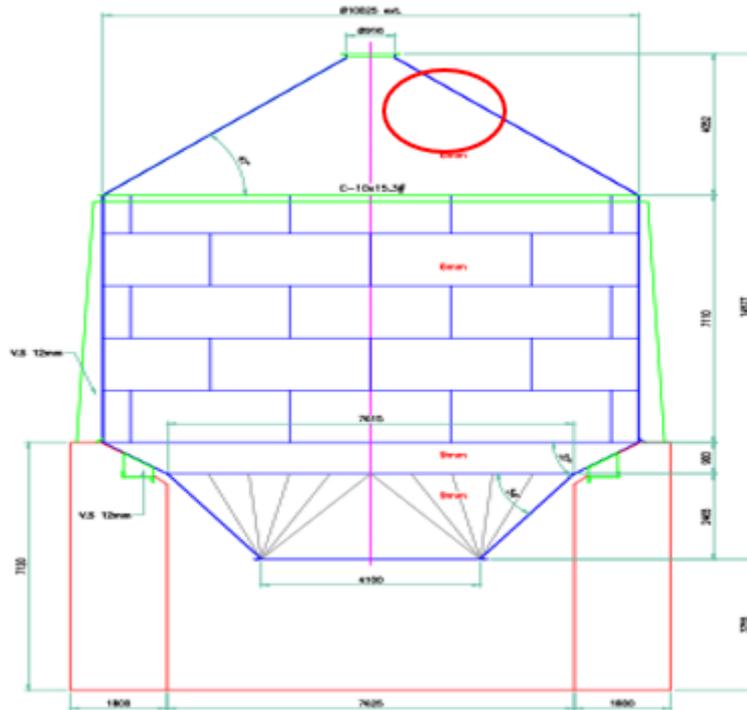


Figura 10
Corrosión de plancha y pintura en mal estado.



Figura 13

Corrosión de plancha, forado y pintura en mal estado.



Figura 14

Desprendimiento del soporte a estructura de silo Santa María.



Punto 03: Se observo la presencia de corrosión de la plancha, pintura en mal estado en todo el alrededor de la parte inferior y superior del SILO SANTA MARIA.

Figura 15

Ubicación de la zona de inspección parte frontal.

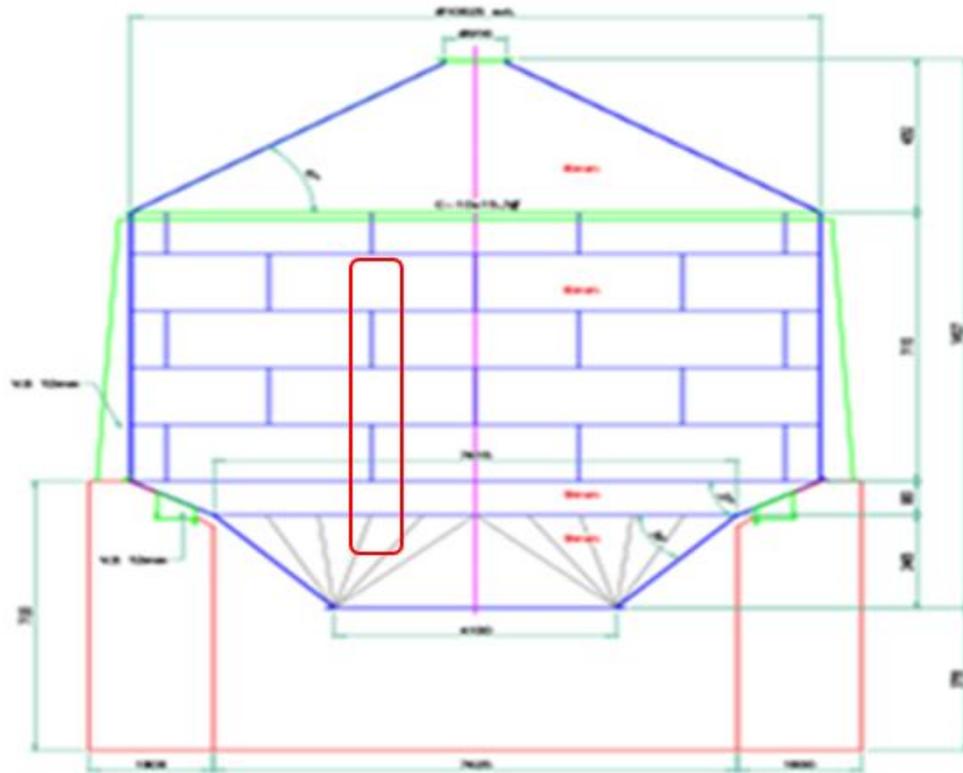


Figura 16

Oxidación en plancha ASTM-A36 con pintura en mal estado.



Figura 17

Desprendimiento de pintura en la parte inferior y superior del silo.



Punto 04: Se observo la presencia de corrosión, pintura en mal estado, forados en las planchas en la parte superior de la cúpula de la estructura del silo.

Figura 18

Ubicación de la zona de inspección parte central.

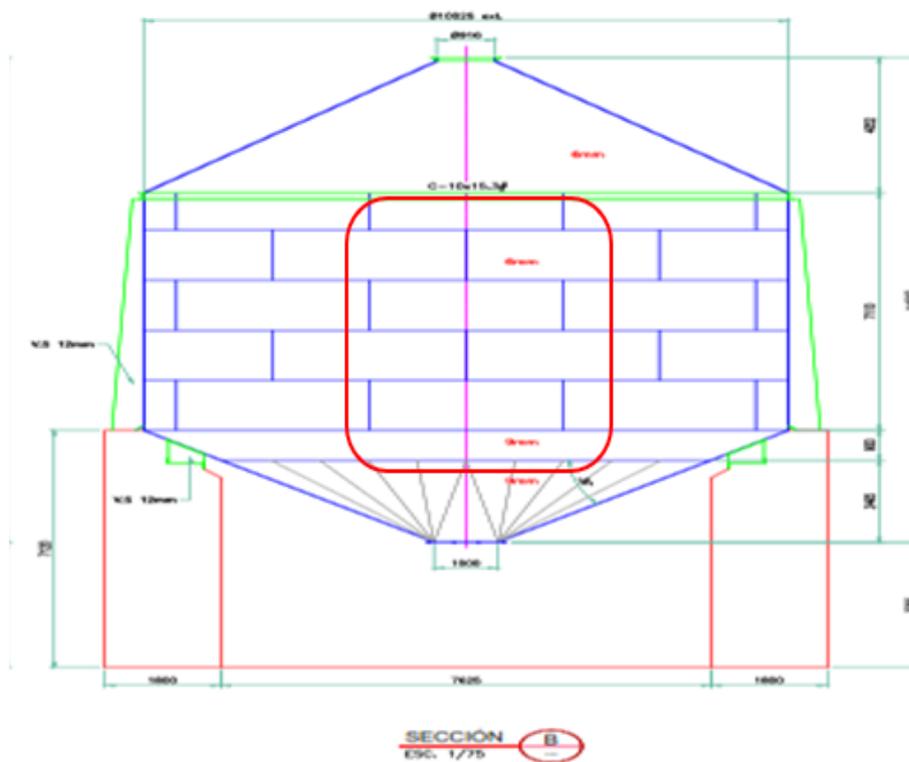


Figura 19

Corrosión y pintura en mal estado en la parte lateral del silo.



Figura 20

Ubicación de la zona de inspección parte de la cúpula.

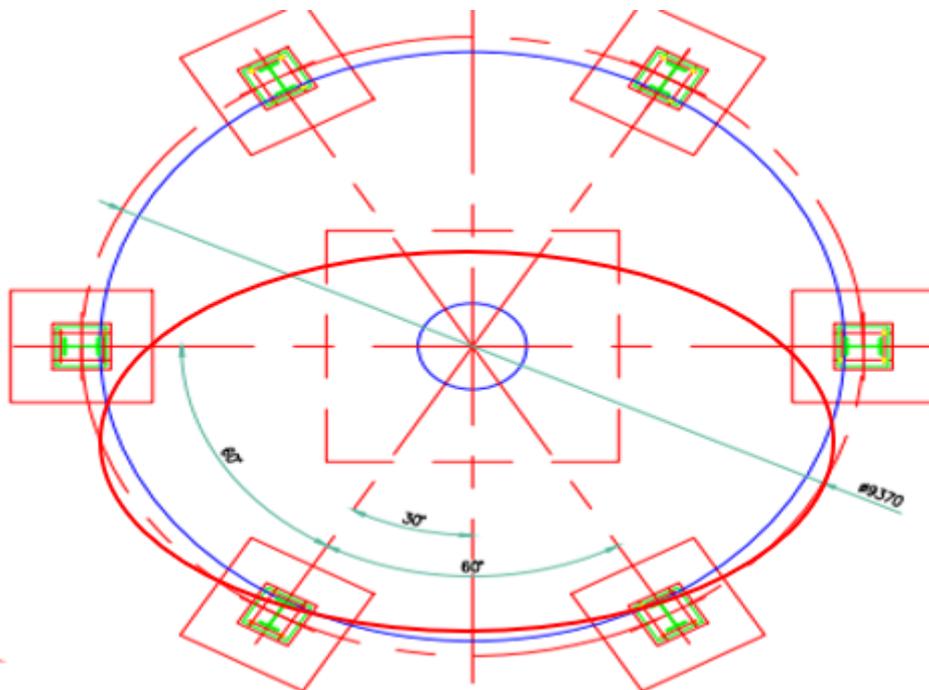


Figura 21

Cúpula de la estructura del silo en mal estado con forados en la plancha.



Punto 05: Se observo el pedestal del silo con corrosión y pintura en mal estado.

Figura 22

Ubicación de la zona de inspección parte de la estructura.

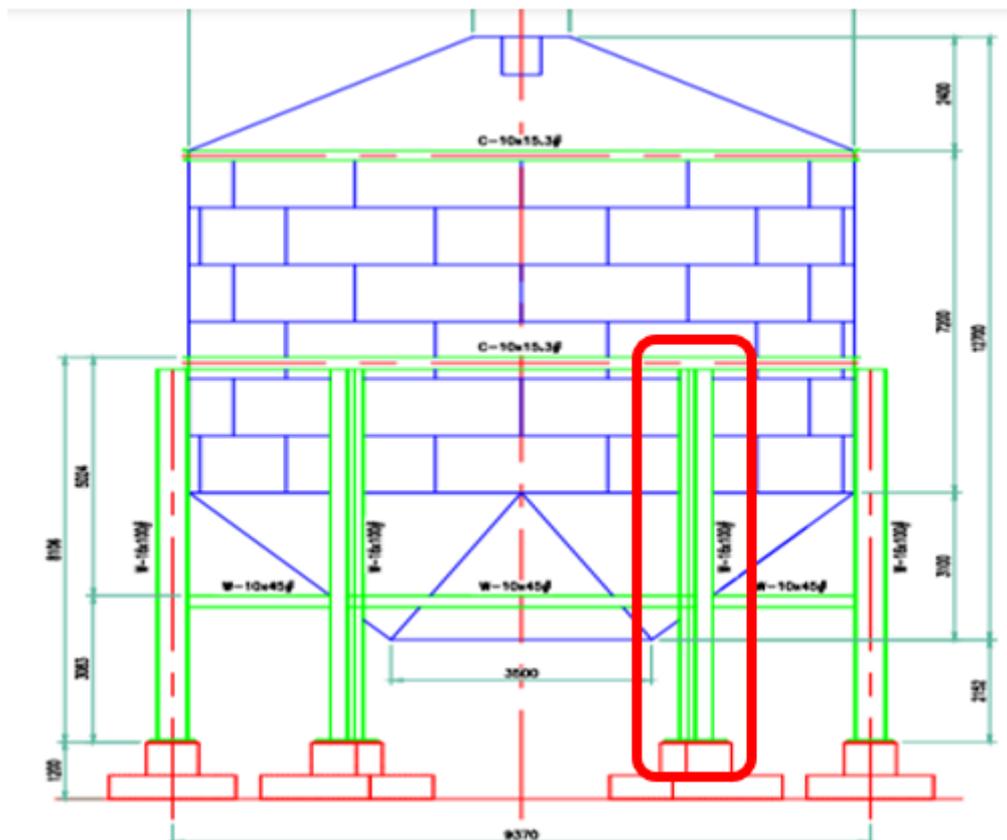


Figura 23

Pedestal metálico con presencia de oxidación y corrosión.



Figura 24

Pedestal metálico con presencia de oxidación y corrosión.



Punto 06 y 07: Se observo el pedestal de concreto con aristas fracturas.

Figura 25

Ubicación de la zona de inspección pedestal P3.

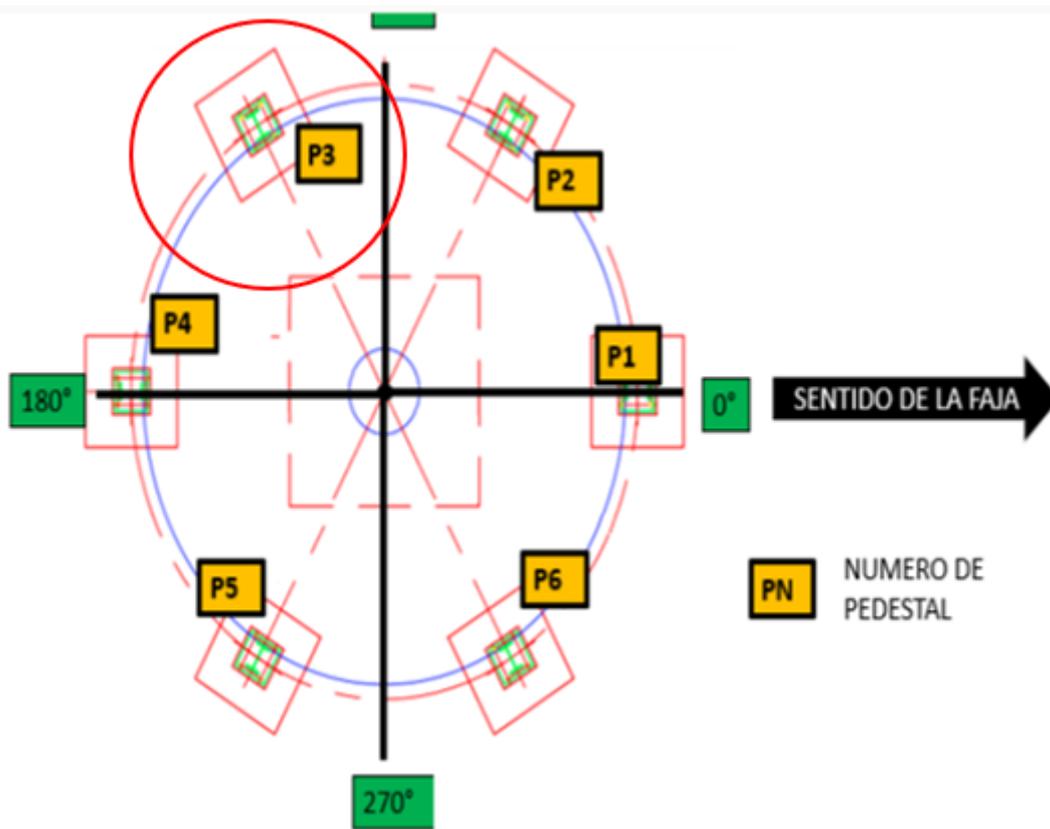


Figura 26

Arista del pedestal fracturado.



Figura 27

Ubicación de la zona de inspección pedestal P6

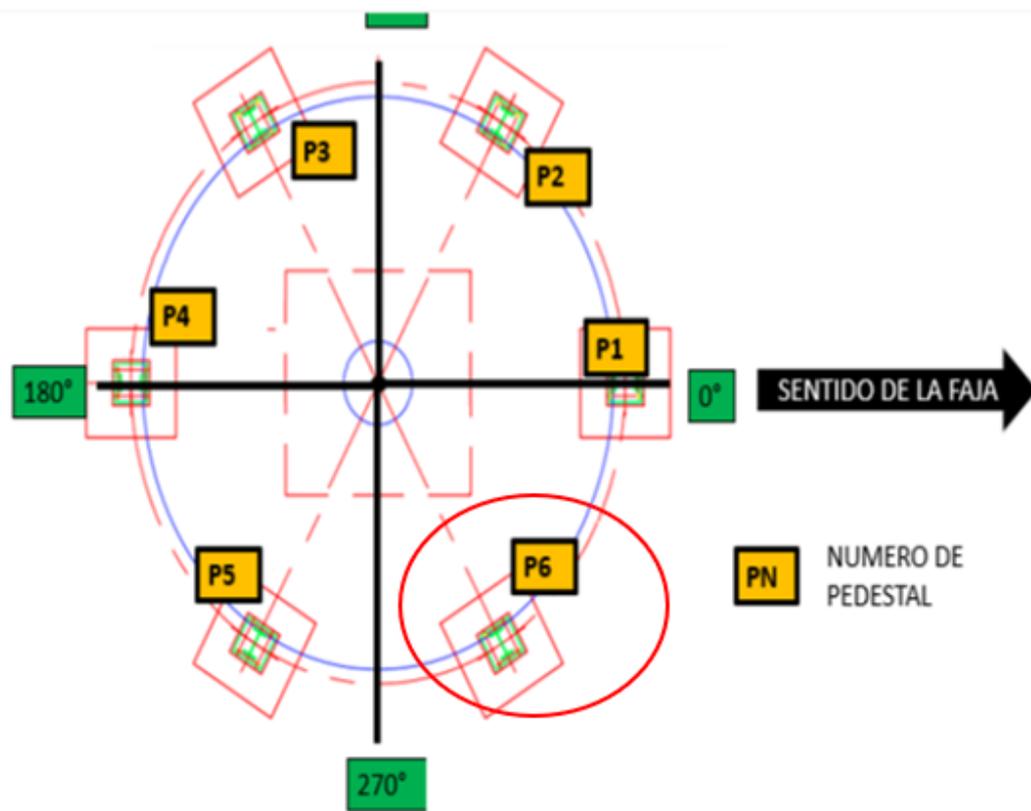


Figura 28

Visualización de la malla armada del pedestal y sus aristas fracturadas.



Punto 08: Se observó la parte inferior de chute de descarga con corrosión, forado de las planchas y las conexiones deformadas y corroídas.

Figura 29
Ubicación de la zona de inspección parte inferior.

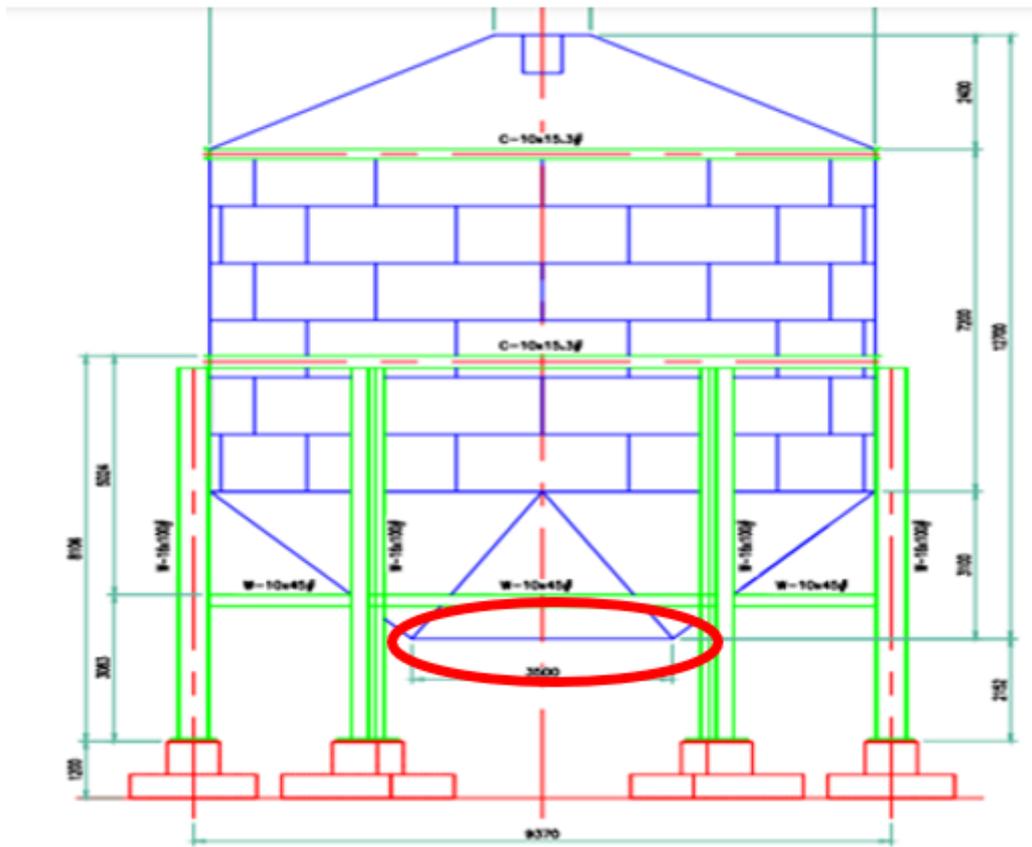


Figura 30
Deformación y corrosión de las aletas de conexión.



Figura 31

Perímetro del chupe de descarga con presencia de corrosión y forado en las planchas.



3.3.2 Ultrasonido (Norma ASTM E797)

La medición de espesores por ultrasonido se realiza asegurando previamente condiciones óptimas de instalación, incluyendo seguridad, limpieza del área de trabajo, inspección de herramientas y equipos, e iluminación adecuada.

El procedimiento se desarrolla en tres zonas del silo de finos del tanque Santa María, distribuyéndose de la siguiente manera:

Zona superior: Se realizan 8 intervenciones, con cada punto de medición (UTTK) registrando 5 mediciones.

Figura 32

Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona superior del silo SANTA MARIA.

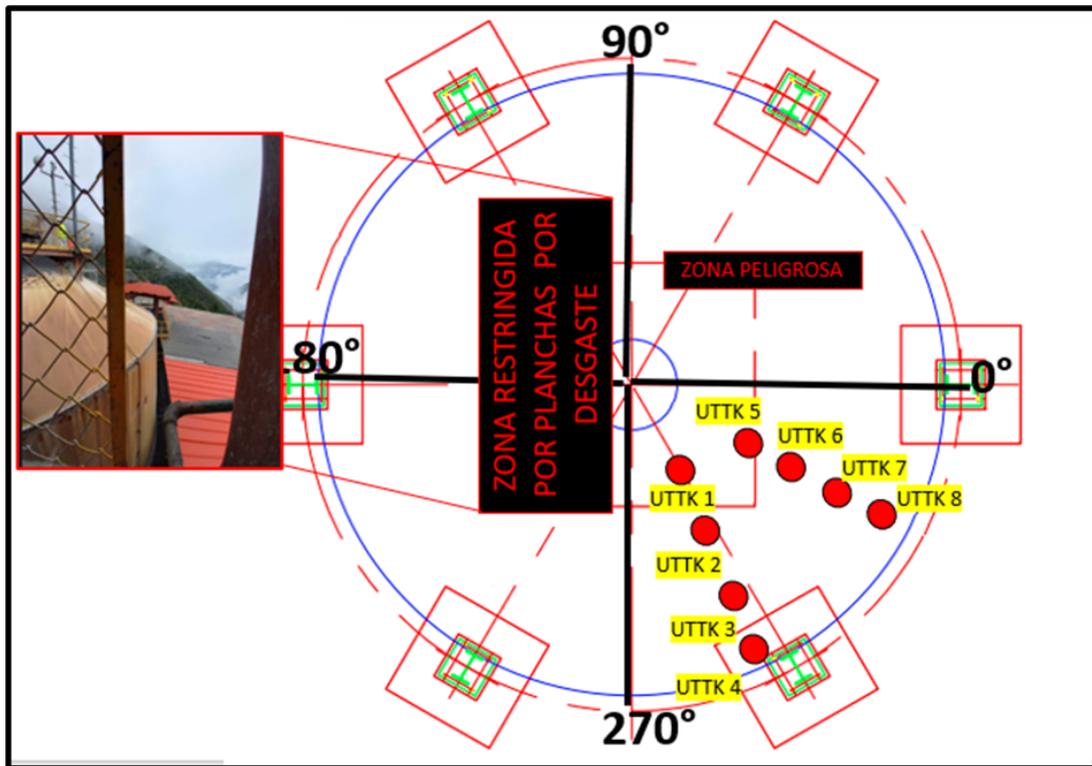


Figura 33

Zona Superior del silo, Spot en UTK-01 y UTK-02.

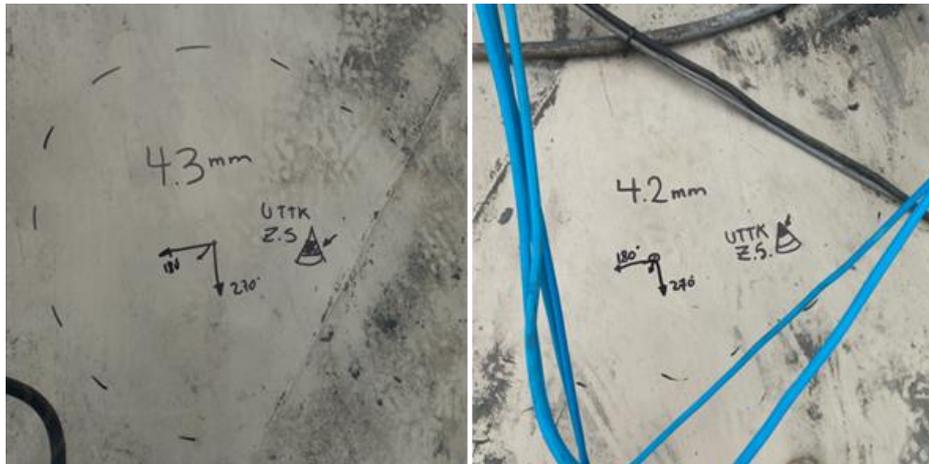


Figura 34

Zona Superior del silo, Spot en UTTK-06 y UTTK07.



Zona media: Se efectúan 10 intervenciones, con cada UTTK registrando 5 mediciones.

Figura 35

Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona media del silo SANTA MARIA.

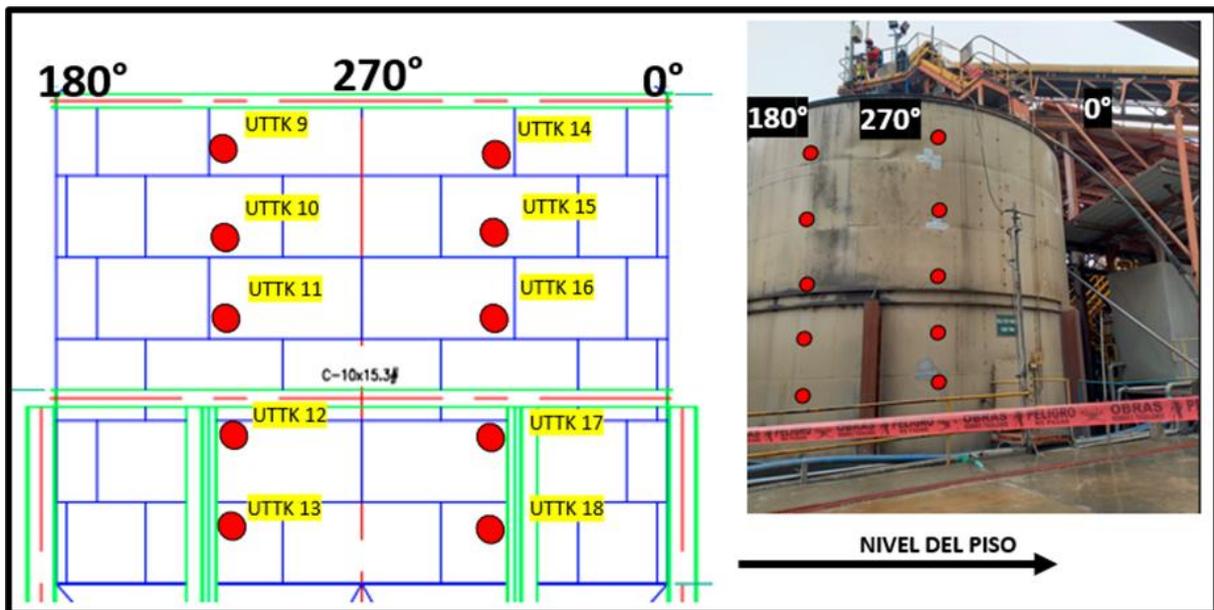


Figura 36

Zona Media del silo, Spot en UTTK-9 y UTTK-10.

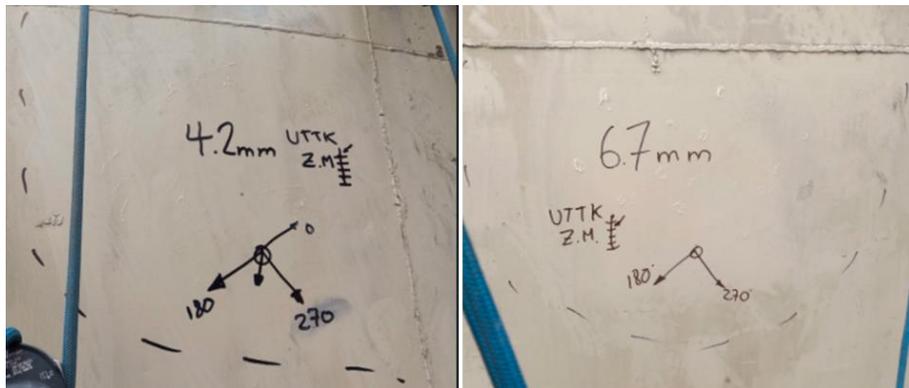


Figura 37

Zona Media del silo, Spot en UTTK-25 y UTTK-26



Zona inferior: Se llevan a cabo 10 intervenciones, con cada UTTK registrando 5 mediciones.

Figura 38

Medición de espesores por Ultrasonido (UTTK) en la zona inferior del silo SANTA MARIA.

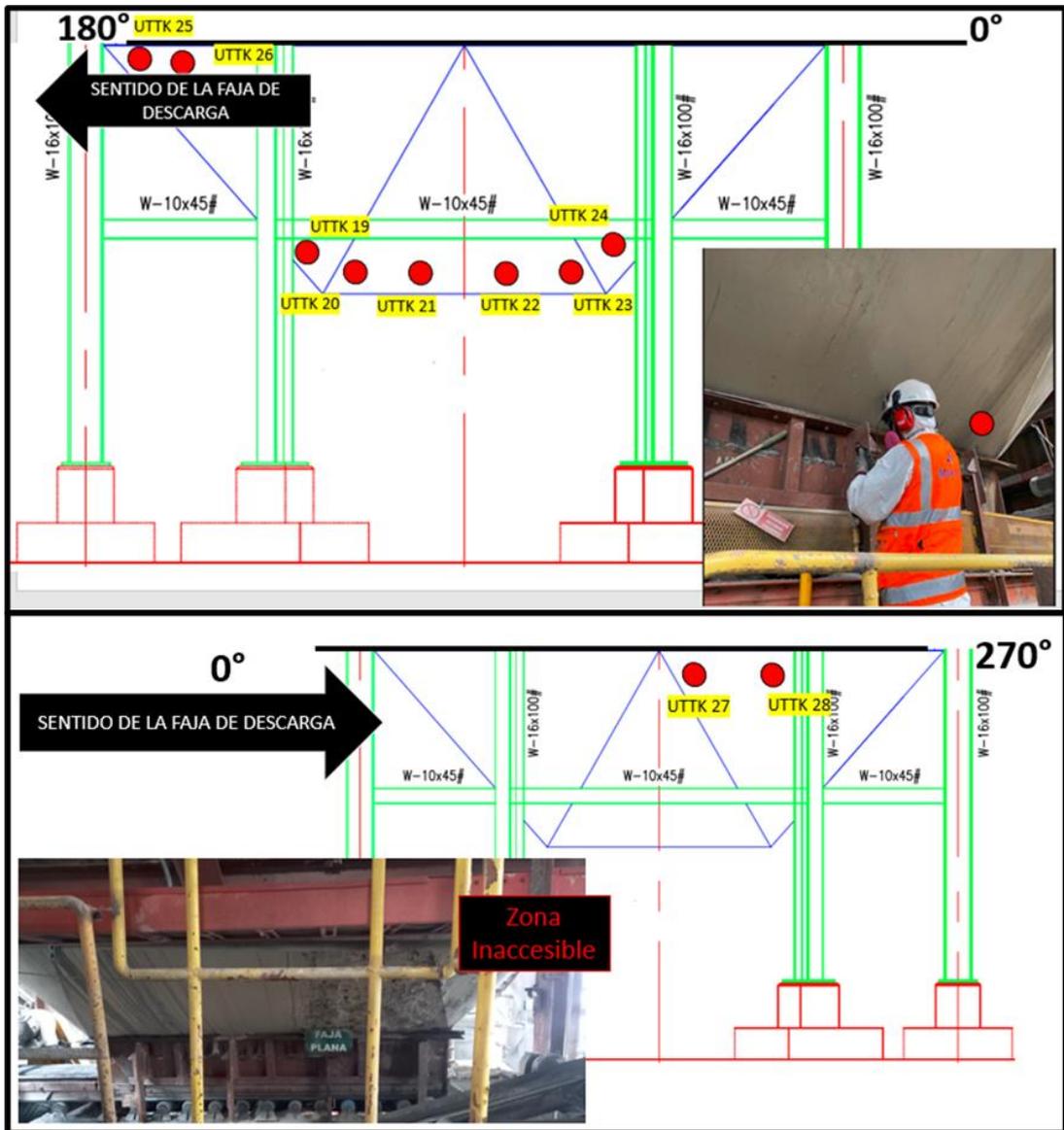


Figura 39

Zona Inferior del silo, Spot en UTKK-19 y UTKK-20.



Figura 40

Zona Inferior del silo, Spot en UTTK-27 y UTTK-28.



Este enfoque garantiza una evaluación detallada del estado del material en cada nivel del silo.

Tabla 1.

Evaluación de espesores de planchas

CODIGO	ZONA DE INPECCION EN EL SILO	MEDICIONES REALIZADAS A CADA PUNTO INSPECCIONADO POR MEDICION DE ESPESORES POR ULTRASONIDO					MEDICION PROMEDIO	Espesor Nominal (mm).	Tipo de Corrosión	Rate de Corrosión máx.(mm/año)	ACEPTADO O RECHAZADO
		M1	M2	M3	M4	M5					
UTTK-01	Zona Superior	4.1	4.2	4.2	4.2	4.1	4.2	6.35	corrosión localizada	34.49%	RECHAZADO
UTTK-02	Zona Superior	4.4	4.3	4.2	4.3	4.3	4.3	6.35	corrosión localizada	32.28%	RECHAZADO
UTTK-03	Zona Superior	4.2	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	6.35	corrosión localizada	31.02%	RECHAZADO
UTTK-04	Zona Superior	4.1	4.3	4.3	4.2	4.1	4.2	6.35	corrosión localizada	33.86%	RECHAZADO
UTTK-05	Zona Superior	4.1	4.1	4	4.2	4.1	4.1	6.35	corrosión localizada	35.43%	RECHAZADO
UTTK-06	Zona Superior	4.5	4.4	4.6	4.4	4.5	4.5	6.35	corrosión localizada	29.45%	RECHAZADO
UTTK-07	Zona Superior	4.3	4.4	4.3	4.5	4.5	4.4	6.35	corrosión localizada	30.71%	RECHAZADO
UTTK-08	Zona Superior	4.4	4.2	4.2	4.3	4.2	4.3	6.35	corrosión localizada	32.91%	RECHAZADO
UTTK-09	Zona Media	4.2	4.2	4.3	4.2	4.3	4.2	12.7	corrosión localizada	66.61%	RECHAZADO
UTTK-10	Zona Media	6.7	6.6	6.7	6.8	6.7	6.7	12.7	corrosión localizada	47.24%	RECHAZADO

UTTK-11	Zona Media	6.4	6.4	6.5	6.3	6.4	6.4	12.7	corrosión localizada	49.61%	RECHAZADO
UTTK-12	Zona Media	7.6	7.8	7.8	7.7	7.7	7.7	12.7	corrosión localizada	39.21%	RECHAZADO
UTTK-13	Zona Media	5.8	5.9	5.7	5.4	5.8	5.7	12.7	corrosión localizada	54.96%	RECHAZADO
UTTK-14	Zona Media	4.5	4.6	4.5	4.7	4.5	4.6	12.7	corrosión localizada	64.09%	RECHAZADO
UTTK-15	Zona Media	6.7	6.8	6.8	6.7	6.8	6.8	12.7	corrosión localizada	46.77%	RECHAZADO
UTTK-16	Zona Media	7.6	7.7	7.6	7.5	7.4	7.6	12.7	corrosión localizada	40.47%	RECHAZADO
UTTK-17	Zona Media	7.5	7.6	7.5	7.5	7.5	7.5	12.7	corrosión localizada	40.79%	RECHAZADO
UTTK-18	Zona Media	5.4	5.5	5.6	5.5	5.5	5.5	12.7	corrosión localizada	56.69%	RECHAZADO
UTTK-19	Zona Inferior	10.2	10.2	10.3	10.1	10.1	10.2	12.7	corrosión localizada	19.84%	RECHAZADO
UTTK-20	Zona Inferior	10.6	10.5	10.4	10.5	10.5	10.5	12.7	corrosión localizada	17.32%	RECHAZADO
UTTK-21	Zona Inferior	10.1	10.2	10.1	10.2	10.2	10.2	12.7	corrosión localizada	20.00%	RECHAZADO
UTTK-22	Zona Inferior	10.2	10.3	10.4	10.3	10.3	10.3	12.7	corrosión localizada	18.90%	RECHAZADO
UTTK-23	Zona Inferior	10.5	10.6	10.6	10.7	10.6	10.6	12.7	corrosión localizada	16.54%	RECHAZADO
UTTK-24	Zona Inferior	10.3	10.4	10.4	10.3	10.4	10.4	12.7	corrosión localizada	18.43%	RECHAZADO
UTTK-25	Zona Inferior	10.2	10.2	10.1	10.1	10.2	10.2	12.7	corrosión localizada	20.00%	RECHAZADO
UTTK-26	Zona Inferior	10.3	10.4	10.3	10.4	10.4	10.4	12.7	corrosión localizada	18.43%	RECHAZADO
UTTK-27	Zona Inferior	9.6	9.6	9.7	9.8	9.8	9.7	12.7	corrosión localizada	23.62%	RECHAZADO
UTTK-28	Zona Inferior	10.2	10.2	10.3	10.2	10.2	10.2	12.7	corrosión localizada	19.53%	RECHAZADO

En el análisis de los espesores de las planchas de acero, se identificó que en la zona superior el espesor nominal corresponde a 1/4'' (6.35 mm) y en las zonas media e inferior, posterior al refuerzo estructural implementado, se registró un espesor final nominan de 1/2'' (12.7 mm).

A partir de los espesores iniciales, se realizó el ensayo obteniéndose los siguientes resultados:

- **Zona superior:** Se identificó una pérdida promedio del 32.52% del espesor original (6.35 mm), equivalente a una reducción de 2.06 mm.

- **Zona media:** Se identifico un desgaste promedio del 50.64% sobre el espesor reforzado (12.7 mm), lo que representa una disminución de 6.43 mm.
- **Zona inferior:** Se identifico una degradación promedio del 19.26% respecto al espesor final post refuerzo (12.7 mm), correspondiente a 2.44 mm de pérdida.

Estos valores evidencian una distribución heterogénea del desgaste, con afectación crítica en la zona media, seguida de la superior, mientras que la inferior presenta la menor degradación.

3.3.3 Líquidos Penetrantes (Norma ASTM E165) y Partículas Magnéticas (Norma ASTM E709)

La inspección se centró en los cruces de soldadura de las planchas que conforman el silo, considerando techo, anillos y cilindro de descarga. La estructura se dividió en cuatro cuadrantes, evaluando puntos estratégicos mediante ensayos no destructivos con líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

Los puntos en evaluación se realizaron en base a un esquema de inspección:

Figura 41

Esquema de puntos de Inspección en la cúpula del Silo

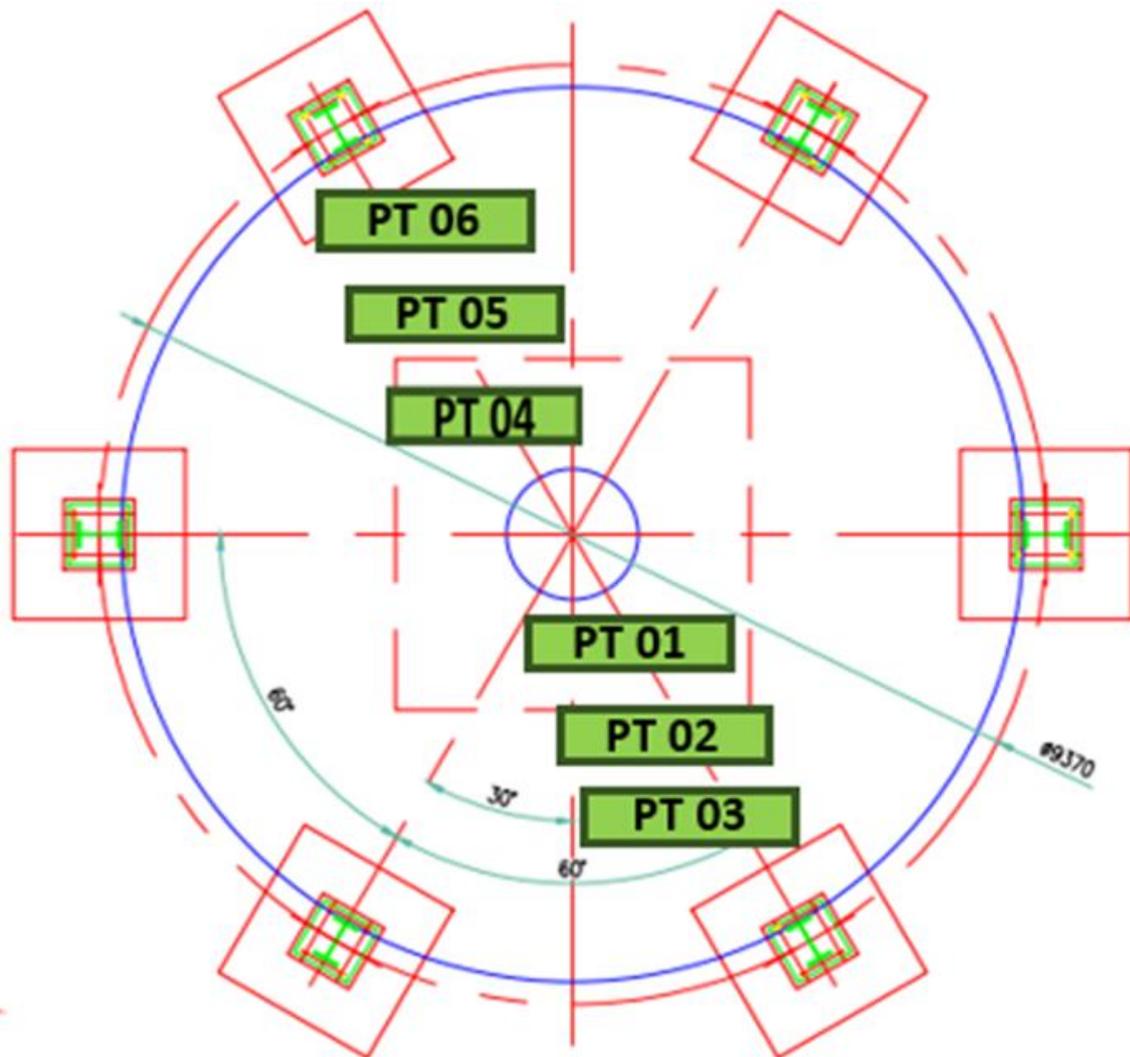


Figura 42

Esquema de puntos de Inspección en la zona Media e inferior del Silo.

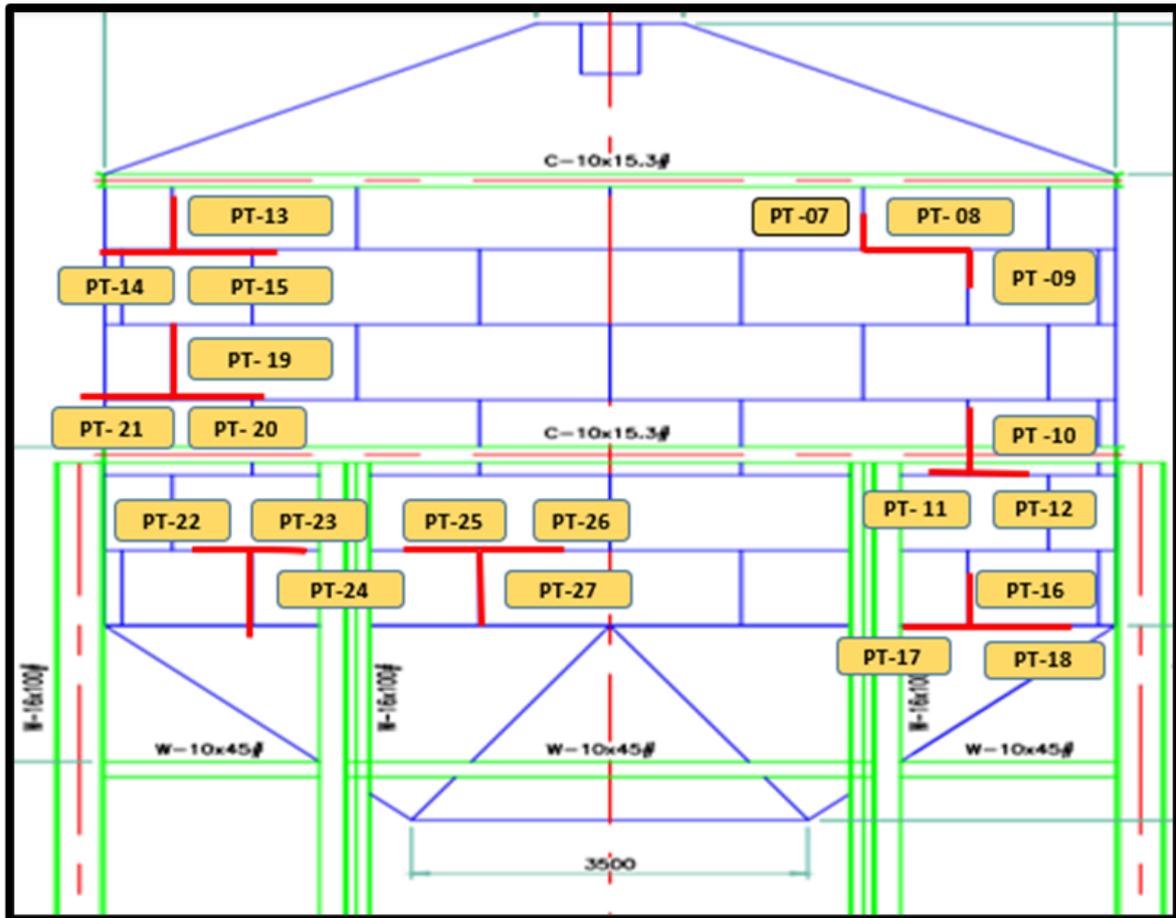


Figura 43

Unión soldada (PT- 1) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador

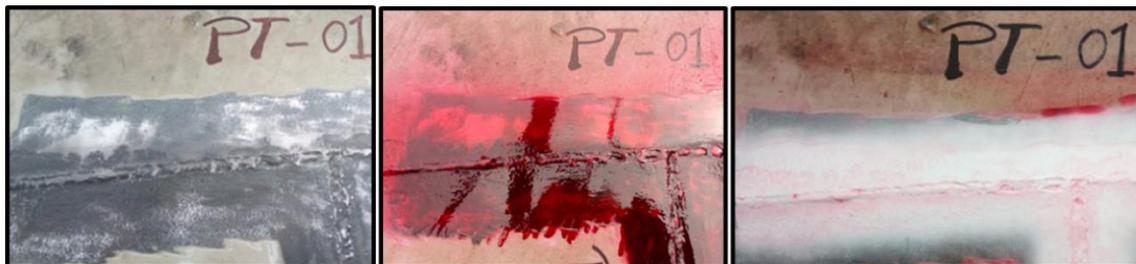


Figura 44

Unión soldada (PT- 2) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador

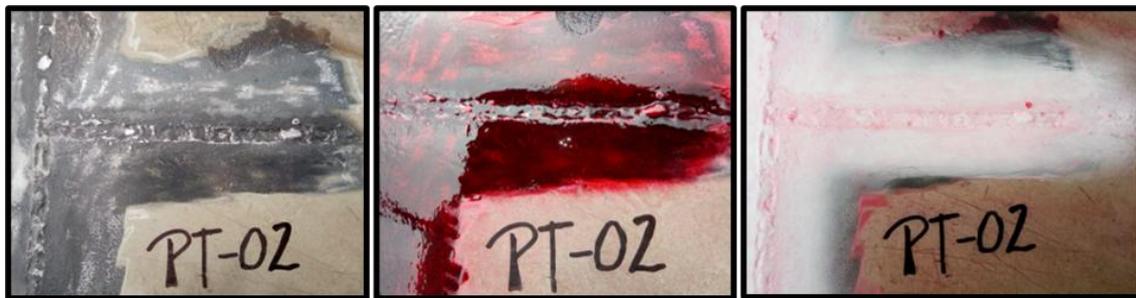


Figura 45

Unión soldada (PT- 3) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.

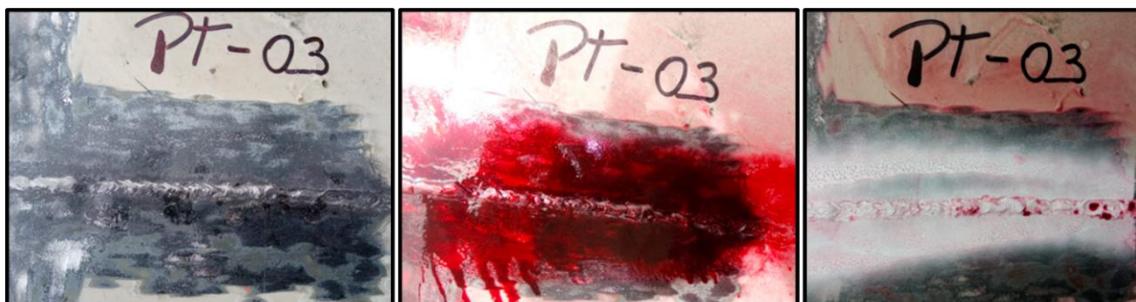


Figura 46

Unión soldada (PT- 4) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.



Figura 47

Unión soldada (PT- 5) Limpieza - Aplicando Penetrante - Aplicando Revelador.

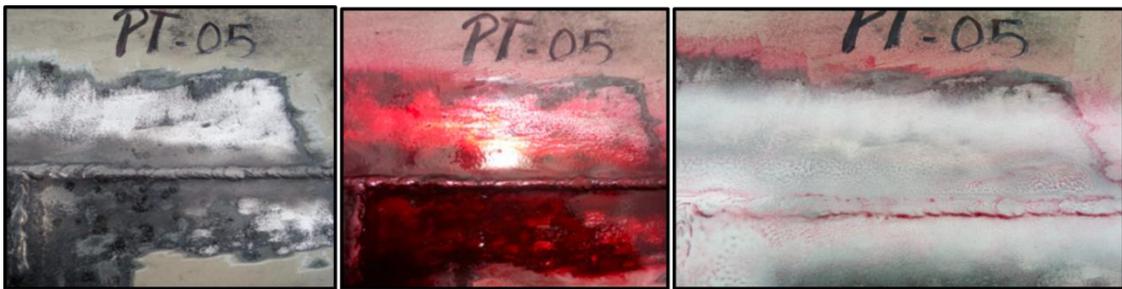
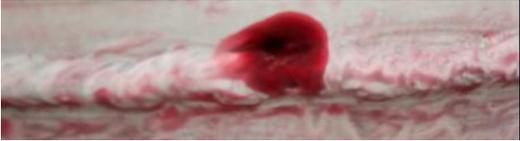
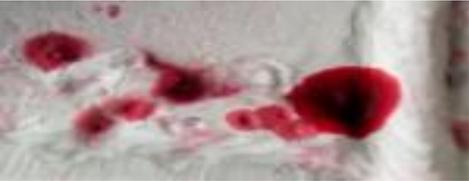


Tabla 2.

Resumen de los puntos por Líquidos Penetrantes y Partículas Magnéticas.

Puntos realizados e inspeccionados mediante en ensayo no destructivo de tintes penetrantes y partículas magnéticas		
1	M	MONITORIAR
2	M	MONITORIAR REPARAR
3	R	 REPARAR
4	R	 REPARAR
5	R	 REPARAR
6	R	

			REPARAR
7	R		
			REPARAR
8	R		
			REPARAR
9	R		
10	M		MONITORIAR
11	M		MONITORIAR
12	M		MONITORIAR
13	OK		LIMPIEZA
14	OK		LIMPIEZA
15	OK		LIMPIEZA REPARAR
16	R		
			REPARACION
17	R		
			REPARACION
18	R		
			REPARACION
19	R		

			REPARACION
20	R		
			REPARACION
21	R		
22	M		MONITORIAR
23	M		MONITORIAR
24	M		MONITORIAR
			REPARACION
25	R		
			REPARACION
26	R		
			REPARACION
27	R		

- R : RECOMIENDA REPARAR
- M : MONITORIAR
- OK : CORRECTO

El ensayo no destructivo de líquidos penetrantes y partículas magnéticas realizado en 27 puntos de la estructura del silo Santa María evidenció que el 89% de las inspecciones presentaron defectos en la soldadura. Se detectaron líneas de soldadura discontinuos y con acabado deficiente, además del material base golpeado y mal estado. Solo 3 puntos cumplieron con los criterios de aceptación de la norma AWS D1.1 2020. Se recomienda la reparación inmediata

de las zonas identificadas como críticas antes de continuar con las operaciones del silo, a fin de evitar accidentes y garantizar la seguridad del silo.

3.3.4 Esclerometría (Norma ASTM C805)

Se realizó el ensayo de esclerometría en los pedestales que sirven como soporte del silo, con el objetivo de determinar su resistencia. Para ello, se limpiaron las caras de los pedestales, asegurando una superficie uniforme para obtener lecturas precisas con el esclerómetro. Se tomaron las lecturas en los 6 pedestales de la estructura.

Figura 48.

Ubicación de la cimentación de pedestales del silo de Finos SANTA MARIA.

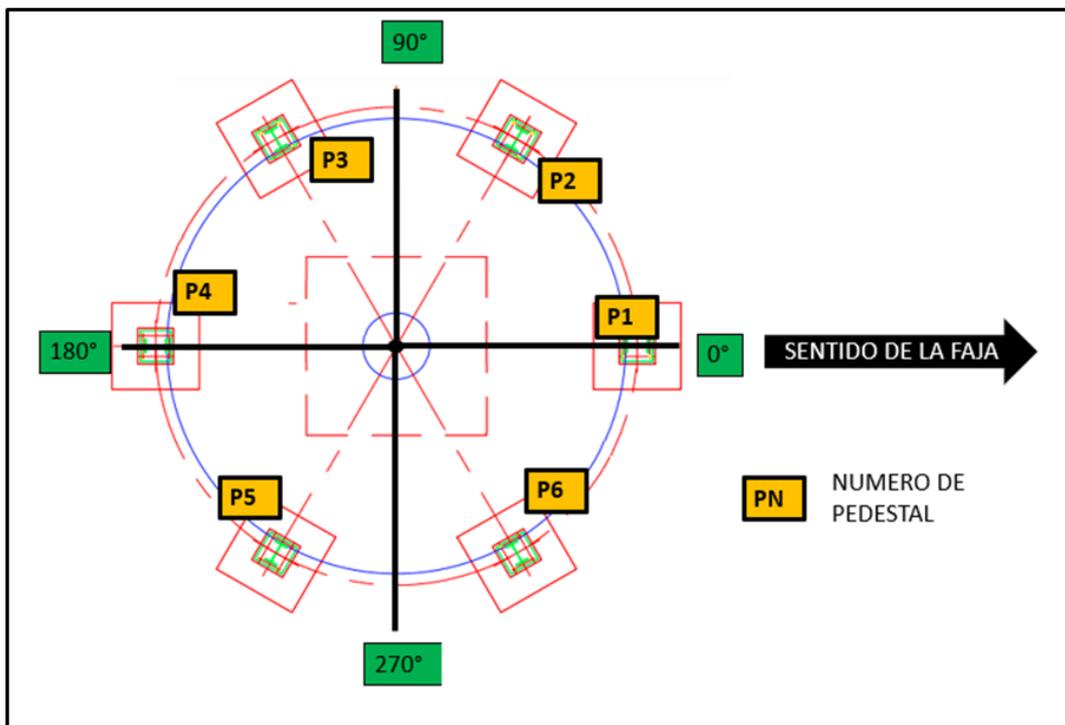


Figura 49

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del primer pedestal (P1).

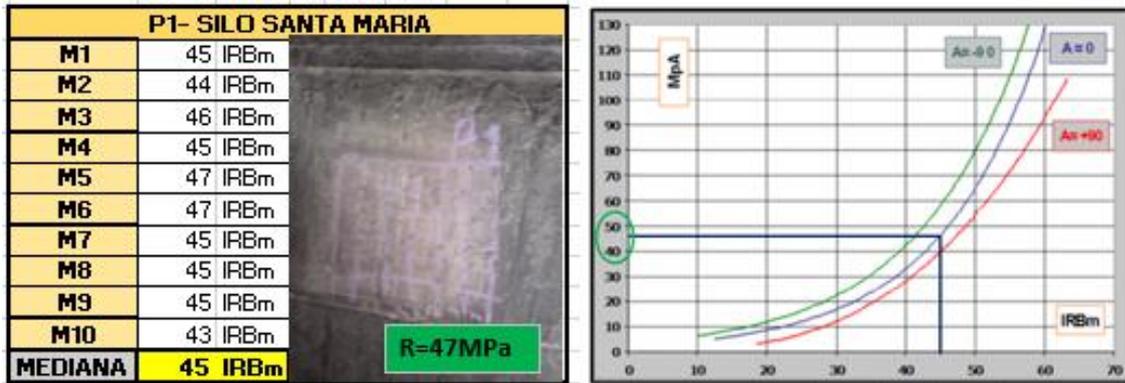


Figura 50

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del segundo pedestal (P2).

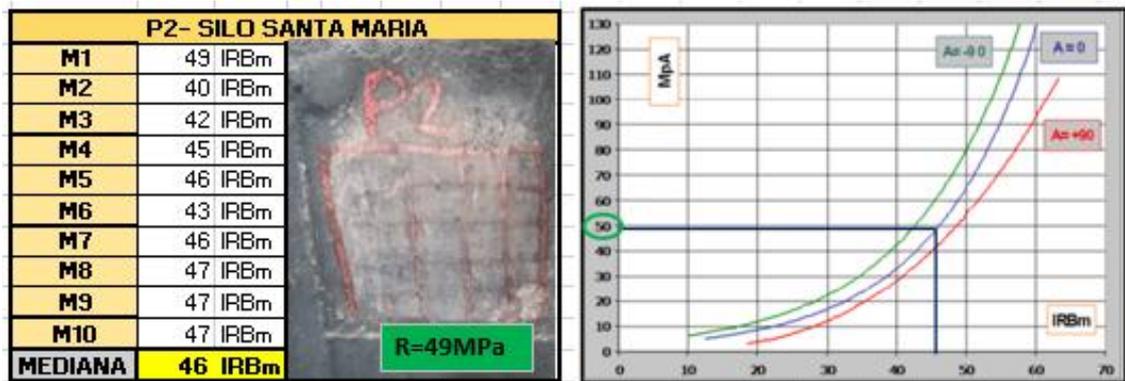


Figura 51

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del tercer pedestal (P3).

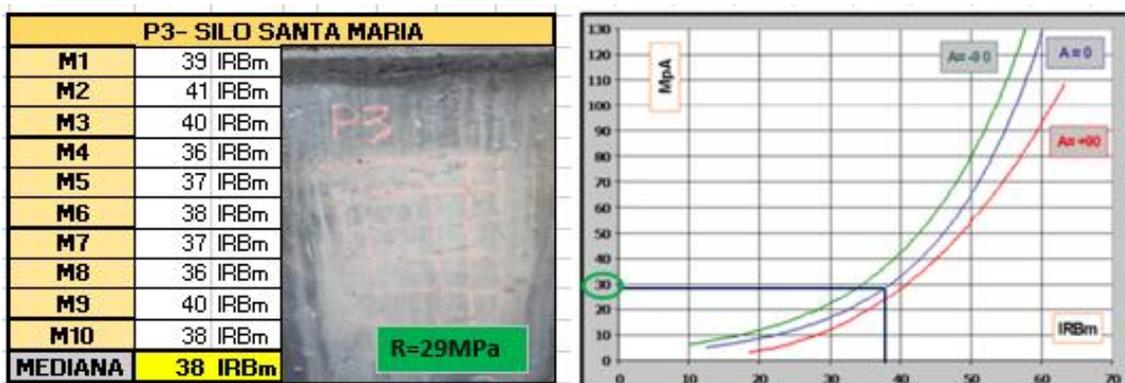


Figura 52

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del cuarto pedestal (P4).

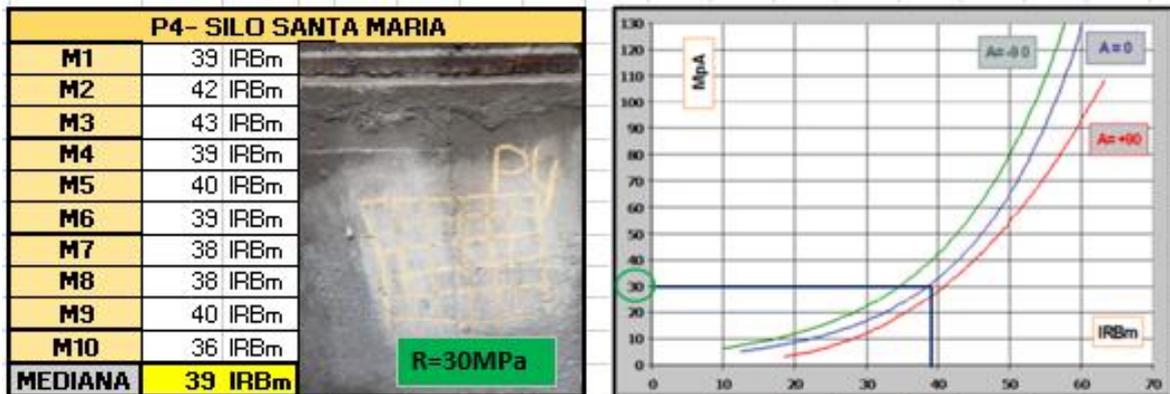


Figura 53

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del quinto pedestal (P5).

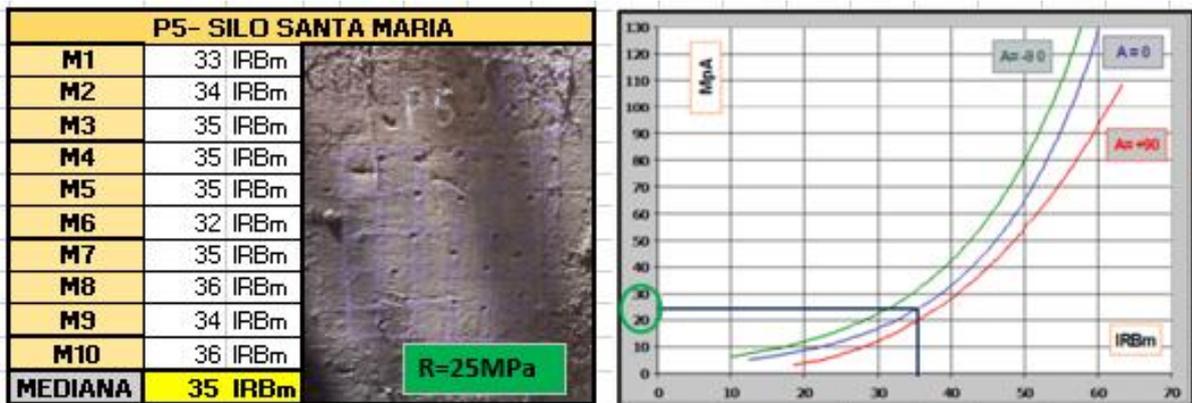
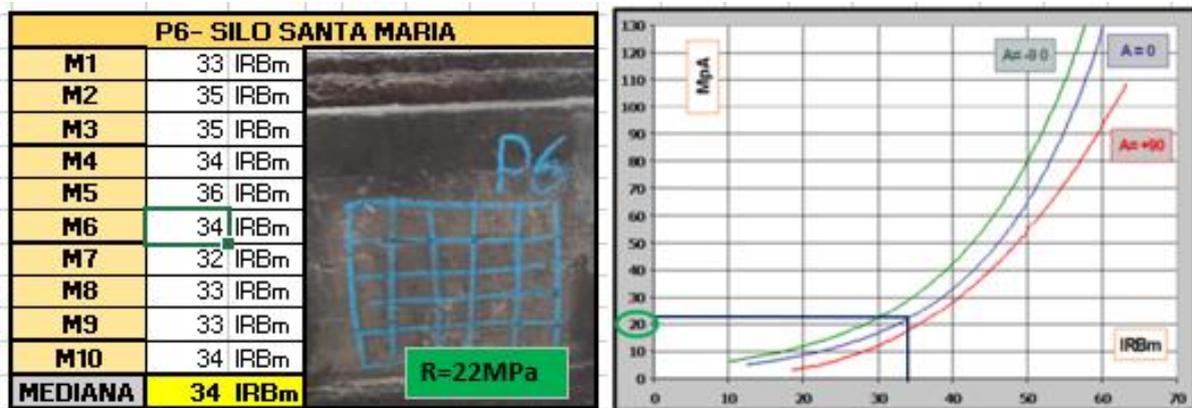


Figura 54

Datos del ensayo con esclerómetro y nomograma del sexto pedestal (P6).



Según la norma ASTM C 805 se tomaron mínimo 10 lecturas por cada pedestal del silo Santa María, separadas entre sí como mínimo 2.50 cm, las cuales se ordenaron y se obtuvo el valor promedio como lo evidencia los siguientes resultados:

Tabla 3.

Datos y resultados del ensayo de esclerometría de los pedestales del silo de finos Santa María.

Zona	Tipo	Mediana	Resistencia relativa (MPa)
PEDESTALES DEL SILO SANTA MARÍA	PRIMER PEDESTAL (P1)	45	47
	SEGUNDO PEDESTAL (P2)	46	49
	TERCER PEDESTAL (P3)	38	29
	CUARTO PEDESTAL (P4)	39	30
	QUINTO PEDESTAL (P5)	35	25
	SEXTO PEDESTAL (P6)	34	22

Se realizó el ensayo de esclerometría a los pedestales de la cimentación según la Norma ASTM C 805. No se cuenta con el valor exacto de resistencia del concreto original, por lo que se tomó como referencia el rango de resistencia para un concreto reforzado (21MPa a 48MPa o 214 kg/cm² a 489 kg/cm²). Los resultados obtenidos se encuentran dentro de este rango, aunque en los pedestales P5 y P6 se registraron valores de 25MPa y 22MPa, respectivamente, los cuales están cerca del límite de rechazo.

3.3.5 *Análisis estructural del silo*

Para el análisis estructural del silo Santa María se inicia con la recopilación de la información de los ensayos no destructivos realizados previamente. Posteriormente, se realiza el modelado estructural en el software SAP2000, el cual nos permitirá predecir su comportamiento ante diversas sollicitaciones mecánicas y ambientales. Según la Norma Peruana de Estructuras

Metálicas (E090), el modelado estructural es esencial para garantizar la seguridad, estabilidad y funcionalidad de las construcciones, especialmente en estructuras sometidas a cargas dinámicas y efectos corrosivos, como el silo en análisis.

Cálculo de las cargas

Para el caso del Silo Santa María, se han considerado diversas cargas conforme a la normativa vigente y las condiciones climáticas de la zona. Las cargas aplicadas en el modelamiento de la estructura incluyen:

- Peso propio de la estructura, determinado en función de los materiales utilizados.
- Cargas debidas al material almacenado, considerando la distribución de presiones en las paredes del silo.
- Carga de viento, evaluada según la ubicación del silo y las velocidades de viento establecidas en la norma E.020.
- Carga de lluvia, en caso de que las condiciones climáticas lo requieran.
- Carga sísmica, considerando la categoría de importancia de la estructura y los coeficientes de diseño sísmico.

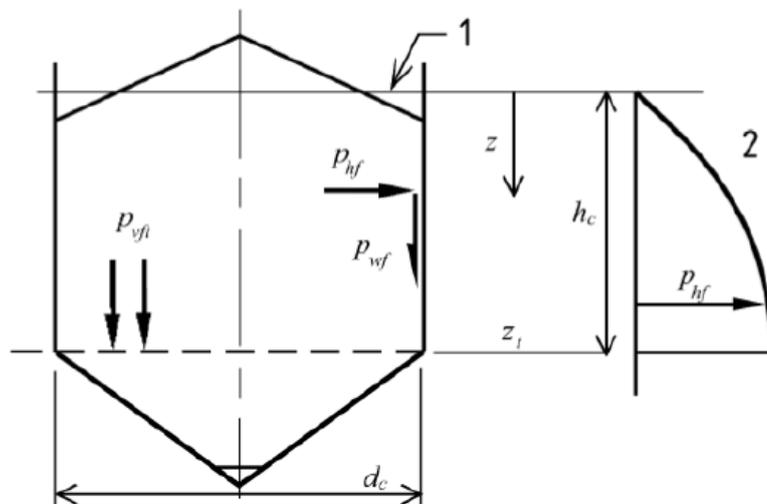
Además, se han realizado combinaciones de carga para evaluar el comportamiento estructural en diferentes escenarios y garantizar la resistencia de los distintos elementos del silo. Finalmente, se han aplicado estos cálculos en los modelos utilizados para el análisis, asegurando que la estructura cumpla con los requisitos de seguridad y funcionalidad exigidos por la normativa peruana.

Cargas debidas al material almacenado

Puesto que los silos almacenan materiales solidos granulares, la distribución vertical de presión horizontal en las paredes no es línea como en el caso de la presión hidrostática del agua (UNE-ENV 1991-4).

Figura 55.

Presiones en el cuerpo de un cilindro UNE-ENV 1991-4



Leyenda

- 1 Superficie equivalente
- 2 Presiones en el segmento de pared vertical

Comportamiento fluidizado, presiones en el cilindro:

$$P_{hf}(z) = P_{ho} * Y_j(z) \quad (1)$$

$$P_{wf}(z) = \mu * P_{ho} * Y_j(z) \quad (2)$$

$$P_{vf}(z) = \frac{P_{ho}}{K} * Y_j(z) \quad (3)$$

Siendo:

$$P_{ho} = \gamma * K * z_0 \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{A}{K * \mu * U} \quad (5)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (6)$$

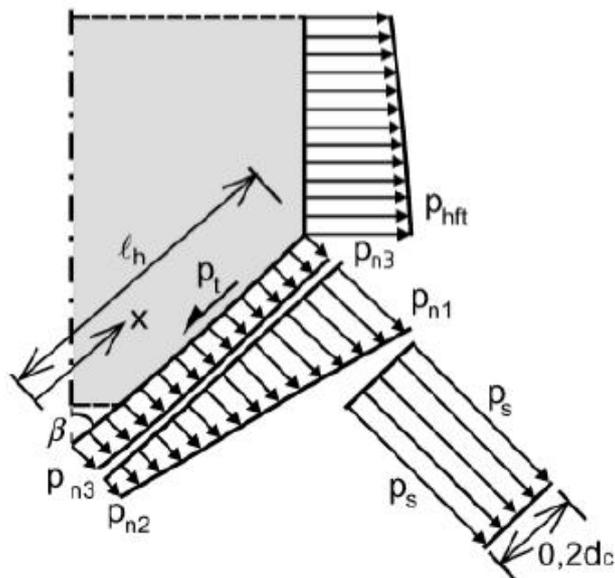
Donde:

- γ : Es el valor característico del precio unitario.
- μ : Es el valor característico del coeficiente de rozamiento con la pared.
- K : Es el valor característico del coeficiente de presiones laterales.
- Z : Es la profundidad desde la superficie equivalente del sólido.
- A : Es la sección transversal plana del silo.
- U : Es el perímetro interno de la sección transversal plana del sólido.

Cuando la inclinación de la pared de la tolva con respecto a la horizontal es mayor a 20° , se debería calcular la presión normal a la pared inclinada de la tolva p_n a cualquier altura (UNE-ENV 1991-4).

Figura 56.

Representación de cargas en la tolva



$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) * \frac{x}{l_h} \quad (7)$$

Siendo:

$$p_{n1} = p_{vft} * (C_b * \text{sen}^2 \beta + \text{cos}^2 \beta) \quad (8)$$

$$p_{n2} = p_{vft} * C_b * \text{sen}^2 \beta \quad (9)$$

$$p_{n3} = 3 * \frac{A}{U} * \frac{\gamma * K}{\sqrt{\mu_h}} * \text{cos}^2 \beta \quad (10)$$

Donde:

- β : Es la inclinación de la tolva respecto a la vertical.
- X : Es la longitud comprendida entre 0 y l_h .
- p_{n1} y p_{n2} : definen presiones en la tolva debido a la presión vertical del material.
- p_{n3} : Es la presión en la tolva debido al solido contenido en la tolva.
- C_b : Es el coeficiente de mayoración de cargas en el fondo.
- p_{vft} : Es la presión vertical que actúa a la altura de la transición.
- μ_h : Es el coeficiente de rozamiento en la pared de la tolva.
- K : Es El coeficiente de presión lateral en el segmento de la pared vertical.

Por lo cual, el valor de la presión de rozamiento con la pared p_t , se obtiene:

$$p_t = p_n * \mu_h \quad (11)$$

En silos con flujo masico se aplica una presión normal fija adicional:

$$p_s = 2K * p_{vft} \quad (12)$$

Tabla 4.

Propiedad de los sólidos disgregados

Tipo de sólido disgregado ^{d,e}	Peso específico ^b		Ángulo de talud natural	Ángulo de rozamiento interno			Coeficiente de presiones laterales		Coeficiente de rozamiento con la pared ^c				Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas C_{sp}
	γ		ϕ	ϕ			K		μ ($\mu = \tan \phi_w$)				
	γ_i	γ_s	ϕ	ϕ_m	a_ϕ	K_m	a_K	Tipo de pared D1	Tipo de pared D2	Tipo de pared D3	a_μ		
	Inferior	Superior		Medio	Coefficiente	Medio	Coefficiente	Medio	Medio	Medio	Coefficiente		
	kN/m ³	kN/m ³	grados	grados									
Material por defecto ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0	
Áridos	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4	
Aluminio	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Mezcla de piensos	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0	
Piensos en pellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7	
Cebada \odot	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5	
Cemento	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5	
Clinker de cemento \ddagger	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7	
Carbón \odot	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6	
Carbón en polvo \odot	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5	
Coque	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6	
Cenizas volantes	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5	
Harina \odot	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6	
Pellets de mineral de hierro	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5	
Cal hidratada	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6	
Caliza en polvo	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5	
Maíz \odot	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9	
Fosfato	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5	
Patatas	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5	
Arena	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4	
Escoria de clinker	10,5	12,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6	
Semillas de soja	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5	
Azúcar \odot	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4	
Remolacha azucarera en pellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5	
Trigo \odot	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5	

NOTA Se deberían realizar ensayos cuando esta tabla no contenga el material a almacenar.

^a Para situaciones en las que es difícil justificar el coste del ensayo porque las implicaciones de usar un rango más amplio de propiedades son menores, se pueden usar los valores del "material por defecto". Estas propiedades pueden ser adecuadas para instalaciones pequeñas. Sin embargo para grandes silos producirán proyectos muy antieconómicos y siempre se debería preferir realizar ensayos.

^b El peso específico del sólido γ_s es el valor característico superior a usar en todos los cálculos de las acciones. El valor característico inferior γ_i se proporciona en la tabla E.1 para ayudar en la estimación del volumen necesario de silo que tendrá una capacidad definida.

^c El rozamiento efectivo con la pared para el tipo de pared D4 (pared ondulada) puede hallarse usando el método definido en el capítulo D.2.

^d Los sólidos de esta tabla que se sabe que son susceptibles de explosión de polvo están marcados con el símbolo \odot .

^e Los sólidos que son susceptibles de bloqueo mecánico están marcados con el símbolo \ddagger .

Fuente: UNE-ENV 1991-4

Tabla 5.

Definiciones de las superficies de pared

Categoría	Título descriptivo	Materiales de la pared típicos
D1	Rozamiento bajo clasificado como "Deslizante"	Acero inoxidable laminado en frío Acero inoxidable pulido Superficie con un revestimiento para bajo rozamiento Aluminio pulido Poliétileno de peso molecular ultracleavado ^a
D2	Rozamiento moderado clasificado como "Liso"	Acero dulce liso (construcción soldada o atornillada) Acero inoxidable terminado con fresa Acero al carbono galvanizado Aluminio oxidado Superficie con un revestimiento para resistencia frente a la corrosión o el desgaste abrasivo
D3	Rozamiento elevado clasificado como "Rugoso"	Hormigón encofrado, hormigón enfoscado u hormigón envejecido Acero al carbono envejecido (oxidado) Acero resistente a la abrasión Piezas cerámicas
D4	Irregular	Paredes onduladas horizontalmente Chapa nervada con nervios horizontales Paredes especiales con grandes anomalías

NOTA Los títulos descriptivos de esta tabla se dan en términos de rozamiento más que de rugosidad porque hay una mala correlación entre las medidas de la rugosidad y la medida del rozamiento con la pared entre un sólido granular deslizante y la superficie.

^a Se debería considerar cuidadosamente en estos casos el efecto de la rugosidad de las partículas que se incrustan dentro de la superficie.

Fuente: UNE-ENV 1991-4

Para el cálculo de las presiones en el silo Santa María se hizo uso del material por defecto con sus propiedades correspondientes de la tabla anterior. Por lo cual se obtuvo:

Presiones en la zona intermedia:

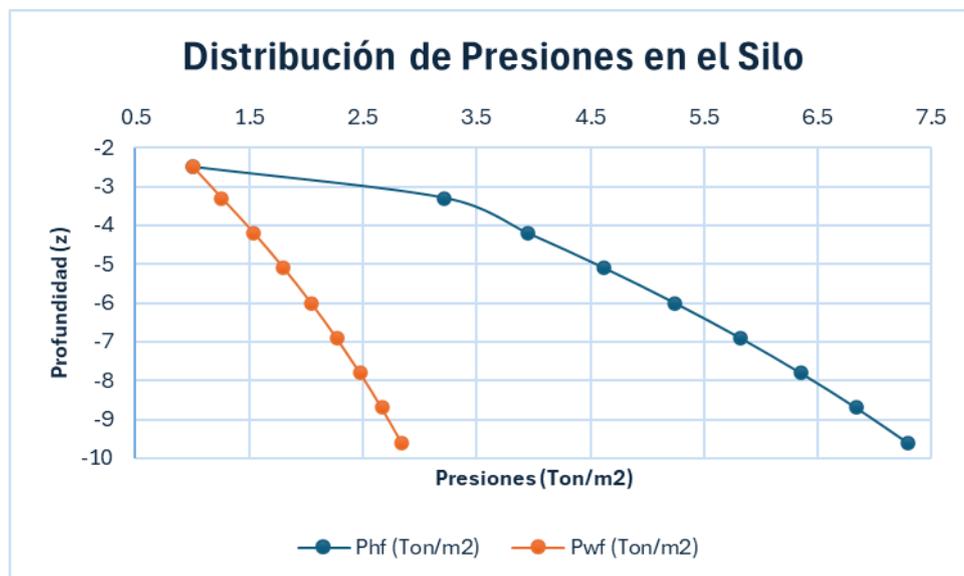
Tabla 6.

Presiones en el silo en la zona intermedia.

P_{ho}	$P_{hf}(z)$	$P_{wf}(z)$	$P_{vf}(z)$	$P_{hf}(z)$	$P_{wf}(z)$	$P_{vf}(z)$
(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(Ton/m ²)	(Ton/m ²)	(Ton/m ²)
125.94	31.54	12.30	63.07	3.22	1.25	6.43
125.94	38.67	15.08	77.35	3.94	1.54	7.89
125.94	45.27	17.66	90.54	4.62	1.80	9.24
125.94	51.37	20.03	102.74	5.24	2.04	10.48
125.94	57.01	22.23	114.01	5.81	2.27	11.63
125.94	62.22	24.26	124.43	6.35	2.48	12.69
125.94	67.03	26.14	134.07	6.84	2.67	13.68
125.94	71.49	27.88	142.98	7.29	2.84	14.58

Figura 57.

Distribución de las presiones en el silo en la zona intermedia.



Presiones en la zona inferior:

Tabla 7.

Presiones en el silo en la zona inferior.

p_t (kN/m ²)	p_t (Ton/m ²)	p_s (kN/m ²)	p_s (Ton/m ²)
61.79	6.30		
68.14	6.95		
74.49	7.60	142.98	14.58
80.84	8.25		
87.20	8.89		

Cargas debidas al viento

Las estructuras arquitectónicas, elementos de cerramiento y componentes exteriores deben diseñarse para resistir las fuerzas generadas por presiones y depresiones aerodinámicas, tanto externas como internas, producidas por la acción del viento. El análisis debe contemplar la acción bidireccional del viento, actuando en dos direcciones horizontales ortogonales, considerando simultáneamente los efectos de presión y succión sobre la estructura.

Clasificación de las edificaciones: La norma E.020 las clasifican en tres tipos según su sensibilidad al viento:

- Edificaciones Tipo 1: Estructuras con baja sensibilidad a efectos dinámicos del viento, que incluyen:
 - Construcciones de baja altura
 - Edificios con poca relación altura/ancho
 - Estructuras cerradas con cubiertas rígidas

Su diseño sigue los criterios establecidos en las secciones 12.3 y 12.4 de la norma.

- Edificaciones Tipo 2: Estructuras esbeltas susceptibles a ráfagas, como:
 - Tanques elevados
 - Estructuras publicitarias
 - Elementos con dimensión reducida en dirección al viento

Requieren incrementar en 20% las cargas externas calculadas según 12.4.

- Edificaciones Tipo 3: Estructuras con geometrías complejas que generan fenómenos aerodinámicos especiales:
 - Cubiertas curvas (domos, arcos)
 - Estructuras suspendidas
 - Elementos esbeltos (chimeneas, torres)

Su diseño exige análisis específicos, aunque las cargas mínimas deben equivaler a las del Tipo 1.

Velocidad de diseño: La velocidad de diseño del viento hasta 10 m de altura será la velocidad máxima adecuada a la zona de ubicación de la edificación (Ver el mapa eólico del Perú) pero no menor a 75 km/h (Norma E.020).

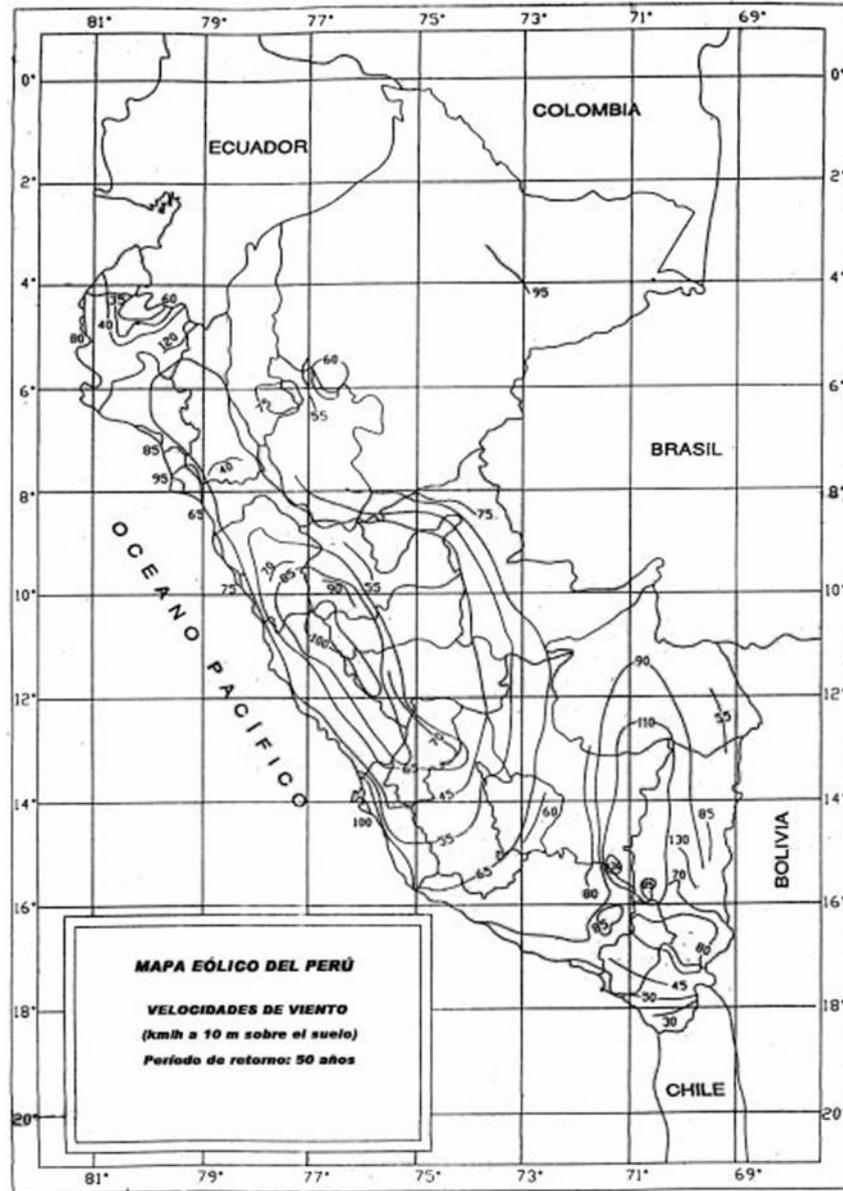
$$V_h = V * \left(\frac{h}{10}\right)^{0.22} \quad (13)$$

Donde:

- V_h : Velocidad de diseño a la altura de h en km/h.
- V : Velocidad de diseño hasta 10 m de altura en km/h.
- h : Altura sobre el terreno en metros

Figura 58.

Mapa eólico del Perú. Fuente: Norma E.020



Carga exterior de viento: La carga exterior (presión y succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual actúa.

$$P_h = 0.005 * C * V_h^2 \quad (14)$$

Donde:

- P_h : Presión o succión del viento a una altura h en Kg/m².
- C : Factor de forma adimensional.
- V_h : Velocidad de diseño a la altura de h en km/h.

Tabla 8.

Factor de forma (C).

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0,8	-0,6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1,5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0,7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2,0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	±0,8	-0,5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0,3-0,7	-0,6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0,7-0,3	-0,6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+0,8	-0,6
Superficies verticales ó inclinadas (planas ó curvas) paralelas a la dirección del viento	-0,7	-0,7

* El signo positivo indica presión y el negativo succión.

Fuente: Norma E.020

La carga de viento a considerar en el silo Santa María es de:

$$V_h = 75 * \left(\frac{16.05}{10}\right)^{0.22}$$

$$V_h = 83.22 \text{ km/h}$$

$$P_h = 0.005 * 0.7 * 83.22^2$$

$$P_h = 24.24 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

Cargas debidas al sismo

La Norma Técnica de Edificación E.030 - Diseño Sismorresistente establece los criterios y requisitos para el diseño y construcción de estructuras capaces de resistir acciones sísmicas. Su objetivo principal es garantizar la seguridad de las edificaciones, minimizando daños estructurales y pérdidas humanas ante eventos sísmicos.

Esta norma proporciona los métodos para el análisis sísmico, define los parámetros de diseño, establece los coeficientes sísmicos y clasifica las estructuras según su importancia y tipo de material.

Peligro sísmico

- a. Zonificación: Zonificación sísmica es la clasificación del territorio peruano en diferentes zonas de peligro sísmico, basándose en la intensidad y frecuencia de los terremotos en cada región. Esta zonificación permite definir los coeficientes sísmicos que se deben utilizar en el diseño estructural de edificaciones, garantizando que las construcciones sean seguras ante sismos.

Tabla 9.

Factores de zona "Z".

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Figura 59.

Zonas sísmicas. Fuente: Norma E.030



- b. Perfiles de suelo: El Artículo 12 de la Norma Técnica de Edificación E.030 aborda las Condiciones Geotécnicas que deben considerarse en el diseño sismorresistente de edificaciones en el Perú. En la siguiente tabla se resumen sus principales tipos de perfiles de suelos:

Tabla 10.*Clasificación de los perfiles de suelos.*

Perfil	\bar{V}_s	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u
S ₀	> 1500 m/s	-	-
S ₁	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S ₂	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S ₃	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S ₄	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: Norma E.030

- c. Parámetros de Sitio (S, TP y TL): La norma E.030 define los parámetros S (amplificación sísmica), TP (período característico) y TL (período límite) según el tipo de suelo. Estos valores, obtenidos de tablas normalizadas, permiten calcular las fuerzas sísmicas considerando las condiciones geotécnicas del terreno para un diseño estructural seguro. El proceso consiste en identificar el perfil de suelo local y aplicar los valores correspondientes en el análisis.

Tabla 11.

Factor de suelo “s”

ZONA \ SUELO	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
Z ₄	0,80	1,00	1,05	1,10
Z ₃	0,80	1,00	1,15	1,20
Z ₂	0,80	1,00	1,20	1,40
Z ₁	0,80	1,00	1,60	2,00

Fuente: Norma E.030

Tabla 12.

Periodos

	Perfil de suelo			
	S0	S1	S2	S3
T _p (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T _L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Fuente: Norma E.030

- d. Categoría de las Edificaciones y Factor de Uso (U): Cada estructura está clasificada de acuerdo con las categorías indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 13.

Categoría de la edificación.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR <i>U</i>
A Edificaciones Esenciales	A1: Establecimientos del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales para el manejo de las emergencias, el funcionamiento del gobierno y en general aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. Se incluyen las siguientes edificaciones: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, estaciones ferroviarias de pasajeros, sistemas masivos de transporte, locales municipales, centrales de comunicaciones. - Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. - Instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. - Edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. - Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	1,5
B Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de buses de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1,0
D Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.	Ver nota 2

- e. Sistemas Estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas (R0): Los sistemas estructurales se clasifican de acuerdo con los materiales de construcción empleados y el tipo de configuración sismorresistente adoptada en cada dirección de análisis. A cada categoría de sistema estructural se le asigna un coeficiente

básico de reducción de fuerzas sísmicas (R_0), cuyos valores específicos están establecidos en tablas normativas. Este coeficiente permite modificar las fuerzas sísmicas de diseño considerando la capacidad de disipación energética y el comportamiento estructural ante solicitaciones sísmicas. La determinación adecuada del coeficiente R_0 resulta fundamental para garantizar un diseño sísmico apropiado según las características particulares de cada sistema estructural.

Tabla 14.

Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.

Sistema Estructural	Coeficiente Básico de Reducción R_0 (*)
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	5
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	4
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	7
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	4
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera	7(**)

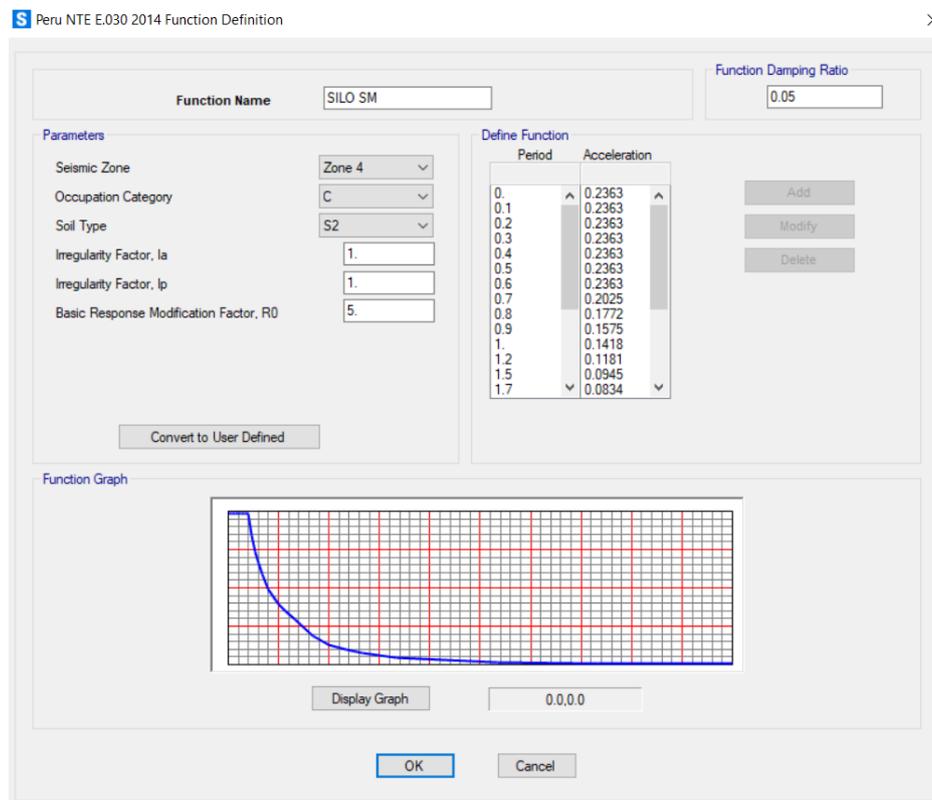
Fuente: Norma E.030

Los factores para ensamblar el espectro son:

- $Z = 0.45$
- $S_2 = 1.05$
- $U = 1$
- $R = 5$

Figura 60.

Espectro de respuesta para el análisis estructural.



Combinaciones de cargas

La Norma E.090 establece los requisitos mínimos para el diseño, cálculo, fabricación, montaje y control de calidad de estructuras de acero destinadas a edificaciones e infraestructuras. Su objetivo es garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de estas estructuras, considerando cargas estáticas, dinámicas y condiciones ambientales propias del territorio peruano, especialmente su alta actividad sísmica.

- **Combinaciones de cargas:** Según la Norma Técnica Peruana E.090, las cargas y combinaciones de cargas que deben considerarse para el análisis estructural incluyen:

Cargas nominales

- D : Carga muerta debido al peso propio de los elementos.
- L : Carga viva debido al mobiliario y los ocupantes.
- L_r : Cargas vivas en las azoteas.

- W : Carga de viento.
- S : Carga de nieve.
- E : Carga de sismo de acuerdo con la norma E.030.
- R : Carga por lluvia o granizo.

Combinaciones de cargas:

$$1.4 * D \quad (15)$$

$$1.2 * D + 1.6 * L + 0.5 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) \quad (16)$$

$$1.2 * D + 1.6 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) + (0.5 * L \text{ o } 0.8 * W) \quad (17)$$

$$1.2 * D + 1.3 * W + 0.5 * L + 0.5 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) \quad (18)$$

$$1.2 * D \pm 1.0 * E + 0.5 * L + 0.2 * S \quad (19)$$

$$0.9 * D \pm (1.3 * W \text{ o } 1.0 * E) \quad (20)$$

Con la información obtenida de los ensayos no destructivos y el análisis de las cargas y sus combinaciones, se procedió al modelado estructural del silo Santa María.

Figura 61.

Modelo estructural del silo Santa María.

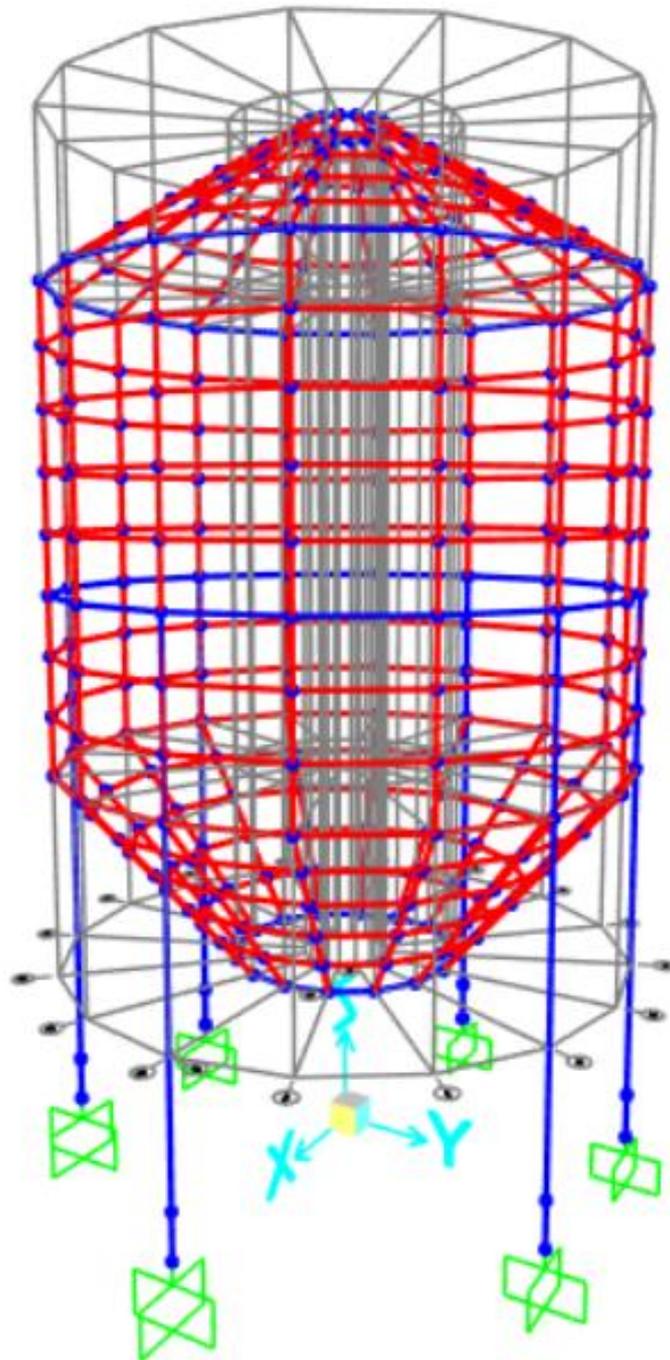


Figura 62.

Esfuerzos en las planchas de acero del silo.

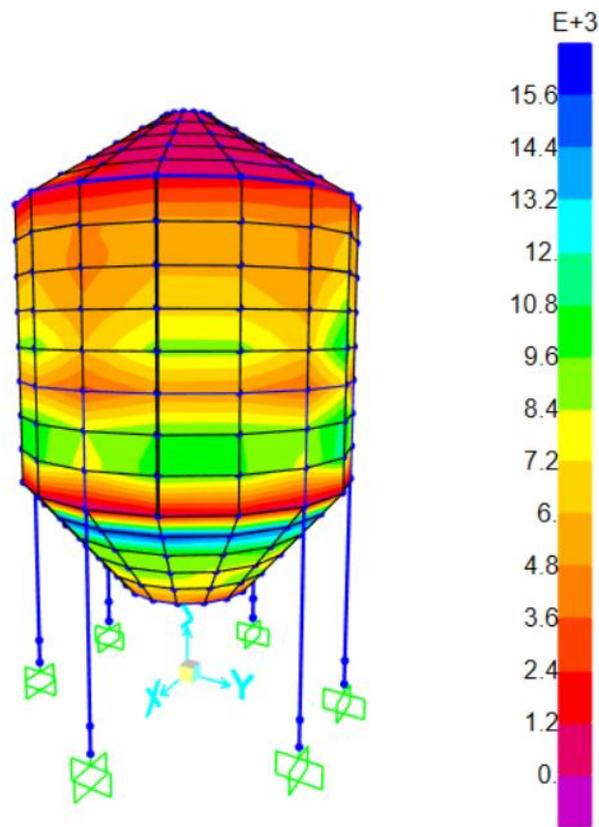


Tabla 15.

Desplazamientos máximos en las uniones de silo Santa María.

Uniones	Tipo	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
137	Max	0.012616	0.001378	-0.000091	0.0000043	0.002664	0.000024
153	Max	0.012283	0.001378	-0.000102	0.000031	0.000001903	0.000024
169	Max	0.011437	0.001379	-0.00011	0.000001467	0.000877	0.000021
121	Max	0.010211	0.001376	-0.000086	0.000062	0.002622	0.000028
17	Max	0.009347	0.00137	-0.000069	0.000014	0.006015	0.001146

Los resultados de los desplazamientos laterales máximos indican que cuatro uniones presentan valores que exceden el límite establecido por la norma E.030 para estructuras de acero, que es de 0.01. El mayor exceso registrado es del 26.62% por encima del límite, lo que, de no corregirse, podría comprometer la estabilidad general de la estructura.

Tabla 16.*Ratio de participación de las masas.*

Caso	Tipo	Dirección	Participación (%)
MODAL	Acceleration	UX	99.989
MODAL	Acceleration	UY	99.9992
MODAL	Acceleration	UZ	0.9864

Tabla 17.*Periodos y frecuencias de los modos analizados.*

Modos	Periodo (s)	Frecuencia (hz)
1	0.479501	2.085500535
2	0.224086	4.462564829
3	0.20137	4.965976217
4	0.109634	9.121217203
5	0.104849	9.537512585
6	0.062522	15.99433222
7	0.062518	15.99527594
8	0.062485	16.00378994
9	0.062455	16.01150334
10	0.060275	16.59049595
11	0.055386	18.05501704
12	0.054981	18.18816186

El mayor período, de 0.4795 s, y la menor frecuencia, de 2.0855 Hz, sugieren una deformación global predominante. Como es habitual en un análisis modal, los modos superiores presentan frecuencias más altas y períodos más cortos, lo que indica deformaciones más difíciles de

controlar. Además, la participación de las masas supera el 90% establecido en la norma E.030.

Los resultados obtenidos en el análisis estructural corroboran el estado del silo evidenciado en los ensayos no Destructivos.

CAPÍTULO IV.

DETERMINACION DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE FALLA

El modelo de análisis de falla es una herramienta que permite evaluar la integridad de las estructuras, permitiendo determinar la gravedad de los daños identificados y prever posibles fallas. La aplicación de este modelo se fundamenta en la recopilación de datos obtenidos a través de ensayos no destructivos y su posterior análisis mediante métodos numéricos y computacionales.

4.1 Evaluación de la necesidad de un modelo de análisis de fallas

La identificación de fallas estructurales en el silo Santa María, como la corrosión localizada, las fisuras en las soldaduras y las deformaciones, evidenció la urgencia de adoptar un enfoque sistemático de análisis de fallas. Los métodos tradicionales de inspección, basados en ensayos destructivos (ED), demostraron ser insuficientes debido a sus altos costos operativos, daño estructural y limitaciones técnicas. Estos procedimientos, además de ser invasivos, solo proporcionaban datos puntuales, sin capacidad para evaluar la integridad global de la estructura.

En contraste, los ensayos no destructivos (END) aplicados en este estudio, como ultrasonido y partículas magnéticas, permitieron diagnosticar las fallas sin alterar la estructura, preservando su funcionalidad durante la ejecución de los ensayos. Por ejemplo, el ensayo por ultrasonido reveló una pérdida de espesor promedio del 50.64% en la zona intermedia del Silo Santa María con un máximo de 66.61%, un valor superior al máximo permitido, del 10%, por la norma ASME Sección VIII (2019). Sin embargo, la simple detección de fallas no es suficiente: se

requiere un modelo de análisis integral que integre datos multidisciplinarios que permita predecir escenarios de riesgo y optimizar las estrategias de mantenimiento.

La necesidad de este enfoque se refuerza al analizar casos históricos. En 2020, el colapso del silo “La Esperanza” (de diseño similar) se atribuyó a la falta de un modelo predictivo que identificara corrosión avanzada en soportes ocultos, lo que resultó en pérdidas económicas (Miguel, 2021). En el silo Santa María, la implementación de un modelo basado en END y simulación computacional permitiría:

- Priorizar intervenciones: Las zonas con corrosión >8% o fisuras >2 mm recibirían refuerzos inmediatos.
- Reducir costos: Evitaría reparaciones emergentes, estimándose un ahorro del 30% en mantenimiento anual.
- Extender la vida útil: Al corregir defectos en etapas tempranas, se proyecta extender la durabilidad del silo.

Además, el enfoque propuesto se alinea con estándares internacionales como la norma API 580, que enfatiza la importancia de la gestión de riesgos basada en datos cuantitativos. Por ejemplo, la integración de mediciones de espesores con modelos de elementos finitos (FEA) en software que permitiría simular el impacto de la corrosión bajo cargas sísmicas, un escenario crítico en la zona de ubicación del silo. En resumen, la adopción de un análisis de fallas proactivo y no invasivo no solo mitiga riesgos inmediatos, sino que también establece un precedente para la gestión sostenible de infraestructuras críticas en la industria minera.

4.2 Metodología para el diseño del modelo de análisis de fallas

Para el desarrollo del modelo, se siguen los siguientes pasos detallados:

- Recopilación de datos estructurales: Se analiza la información obtenida en los ensayos no destructivos, como la medición de espesores, inspección visual, pruebas de líquidos penetrantes entre otras requeridas para un análisis más completo. Esta fase es

fundamental para establecer una línea base sobre la condición del silo y determinar los puntos críticos que requieren un análisis más detallado.

- Identificación de zonas críticas: A partir de la información recopilada, se realiza un análisis detallado de las zonas con mayor deterioro estructural. Se identifican áreas con corrosión severa, reducción significativa de espesor en placas metálicas y defectos en soldaduras que puedan comprometer la estabilidad de la estructura.
- Selección de criterios de evaluación: Se establecen los parámetros de análisis, incluyendo factores de seguridad, criterios de aceptación basados en normativas internacionales y umbrales de degradación permitidos. Esta fase permite definir los niveles de criticidad de las fallas detectadas y determinar la urgencia de intervenciones.
- Modelado computacional: Se utilizan herramientas de simulación estructural para recrear el comportamiento del silo bajo diferentes condiciones de carga. Se evalúan escenarios como cargas operativas normales, cargas extremas y efectos de vibraciones generadas por la descarga del material almacenado o por la presencia de un sismo.
- Análisis de esfuerzos y deformaciones: Se estudian las tensiones internas, la distribución de cargas y la respuesta de la estructura ante diversas solicitaciones. Se identifican puntos de acumulación de esfuerzos que puedan derivar en fallas estructurales y se comparan con los datos obtenidos en los ensayos no destructivos.
- Evaluación de la progresión de fallas: Se implementan modelos en solicitaciones máximas con el objetivo de obtener la propagación de grietas para prever el comportamiento de los defectos detectados a lo largo del tiempo. Esto permite determinar la velocidad de deterioro y estimar la vida útil de la estructura sin intervenciones.

- Validación del modelo: Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en la simulación con los datos reales obtenidos de los ensayos no destructivos para verificar la precisión del análisis. Se ajustan los parámetros del modelo según sea necesario y se formulan recomendaciones específicas para el mantenimiento preventivo y correctivo.

4.3 Descripción de las técnicas y herramientas empleadas en el modelo

A continuación, se detallará los procedimientos del desarrollo de los ensayos no destructivos considerados en el presente estudio con el objetivo de localizar las zonas críticas del silo Santa María.

A. Procedimiento de Inspección Visual según la Norma AWS D1.1

De acuerdo con norma AWS D1.1, la inspección visual debe llevarse a cabo por un inspector calificado antes, durante y después del proceso de soldadura para garantizar la conformidad con los estándares especificados.

- Inspección Antes de la Soldadura: Antes de realizar la soldadura, el inspector debe verificar:
 - La conformidad del diseño con los planos y especificaciones.
 - El estado de los materiales base y los consumibles de soldadura.
 - La preparación de los bordes y la limpieza de la junta a soldar.
 - La configuración y fijación de las piezas a unir.
 - Las condiciones ambientales, como temperatura y humedad.
- Inspección Durante la Soldadura: Durante el proceso de soldadura, se debe evaluar:
 - El cumplimiento de los parámetros del procedimiento de soldadura calificado (WPS).

- La presencia de defectos superficiales en los cordones de soldadura, como grietas o inclusiones.
- La ejecución de pases intermedios, verificando su limpieza y fusión adecuada.
- La temperatura de precalentamiento y entre pases cuando sea aplicable.
- Inspección Después de la Soldadura: Una vez completada la soldadura, se debe revisar:
 - La apariencia general de la soldadura (perfil, tamaño y acabado).
 - La presencia de discontinuidades superficiales, como porosidad, socavaciones, falta de fusión o grietas.
 - La correcta aplicación de los criterios de aceptación establecidos en la norma AWS D1.1.

La norma AWS D1.1 establece criterios específicos para determinar la aceptabilidad de una soldadura, basándose en factores como el tamaño de las discontinuidades, la longitud de las imperfecciones y su ubicación.

Criterios de aceptación

- Se prohíben grietas y defectos que comprometan la resistencia de la soldadura.
- Las tolerancias de las juntas deben cumplir con lo especificado en las tablas de la norma.
- Las soldaduras en estructuras críticas deben cumplir requisitos adicionales de tenacidad y calidad de unión.

Los resultados de la inspección visual deben documentarse en un informe detallado, que incluya:

- Identificación de la estructura inspeccionada.
- Métodos utilizados en la inspección.

- Resultados obtenidos y conformidad con los criterios de la norma.
- Recomendaciones para reparaciones o correcciones necesarias.

B. Método de esclerometría

La norma ASTM C 805 describe un método no destructivo para determinar el número de rebote del hormigón endurecido mediante un martillo de acero accionado por resorte. Este valor refleja indirectamente la dureza superficial del hormigón y se correlaciona con su resistencia a compresión. Su objetivo principal es evaluar la uniformidad del hormigón in situ, identificar zonas degradadas o de baja calidad, y estimar el desarrollo de resistencia durante la construcción o en estructuras existentes. Es una herramienta complementaria que no sustituye ensayos destructivos, como extracción de núcleos, pero ofrece ventajas en rapidez y costo.

Procedimientos

1. Preparación del equipo

- Verificar la calibración del martillo de rebote anualmente o ante sospechas de mal funcionamiento, utilizando un yunque de acero endurecido (dureza Rockwell 66 HRC). Un martillo calibrado correctamente debe arrojar un rebote de 80 ± 2 unidades en el yunque.
- Evitar el uso de múltiples martillos sin previa comparación de resultados en superficies similares.

2. Preparación de la superficie:

- Seleccionar zonas con espesor mínimo de 100 mm, libres de porosidad, descamación o huecos.
- Pulir superficies rugosas o con mortero suelto con una piedra abrasiva de carburo de silicio. Superficies lisas no requieren pulido.

- Evitar áreas cercanas a barras de refuerzo (<20 mm de cobertura) usando detectores de metal.

3. Toma de lecturas

- Realizar 10 impactos por área de prueba, espaciados al menos 25 mm entre sí.
- Hay que asegurar que el martillo esté perpendicular a la superficie y registrar la orientación (horizontal, vertical, etc.).
- Descartar lecturas con variaciones mayores a ± 6 unidades respecto al promedio. Si más de 2 lecturas se descartan, repetir el ensayo en una nueva zona.

Factores de influencia

Considerar efectos de humedad superficial, carbonatación, tipo de encofrado y orientación del martillo. Las superficies secas o carbonatadas pueden inflar los números de rebote.

Criterios de Aceptación

La norma no establece valores absolutos para aceptar o rechazar el hormigón, debido a la incertidumbre inherente del método. Sin embargo, define criterios para garantizar la validez de los resultados:

- Superficies deben cumplir con espesor mínimo (100 mm) y estar libres de defectos.
- No comparar resultados entre superficies pulidas y no pulidas.
- El martillo debe arrojar 80 ± 2 unidades en el yunque de verificación.
- Desviación estándar máxima permitida para un operador y equipo: ± 2.5 unidades.
- Rango máximo aceptable entre 10 lecturas: 12 unidades.

C. Medición de espesores por ultrasonido

La norma ASTM E 797 establece un método no destructivo para medir espesores de materiales mediante ultrasonido de contacto manual pulso-eco, aplicable a temperaturas $\leq 200^{\circ}\text{F}$ (93°C). Su objetivo es determinar el espesor de componentes accesibles desde un solo lado, como piezas maquinadas, equipos industriales o estructuras afectadas por corrosión/erosión. El método se basa en la relación entre el tiempo de propagación de ondas ultrasónicas y el espesor del material, calculado mediante:

$$T = \frac{V * t}{2} \quad (21)$$

Donde:

- T : Espesor del material.
- V : Velocidad del sonido en el material (constante para cada tipo de material).
- t : Tiempo de propagación de ida y vuelta de la onda.

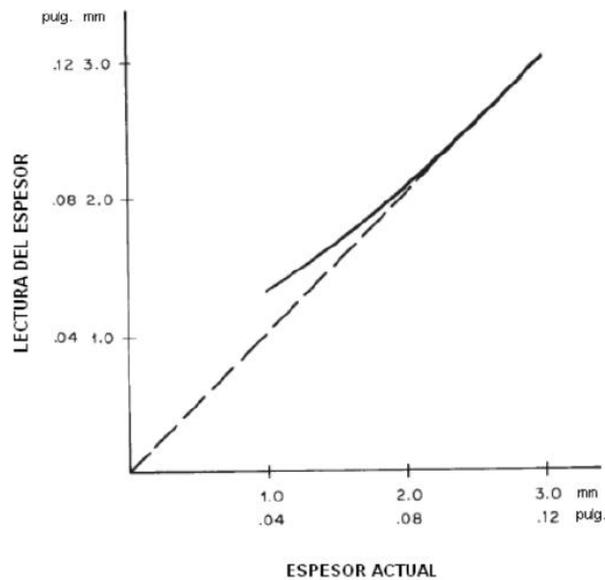
Procedimientos

1. Calibración del equipo

- Utilizar bloques de referencia de espesor conocido y material similar al analizado. Preferir bloques con espesores en extremos del rango de interés (mínimo y máximo).
- Ajustar el instrumento según el tipo de sonda:
 - *Sondas de elemento único*: Verificar linealidad del barrido en CRT y corregir retrasos.
 - *Sondas duales*: Considerar no linealidades en secciones delgadas (< 3 mm) y aplicar curvas de corrección empíricas (Fig. 2).

Figura 63

No linealidad de un transductor dual.



2. Preparación de la superficie

- Limpiar y pulir superficies rugosas o corroídas para asegurar contacto acústico óptimo.
- Usar acoplantes para minimizar pérdidas de señal.

3. Toma de lecturas

- Posicionar la sonda perpendicularmente a la superficie.
- En materiales curvos o irregulares, realizar múltiples mediciones y considerar la sección más delgada detectada.
- Para altas temperaturas ($>540^{\circ}\text{C}$), aplicar correcciones (reducir lecturas en ~1% por cada 55°C en acero).

4. Validación

- Verificar la linealidad del equipo con bloques de referencia antes y durante las mediciones.

- En secciones delgadas, usar sondas de alta frecuencia y ajustar el retraso del barrido para amplificar la resolución.

5. Factores que Afectan la Precisión

- **Temperatura del Material:** Ajustar la velocidad del ultrasonido si la temperatura difiere de la estándar (usar tablas de compensación) (ASTM E797, 2021).
- **Geometría de la Pieza:** En curvaturas o bordes, emplear transductores especializados (de contacto puntual) para minimizar.

Criterios de Aceptación

- La desviación máxima permitida entre lecturas y valores reales debe ser $\leq 1\%$ del espesor nominal para materiales homogéneos.
- En sondas duales, errores $\leq \pm 0.1$ mm para espesores < 3 mm, y $\leq \pm 2\%$ para espesores ≥ 3 mm.
- Contrastar los resultados con los valores mínimos/máximos permitidos por normas de diseño. La norma ASTM E797 no establece límites, solo metodología.

D. Método por líquidos penetrantes

La norma ASTM E 165 establece los procedimientos para el desarrollo del ensayo:

Procedimiento

- a. Preparación Inicial y Limpieza de la Superficie
 - *Preparación del Material:* Asegurar que la superficie esté libre de contaminantes como aceite, grasa, óxido o recubrimientos que puedan interferir con la penetración.

- *Condiciones Ambientales:* Realizar el ensayo en un ambiente con temperatura entre 10°C y 52°C y humedad controlada para evitar evaporación prematura del penetrante.

b. Aplicación del Penetrante

- *Selección del Tipo de Penetrante:* Elegir entre visible (colorante rojo) o fluorescente (brillo bajo luz UV), según la sensibilidad requerida.
- *Técnica de Aplicación:*
 - Rociar, sumergir o aplicar con brocha el penetrante, cubriendo uniformemente la superficie.
 - *Tiempo de Dwell:* Dejar actuar el penetrante durante 5 a 60 minutos, dependiendo del material y el tipo de defecto sospechado (Tabla 1; ASTM E165, 2023).

Tabla 18.

Clasificación de tipos y métodos de examinación penetrante.

Tipo I – Examinación penetrante fluorescente
Método A – Lavable con agua (ver método de examinación E 1209)
Método B – Posemulsificable, lipofílico (ver método de examinación E 1208)
Método C – Removible con solvente (ver método de examinación E 1219)
Método D – Posemulsificable, hidrófilo (ver método de examinación E 1210)
Tipo II – Examinación penetrante visible
Método A – Lavable con agua (ver método de examinación E 1418)
Método C – Removible con solvente (ver método de examinación E 1220)

c. Remoción del Exceso de Penetrante

- *Métodos de Remoción:*
 - *Penetrantes Lavables con Agua:* Enjuagar con agua a presión ≤ 40 psi.

- *Penetrantes Post-Emulsificables:* Aplicar un emulsificador antes del enjuague.
 - *Penetrantes Removibles con Solvente:* Usar un trapo limpio y solvente para limpiar.
 - *Verificación de la Limpieza:* Asegurar que no queden residuos de penetrante en la superficie, excepto en las discontinuidades.
- d. Aplicación del Revelador
- *Tipos de Revelador:*
 - *Seco:* Polvo fino para superficies rugosas.
 - *Húmedo no Acuoso:* Suspensión en solvente, aplicado por spray.
 - *Húmedo Acuoso:* Solución en agua, aplicada por inmersión o spray.
 - *Tiempo de Revelación:* Dejar actuar el revelador durante 10 a 60 minutos para que absorba el penetrante atrapado y forme indicaciones visibles.
- e. Inspección y Evaluación
- *Condiciones de Observación:*
 - *Penetrantes Visibles:* Inspeccionar bajo luz blanca con intensidad ≥ 1000 lux.
 - *Penetrantes Fluorescentes:* Usar luz ultravioleta (UV-A, 320-400 nm) en oscuridad ambiental.
 - *Interpretación de Indicaciones:* Clasificar las discontinuidades según su forma, tamaño y ubicación. Comparar con criterios de aceptación de normas aplicables (ASTM E165, 2023).
- f. Criterios de Aceptación

- *Límites de Discontinuidades:* La norma ASTM E165 no define criterios de aceptación; estos deben establecerse según especificaciones del cliente o normas complementarias ((ASTM E165, 2023).

E. Método de partículas magnéticas

El estándar ASTM E709 regula el método de partículas magnéticas (MT), una técnica no destructiva para detectar discontinuidades en materiales ferromagnéticos. Este procedimiento identifica defectos superficiales y subsuperficiales en componentes críticos como soldaduras y piezas estructurales sometidas a esfuerzos mecánicos.

La inspección por partículas magnéticas se basa en la inducción de un campo magnético en la pieza de ensayo. Si existen defectos, como grietas o discontinuidades, el campo se distorsiona y genera una fuga de flujo magnético. Cuando se aplican partículas magnéticas sobre la superficie, estas se concentran en la zona defectuosa, permitiendo su detección visual.

Procedimiento

a. Preparación de la Superficie

- **Limpieza:** Se debe eliminar aceite, grasa, óxido, pintura o cualquier contaminante que impida la libre movilidad de las partículas. En algunos casos se permite una capa muy fina de recubrimiento (hasta 0,05 mm) siempre que no interfiera en la formación de la indicación.
- **Inspección Visual Previa:** Se verifica que la superficie esté en condiciones adecuadas para el ensayo y se determina el área de inspección, la cual debe abarcar el área de interés más un margen adicional (por lo general, 1 pulgada alrededor de la zona crítica).

b. Aplicación del campo magnético

La correcta magnetización es esencial para generar el flujo de campo que hará visible el defecto. Según ASTM E709, existen dos métodos generales:

- Magnetización Directa
 - Principio: Se establece contacto eléctrico directo entre la fuente de corriente y la pieza, utilizando dispositivos como puntas de prueba (prods), yugo o abrazaderas.
 - Ventajas: Alta sensibilidad para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales; se puede concentrar el campo en zonas específicas (por ejemplo, en soldaduras).
 - Consideraciones:
 - Es fundamental mantener un buen contacto para evitar quemaduras por arco o sobrecalentamiento local.
 - La magnetización debe realizarse en, al menos, dos direcciones perpendiculares para revelar discontinuidades en cualquier orientación.
- Magnetización Indirecta
 - Principio: Se induce un campo en la pieza mediante dispositivos como bobinas preformadas, envolturas de cable o conductores centrales sin requerir contacto eléctrico directo.
 - Ventajas: Minimiza el riesgo de quemaduras por arco; útil para piezas con geometrías complejas o tubulares.
 - Consideraciones:

- Es necesario asegurar una distribución uniforme del campo y confirmar la intensidad mediante medidores (por ejemplo, sonda de efecto Hall).

c. Aplicación de las partículas magnéticas

Existen dos grandes categorías de partículas utilizadas en el ensayo:

- Partículas Secas
 - Aplicación: Se esparcen manualmente o mediante sopladores especializados mientras la pieza se encuentra magnetizada.
 - Características:
 - Deben ser lo suficientemente finas para revelar defectos pequeños, pero no tan diminutas que se adhieran a irregularidades superficiales.
 - La técnica requiere que la corriente magnetizante permanezca activa durante la aplicación y la eliminación del exceso, ya que las partículas pierden movilidad al asentarse.
 - Ventajas y Limitaciones:
 - Son ideales para aplicaciones en campo donde se requiere rapidez.
 - Pueden ser menos sensibles en superficies muy pulidas o en condiciones de viento.
- Partículas Húmedas
 - Aplicación: Se aplican en forma de suspensión (agua acondicionada, destilados de petróleo o aceite) que puede distribuirse de manera uniforme sobre la pieza.
 - Características:

- Permiten una mayor movilidad y son especialmente útiles para detectar discontinuidades casi superficiales.
- En aplicaciones con partículas fluorescentes, se requiere una fuente de luz ultravioleta para la inspección.
- Controles:
 - Es fundamental mantener la concentración y viscosidad recomendada del baño de partículas para garantizar resultados consistentes.
 - La aplicación debe sincronizarse con la magnetización, ya sea durante (técnica continua) o después de ésta (técnica residual).

d. Inspección y evaluación de las indicaciones

Una vez aplicada la magnetización y las partículas, el siguiente paso es la inspección:

- Observación:
 - Con luz visible se examinan las indicaciones producidas por partículas no fluorescentes.
 - Con luz ultravioleta (luz negra) se inspeccionan las indicaciones formadas por partículas fluorescentes, asegurando una intensidad mínima ($\geq 1000 \text{ Mw/cm}^2$) y que la zona de inspección esté adecuadamente oscurecida.
- Interpretación:
 - Las acumulaciones de partículas indican la presencia de discontinuidades.
 - Se evalúan criterios como longitud, forma y concentración de la indicación, comparándolos con los criterios de aceptación definidos en la especificación o en el contrato.

e. Desmagnetización y limpieza

Al finalizar el ensayo, es habitual realizar una desmagnetización para eliminar los campos residuales que podrían interferir en procesos posteriores:

- Desmagnetización: Se realiza mediante la aplicación de un campo alterno decreciente o con dispositivos específicos hasta que el campo residual se reduzca a niveles aceptables (por lo general, < 3 G).
- Limpieza: Se elimina cualquier residuo de partículas mediante aire comprimido, cepillado o enjuague con solventes, según lo requiera la pieza y el proceso subsiguiente (por ejemplo, pintura o maquinado).

f. Consideraciones de Seguridad y Condiciones Ambientales

- Temperatura: El ensayo no debe realizarse en superficies que excedan los 65°C (135°F), ya que las altas temperaturas pueden afectar la movilidad de las partículas y la integridad del material.
- Protección del personal: En el caso de la aplicación de partículas secas, es importante utilizar equipo de protección personal para evitar la inhalación de polvo.
- Manipulación de vehículos de suspensión: Los líquidos empleados deben cumplir con requisitos de inflamabilidad y toxicidad, y se deben seguir las precauciones de seguridad indicadas por el fabricante.

F. Análisis estructural

El análisis estructural de estructuras metálicas, de acuerdo con las normas peruanas, es un proceso técnico que evalúa el comportamiento, resistencia y estabilidad de estructuras compuestas por elementos de acero, garantizando que cumplan con los requisitos de seguridad, funcionalidad y durabilidad establecidos en la normativa nacional. Este análisis se rige principalmente por las siguientes normas y documentos técnicos:

Norma E.020 – Cargas

La Norma E.020 establece los tipos, magnitudes, distribuciones y combinaciones de cargas que deben considerarse en el diseño estructural de edificaciones e infraestructuras. Su objetivo es garantizar que las estructuras resistan las fuerzas externas e internas previsibles durante su vida útil, asegurando la seguridad de las personas y la integridad de la construcción.

La norma clasifica las cargas en dos categorías principales:

Cargas estáticas:

- Cargas muertas (CM): Peso propio de la estructura y elementos permanentes (muros, acabados).
- Cargas vivas (CV): Cargas variables por uso (personas, muebles, equipos).

Cargas dinámicas:

- Cargas de sismo (CS): Fuerzas horizontales derivadas de la actividad sísmica, calculadas según la zona sísmica del Perú.
- Cargas de viento (Cvi): Presiones generadas por el viento, dependientes de la velocidad regional y la forma de la estructura.
- Cargas de Nieve (CN): Aplica en zonas andinas con altitudes superiores a 3,000 msnm (Cusco, Puno).

Para el análisis de las cargas en una estructura específica, como un silo, se utilizará la norma europea UNE-EN 1991-4:2011, actualmente vigente.

La UNE-EN 1991-4 forma parte del conjunto de Eurocódigos, específicamente del Eurocódigos 1: Acciones en estructuras, y se titula “Acciones en estructuras. Parte 4: Silos y depósitos”. Esta norma armonizada establece los criterios para el cálculo de las acciones (cargas y fuerzas) que deben considerarse en el diseño de silos, depósitos y estructuras similares destinadas al almacenamiento de materiales a granel o líquidos.

Ensayo y evaluación de propiedades de los silos

Según la norma UNE-EN 1991-4:2011 los valores de las propiedades de los sólidos usados en el cálculo deben tener en cuenta las variaciones potenciales debidas a cambios en la composición, el método de fabricación, la granulometría, el contenido de humedad, la temperatura, la edad y la carga eléctrica debida a la manipulación.

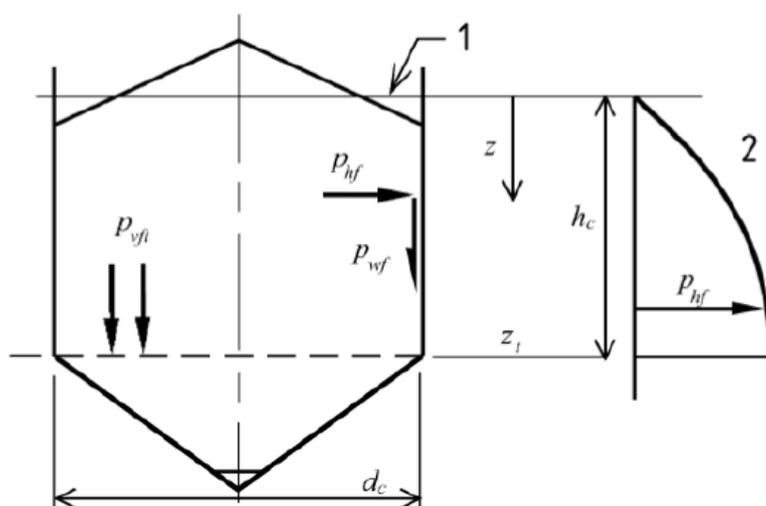
Para cualquier sólido disgregado pueden tomarse como válidas las propiedades por defecto del sólido almacenado que se indican en la Tabla 4.

Cargas debidas al material almacenado:

Puesto que los silos almacenan materiales solidos granulares, la distribución vertical de presión horizontal en las paredes no es línea como en el caso de la presión hidrostática del agua (UNE-ENV 1991-4).

Figura 64

Presiones en el cuerpo de un cilindro UNE-ENV 1991-4



Leyenda

- 1 Superficie equivalente
- 2 Presiones en el segmento de pared vertical

Comportamiento fluidizado, presiones en el cilindro:

$$P_{hf}(z) = P_{ho} * Y_j(z) \quad (22)$$

$$P_{wf}(z) = \mu * P_{ho} * Y_j(z) \quad (23)$$

$$P_{vf}(z) = \frac{P_{ho}}{K} * Y_j(z) \quad (24)$$

Siendo:

$$P_{ho} = \gamma * K * z_0 \quad (25)$$

$$z_0 = \frac{A}{K * \mu * U} \quad (26)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (27)$$

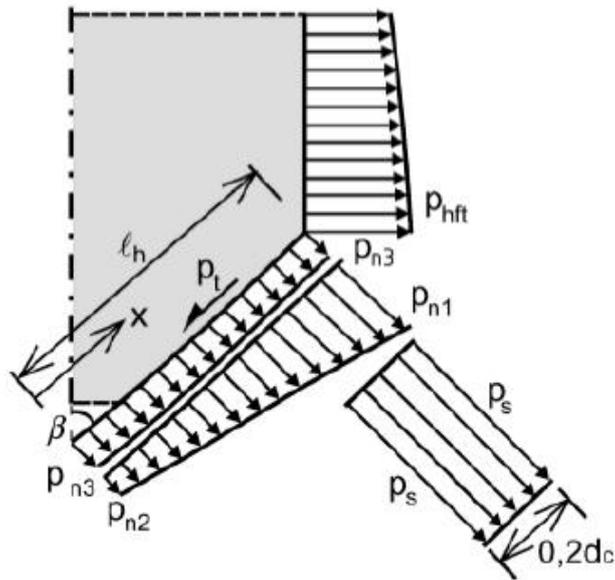
Donde:

- γ : Es el valor característico del precio unitario.
- μ : Es el valor característico del coeficiente de rozamiento con la pared.
- K : Es el valor característico del coeficiente de presiones laterales.
- Z : Es la profundidad desde la superficie equivalente del sólido.
- A : Es la sección transversal plana del silo.
- U : Es el perímetro interno de la sección transversal plana del sólido.

Cuando la inclinación de la pared de la tolva con respecto a la horizontal es mayor a 20°, se debería calcular la presión normal a la pared inclinada de la tolva p_n a cualquier altura (UNE-ENV 1991-4).

Figura 65

Representación de cargas en la tolva.



$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) * \frac{x}{l_h}$$

Siendo:

$$p_{n1} = p_{vft} * (C_b * \text{sen}^2 \beta + \text{cos}^2 \beta) \quad (28)$$

$$p_{n2} = p_{vft} * C_b * \text{sen}^2 \beta \quad (29)$$

$$p_{n3} = 3 * \frac{A}{U} * \frac{\gamma * K}{\sqrt{\mu_h}} * \text{cos}^2 \beta \quad (30)$$

Donde:

- β : Es la inclinación de la tolva respecto a la vertical.
- X : Es la longitud comprendida entre 0 y l_h .
- p_{n1} y p_{n2} : definen presiones en la tolva debido a la presión vertical del material.
- p_{n3} : Es la presión en la tolva debido al solido contenido en la tolva.
- C_b : Es el coeficiente de mayoración de cargas en el fondo.
- p_{vft} : Es la presión vertical que actúa a la altura de la transición.
- μ_h : Es el coeficiente de rozamiento en la pared de la tolva.

- K : Es El coeficiente de presión lateral en el segmento de la pared vertical.

Por lo cual, el valor de la presión de rozamiento con la pared p_t , se obtiene:

$$p_t = p_n * \mu_h \quad (31)$$

En silos con flujo masico se aplica una presión normal fija adicional:

$$p_s = 2K * p_{vft} \quad (32)$$

Carga de viento

Las estructuras arquitectónicas, elementos de cerramiento y componentes exteriores deben diseñarse para resistir las fuerzas generadas por presiones y depresiones aerodinámicas, tanto externas como internas, producidas por la acción del viento. El análisis debe contemplar la acción bidireccional del viento, actuando en dos direcciones horizontales ortogonales, considerando simultáneamente los efectos de presión y succión sobre la estructura.

Clasificación de las edificaciones: La norma E.020 las clasifican en tres tipos según su sensibilidad al viento:

- Edificaciones Tipo 1: Estructuras con baja sensibilidad a efectos dinámicos del viento, que incluyen:
 - Construcciones de baja altura
 - Edificios con poca relación altura/ancho
 - Estructuras cerradas con cubiertas rígidas

Su diseño sigue los criterios establecidos en las secciones 12.3 y 12.4 de la norma.

- Edificaciones Tipo 2: Estructuras esbeltas susceptibles a ráfagas, como:
 - Tanques elevados
 - Estructuras publicitarias

- Elementos con dimensión reducida en dirección al viento

Requieren incrementar en 20% las cargas externas calculadas según 12.4.

- Edificaciones Tipo 3: Estructuras con geometrías complejas que generan fenómenos aerodinámicos especiales:
 - Cubiertas curvas (domos, arcos)
 - Estructuras suspendidas
 - Elementos esbeltos (chimeneas, torres)

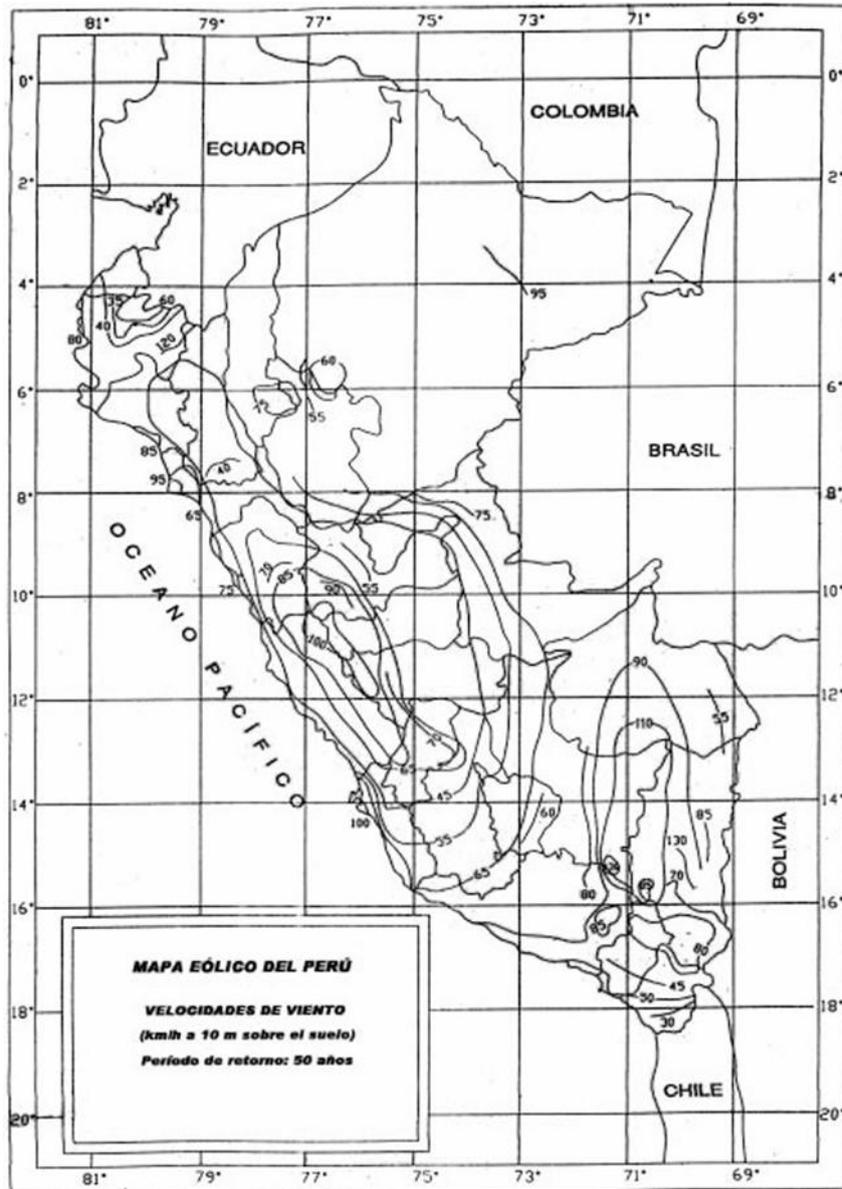
Su diseño exige análisis específicos, aunque las cargas mínimas deben equivaler a las del Tipo 1.

Velocidad de diseño:

La velocidad de diseño del viento hasta 10 m de altura será la máxima adecuada a la zona de ubicación de la edificación según el mapa eólico del Perú, pero no menos de 75 km/h (Norma E.020).

Figura 66.

Mapa eólico del Perú. Fuente: Norma E.020



$$V_h = V * \left(\frac{h}{10}\right)^{0.22} \quad (33)$$

Donde:

- V_h : Velocidad de diseño a la altura de h en km/h.
- V : Velocidad de diseño hasta 10 m de altura en km/h.
- h : Altura sobre el terreno en metros.

Carga exterior de viento: La carga exterior (presión y succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual actúa.

$$P_h = 0.005 * C * V_h^2 \quad (34)$$

Donde:

- P_h : Presión o succión del viento a una altura h en Kgf/m².
- C : Factor de forma adimensional.
- V_h : Velocidad de diseño a la altura de h en km/h.

Norma E.030 - Diseño Sismorresistente

La Norma Técnica de Edificación E.030 - Diseño Sismorresistente establece los criterios y requisitos para el diseño y construcción de estructuras capaces de resistir acciones sísmicas. Su objetivo principal es garantizar la seguridad de las edificaciones, minimizando daños estructurales y pérdidas humanas ante eventos sísmicos.

Esta norma proporciona métodos de análisis sísmico, define parámetros de diseño, establece coeficientes sísmicos y clasifica las estructuras según su importancia y tipo de material. Su aplicación es obligatoria en el diseño de edificaciones nuevas y en la evaluación de estructuras existentes en zonas de alta sismicidad.

Peligro sísmico

- f. Zonificación: Zonificación sísmica es la clasificación del territorio peruano en diferentes zonas de peligro sísmico, basándose en la intensidad y frecuencia de los terremotos en cada región. Esta zonificación permite definir los coeficientes sísmicos que se deben utilizar en el diseño estructural de edificaciones, garantizando que las construcciones sean seguras ante sismos.

Tabla 19.

Factores de zona "Z".

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Figura 67.

Zonas sísmicas. Fuente: Norma E.030.



- g. Perfiles de suelo: El Artículo 12 de la Norma Técnica de Edificación E.030 aborda las Condiciones Geotécnicas que deben considerarse en el diseño sismorresistente de edificaciones en el Perú. En la siguiente tabla se resumen sus principales tipos de perfiles de suelos:

Tabla 20.*Clasificación de los perfiles de suelos.*

Perfil	\bar{V}_s	\bar{N}_{60}	\bar{S}_u
S ₀	> 1500 m/s	-	-
S ₁	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S ₂	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S ₃	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S ₄	Clasificación basada en el EMS		

Fuente: Norma E.030

- h. Parámetros de Sitio (S, TP y TL): La norma E.030 define los parámetros S (amplificación sísmica), TP (período característico) y TL (período límite) según el tipo de suelo. Estos valores, obtenidos de tablas normalizadas, permiten calcular las fuerzas sísmicas considerando las condiciones geotécnicas del terreno para un diseño estructural seguro. El proceso consiste en identificar el perfil de suelo local y aplicar los valores correspondientes en el análisis.

Tabla 21.*Factor de suelo "s"*

ZONA \ SUELO	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃
Z ₄	0,80	1,00	1,05	1,10
Z ₃	0,80	1,00	1,15	1,20
Z ₂	0,80	1,00	1,20	1,40
Z ₁	0,80	1,00	1,60	2,00

Fuente: Norma E.030

Tabla 22.

Periodos

	Perfil de suelo			
	S0	S1	S2	S3
T_p (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T_l (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Fuente: Norma E.030

- i. Categoría de las Edificaciones y Factor de Uso (U): Cada estructura está clasificada de acuerdo con las categorías indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 23.*Categoría de la edificación.*

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR <i>U</i>
A Edificaciones Esenciales	A1: Establecimientos del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales para el manejo de las emergencias, el funcionamiento del gobierno y en general aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. Se incluyen las siguientes edificaciones: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, estaciones ferroviarias de pasajeros, sistemas masivos de transporte, locales municipales, centrales de comunicaciones. - Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. - Instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. - Edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. - Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	1,5
B Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de buses de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1,0
D Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.	Ver nota 2

j. Sistemas Estructurales y Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas

(R0): Los sistemas estructurales se clasifican de acuerdo con los materiales de construcción empleados y el tipo de configuración sismorresistente adoptada en cada dirección de análisis. A cada categoría de sistema estructural se le asigna un coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas (R_0), cuyos valores específicos están establecidos en tablas normativas. Este coeficiente permite modificar las fuerzas sísmicas de diseño considerando la capacidad de disipación energética y el

comportamiento estructural ante solicitaciones sísmicas. La determinación adecuada del coeficiente R_0 resulta fundamental para garantizar un diseño sísmico apropiado según las características particulares de cada sistema estructural.

Tabla 24.

Coeficiente Básico de Reducción de las Fuerzas Sísmicas.

Sistema Estructural	Coeficiente Básico de Reducción R_0 (*)
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	5
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	4
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	7
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	4
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera	7(**)

Fuente: Norma E.030

Norma E.090 - Estructuras Metálicas

La Norma E.090 establece los requisitos mínimos para el diseño, cálculo, fabricación, montaje y control de calidad de estructuras de acero destinadas a edificaciones e infraestructuras. Su objetivo es garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de estas estructuras, considerando cargas estáticas, dinámicas y condiciones ambientales propias del territorio peruano, especialmente su alta actividad sísmica.

- a. Combinaciones de cargas: Según la Norma Técnica Peruana E.090, las cargas y combinaciones de cargas que deben considerarse para el análisis estructural incluyen:

Cargas nominales

- D : Carga muerta debido al peso propio de los elementos.
- L : Carga viva debido al mobiliario y los ocupantes.
- L_r : Cargas vivas en las azoteas.
- W : Carga de viento.
- S : Carga de nieve.
- E : Carga de sismo de acuerdo con la norma E.030.
- R : Carga por lluvia o granizo.

Combinaciones de cargas

$$1.4 * D \quad (35)$$

$$1.2 * D + 1.6 * L + 0.5 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) \quad (36)$$

$$1.2 * D + 1.6 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) + (0.5 * L \text{ o } 0.8 * W) \quad (37)$$

$$1.2 * D + 1.3 * W + 0.5 * L + 0.5 * (L_r \text{ o } S \text{ o } R) \quad (38)$$

$$1.2 * D \pm 1.0 * E + 0.5 * L + 0.2 * S \quad (39)$$

$$0.9 * D \pm (1.3 * W \text{ o } 1.0 * E) \quad (40)$$

CAPÍTULO V.

DISEÑO DEL MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS

5.1 Proceso de desarrollo y construcción del modelo de análisis

El desarrollo del modelo de análisis de fallas se lleva a cabo en una serie de fases que garantizan una evaluación estructurada y precisa de la integridad del Silo Santa María. A continuación, se describe cada una de estas fases con mayor detalle:

- Definición de los objetivos del modelo: Se establecen los parámetros clave que guiarán el análisis de fallas, tales como la identificación de defectos estructurales, la evaluación del impacto de los esfuerzos en la estructura y la predicción del comportamiento del silo en diversas condiciones de carga. Se definen además los criterios de aceptación y los niveles de riesgo con base en normativas internacionales de acuerdo con cada ensayo no destructivo a realizar.
- Recolección y procesamiento de datos: Se recopilan datos obtenidos en los ensayos no destructivos, tales como inspección visual (AWS D1.1, 2020), medición de espesores por ultrasonido (ASTM E797, 2015), ensayo de esclerometría (ASTM C805, 2013) y líquidos penetrantes (ASTM E165, 2012). Posteriormente, los datos son procesados y organizados para su integración en el modelo computacional, asegurando que la información sea representativa del estado real de la estructura.
- Desarrollo del modelo geométrico: Se elabora un modelo tridimensional del silo empleando software de modelado estructural. Este modelo debe replicar fielmente las dimensiones, geometría y características constructivas del silo, lo que permitirá realizar simulaciones precisas bajo diferentes escenarios de carga y condiciones ambientales.
- Asignación de propiedades de materiales: Se incorporan las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del silo en el modelo computacional, considerando los

datos obtenidos en los ensayos no destructivos y las especificaciones de normativas. Se incluyen parámetros como módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, límite elástico y resistencia a la tracción para garantizar que el modelo refleje el comportamiento real de los materiales en servicio.

- Aplicación de cargas y condiciones de frontera: Se simulan diversas condiciones de carga que incluyen el peso propio de la estructura, la presión del material almacenado, los efectos del viento, las cargas sísmicas y las variaciones térmicas. Se establecen restricciones adecuadas en los apoyos y conexiones del silo para reflejar su comportamiento estructural en condiciones reales de operación.
- Evaluación de los resultados y comparación con datos experimentales: Los resultados obtenidos en la simulación se comparan con los datos obtenidos en los ensayos no destructivos para verificar la coherencia de los valores de tensiones, deformaciones y factores de seguridad en cada componente del silo. Se identifican discrepancias y se evalúa la necesidad de ajustes en el modelo.
- Calibración y ajuste del modelo: Si se detectan discrepancias entre los resultados numéricos y los datos experimentales, se realizan ajustes en los parámetros del modelo, tales como las condiciones de carga, los coeficientes de seguridad y las propiedades de los materiales. Este proceso iterativo asegura que el modelo represente con precisión el estado real del silo.
- Generación de informes y conclusiones: Se documentan los hallazgos del análisis y se generan recomendaciones para el mantenimiento y reforzamiento estructural del silo. El informe final incluye gráficos, mapas de tensiones y deformaciones, tablas de comparación con los datos de ensayos no destructivos y sugerencias para la planificación de intervenciones correctivas y preventivas.

Este proceso garantiza un análisis exhaustivo y confiable del Silo Santa María, permitiendo anticipar fallas potenciales y optimizar las estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo. La combinación de ensayos experimentales y simulaciones computacionales proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la gestión de la infraestructura.

5.2 Validación del modelo a través de estudios preliminares o simulaciones

La validación del modelo de análisis de falla es un paso crítico para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de simulación. Para ello, se realizan estudios preliminares y simulaciones numéricas que permiten comparar los datos generados con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos no destructivos.

En primer lugar, se ejecutan pruebas preliminares en modelos simplificados del silo para verificar la coherencia de las propiedades asignadas a los materiales, las condiciones de carga y los coeficientes de seguridad utilizados en el análisis. Estas pruebas iniciales permiten ajustar los parámetros del modelo y detectar posibles inconsistencias antes de proceder con simulaciones más complejas.

Posteriormente, se ejecutan simulaciones implementado en software especializado. Estas simulaciones replican las condiciones reales de operación del silo, incluyendo cargas estáticas y dinámicas, efectos ambientales como temperatura, viento y humedad, y la influencia de factores como la corrosión y la fatiga del material.

Para evaluar la precisión del modelo, los resultados obtenidos en las simulaciones se comparan con los datos recolectados en los ensayos no destructivos, tales como medición de espesores por ultrasonido (ASTM E797, 2015), inspección visual de soldaduras (AWS D1.1, 2020), esclerometría para evaluación del concreto (ASTM C805, 2013) y pruebas de líquidos penetrantes para detección de grietas (ASTM E165, 2012). La correlación entre estos resultados permite determinar la confiabilidad del modelo y realizar ajustes en los parámetros si es necesario.

Adicionalmente, se realizan análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de diversas variables en el comportamiento estructural del silo. Esto incluye la variación de las propiedades de los materiales, la distribución de cargas y la interacción entre los diferentes componentes estructurales. Estos estudios ayudan a identificar los factores críticos que afectan la estabilidad del silo y permiten optimizar el modelo para mejorar su precisión.

Finalmente, la validación se completa con la comparación de los resultados obtenidos con estudios previos y referencias bibliográficas en el campo del análisis estructural y la mecánica de fallas. Este proceso asegura que el modelo desarrollado cumple con los estándares de la ingeniería estructural y proporciona información fiable para la toma de decisiones en materia de mantenimiento y reforzamiento del silo.

5.3 Evaluación de la efectividad del modelo en la detección de fallas

La evaluación de la efectividad del modelo en la detección de fallas se llevó a cabo mediante la comparación entre los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas y los datos recopilados en los ensayos no destructivos realizados al Silo Santa María. Esta comparación permitió determinar el grado de precisión del modelo y su capacidad para predecir defectos estructurales de manera fiable.

Tabla 25

Observaciones de los resultados de los END.

END	Zona crítica identificada	Observaciones
Inspección Visual (AWS D1.1)	Soldaduras y deterioro de la estructura	Grietas visibles en cordones de soldadura, corrosión y oxidación
Esclerometría (ASTM C805)	Cimentación (Pedestales)	Variación considerable de la resistencia superficial del concreto
Ultrasonido (ASTM E797)	Placas laterales	Reducción de los espesores de las placas metálicas detectada (con tramos críticos)

Líquidos Penetrantes (ASTM E165)	Uniones metálicas	Fisuras superficiales no visibles al ojo humano por defectos durante el soldado.
-----------------------------------------	-------------------	----------------------------------------------------------------------------------

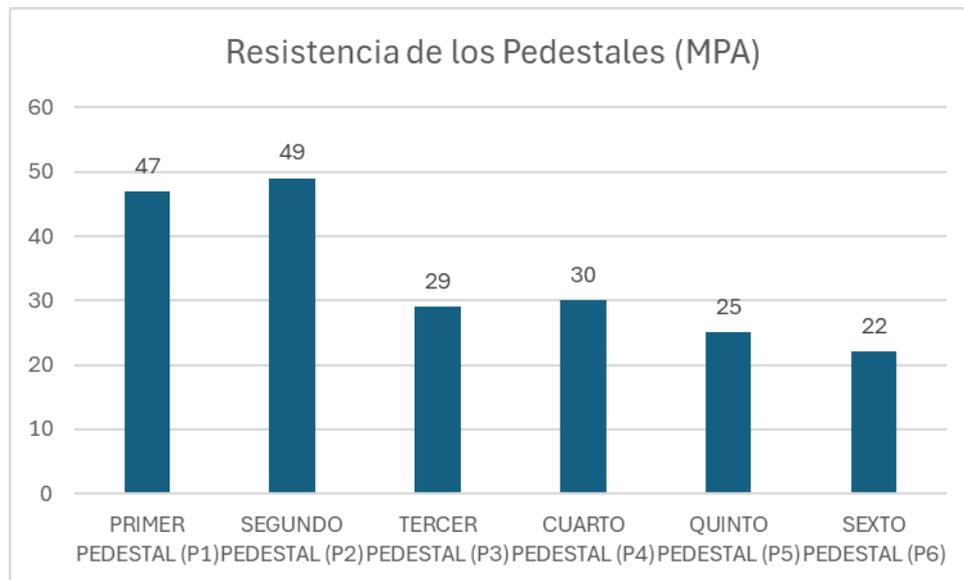
Los ensayos no destructivos (END) permitieron identificar zonas críticas afectadas por corrosión, disminución del espesor de placas metálicas, fisuras en uniones soldadas y deterioro del concreto en la cimentación del silo.

Los resultados de la simulación mediante el Método de Elementos Finitos (FEA) fueron contrastados con los datos obtenidos en los END, observándose una correlación significativa en la identificación de zonas de alto riesgo. En particular, las simulaciones reflejaron con precisión los desplazamientos en la estructura.

La evaluación de la cimentación mediante el ensayo de esclerometría reveló que algunos pedestales presentan resistencias inferiores en más de un 15% respecto al promedio general de 33.67 MPa, con una variación máxima del 53% entre el valor más alto y el más bajo registrado.

Figura 68

Resistencia de los pedestales medidos por END.



Dado que no se dispone de la resistencia de diseño original de los pedestales, se trabajó con el valor promedio de esta estructura. Con base en este criterio, se infiere que los pedestales con menor resistencia podrían fallar prematuramente, lo cual fue corroborado por el análisis estructural, donde dichos pedestales mostraron mayores desplazamientos laterales, como se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 26

Desplazamientos máximos en los pedestales.

Uniones	Pedestal	Resistencia (MPa)	Tipo	Dx	Dy	Dz
312	P4	30	Max	0.0000220	0.0000015	-0.0000021
313	P3	29	Max	0.0000150	0.0000016	-0.0000023
314	P2	49	Max	0.0000210	0.0000019	-0.0000026
315	P5	25	Max	0.0000089	0.0000013	-0.0000018
316	P6	22	Max	0.0000230	0.0000016	-0.0000021
317	P1	47	Max	0.0000081	0.0000012	-0.0000017

Uno de los principales hallazgos fue la validación de la reducción de espesores en las placas de acero, especialmente en la zona media del silo, donde el ultrasonido reveló una pérdida de hasta el 66.61% del espesor original.

Tabla 27

Espesores máximos y mínimos de las planchas metálicas.

Zona de inspección en el silo	Medición promedio (mm)		Espesor Nominal (mm).	Rate de Corrosión máx.(mm/año)	
	Max.	Min.		Max.	Min.
Zona Superior	4.5	4.1	6.35	35.43%	29.45%
Zona Media	7.7	4.2	12.7	66.61%	39.21%
Zona Inferior	10.6	9.7	12.7	23.62%	16.54%

Las simulaciones numéricas confirmaron que esta reducción impacta directamente en la capacidad de carga del silo, generando concentraciones de esfuerzos que incrementan el riesgo de falla por fatiga y deformación plástica.

Tabla 28

Deformaciones máximas de las planchas metálicas.

ÁREA	TIPO	Ex TOP	Ey TOP
49	Max	0.000714	0.000110
64	Max	0.000708	0.000086
56	Max	0.000704	0.000082
57	Max	0.000702	0.000073
65	Max	0.000702	0.000005
80	Max	0.000697	0.000005
72	Max	0.000693	0.000005
73	Max	0.000691	0.000005

50	Max	0.000688	0.000136
49	Max	0.000687	0.000129
58	Max	0.000687	0.000113
58	Max	0.000685	0.000113
50	Max	0.000684	0.000101
63	Max	0.000680	0.000111
63	Max	0.000680	0.000104
55	Max	0.000679	0.000098
66	Max	0.000679	0.000009
56	Max	0.000678	0.000113

Adicionalmente, el modelo identificó una alta probabilidad de falla en las conexiones soldadas, asociada a defectos detectados mediante ensayos con líquidos penetrantes. El análisis de esfuerzos en estas uniones mostró deformaciones que exceden los límites permisibles establecidos por la normativa técnica peruana y por el tipo de material, lo cual indica la necesidad de intervenciones inmediatas para preservar la integridad estructural.

5.4 Análisis Estadístico de los resultados de los Ensayo No Destructivos.

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Fisher (LSD) para evaluar diferencias significativas en los espesores medidos por ultrasonido en tres zonas del silo (superior, media, inferior). Los datos provienen de mediciones repetidas (M1 a M5) por punto, con un espesor nominal de 6.35 mm (zona superior) y 12.7 mm (zonas media e inferior).

5.4.1 Análisis de varianza (ANOVA)

Se realizó un ANOVA para evaluar si existen diferencias significativas en los espesores medidos por ultrasonido entre las zonas superior, media e inferior del silo Santa María. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

- H_0 : No hay diferencias significativas entre las medias de espesores de las tres zonas ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$).
- H_1 : Al menos una zona difiere significativamente en espesor promedio.

Fórmulas clave:

1. **Suma de Cuadrados Total (SST):**

$$SST = \sum_{i=1}^{ki} \sum_{j=1}^{nj} (X_{IJ} - \hat{X})^2 \quad (41)$$

2. **Suma de Cuadrados Entre Grupos (SSB):**

$$SSB = \sum_{i=1}^k n_i (\hat{X}_i - \hat{X})^2 \quad (42)$$

3. **Suma de Cuadrados Dentro de Grupos (SSW):**

$$SSW = SST - SSB \quad (43)$$

4. **Estadístico F:**

$$F = \frac{MSB}{MSW} = \frac{SSB/(k-1)}{SSW/(N-k)} \quad (44)$$

Tabla 29

Análisis de Varianza (ANOVA)

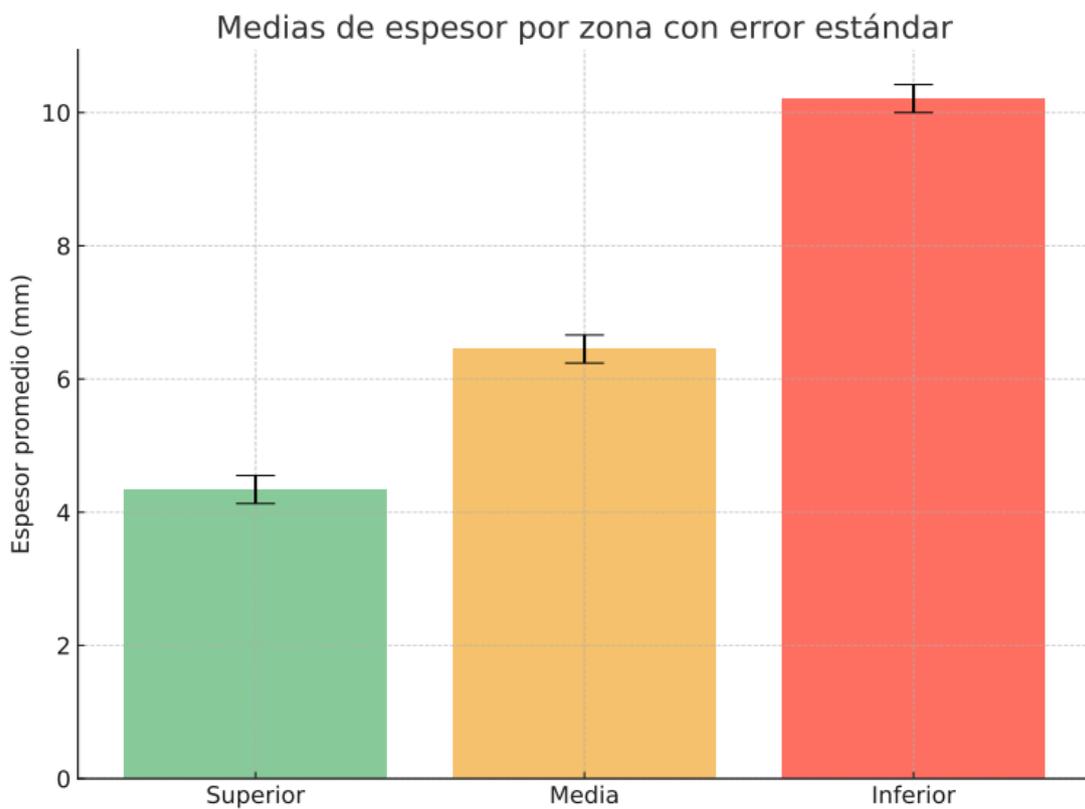
Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrado Medio (MS)	F-valor	p-valor
Entre Grupos (Zonas)	175.86	2	87.93	218.74	<0.001

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrado Medio (MS)	F-valor	p-valor
Dentro de Grupos	10.48	26	0.40		
Total	186.34	28			

- F-valor = 218.74 (F crítico para $\alpha=0.05$: ~ 3.37).
- p-valor < 0.001: Se rechaza H_0 . Hay diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos zonas.

Figura 69

Medias de espesor por zona con error estándar.



5.4.2 Prueba de Fisher (LSD)

Objetivo: Identificar qué zonas difieren entre sí.

Fórmula LSD:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} * \sqrt{MSW * \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \quad (45)$$

Donde:

- $t_{\alpha/2, N-k}$ = valor crítico t (para $\alpha = 0.05$, $df = 26$) ≈ 2.056 .
- $MSW = 0.40$.
- n_i, n_j = tamaño de muestra por zona (8, 10, 10).

Tabla 30.

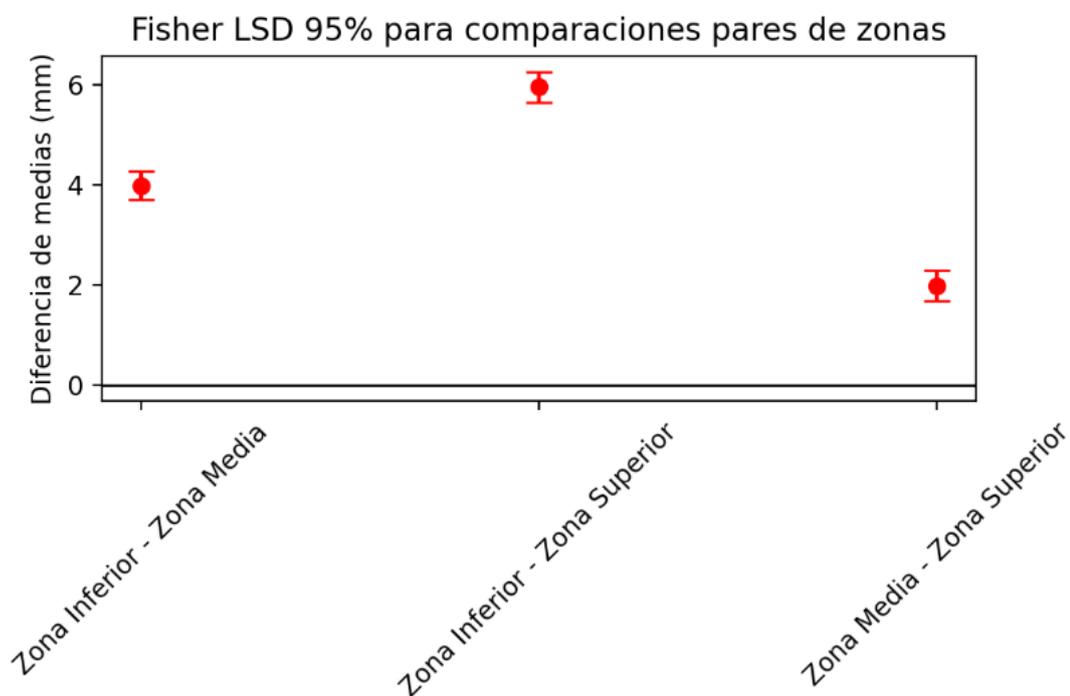
Prueba de Fisher – Comparaciones por pares.

Zona 1	Zona 2	Diferencia de Medias	LSD ($\alpha=0.05$)	Significancia
Superior	Media	4.34 vs 6.45	0.56	Sí ($p < 0.001$)
Superior	Inferior	4.34 vs 10.21	0.56	Sí ($p < 0.001$)
Media	Inferior	6.45 vs 10.21	0.56	Sí ($p < 0.001$)

- Todas las zonas difieren significativamente entre sí ($p < 0.05$).
- Orden de espesores: Inferior (10.21 mm) > Media (6.45 mm) > Superior (4.34 mm).

Figura 70

Diagrama Fisher LSD 95% para comparaciones pares de zonas



5.4.3 Estadístico Descriptivo por Zona

Tabla 31.

Estadísticas Descriptivas por Zona.

Zona	n	Media (mm)	Desviación		
			Estándar (mm)	Mínimo	Máximo
Superior	8	4.34	0.13	4.10	4.50
Media	10	6.45	1.02	4.60	7.70
Inferior	10	10.21	0.28	9.70	10.60

5.4.4 Discusión de Resultados

- ANOVA y Fisher confirman que la corrosión es heterogénea según la zona del silo, siendo más severa en la zona superior (espesores ~4.34 mm vs. nominal de 6.35/12.7 mm).
- La zona inferior muestra menor tasa de corrosión (espesores cercanos a 10.2 mm), pero aún fuera de especificación.
- Implicaciones: Sugiere que la exposición a agentes corrosivos (humedad, químicos) varía por altura, requiriendo estrategias de mantenimiento diferenciadas.

Tabla 32.

Resumen Análisis de Varianza ANOVA

Variable	SS	df	MS	F	p
Entre Zonas	175.86	2	87.93	218.74	<0.001
Error	10.48	26	0.40		

En conclusión, el modelo de análisis de falla demostró ser altamente efectivo en la identificación de fallas estructurales del Silo Santa María, proporcionando información detallada y precisa sobre las áreas de mayor riesgo. La validación a través de estudios preliminares y simulaciones confirma que el modelo desarrollado es una herramienta confiable para la toma de decisiones en materia de mantenimiento y reforzamiento estructural.

- Los análisis ANOVA y Fisher confirman que la corrosión afecta diferencialmente al silo, siendo más crítica en la zona superior.

- Los resultados respaldan la necesidad de un modelo predictivo para gestionar la integridad estructural.

CAPÍTULO VI.

VIABILIDAD ECONÓMICA DEL MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS

6.1 Análisis de la aplicabilidad y escalabilidad del modelo

El modelo de análisis de falla desarrollado para el Silo Santa María ha demostrado ser una herramienta efectiva para la detección de defectos estructurales y la evaluación de la integridad de la estructura. Sin embargo, su aplicabilidad no se limita exclusivamente a este caso de estudio, sino que puede ser adaptado para su uso en otras estructuras similares, tanto en la industria minera como en sectores industriales donde se empleen silos de almacenamiento de gran tamaño.

La aplicabilidad del modelo radica en su capacidad para identificar fallas en estructuras metálicas y de concreto mediante la combinación de ensayos no destructivos y simulaciones computacionales. Dado que las metodologías utilizadas, son ampliamente reconocidas y aplicadas en la ingeniería estructural, el modelo puede ser replicado en otros proyectos con características similares.

En términos de escalabilidad, el modelo puede ser ajustado para evaluar estructuras de mayor o menor tamaño, modificando los parámetros de entrada incorporando otros ensayos, las condiciones de carga y las propiedades del material. Para estructuras más grandes, se requerirá un refinamiento en la malla del modelo FEA y una mayor cantidad de datos experimentales para garantizar la precisión de los resultados. Por otro lado, en estructuras más pequeñas, la reducción de la complejidad del modelo permitirá optimizar el tiempo de simulación y el análisis de los resultados.

Otro factor clave en la escalabilidad del modelo es su integración con sistemas de monitoreo continuo. Con el avance de tecnologías como sensores de ultrasonido en tiempo real y la

inteligencia artificial aplicada al procesamiento de datos estructurales, el modelo puede evolucionar hacia una herramienta predictiva capaz de anticipar fallas antes de que se manifiesten físicamente en la estructura.

Finalmente, la implementación del modelo en diferentes industrias requerirá ajustes específicos en función de los materiales, normativas locales y condiciones de operación de cada estructura. Sin embargo, la metodología general y los principios de análisis estructural empleados en este estudio proporcionan una base sólida para su adaptación y uso en diversos escenarios de ingeniería estructural.

6.2 Consideración de factores económicos y técnicos en la implementación del modelo

Desde un punto de vista económico, la principal inversión asociada con la implementación del modelo está relacionada con la adquisición de equipos, materiales y herramientas para ensayos no destructivos (END), software de análisis estructural y la capacitación del personal encargado de la inspección y evaluación de datos. La compra de herramientas representa un costo inicial significativo, pero su uso prolongado (vida útil promedio de los equipos es de 5 a 10 años aproximadamente) reduce la necesidad de intervenciones correctivas costosas y permite anticipar fallas antes de que comprometan la seguridad de la estructura. Por ello, se realizó una estimación detallada de los costos asociados a la ejecución del modelo:

Tabla 33

Cotización de los materiales utilizados.

MATERIALES	UND	PRECIOS UNITARIOS POR PROVEEDOR				
		Promart		Saga Falabella		Testek Group
TIZAS PARA METAL	UND	S/	1.61	S/	1.74	
TRAPOS INDUSTRIAL	KG	S/	6.50	S/	7.50	
GEL ACOPLANTE	GL					S/ 463.97
KIT DE LIQUIDOS PENETRANTES	KIT	S/	107.90			S/ 112.00
LIJAS (100)	UND	S/	2.90	S/	3.10	
REMOVEDOR DE PINTURA	UND			S/	44.90	S/ 46.00

PINTURA SPRAY DE ZINC LARO PERFECT 400ml	UND		S/	40.00	S/	58.00
PLUMON INDELEBLE	UND	S/	2.90	S/	2.40	
GUANTES QUIRURGICOS	PAR	S/	0.85	S/	0.25	
SPRAY DE PARTICULAS MAGNETICAS HUMEDAS	UND				S/	35.00
LACA CONTRASTE BLANCO	UND				S/	25.00
TIZAS DE COLORES	KIT	S/	2.40		S/	8.20
CORRECTOR	UND	S/	2.20		S/	2.50
THINER	GL	S/	62.70	S/	48.83	

Fuente: Propia

Tabla 34

Materiales utilizados en la ejecución de los END.

MATERIALES	UND	CANT	MIN	PRECIO TOTAL
TIZAS PARA METAL	UND	10	S/ 1.61	S/ 16.13
TRAPOS INDUSTRIAL	KG	12	S/ 6.50	S/ 78.00
GEL ACOPLANTE	GL	1	S/ 463.97	S/ 463.97
KIT DE LIQUIDOS PENETRANTES	KIT	5	S/ 107.90	S/ 539.50
LIJAS (100)	UND	10	S/ 2.90	S/ 29.00
REMOVEDOR DE PINTURA	UND	3	S/ 44.90	S/ 134.70
PINTURA SPRAY DE ZINC LARO PERFECT 400ml	UND	1	S/ 40.00	S/ 40.00
PLUMON INDELEBLE	UND	6	S/ 2.40	S/ 14.40
GUANTES QUIRURGICOS	PAR	24	S/ 0.25	S/ 6.00
SPRAY DE PARTICULAS MAGNETICAS HUMEDAS	UND	7	S/ 35.00	S/ 245.00
LACA CONTRASTE BLANCO	UND	4	S/ 25.00	S/ 100.00
TIZAS DE COLORES	KIT	1	S/ 2.40	S/ 2.40
CORRECTOR	UND	4	S/ 2.20	S/ 8.80
THINER	GL	1	S/ 48.83	S/ 48.83
TOTAL				S/ 1,726.73

Fuente: Propia

Tabla 35

Cotización de las herramientas utilizadas.

HERRAMIENTAS	UND	PRECIOS UNITARIOS POR PROVEEDOR		
		Promart	Saga Falabella	Testek Group
AMOLADORA EINHELL	UND	S/ 399.00		
BATERIAS DE AMOLADORA	UND	S/ 139.00		
ESCOBILLA DE COPA DE ACERO	UND	S/ 17.90		
CARGADOR PORTATIL	UND	S/ 121.00		
ESPATULA	UND	S/ 7.90	S/ 5.39	

ESCOBILLA DE METAL	UND	S/	14.90		
DISCO POLIFAN	UND	S/	14.90	S/	16.50
REGLA METALICA 30 cm	UND	S/	17.90	S/	4.90
BRIDGE CAM	UND				S/ 497.00
DISCO DE GRATA	UND	S/	43.20	S/	38.90

Fuente: Propia

Tabla 36

Herramientas utilizadas en la ejecución de los END.

HERRAMIENTAS	UND	CANT	MIN	PRECIO TOTAL
AMOLADORA EINHELL	UND	2	S/ 399.00	S/ 798.00
BATERIAS DE AMOLADORA	UND	5	S/ 139.00	S/ 695.00
ESCOBILLA DE COPA DE ACERO	UND	13	S/ 17.90	S/ 232.70
CARGADOR PORTATIL	UND	3	S/ 121.00	S/ 363.00
ESPATULA	UND	4	S/ 5.39	S/ 21.56
ESCOBILLA DE METAL	UND	4	S/ 14.90	S/ 59.60
DISCO POLIFAN	UND	15	S/ 14.90	S/ 223.50
REGLA METALICA 30 cm	UND	2	S/ 4.90	S/ 9.80
BRIDGE CAM	UND	1	S/ 497.00	S/ 497.00
DISCO DE GRATA	UND	13	S/ 38.90	S/ 505.70
TOTAL				S/ 3,405.86

Fuente: Propia

Tabla 37

Cotización de los equipos utilizados.

EQUIPOS	UND	PRECIOS UNITARIOS POR PROVEEDOR		
		Promart	Saga Falabella	Testek Group
MEDIDOR DE ESPESORES c/ACCESORIOS	UND			S/ 15,732.15
LAPTOP (MOUSE Y CARGADOR)	UND		S/ 2,199.00	
RADIOS HANDY	UND	S/ 149.00		
YUGO MAGNETICO + ACCESORIOS	UND			S/ 5,082.26
ESCLEROMETRO + ACCESORIOS	UND			S/ 2,284.16
SOFTWARE ANSYS	UND	S/		1,900.00

Fuente: Propia

Tabla 38

Equipos utilizados en la ejecución de los END.

EQUIPOS	UND	CANT	MIN	PRECIO TOTAL
MEDIDOR DE ESPESORES c/ACCESORIOS	UND	1	S/ 15,732.15	S/ 15,732.15
LAPTOP(MOUSE Y CARGADOR)	UND	2	S/ 2,199.00	S/ 4,398.00
RADIOS HANDY	UND	2	S/ 149.00	S/ 298.00
YUGO MAGNETICO + ACCESORIOS	UND	1	S/ 5,082.26	S/ 5,082.26
ESCLEROMETRO + ACCESORIOS	UND	2	S/ 2,284.16	S/ 4,568.32
SOFTWARE ANSYS	UND	1	S/ 1,900.00	S/ 1,900.00
TOTAL				S/ 31,978.73

Fuente: Propia

Tabla 39

Personal requerido durante la ejecución de los END.

PERSONAL	UND	PU	P. Total
INGENIEROS ESPECIALISTA	HH	S/ 45.00	S/ 3,600.00
TÉCNICO END	HH	S/ 30.00	S/ 3,600.00
AYUDANTES	HH	S/ 18.00	S/ 2,880.00
TOTAL			S/ 10,080.00

Fuente: Propia

El costo **TOTAL ESTIMADO PARA LA EJECUCIÓN** de los END es de **S/ 47,191.32**.

Estos costos cubren todos los insumos necesarios para realizar las inspecciones, análisis y validaciones correspondientes. Aunque la inversión inicial puede parecer significativa, su retorno se justifica por la prevención de fallas estructurales graves, la reducción de costos de mantenimiento correctivo y la prolongación de la vida útil de la estructura.

Además, la disponibilidad de software especializado y personal capacitado contribuye directamente a la eficiencia del modelo. Es importante resaltar que parte de estos recursos pueden reutilizarse en otras estructuras, lo que mejora la rentabilidad a largo plazo.

Por tanto, la implementación del modelo es técnicamente viable y económicamente sostenible, especialmente en contextos donde la seguridad estructural es prioritaria.

6.3 Análisis de costos Detallado

6.3.1 Gastos operativos anuales

Tabla 40

Análisis de los gastos operativos anuales.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (S/)	Subtotal (S/)
Personal				
Ingeniero Especialista	Hora	80	S/ 45.00	S/ 3,600.00
Técnico END	Hora	120	S/ 30.00	S/ 3,600.00
Ayudante	Hora	160	S/ 18.00	S/ 2,880.00
Materiales				
Tizas Para Metal	Und	10	S/ 1.61	S/ 16.13
Tropos Industrial	Kg	12	S/ 6.50	S/ 78.00
Gel Acoplante	Gl	1	S/ 463.97	S/ 463.97
Kit de Líquidos Penetrantes	Kit	5	S/ 107.90	S/ 539.50
Lijas (100)	Und	10	S/ 2.90	S/ 29.00
Removedor De Pintura	Und	3	S/ 44.90	S/ 134.70
Pintura Spray De Zinc Laro Perfect 400ml	Und	1	S/ 40.00	S/ 40.00
Plumon Indeleble	Und	6	S/ 2.40	S/ 14.40
Guantes Quirúrgicos	Par	24	S/ 0.25	S/ 6.00
Spray de Partículas Magnéticas Húmedas	Und	7	S/ 35.00	S/ 245.00
Laca Contraste Blanco	Und	4	S/ 25.00	S/ 100.00
Tizas De Colores	Kit	1	S/ 2.40	S/ 2.40
Corrector	Und	4	S/ 2.20	S/ 8.80
Thiner	Gl	1	S/ 48.83	S/ 48.83
Herramientas				
Escobilla De Copa De Acero	UND	13	S/ 17.90	S/ 232.70
Espátula	UND	4	S/ 5.39	S/ 21.56
Escobilla De Metal	UND	4	S/ 14.90	S/ 59.60
Disco Polifan	UND	15	S/ 14.90	S/ 223.50
Regla Metálica 30 cm	UND	2	S/ 4.90	S/ 9.80
Disco de Grata	UND	13	S/ 38.90	S/ 505.70
Equipos				
Software ANSYS (Educativo)	Mes	1	S/ 900.00	S/ 900.00
Mantenimiento				
Mantenimiento	Gl	1	S/ 2,500.00	S/ 2,500.00
TOTAL				S/ 16,259.59

Fuente: Propia

Nota:

- Costo Hora Hombre: Basado en mercado laboral peruano (2024).

- Costo Hora Máquina: Incluye depreciación y mantenimiento.

6.3.2 Análisis de Mercado y Precios Unitarios

Tabla 41

Comparativa de Costos con alternativas Existentes.

Método de Inspección	Costo Promedio (S/)	Ventajas	Desventajas
Modelo Propuesto (END + MEF)	S/ 47,191.32	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Detección temprana de fallas. ✓ Reduce costos de reparación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inversión inicial alta.
Inspección Visual Tradicional	S/ 8,000.00	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No detecta fallas internas.
Ultrasonido Básico	S/ 15,000.00	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rápido para áreas pequeñas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limitado a superficies accesibles.

Fuente: Cotizaciones locales de empresas de ingeniería (2024).

6.3.3 Rentabilidad y Retorno de Inversión (ROI)

El rendimiento o retorno sobre la inversión (ROI) constituye un indicador financiero que permite evaluar la eficiencia de una inversión al relacionar los beneficios obtenidos con el capital invertido. Este indicador se utiliza como herramienta de análisis para medir el desempeño financiero de una empresa, proporcionando una perspectiva clara sobre la rentabilidad de las decisiones de inversión.

6.3.3.1 Cálculo de Beneficios vs. Costos

Tabla 42

Cálculo de Beneficios vs. Costos.

Concepto	Costo (S/)	Beneficio (S/)	Período
Implementación Inicial	S/ 47,191.32	-	Año 0
Ahorro en Reparaciones	-	30,000.00/año	Años 1-5
Vida Útil Extendida	-	15,000.00/año	Años 1-10

Fuente: Propia

Tabla 43

Retorno sobre la inversión desde el año 1 al año 5.

	AÑO 01	AÑO 02	AÑO 03	AÑO 04	AÑO 05
Gastos operativos	S/ 16,259.59				
Ahorro en Rep.	S/ 30,000.00				
Utilidad	S/ 13,740.42				
ROI anual	S/ 33,450.90	S/ 19,710.49	S/ 5,970.07	-S/ 7,770.35	-S/ 21,510.76
ROI (%)	-70.88%	-41.77%	-12.65%	16.47%	45.58%

Fuente: Propia

Tabla 44

Retorno sobre la inversión desde el año 5 al año 10.

	AÑO 06	AÑO 07	AÑO 08	AÑO 09	AÑO 10
Gastos operativos	S/ 16,259.59				
Ahorro en Reparaciones	S/ 30,000.00				
Utilidad	S/ 13,740.42				
ROI anual	-S/ 35,251.18	-S/ 48,991.59	-S/ 62,732.01	-S/ 76,472.42	-S/ 90,212.84
ROI (%)	74.70%	103.81%	132.93%	162.05%	191.16%

Fuente: Propia

ROI = (Beneficios Acumulados - Costo Inicial) / Costo Inicial

- **Año 5:** $(68,702.08 - 47,191.32) / 47,191.32 = 45.58\%$.

6.3.4 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son indicadores financieros fundamentales en la evaluación de proyectos de inversión, ya que permiten determinar con mayor precisión la viabilidad económica y la rentabilidad esperada de una iniciativa. Ambos criterios facilitan la toma de decisiones al proporcionar una visión cuantitativa sobre el desempeño financiero del proyecto a lo largo del tiempo.

Tabla 45

Inversión y utilidad desde el año 0 al año 5.

Año	Utilidad
0	-S/ 47,191.32
1	S/ 13,740.42
2	S/ 13,740.42
3	S/ 13,740.42
4	S/ 13,740.42
5	S/ 13,740.42

Fuente: Propia

En diversas economías de América Latina, las tasas de descuento suelen situarse entre el 10 % y el 12 %, lo que refleja un mayor nivel de riesgo país y operativo en comparación con economías más estables, como la de Australia, donde esta tasa se aproxima al 7 %. Según el informe de Faster Capital (2024), el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) en entornos corporativos a nivel global oscila generalmente entre el 6 % y el 12 %. Adicionalmente, profesionales con experiencia en proyectos similares estiman que una tasa apropiada se encuentra entre el 10 % y el 13 %, siendo ajustada al alza en contextos de mayor incertidumbre o riesgo. En consecuencia, para el presente análisis se adopta una tasa de descuento (K) del 13 %, considerando las condiciones específicas del entorno evaluado.

Tabla 46

Calculo del VAN y la TIR.

Tasa. Descuento (K)	13.00%	
TIR	>	K
13.98%	>	13.00%
TIR	13.98%	Rentable
VAN	S/ 1,136.90	Ganancias

Fuente: Propia

- La Tasa Interna de Retorno (TIR) calculada para un horizonte temporal de cinco años es de 13.98 %. Al superar ligeramente la tasa de descuento establecida en 13.00 %, se puede inferir que el proyecto presenta rentabilidad, aunque con un margen de ganancia limitado. La diferencia de 0.98 puntos porcentuales indica una rentabilidad modesta, pero aceptable desde una perspectiva financiera.
- Por otro lado, el Valor Actual Neto (VAN) estimado para el mismo periodo asciende a S/ 1,136.90, lo que evidencia que el proyecto genera un beneficio neto tras recuperar la inversión inicial. Si bien el valor obtenido no es significativo en términos absolutos, confirma que, bajo las condiciones y supuestos adoptados, la propuesta resulta financieramente viable.

6.3.5 Recomendaciones para Reducción de Costos

- Optimización de Horas Hombre:
Capacitar a personal interno en END para reducir dependencia de externos.
- Alquiler de Equipos:
Renta de esclerómetros o medidores de espesor en proyectos puntuales.
- Software Educativo:
Usar licencias académicas de ANSYS (50% más económicas).

6.3.6 Factores Técnico-Económicos Clave

Tabla 47

Factores Técnico-Económicos Clave

Factor	Impacto en Costo	Solución Propuesta
Disponibilidad de Personal	Alto	Capacitación interna.
Acceso a Tecnología	Medio	Alianzas con universidades.
Normativas Locales	Bajo	Uso de estándares internacionales.

- El modelo es económicamente viable (ROI > 100% en 5 años).
- Propuesta de mejora: Incluir sensores IoT para reducir costos de monitoreo continuo.

6.4 Discusión sobre los resultados obtenidos y posibles mejoras para futuras investigaciones

Los resultados obtenidos en la investigación demuestran que el modelo de análisis de fallas aplicado al Silo Santa María logra identificar eficazmente las zonas críticas de la estructura, evidenciando una correlación significativa entre los ensayos no destructivos (END) y las simulaciones estructurales realizadas mediante el método de elementos finitos (MEF). Esta efectividad respalda la validez de integrar técnicas de monitoreo estructural con análisis computacional para la detección temprana de fallas, un enfoque que coincide con hallazgos clave de estudios previos sobre silos industriales.

Según Calero Pérez y González Rojas (2021) sobre el diseño de un silo de 100 m³ para la industria alimentaria empleó simulaciones en ANSYS para validar presiones y deformaciones, logrando un factor de seguridad elevado (FS = 8.34) debido al

conservadurismo de normas como API 650. Este trabajo refuerza la fiabilidad del MEF en la evaluación estructural, alineándose con los resultados del presente estudio, donde la correlación entre zonas críticas identificadas por END y el modelo computacional evidenciando una correlación significativa. Además, ambos trabajos destacan la importancia de integrar normativas sísmicas para evaluar escenarios dinámicos, un aspecto que amplía la aplicabilidad del modelo.

Por otro lado, Ercoli et al. (2007) analizó la interacción grano-pared en silos mediante modelización no lineal con el software ALGOR, demostrando que parámetros como el coeficiente de Poisson y el ángulo de dilatación influyen hasta en un 115% en las presiones estáticas. Estos hallazgos son consistentes con la detección de fisuras no visibles en el Silo Santa María, donde la combinación de END y MEF permitió identificar microfisuras asociadas a sobrepresiones dinámicas, similares a las reportadas en silos con tolva analizados por Ercoli et al.

A diferencia de los estudios mencionados, este trabajo incorporó un análisis integral de la cimentación mediante esclerometría, un aspecto crítico en estructuras expuestas a minerales agresivos, pero poco abordado en investigaciones previas. Mientras que Calero Pérez y González Rojas (2021) se centró en la simulación del comportamiento de las paredes y tolvas, y Ercoli et al. (2007) en interacciones grano-pared, la evaluación de la cimentación aquí realizada reveló que el deterioro del concreto en zonas de alta humedad acelera la aparición de grietas, un hallazgo clave para programas de mantenimiento preventivo.

Además, a diferencia de los modelos estáticos predominantes en la literatura, este estudio integró efectos sísmicos según la normativa E.030, identificando desplazamientos críticos en la unión silo-tolva. Esto contrasta con la investigación realizado por Ercoli et al. (2007),

que solo consideró descargas centradas, y con Calero Pérez y González Rojas (2021), que mencionó brevemente cargas sísmicas bajo la norma ecuatoriana NEC.

Posibles Mejoras para Futuras Investigaciones

Siguiendo las recomendaciones Ercoli et al. (2007), que destacó la necesidad de validación experimental, se sugiere incorporar sensores de vibración y deformación para actualizar parámetros en tiempo real. Esto optimizaría modelos como el de Calero Pérez y González Rojas (2021), donde el conservadurismo normativo limita la eficiencia económica. Además, el uso de inteligencia artificial (IA) para analizar datos de END, tal como se explora en estudios de dinámica granular, podría automatizar la detección de patrones críticos.

Por otro lado, la validar el modelo mediante pruebas de carga en campo permitiría ajustar parámetros granulares y reducir discrepancias, como las observadas en la investigación de Ercoli et al. (2007), donde variaciones del módulo de Young afectaron las presiones en un 28%.

También, basado en el análisis de silos hiperbólicos de Ercoli et al. (2007), futuros trabajos podrían evaluar estructuras con geometrías no convencionales, integrando efectos de corrosión y fatiga térmica, aspectos no considerados en el presente estudio.

En conclusión, la integración de END, MEF y normativas sísmicas ha demostrado ser un enfoque robusto para la detección de fallas en silos, respaldado por estudios como el de Calero Pérez y González Rojas (2021) y Ercoli et al. (2007). Sin embargo, la incorporación de tecnologías emergentes (sensores, IA) y la validación experimental ampliada representan pasos críticos para optimizar la precisión del modelo y su adaptabilidad a diversas tipologías industriales, consolidando así un marco metodológico seguro y eficiente.

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como finalidad desarrollar un enfoque integral para la identificación y análisis de fallas en la estructura del Silo Santa María, utilizando ensayos no destructivos y modelado estructural, de la cual se puede concluir:

1. La investigación permitió consolidar una base teórica robusta sobre los mecanismos de falla en silos metálicos, integrando normativas internacionales (AWS D1.1, ASTM, ASME, API y Eurocódigos) y principios de mecánica estructural. Este marco conceptual fue fundamental para guiar la selección de técnicas de evaluación no destructiva y el desarrollo del modelo computacional.
2. La investigación permitió llevar a cabo una evaluación exhaustiva del silo, identificando con precisión sus elementos, las cuales gracias a la aplicación de ensayos no destructivos como la inspección visual (según AWS D1.1), la medición de espesores por ultrasonido (ASTM E797), la esclerometría (ASTM C805) y la aplicación de líquidos penetrantes (ASTM E165) y partículas magnéticas (ASTM 709) se pudieron identificar zonas críticas afectadas por corrosión, pérdida de espesor y defectos en las soldaduras. Este resultado detallado reveló que las deficiencias estructurales se presentan en diferentes niveles de la estructura, lo que representa un riesgo para la seguridad y el funcionamiento del silo.
3. La integración de diversas técnicas de END permitió elaborar un modelo que combina las medidas de espesores, la evaluación de la calidad del concreto de la cimentación mediante esclerometría y la detección de defectos en las uniones soldadas a través de líquidos penetrantes. Esta metodología multidimensional, que combina datos de diferentes fuentes, mejoró la resolución del diagnóstico y permitió alimentar el modelo computacional con información precisa, fortaleciendo la capacidad del modelo para predecir fallas estructurales de manera fiable.

4. Se diseñó un modelo de análisis de fallas basado en el método de elementos finitos, que integró la información empírica obtenida de los ensayos no destructivos con simulaciones numéricas. Este modelo permitió simular la distribución de esfuerzos y detectar áreas de alta concentración de deformaciones, confirmando la existencia de defectos críticos en la estructura. El hecho de que el modelo presentara una correlación significativa con los hallazgos obtenidos de los END respalda su capacidad predictiva y lo posiciona como una herramienta valiosa para la identificación temprana de fallas en sistemas de almacenamiento metálicos.
5. Se llevó a cabo un análisis económico detallado considerando los costos asociados a materiales, herramientas, equipos y personal; la inversión total estimada fue de S/ 47,191.32 con un ROI del 45.58% en 5 años . A pesar de los costos iniciales, el análisis concluye que la inversión se justifica por la reducción de riesgos y la prevención de fallas catastróficas. La aplicación del modelo permite disminuir los costos asociados a reparaciones de emergencia y prolongar la vida útil del silo, lo cual se traduce en un ahorro económico considerable a mediano y largo plazo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda profundizar en técnicas avanzadas de Ensayos no destructivos como ultrasonido convencional (haz angular), termografía infrarroja (IRT), Eddy Current Testing (ECT) y emisión acústica (AE) para dar un mejor mapeo de corrosión, detectar micro fisuras, discontinuidades volumétricas y degradación de materiales en etapas tempranas, complementando los métodos tradicionales.
2. Para optimizar la validación de los resultados y lograr una integración más robusta de las técnicas END, se recomienda implementar un protocolo combinado que incluya: para la parte estructural ultrasonido phased array (PAUT) para evaluar con mayor precisión las uniones soldadas, campo magnético alterno (MLF) en planchas estructurales para detectar micro fisuras, levantamiento topográfico con láser escáner para cuantificar deformaciones, verticalidad y ovalidad, y para la parte de concreto técnicas avanzadas de ultrasonido del concreto y escaneo de varillas, permitiendo una caracterización integral de todos los componentes estructurales (metálicos y de hormigón) y generando datos más confiables para alimentar el modelo predictivo, con especial aplicación en las zonas críticas ya identificadas durante el estudio inicial.
3. Se recomienda implementar modelos de elementos finitos avanzados que consideren comportamiento no lineal como el daño progresivo del silo por corrosión y la fatiga. Estos modelos pueden ser calibrados con los datos experimentales obtenidos mediante técnicas avanzadas END, dando paso a resultados de mayor exactitud, ya que estaría incorporando el análisis de la mecánica estructural y los procesos de corrosión, integrando incluso machine learning para mejorar la capacidad predictiva.

4. Dado el éxito del modelo en la detección de fallas estructurales, se sugiere su aplicación en otras infraestructuras de almacenamiento, como silos cementeros o depósitos de productos químicos, con las modificaciones pertinentes según cada caso.
5. Con base en los resultados económicos que demuestran la viabilidad del modelo (ROI del 45.58% en 5 años e inversión recuperable de S/47,191.32), se recomienda implementar definitivamente el sistema de análisis mediante END, adquiriendo los equipos esenciales para garantizar su continuidad, capacitando al personal técnico para optimizar costos operativos, y estableciendo un programa de mantenimiento predictivo que priorice las zonas críticas identificadas; esta estrategia integral no solo reducirá los gastos por reparaciones emergentes (ahorro estimado de S/30,000 anuales) sino que extenderá la vida útil del silo Santa María, convirtiendo la inversión inicial en ganancias sostenibles para la operación minera.

BIBLIOGRAFÍA

- Asprilla Valdes , A. (2021). Prototipo de sistema de gestión de abastecimiento, mantenimiento y control de polución de silos de cemento. *Tesis de Grado*. Repositorio de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/29148/AsprillaValdesAlberto2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Berroa Huarachi, E. G. (2019). 1) Aplicación de control de calidad de los requisitos mínimos para el proceso de preparación superficial y recubrimiento en un tanque de clarificación del Proyecto Tambomayo. *Tesis de Grado*. Arequipa, Peru: Repositorio Universidad Nacional San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/11046/IMbehueg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Borja Suarez, M. (2016). *Metodologia de la Investigacion Cientifica para Ingenieros*. Chiclayo, Lambayeque, Peru. Recuperado el 18 de Marzo de 2022, de <https://1library.co/document/y90kr2wy-metodologia-de-la-investigacion-para-ingenieros.html>
- Calero Perez , E. E., & Gonzales Rojas , L. E. (2021). Diseño y análisis mediante simulación de un silo de fondo cónico de 100 m³ de capacidad para la industria alimenticia, en plancha lisa de acero estructural ASTM-A572 GR50. *Tesis de Grado*. Repositorio Universidad Politecnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20285>
- Cevallos Pazmiño, J. A., & Peralta Maldonado , L. D. (2019). Análisis del estado actual de los silos y recipientes móviles (Bulks) de la Empresa BJ Services mediante ensayos no destructivos y determinación de zonas críticas mediante software de elementos finitos. *Tesis de Grado*. Repositorio de la Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1520>
- Diaz Garcia , M. A., Navamuel Aparicio, B., & Ramos Gutierrez , O. R. (2017). Sistema Integral de elevacion SIE plataforma autodeslizante para refuerzo y reparación de un silo de hormigón. *Dialnet VII Congreso Internacional de Estructuras: [resúmenes publicados en la revista Hormigón y Acero, 68]*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6940691>

- Hernández, F. y. (2010). *Metodología De La Investigación*. España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.; 5a edición (23 Mayo 2014).
- INFINITIA. (8 de Octubre de 2020). *infinitiaresearch*. Recuperado el 26 de Julio de 2022, de <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayos-no-destructivos-definicion-aplicacion/>
- Martínez, A. C. (2019). *Rediseño del anillo y tapa de un silo usado en el almacenamiento de forraje en una empresa de la ciudad de Cali*. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10781/T08407.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Miguel, C. P. (2021). *Analisis y Diseño de Silos metalicos de almacenamiento*. Obtenido de <https://repositorio.upct.es/handle/10317/10040>
- Miño Vaca , B. A. (2020). Determinacion, Interpretacion interpretación y evaluación de discontinuidades en juntas soldadas de estructuras metálicas por ensayos no destructivos, basado en el código AWS D1.1. *Tesis de Grado*. Quito, Ecuador: Repositorio de la Universidad Politecnica Salesiana - Sede Quito. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18289>
- Ormaza Salcedo , J. A. (2019). Propuesta de mejora para el proceso de fumigación de materia prima almacenada en silos en una empresa de alimento balanceado. *Tesis de Grado*. Repositorio Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/46231>
- Peralta Cruz, E. F. (2018). Aplicación y evaluación de las principales discontinuidades en las uniones soldadas con END (liquidos penetrantes) en los tanques de envejecimiento en el proyecto de “reforzamiento de los anillos superiores en la planta concentradora Cuajone-SPCC”. *Tesis de grado*. Arequipa: Repositorio de la Universidad San Agustin. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8390>
- Ramos Gangas , A. (2018). Diseño de la estructura de un silpo de acero para almacenar 1000 toneladas de cemento. *Tesis de Grado*. Repositorio Universidad de Cantabria. Obtenido de [https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14174/409409.pdf;jsessi](https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/14174/409409.pdf;jsessionid=...)
- Revenet , J. (1992). *Silos*. Edicion Laert Fotocomposicion SL. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=2svVhbUbApcC&pg=PA500&dq=silos+de+almacenamiento&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwijiLgJ94r5AhWEGbkGH85C5YQ6AF6B-AgGEAI#v=onepage&q=silos%20de%20almacenamiento&f=false>

- Ruiz , M., & Furios, M. (2019). Sistema de Monitoreo de Condiciones de Almacenamiento en Silo Bolsas. *Tesis de Grado*. Repositorio Universidad Tecnologica Nacional. Obtenido de <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/4146/Informe%20Proyecto%20Final%20%28Ruiz%20-%20Furios%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Servicio de Innovacion y Apoyo Tecnico a la Docencia y a la Investigacion UMH. (2016). *VIII Congreso Iberico de Agroingenieria Libro de Actas*. Universitas Miguel Hernandez. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=8pd0DQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=ensayo+de+termografia+a+un+silo+de+almacenamiento&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjOn_S7-Yr5AhV_CbkGHYrsAtIQ6AF6BAGJEAI#v=onepage&q&f=false
- The American Society of Mechanical Engineers. (2013). *VIII Reglas para la Construcción de Recipientes a Presion*. Código ASME para Calderas y Recipientes a Presion. Obtenido de <https://www.asme.org/getmedia/443f6b0a-4e45-4a12-8f83-3230fa92306a/35832.pdf>
- Ttito Callata, D. A. (2017). Evaluación de las principales discontinuidades presentadas en las uniones soldadas de una línea de tubería para la conducción de petróleo y la aplicación de los ensayos no destructivos en el proyecto “Puerto Bravo”. *Tesis de Grado*. Repositorio de la Universidad San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5112>
- Vallejo Sagastequi, C. (2018). Implementación de un silo metálico de 1050 m³ para almacenamiento de cemento en la empresa cementos norte Pacasmayo s.a.c. *Tesis de Grado*. Repositorio Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11102>
- Williams, D. B., & Gracey, A. D. (2016). *Mantenimiento y Funcionamiento de Silos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=kJ1q-leaxg8C&oi=fnd&pg=PA32&dq=Silos+y+recipientes+de+almacenamiento&ots=BQ40ltzqxR&sig=0IzKqY2le8he_Whrpg0sUakt0TA&redir_esc=y#v=onepage&q=Silos%20y%20recipientes%20de%20almacenamiento&f=false

ANEXOS

ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 48.

Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Metodología	Técnicas e instrumentos de recolección de información
¿De qué forma se puede desarrollar un enfoque efectivo para identificar y analizar las posibles fallas en la estructura del silo, utilizando métodos de ensayos no destructivos, con el fin de mejorar la seguridad	Realizar el diseño de un modelo de análisis de fallas en la estructura en el silo Santa María aplicando ensayos no destructivos.	Se podrá realizar el diseño de un modelo de análisis de fallas en la estructura en el silo Santa María aplicando ensayos no destructivos.	<p>Tipo de investigación</p> <p>La investigación se clasificará en el tipo tecnológica</p> <p>Nivel de la investigación</p> <p>El nivel de la investigación en este</p>	<p>Técnicas</p> <p>Técnica documental:</p> <p>Técnica de observación:</p> <p>Instrumentos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Base de datos de las dimensiones del silo a evaluar

estructural y prolongar su vida útil?			caso se consideró que hay el nivel cuantitativo. Método de la investigación	<ul style="list-style-type: none"> • Planos de la ubicación • Manuales de diseño • Tablas de datos para analizar los valores de factor de seguridad
Problema específico	Objetivo Específico	Hipótesis Especifica	La metodología que se aplicara a la presente investigación se clasifica por el tipo no experimental de la subclase Explicativa	
¿Cuáles son las fallos y deficiencias más comunes en que se presenta en la estructura del silo que podrían comprometer su seguridad y funcionamiento?	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar evaluación no destructiva del estado estructural del silo Santa María mediante la caracterización detallada de su diseño, materiales de construcción y condiciones operativas, con el fin de identificar posibles fallos y deficiencias estructurales 	<ul style="list-style-type: none"> • Al realizar un evaluación no destructiva detallado de la estructura del silo Santa María, se puede identificar posibles fallos y deficiencias estructurales que puedan afectar su seguridad y funcionamiento. 	Diseño de la investigación El diseño de la presente investigación se	

	que puedan afectar su seguridad y funcionamiento		caracteriza por ser del tipo no experimental.
<ul style="list-style-type: none"> ¿De qué forma realizar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo? 	<ul style="list-style-type: none"> Diseñar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo. 	<ul style="list-style-type: none"> Se puede diseñar un modelo de análisis de fallas en la estructura del silo. 	
<ul style="list-style-type: none"> ¿De qué forma se realizaría los ensayos no destructivos, con un modelo de análisis de fallas en silos? 	<ul style="list-style-type: none"> Determinar por medio de ensayos no destructivos el modelo de análisis de fallas en silos. 	<ul style="list-style-type: none"> Se puede determinar por medio de ensayos no destructivos el modelo de análisis de fallas en silos. 	
<ul style="list-style-type: none"> ¿Como verificar la viabilidad económica del modelo de análisis de fallas en la estructura del silo? 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluar la viabilidad económica del modelo de análisis de fallas en la estructura del silo. 	<ul style="list-style-type: none"> El modelo de análisis de fallas en la estructura del silo es viable económicamente. 	

Nota: en esta tabla se muestra todo lo que involucra a la matriz de consistencia, los problemas generales, los objetivos e hipótesis generales. Elaboración propia

Tabla 49.

Operacionalización de las variables

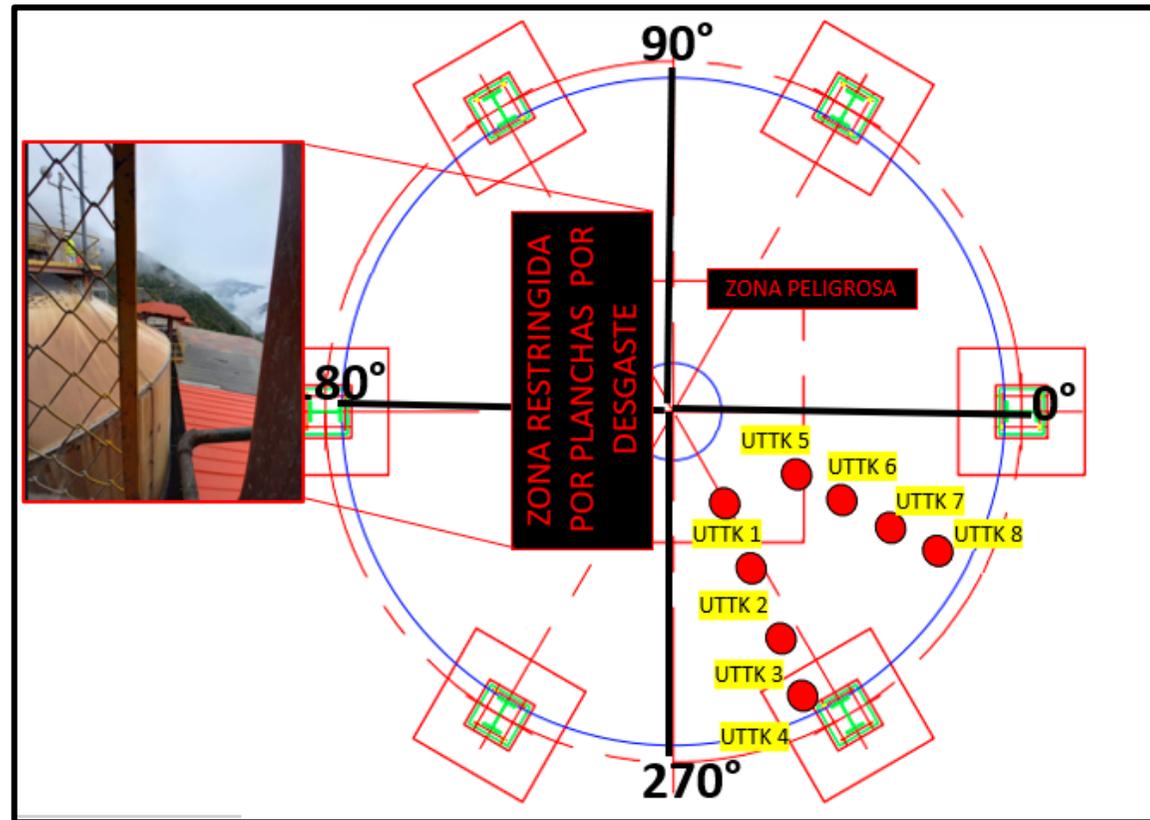
Variable	Dimensión	Indicadores
Variable independiente. ensayos no destructivos.	<ul style="list-style-type: none">• Fallas en la estructura• Discontinuidades en la soldadura	<ul style="list-style-type: none">• Fallas visuales• Puntos de corrosión y desgaste• Numero de componentes desgastados
Variable interviniente. Diseño del modelo de análisis de fallas.	<ul style="list-style-type: none">• Evaluación de fallas• Análisis de fracturas• Evaluación de espesores	<ul style="list-style-type: none">• Fallas visuales• Puntos de corrosión y desgaste• Numero de componentes desgastados• Registro de fallas en la estructura del silo
Variable dependiente. Estructura del silo santa maría.	<ul style="list-style-type: none">• Dimensiones del silo• Capacidad de almacenaje• Factores de almacenamiento (tipo de material a almacenar, propiedades corrosivas)• Discontinuidades en las uniones del silo	<ul style="list-style-type: none">• Fallas visuales• Puntos de corrosión y desgaste• Numero de componentes desgastados

Nota: en esta tabla se muestra las variables de operacionalización que se realizara con respecto al análisis de falla.

ANEXO B: ENSAYO MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO

Figura 71

Ubicación de las intervenciones en la zona superior del silo Santa María.



UTTK: MEDICIÓN DE ESPESORES POR ULTRASONIDO

Figura 72

Ubicación de las intervenciones en la zona media del silo Santa María.

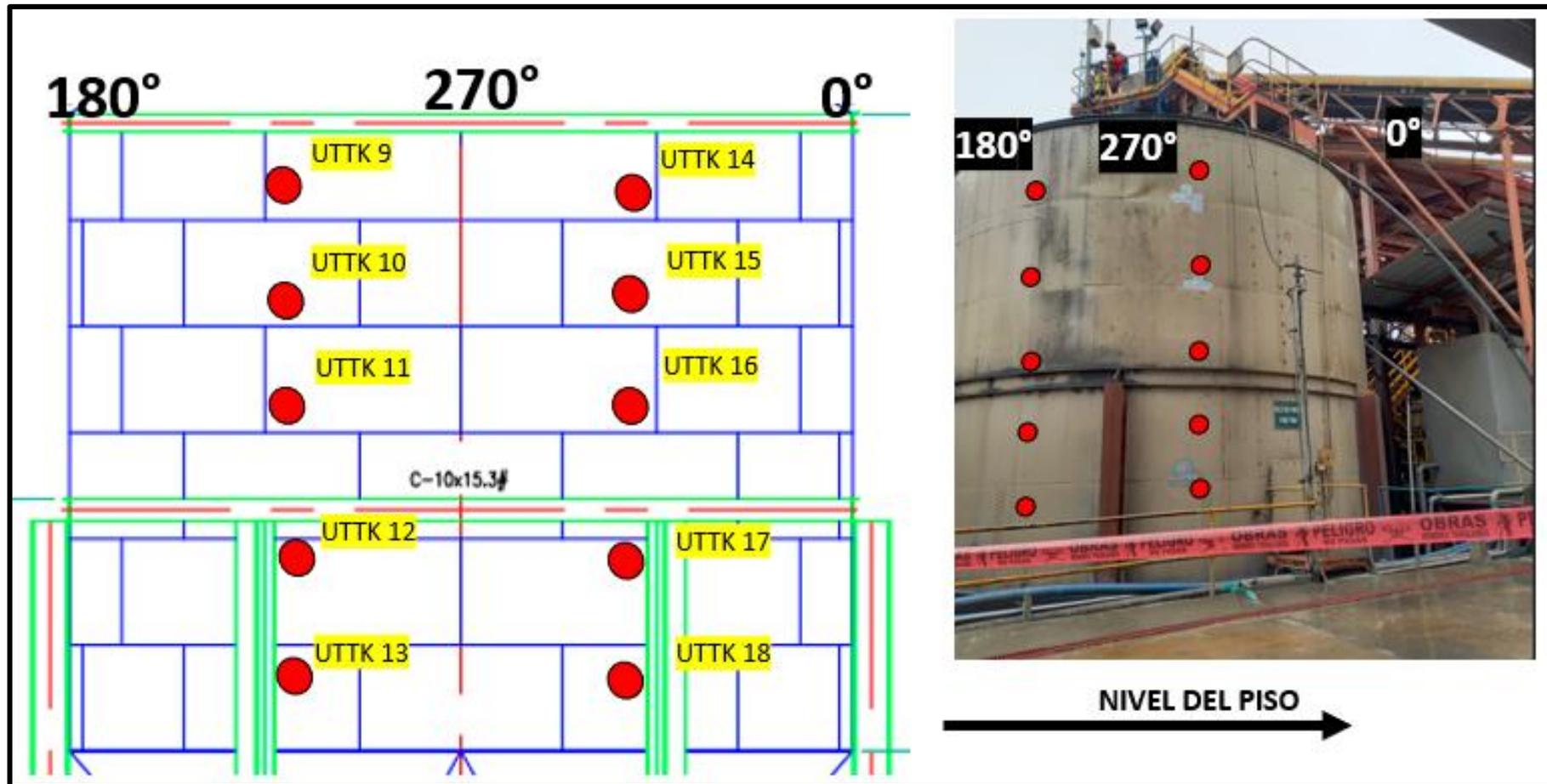


Figura 73

Ubicación de las intervenciones en la zona inferior del silo Santa María.

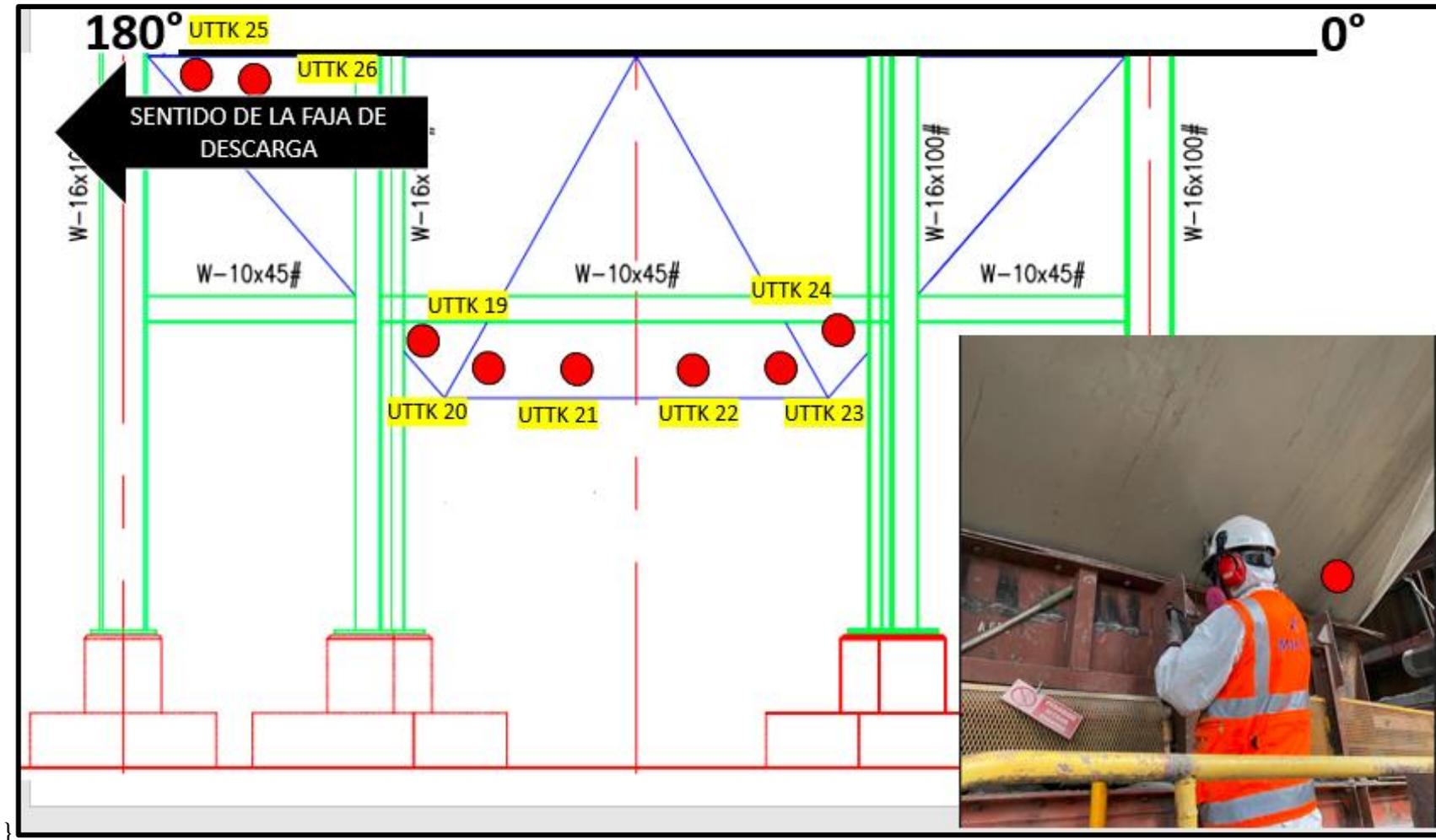
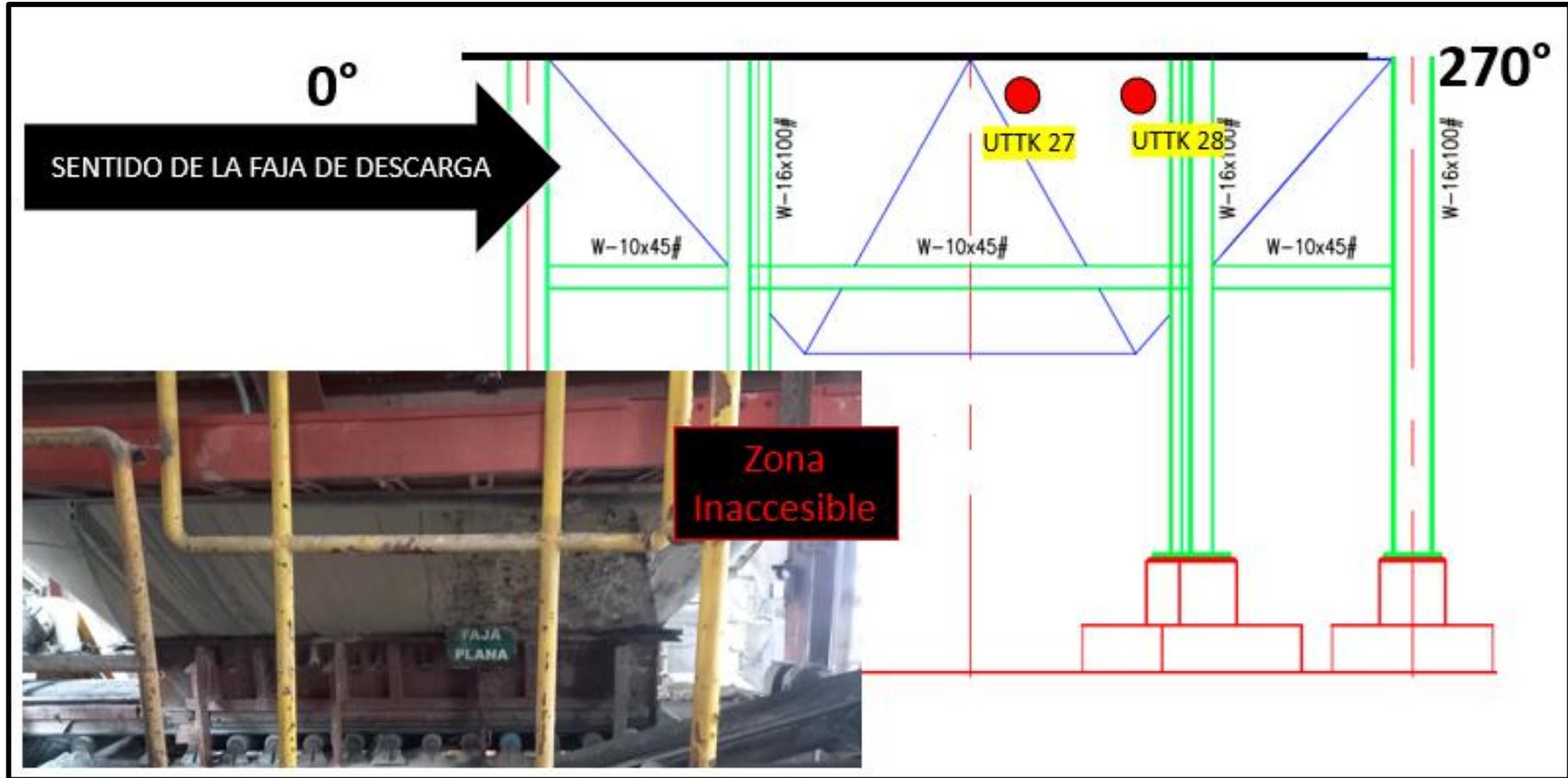


Figura 74

Ubicación de las intervenciones en la zona inferior del silo Santa María.



ANEXO C: MÉTODO POR LÍQUIDOS PENETRANTES Y PARTÍCULAS

MAGNÉTICAS

MT : PARTICULAS MAGNETICAS

PT : LIQUIDOS PENETRANTES

Figura 75

Ubicación de los puntos de Inspección en la cúpula del silo Santa María.



Figura 76

Ubicación de los puntos de Inspección en la zona Media e inferior del silo.

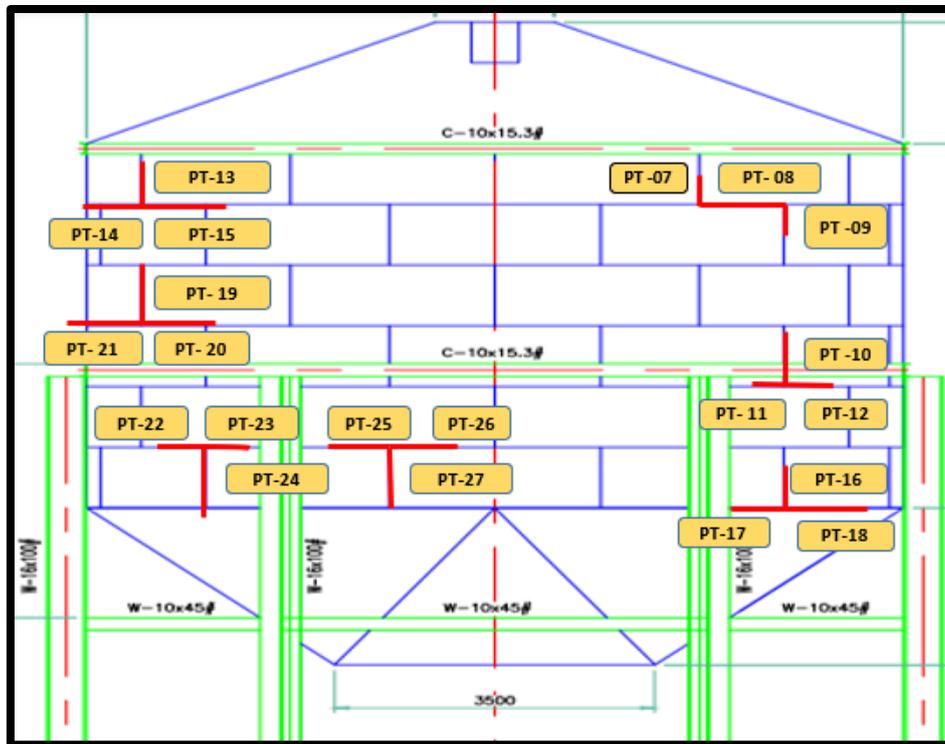
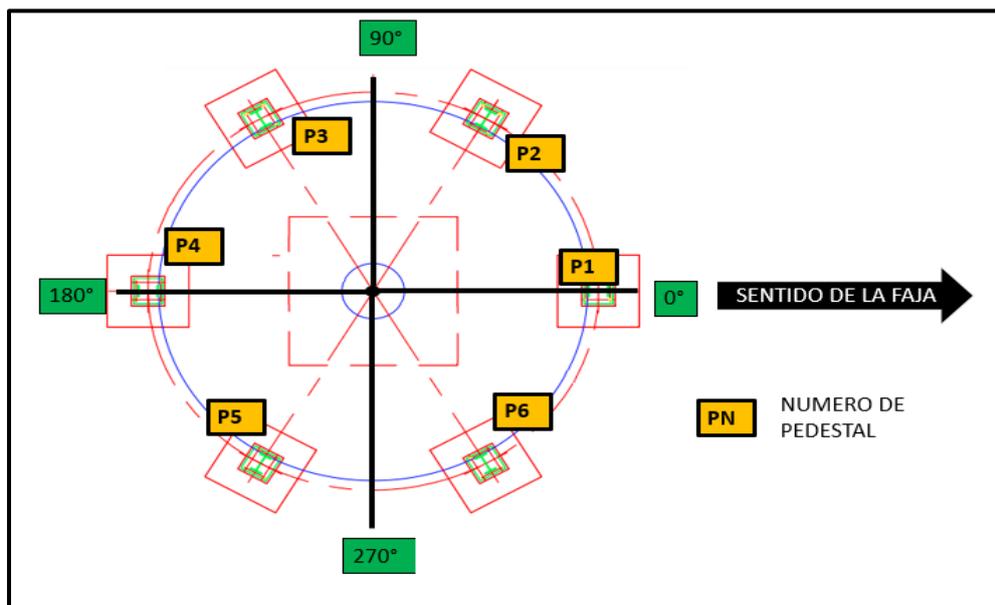


Figura 77

Ubicación de los pedestales de la cimentación del silo.



ENSAYO DE ESCLEROMETRIA

ANEXO D: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL FLEXOMETRO

FME-001



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° ML-0195-2024

Fecha de Emisión: 2024-08-28

Orden de Trabajo 0151-00

Expediente: 0768

1. INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Razón Social : MAKYL ENGINEERING CONSULTING SERVICES E.I.R.L

Dirección : JR. ALMERIA NRO. 299 URB. JAVIER PRADO SAN LUIS - LIMA

Los resultados son válidos al momento de la calibración, al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una nueva calibración, la cual está en función del uso, mantenimiento o reglamentaciones vigentes.

2. INSTRUMENTO : FLEXÓMETRO

Tipo : ANALÓGICO
Marca : FUJ
Serie : NO INDICA
Modelo : NO INDICA
Identificación : UF001-20
Alcance de Indicación : De 0 mm a 5000 mm
Div. Escala : 1 mm
Clase : NO INDICA
Procedencia : CHINA

Este certificado sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de DSI Perú Automation E.I.R.L.

El presente certificado carece de validez sin las firmas y sellos de DSI Perú Automation E.I.R.L.

3. LUGAR DE Y FECHA DE CALIBRACIÓN

Calibrado el 2024-08-20 en el laboratorio de calibración de longitud de DSI Perú Automation E.I.R.L.

Los resultados reportados en el presente certificado de calibración corresponde únicamente al objeto calibrado, no pudiéndose extender a otro.

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Calibrado por el método de comparación directa base al procedimiento DI-011 Para la calibración de Flexómetros del CEM - España.

Los resultados reportados en el presente certificado de calibración no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

5. TRAZABILIDAD

Los patrones utilizados en la calibración son trazables a los patrones del INACAL-DM:

Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
REGLA PATRÓN	LLA-400-2024




Alan Araujo Campos
Responsable de Laboratorio
DSI PERU AUTOMATION EIRL

Dirección: Cal. El Engranaje N° 248 Urb. Indus. La Milla, San Martín de Porres, Lima

Fecha: Ago/24

Teléfonos: 01 574-5560 / 01 574-8097

Versión 03

Email: Info@dsiperuautomation.com / www.dsiperuautomation.com

Página 1 de 2

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° ML-0195-2024

6. RESULTADOS

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	20,3	20,6
Humedad Relativa (%H.R.)	76,0	76,0

MEDICIÓN

N°	INDICACION DEL PATRÓN (mm)	INDICACION DEL INSTRUMENTO (mm)	ERROR (mm)	INCERTIDUMBRE (mm)	ERROR MÁXIMO PERMISIBLE (mm)
1	500	499	-1	0,8	1,00
2	1 000	999	-1	0,8	1,00
3	1 500	1 499	-1	0,8	1,40
4	2 000	1 999	-1	0,8	1,40
5	2 500	2 499	-1	0,8	1,80
6	3 000	2 999	-1	0,8	1,80
7	3 500	3 499	-1	0,8	2,20
8	4 000	3 999	-1	0,8	2,20
9	4 500	4 499	-1	0,8	2,60
10	5 000	4 999	-1	0,8	2,60

7. OBSERVACIONES

Se colocó una etiqueta con la indicación CALIBRADO en el Instrumento.
 Los errores máximos permitidos se tomaron de acuerdo a la norma OIML R35-1 2007.
 La incertidumbre reportada es la incertidumbre expandida que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$ para una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %.

Fin del Documento



Dirección: Cal. El Engranaje N° 248 Urb. Indus. La Milla, San Martín de Porres, Lima

Fecha: Ago/24

Teléfonos: 01 574-5560 / 01 574-8097

Versión 03

Email: Info@dsiperuautomation.com / www.dsiperuautomation.com

Página 2 de 2

ANEXO E: CERTIFICADO DE CALIBRACION DE LA GALGA BRIDGE CAM



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

L-NA-2024-0061



O.T : ONEM-OTI-2024-0024

1. SOLICITANTE : MAKYL E.C.S E.I.R.L.

DIRECCIÓN : Jr. Almería nro. 299 urb. Javier Prado
Lima - Lima - San Luis.

2. INSTRUMENTO DE : CALIBRADOR DE SOLDADURA
BRIDGE CAM GAUGE

MARCA : G.A.L GAGE CO

MODELO : No indica

NÚMERO DE SERIE : (269) 465-5750

IDENTIFICACIÓN : No indica

PROCEDENCIA : U.S.A

UBICACIÓN : Instalaciones de MAKYL E.C.S E.I.R.L.

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $K=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados sólo están relacionados con los ítems calibrados y son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del Responsable Técnico de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

3. FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Calibrado el 2024-08-25 en el Laboratorio de Calibraciones de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se efectuó por comparación directa utilizando patrones certificados.

5. CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA	20, 3 °C	20, 8 °C
HUMEDAD RELATIVA	50, 20% H.R.	50, 17% H.R.

6. TRAZABILIDAD

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

PATRON DE REFERENCIA	ALCANCE DE INDICACION	DIV. DE ESCALA / RESOLUCIÓN	CLASE DE EXACTITUD	CERTIFICADO Y/O INFORME
Bloques Patrón de Longitud	0,5 mm a 100 mm	NO APLICA	Grado 0	LLA-C-100-2024
Retícula de medición	0 mm a 8 mm	0,1 mm	$\pm 0,05\text{mm}$	LLA-084-2024
Regla patrón	0 mm a 1000 mm	0,1 mm; 1 mm	$\pm 0,02\text{mm}$	LLA-075-2024
Termohigrómetro	-20 °C a 70 °C	0,1 °C	$\pm 0,3\text{K} / \pm 2 \% \text{rh}$	CLC-0140-001-24




Ing. Gustavo Ariel Romero
Responsable Técnico



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.
Calle Coricancha N°134 Urb. San Juan Bautista de Villa - Chorrillos / Teléfonos: 943686358 / 979020229
Correos: info@onemetrology.com / comercial@onemetrology.com / Web: www.onemetrology.com

7. RESULTADOS

UNDERCUT/ REINFORCEMENT/LEG			
LONGITUD NOMINAL (mm)	LONGITUD HALLADO (mm)	ERROR (mm)	INCERTIDUMBRE (mm)
0.00	0.00	0.00	0.20
5.00	5.00	0.00	0.20
10.00	10.00	0.00	0.20
15.00	15.00	0.00	0.20
20.00	20.00	0.00	0.20
25.00	25.00	0.00	0.20

MEDIDOR DE FILETE DE SOLDADURA			
LONGITUD NOMINAL (mm)	LONGITUD HALLADO (mm)	ERROR (mm)	INCERTIDUMBRE (mm)
0.00	0.00	0.00	0.20
5.00	5.00	0.00	0.20
10.00	10.00	0.00	0.20
15.00	15.0	0.00	0.20

LONGITUD LATERAL SUPERIOR			
LONGITUD NOMINAL (mm)	LONGITUD HALLADO (mm)	ERROR (mm)	INCERTIDUMBRE (mm)
0.00	0.00	0.00	0.20
10.00	10.00	0.00	0.20
20.00	20.00	0.00	0.20
30.00	30.00	0.00	0.20
40.00	40.00	0.00	0.20
50.00	50.00	0.00	0.20
60.00	60.00	0.00	0.20

LONGITUD LATERAL VERTICAL			
LONGITUD NOMINAL (in)	LONGITUD HALLADO (in)	ERROR (in)	INCERTIDUMBRE (in)
0.00	0.00	0.00	0.01
0.50	0.50	0.00	0.01
1.00	1.00	0.00	0.01
1.50	1.50	0.00	0.01
2.00	2.00	0.00	0.01



RESULTADOS DE MEDICION ANGULAR			
ANGULO NOMINAL (°)	ANGULO HALLADO (°)	ERROR (°)	INCERTIDUMBRE (°)
0.0	0.0	0.0	0.08
10.0	10.0	0.0	0.08
20.0	20.0	0.0	0.08
30.0	30.0	0.0	0.08
40.0	40.0	0.0	0.08
50.0	50.0	0.0	0.08
60.0	60.0	0.0	0.08

8. OBSERVACIONES.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con indicación "CALIBRADO". La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

FIN DEL DOCUMENTO



Metrology Laboratory

ANEXO F: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL VERNIER



Página 1 de 2



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

L-NA-2024-0063

O.T : ONEM-OTI-2024-0024

1. SOLICITANTE : MAKYL E.C.S E.I.R.L.

DIRECCIÓN : Jr. Almería nro. 299 urb. Javier Prado
Lima - Lima - San Luis.

2. INSTRUMENTO DE : VERNIER CALIBRADOR (PIE DE REY)

MARCA : Ubermann

MODELO : No indica

NÚMERO DE SERIE : 78956

ALCANCE DE ESCALA : 150,00 mm

DIVISIÓN DE ESCALA : 0,05 mm

TIPO DE INDICACIÓN : Analógico

IDENTIFICACIÓN : No indica

PROCEDENCIA : China

UBICACIÓN : Instalaciones de MAKYL E.C.S E.I.R.L.

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $K=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados sólo están relacionados con los ítems calibrados y son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del Responsable Técnico de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

3. FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Calibrado el 2024-08-25 en el Laboratorio de Calibraciones de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó tomando como referencia el "Procedimiento PC-012: Procedimiento de Calibración de Pie de Rey" del SNM - INDECOPI.

5. CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA HUMEDAD RELATIVA	20, 7 °C 50, 25% H.R.	20, 7 °C 50, 26% H.R.

6. TRAZABILIDAD

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

PATRON DE REFERENCIA	ALCANCE DE INDICACION	DIV. DE ESCALA / RESOLUCIÓN	CLASE DE EXACTITUD	CERTIFICADO Y/O INFORME
Bloques Patrón de Longitud	0,5 mm a 100 mm	NO APLICA	Grado 0	LLA-C-061-2023
Termómetro digital	-50 °C a 150 °C	0,1 °C	±0,2 °C	CLC-069-001-24
Termohigrómetro	-20 °C a 70 °C	0,1 °C	±0,3K /±2 %rh	CLC-0140-001-24



Ing. Gustavo Ariel Romero
Responsable Técnico



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.
Calle Coricancha N°134 Urb. San Juan Bautista de Villa - Chorrillos / Teléfonos: 943686358 / 979020229
Correos: info@onemetrology.com / comercial@onemetrology.com / Web: www.onemetrology.com

7. RESULTADOS

RESULTADOS DE MEDICIÓN			
Valor patrón (mm)	Indicación promedio del pie de rey (mm)	Error (µm)	Incertidumbre (µm)
0,00	0,00	0	15,1
10,00	10,00	0	15,1
20,00	20,00	0	15,1
30,00	30,00	0	15,1
50,00	50,00	0	15,1
100,00	100,00	0	15,1
150,00	150,00	0	15,1

El error máximo permitido para este pie de rey de alcance 0 a 200 mm es de $\pm 50 \mu\text{m}$ según DIN 862

8. OBSERVACIONES.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con indicación "CALIBRADO". La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

(*) Indicado en una etiqueta adherida al instrumento.

FIN DEL DOCUMENTO



ANEXO G: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL YUGO MAGNETICO



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

L-NA-2024-0056

O.T : ONE-OTI-2024-0011

1. SOLICITANTE : MA YL ENGINEERING CONSULTING Y SERVICES E.I.R.L
 DIRECCIÓN : Jr.Almería 299-Urb.Javier Prado,San Luis Lima,Perú.Phone: (51-1)

2. INSTRUMENTO DE : YUGO MAGNÉTICO

MARCA : MAGNAFLUX
 MODELO : Y-8
 NÚMERO DE SERIE : 0834
 AMPERAJE : 4 Amp
 CAPACIDAD LEVANTE : 50 Lbs (22.7Kg)
 SEPARACIÓN PIERNAS : 0-12in (0-30cm)
 IDENTIFICACIÓN : NO INDICA
 PROCEDENCIA : U.S.A.
 TIPO DE CORRIENTE : DC

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura K=2. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados sólo están relacionados con los ítems calibrados y son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del Responsable Técnico de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

3. FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Calibrado el 2024-08-20 en el Laboratorio de Calibraciones de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Las pruebas se han realizado de acuerdo con los requisitos de ASME Sección V Edición 2023 EXAMEN NO DESTRUCTIVO Artículo 7 T-762 Inciso b.

5. CONDICIONES AMBIENTALES

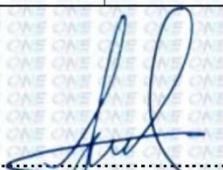
MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA	21, 18 °C	21, 20°C
HUMEDAD RELATIVA	51,20% H.R.	51,20% H.R.

6. TRAZABILIDAD

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

PATRON DE REFERENCIA	ALCANCE DE INDICACION	DIV. DE ESCALA / RESOLUCIÓN	CLASE DE EXACTITUD	CERTIFICADO Y/O INFORME
BLOQUE DE LEVANTE	50 Lbs (22.68Kg)	NO APLICA	NO APLICA	LOM-0102-2024
Termohigrómetro	-20 °C a 70 °C	0,1 °C	±0,3K / ±2 %rh	CLC-0140-001-24




 Ing. Gustavo Ariel Romero
 Responsable Técnico



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.
 Calle Coricancha N°134 Urb. San Juan Bautista de Villa – Chorrillos / Teléfonos: 943686358 / 979020229
 Correos: info@onemetrology.com / comercial@onemetrology.com / Web: www.onemetrology.com

7. RESULTADOS DE MEDICION

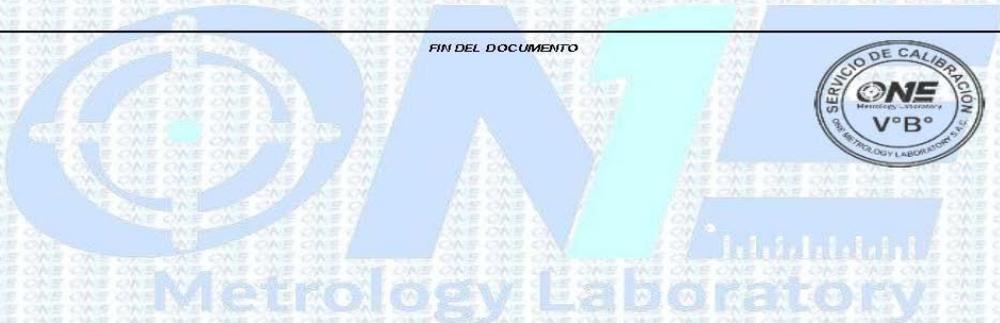
RESULTADOS DE PRUEBA	
VALOR PATRÓN (Lbs) / (kg)	VALOR DE LEVANTE DEL YUGO (Lbs) / (kg)
50 Lbs (22.68Kg)	50 Lbs (22.68Kg)

8. OBSERVACIONES.

Se ha verificado que la capacidad de elevación del Yugo en Corriente Directa es de 50 libras según los requisitos de ASTM E1444 Edición 2022.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con indicación "CALIBRADO". La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

FIN DEL DOCUMENTO



ANEXO H: CERTIFICADO DE CALIBRACION DEL INDICADOR DE CAMPO MAGNETICO



Página 1 de 2

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

ONEM-I-2024-0035



O.T : ONE-OT-I-2024-0035

1. SOLICITANTE : MAKYL E.C.S E.I.R.L.

DIRECCIÓN : Jr. Almería nro. 299 urb. Javier Prado
Lima - Lima - San Luis.

2. INSTRUMENTO : INDICADOR DE CAMPO MAGNÉTICO

MARCA : PARKER RESEARCH CORP

MODELO : MG-50

NÚMERO DE SERIE : 911192

IDENTIFICACIÓN : No indica

PROCEDENCIA : No indica

UBICACIÓN : Instalaciones de MAKYL E.C.S E.I.R.L.

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura K=2. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados sólo están relacionados con los ítems calibrados y son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

El certificado de calibración no es válido sin la firma del Responsable Técnico de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

3. FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Calibrado el 2024-08-25 en el Laboratorio de Calibraciones de ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.

4. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se efectuó por comparación directa utilizando patrones certificados.

5. CONDICIONES AMBIENTALES

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
TEMPERATURA	21, 54 °C	21, 62 °C
HUMEDAD RELATIVA	50, 55% H.R.	50, 58% H.R.

6. TRAZABILIDAD

Este certificado documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

PATRON DE REFERENCIA	ALCANCE DE INDICACION	DIV. DE ESCALA / RESOLUCIÓN	CLASE DE EXACTITUD	CERTIFICADO Y/O INFORME
Termohigrómetro	-20 °C a 70 °C	0,1 °C	±0,3K / ±2 %rh	CLC-0140-001-24
Gausimetro	-20 a 20 Gauss	2 Gauss	No Aplica	LPE-0103-2024
Reticula de medición	0 mm a 8 mm	0,1 mm	±0,05mm	LLA-084-2024
Regla patrón	0 mm a 1000 mm	0,1 mm; 1 mm	±0,02mm	LLA-075-2024



Ing. Gustavo Ariel Romero
Responsable Técnico



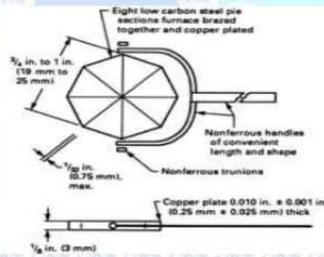
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN DE ONE METROLOGY LABORATORY S.A.C.
Calle Coricancha N°134 Urb. San Juan Bautista de Villa - Chorrillos / Teléfonos: 943686358 / 979020229
Correos: info@onemetrology.com / comercial@onemetrology.com / Web: www.onemetrology.com

7. RESULTADOS

RESULTADOS DE VERIFICACIÓN		
INDICACIÓN DEL PATRÓN (Gauss)	INDICACIÓN EN EL INSTRUMENTO	RESULTADO
20	Se visualiza la las líneas del campo magnético.	ACEPTABLE

DIMENSIONES			
LONGITUD NOMINAL (mm)	LONGITUD HALLADO (mm)	ERROR (mm)	INCERTIDUMBRE (mm)
25.00	25.00	0.00	0.10
0.75	0.75	0.00	0.10
3.00	3.00	0.00	0.10

Gráfico de referencia del instrumento



8. OBSERVACIONES.

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta autoadhesiva con indicación "CALIBRADO". La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

FIN DEL DOCUMENTO



ANEXO I: CERTIFICADO DE CALIBRACION SIUI ULTRASONIDO

 <p>GLOBAL SUPPLY LOGISTIC E.I.R.L</p>		<p>CERTIFICATE OF LINEARITY</p>	
<p>CERTIFICATE N° : UT-GSL-0202-024 WORK ORDER : 0189-024</p>		<p>SIUI / SMARTOR</p> 	
<p>CUSTOMER : MAKYL ENGINEERING CONSULTING SERVICES E.I.R.L INSTRUMENT DESCRIPTION : ULTRASONIC FLAW DETECTOR BRAND : SIUI MODEL : SMARTOR SERIAL NUMBER : M06320220187R PURCHASE ORDER : 140-281024</p>		<p>Certified by:</p>  <p>UT-GSL-0202-024/0189/0131/2024</p> <p>Eng. Julio J. Gutierrez Sulca ASNT NDT Level III N° 237298 PT-MT-VT-UT-RT-LT www.asnt.org</p> 	
<p>INSTRUMENT CONDITION : ACCEPTABLE STANDARD / CODE : The accuracy of this instrument described above has been confirmed by reference block traceable to National Standard. The verification systems procedures utilized at this facility conform to the requirements of linearity set forth in ASTM E 317-21 This instrument meet or exceeds the specification of manufacturer</p>		<p>CERTIFICATION DATE : October 31, 2024 CERTIFICATION DUE DATE : October 30, 2025 ATTACHED DOCUMENTS : Ultrasonic Instrument Linearity (Values and Data Plots) Three pages</p>	
<p>TRUTH VALIDATION (VALIDACION DE VERACIDAD)</p> <p>Cell phone: 511-987762167 / 981317680 / 987762168 Email : ventas@gsl-peru.com - www.gsl-peru.com / www.gsl-ndt.pe Jr. Curazao N° 415, Urb. Santa Patricia, / Etapa, La Molina, Lima 15024 – Perú</p>		<p>ASNT</p> 	

Ultrasonic instrument Linearity

Customer : MAKYL ENGINEERING CONSULTING SERVICES E.I.R.L
Reference Certificate : UT-GSL-0202-024

Instrument : Ultrasonic Flaw Detector
Brand : SIUI
Model : SMARTOR
Serial No : M06320220187R

Transducer
Brand : SIUI
Model : P4-25 (Normal)
Size : Ø25 mm
Frequency : 4 MHz
Serial N° : 12305187R

Calibration Standard
Brand : TM TECK
Block Standard : ISO 2400-2012
Block : Calibration Block V1
Serial N° : K11109
Material : Carbon Steel 1018
Heat treatment : Normalized
INACAL calibration : LLA-115-2024
Ambient Temperature
Start / End of Test : 20°C / 20°C
Reference Standard : ASTM E 317-21

VERTICAL LINEARITY SIGNAL

N°	Actual Higher Signal % (H _A)	Calculate		Actual Lower Signal %
		½ Higher Signal % (H _B)	Acceptable Limits %	
1	100	(50)	44-56	49
2	90	(45)	40-50	44
3	80	(40)	37-43	39
4	70	(35)	33-37	35
5	60	(30)	29-31	30
6	50	(25)	23-27	25
7	40	(20)	17-23	20
8	30	(15)	12-18	15
9	20	(10)	6-14	10
10	10	(05)	0-10	05

HORIZONTAL LINEARITY AMPLITUDE

AMPLITUDE CONTROL LINEARITY

Back Reflector N°	Grid Location mm	Grid Location %	Acceptable Limits %	Actual Signal %	Initial Amplitude	dB Change	Result	Limits
2	50	20	19.0-21.0	20.0	80% FSH	Down 12	20	15%-25%
3	75	30	28.5-31.5	30.0	40% FSH	Up 6	79	65%-95%
4	100	40	38.0-42.0	40.0	20% FSH	Up12	80	65%-95%
5	125	50	47.5-52.5	50.0				
6	150	60	57.0-63.0	60.0				
7	175	70	66.5-73.5	70.0				
8	200	80	76.0-84.0	80.0				
9	225	90	85.5-94.5	90.0				
10	250	100	95.0-100	100.0				

Note:
Acceptance limits are ± 5% FSH for Horizontal Linearity Amplitude

NDT Level III signature

This instrument is considered : **Acceptable** (√)
Not acceptable ()

Calibration Date : October 31, 2024

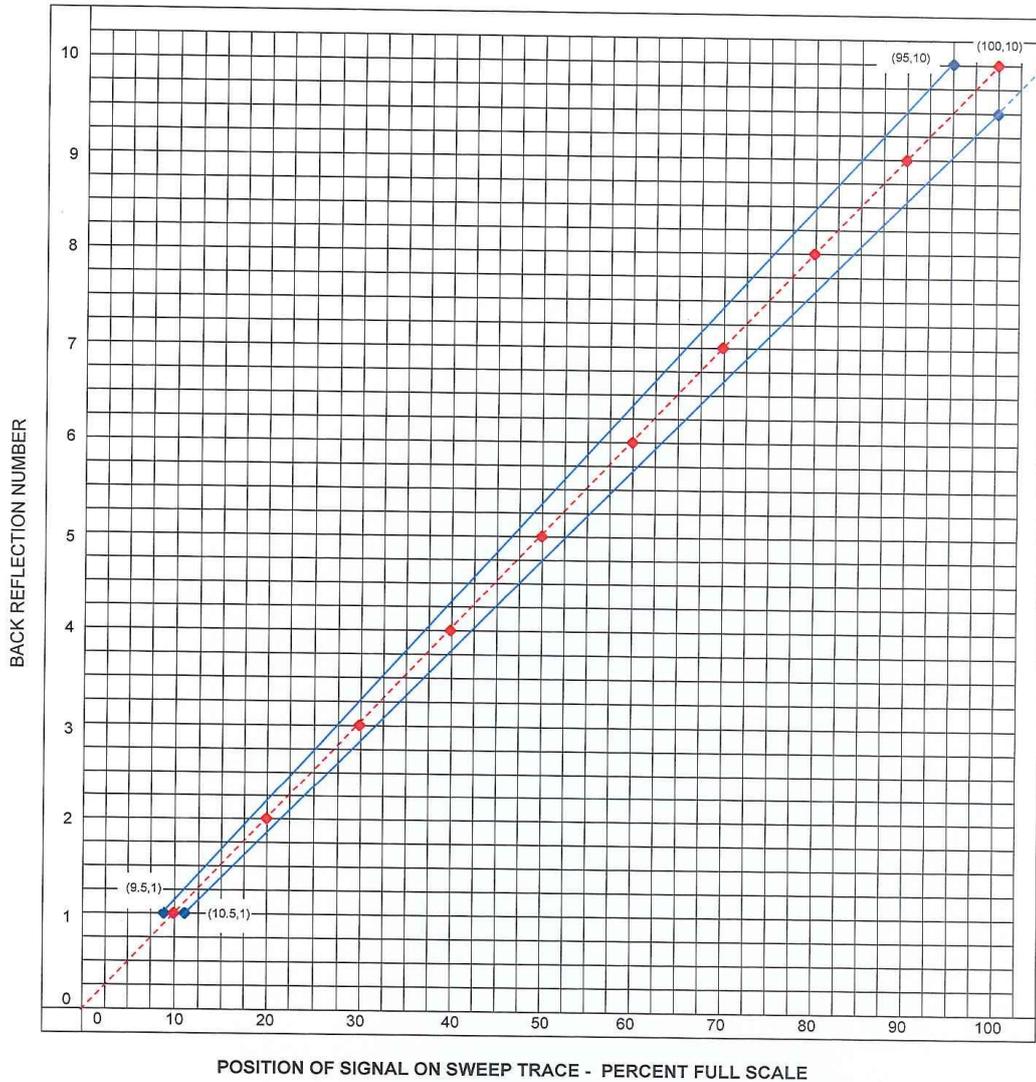
Recalibration Date : October 30, 2025



UT-GSL-0202-024 / 31/10/2024

Eng. Julio J. Gutierrez Sulca,
ASNT NDT Level III N°237298
PT-MT-VT-UT-RT-LT
www.asnt.org

**DATA PLOT
FOR DETERMINATION OF HORIZONTAL LINEARITY**



--- Ideal and Real Linearity Line
— Linearity Range Line

UT-GSL-0202-024 (31/2024)

Eng. Julio J. Gutierrez Sulca.
ASNT NDT Level III N° 237298
PT-MT-VT-UT-RT-LT
www.asnt.org

UT-GSL-0202-024

2 de 3

ANEXO J: RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS ABSOLUTOS EN UNIONES

SOLDADAS

Tabla 50

Desplazamientos absolutos en las uniones de silo Santa María.

Uniones	Tipo	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
1	Max	0.000123	0.001369	-0.00007	0.001035	-0.000071	0.00151
1	Min	-0.004692	-0.009066	-0.000945	-0.000014	-0.006343	-0.000027
2	Max	0.000143	0.001376	-0.000075	0.000656	-0.000061	-0.000051
2	Min	-0.004172	-0.008849	-0.001283	-0.000024	-0.007287	-0.00317
3	Max	0.000157	0.001375	-0.000085	-0.000056	0.008484	-0.000038
3	Min	-0.002795	-0.008625	-0.002533	-0.005129	0.000053	-0.002267
4	Max	0.000134	0.00137	-0.000082	0.000895	0.00887	0.000942
4	Min	-0.003303	-0.009004	-0.002202	-0.00002	0.000096	-0.00008508
5	Max	0.000192	0.001404	-0.000123	-0.000018	-0.000056	-0.000081
5	Min	-0.001218	-0.006747	-0.003843	-0.001493	-0.004599	-0.006994
6	Max	0.0002	0.001403	-0.00012	-0.000068	0.000359	-0.000057
6	Min	-0.000354	-0.00661	-0.004556	-0.005704	-0.000047	-0.004356
7	Max	0.001203	0.001451	-0.000172	-0.000046	-0.000003741	-0.000059
7	Min	-0.000237	-0.003011	-0.007033	-0.004943	-0.001955	-0.005293
8	Max	0.001762	0.001442	-0.000165	0.000088	-0.000033	-0.000045
8	Min	-0.000235	-0.002911	-0.007331	-0.000024	-0.002761	-0.003797
9	Max	0.001646	0.001478	-0.000188	-0.000044	0.00000248	0.000014
9	Min	-0.000232	-0.001468	-0.008726	-0.00511	-0.000944	-0.00153
10	Max	0.001779	0.001471	-0.000171	0.002648	0.000009781	0.000004697
10	Min	-0.000234	-0.001577	-0.008522	0.000037	-0.000833	-0.001014
11	Max	0.001747	0.001453	-0.000172	-0.000047	0.000051	0.003343
11	Min	-0.000227	-0.001683	-0.008292	-0.006674	-0.000144	0.000058
12	Max	0.001451	0.001443	-0.000166	0.002531	0.002723	0.002346

12	Min	-0.000231	-0.001682	-0.008428	-0.000023	0.000032	0.000044
13	Max	0.003794	0.001406	-0.000124	-0.00002	0.002714	0.006952
13	Min	-0.000193	-0.004387	-0.005536	-0.003484	0.000055	0.000081
14	Max	0.003139	0.001404	-0.000121	-0.000066	0.00165	0.004412
14	Min	-0.000201	-0.004407	-0.005987	-0.003928	-0.000031	0.000057
15	Max	0.007277	0.001377	-0.000075	0.000022	0.005968	0.004926
15	Min	-0.000145	-0.006825	-0.002445	-0.001303	0.00006	0.000054
16	Max	0.006127	0.001376	-0.000086	-0.000056	-0.000052	0.003382
16	Min	-0.000159	-0.006777	-0.003453	-0.005111	-0.006038	0.000039
17	Max	0.009347	0.00137	-0.000069	0.000014	0.006015	0.001146
17	Min	-0.000124	-0.007343	-0.000907	-0.000821	0.000073	-0.000027
18	Max	0.007914	0.001371	-0.000082	0.00002	-0.000098	0.000787
18	Min	-0.000135	-0.007418	-0.002199	-0.000602	-0.008497	-0.000008632
19	Max	0.008707	0.001368	-0.000075	0.000025	0.006831	-0.000052
19	Min	-0.000145	-0.007581	-0.001355	-0.000394	0.000061	-0.003143
20	Max	0.007405	0.00137	-0.000085	0.004772	-0.000053	-0.000038
20	Min	-0.000159	-0.007799	-0.002545	0.000056	-0.00774	-0.002257
21	Max	0.00582	0.001329	-0.000123	0.001345	0.004729	-0.000082
21	Min	-0.000194	-0.009637	-0.003889	0.000019	0.000054	-0.006765
22	Max	0.004902	0.001338	-0.00012	0.005981	0.000046	-0.000057
22	Min	-0.000201	-0.009822	-0.004631	0.000065	-0.000787	-0.004361
23	Max	0.003417	0.00127	-0.000173	0.004913	0.001937	-0.000059
23	Min	-0.000227	-0.013345	-0.007077	0.000047	0.000003563	-0.005421
24	Max	0.002891	0.001276	-0.000166	0.000104	0.002896	-0.000045
24	Min	-0.00023	-0.013443	-0.007363	-0.000086	0.000032	-0.003702
25	Max	0.002985	0.001249	-0.000188	0.005342	0.000875	0.00001
25	Min	-0.000232	-0.015687	-0.00875	0.000044	-0.000001315	-0.001227
26	Max	0.002869	0.001269	-0.000171	-0.000036	0.00059	0.000002729
26	Min	-0.000233	-0.015493	-0.008633	-0.002563	-0.000008567	-0.000918
27	Max	0.002869	0.001269	-0.000173	0.005725	-0.000002791	0.003283

27	Min	-0.000237	-0.014954	-0.008234	0.000047	-0.000164	0.000058
28	Max	0.003149	0.001275	-0.000166	0.000023	-0.000032	0.002336
28	Min	-0.000234	-0.014925	-0.008335	-0.001559	-0.002346	0.000044
29	Max	0.000938	0.001328	-0.000124	0.003486	-0.000053	0.006479
29	Min	-0.000274	-0.01198	-0.00566	0.000019	-0.002429	0.000081
30	Max	0.001634	0.001337	-0.000121	0.003682	0.000031	0.004077
30	Min	-0.00027	-0.012008	-0.006164	0.000065	-0.001174	0.000057
31	Max	0.000145	0.001367	-0.000076	0.001699	-0.00006	0.005046
31	Min	-0.002442	-0.009618	-0.002664	-0.000022	-0.005174	0.000051
32	Max	0.000159	0.001368	-0.000086	0.005095	0.005386	0.003531
32	Min	-0.001249	-0.009702	-0.003715	0.000056	0.000052	0.000038
33	Max	0.000175	0.001376	-0.000099	0.001533	-0.000049	-0.000018
33	Min	-0.001333	-0.008344	-0.003899	-0.000011	-0.006029	-0.001485
34	Max	0.00015	0.00137	-0.000095	0.000288	-0.000045	0.000595
34	Min	-0.001974	-0.008951	-0.003416	-0.000007643	-0.005545	-0.000003802
35	Max	0.000452	0.0014	-0.00012	0.002193	-0.000028	-0.000031
35	Min	-0.000265	-0.006594	-0.005132	0.000016	-0.00364	-0.00302
36	Max	0.001961	0.001426	-0.000151	0.002795	-0.000021	-0.000019
36	Min	-0.000237	-0.00361	-0.006888	-0.000017	-0.00271	-0.002198
37	Max	0.001905	0.001453	-0.00015	0.004661	0.000003984	0.00000809
37	Min	-0.000235	-0.002012	-0.007663	0.000061	-0.000308	-0.000741
38	Max	0.00158	0.001426	-0.000151	0.002366	0.00198	0.001249
38	Min	-0.000231	-0.002192	-0.007658	-0.000018	0.000021	0.000019
39	Max	0.002796	0.001401	-0.00012	0.001715	0.003382	0.003048
39	Min	-0.000207	-0.004695	-0.006125	0.000016	0.000028	0.000031
40	Max	0.005007	0.001377	-0.0001	0.000824	0.005523	0.002141
40	Min	-0.000176	-0.006708	-0.004477	-0.000011	0.000048	0.000018
41	Max	0.006566	0.001372	-0.000095	0.000007638	0.004982	0.000502
41	Min	-0.000151	-0.007489	-0.003422	-0.000322	0.000046	-0.000003837
42	Max	0.006015	0.001368	-0.000099	0.000011	0.00541	-0.000018

42	Min	-0.000176	-0.008076	-0.003856	-0.001143	0.000049	-0.001472
43	Max	0.004158	0.001345	-0.00012	-0.000016	0.004176	-0.000031
43	Min	-0.000207	-0.009872	-0.005221	-0.002512	0.000028	-0.002919
44	Max	0.002729	0.001293	-0.000151	0.000017	0.002722	-0.000019
44	Min	-0.00023	-0.012736	-0.006902	-0.003112	0.000021	-0.002315
45	Max	0.002758	0.001294	-0.00015	-0.000061	0.000382	0.000006213
45	Min	-0.000234	-0.014445	-0.007826	-0.004578	-0.000004789	-0.000559
46	Max	0.003028	0.001292	-0.000151	0.000017	-0.000021	0.001299
46	Min	-0.000236	-0.013975	-0.007588	-0.003442	-0.002415	0.000019
47	Max	0.001989	0.001343	-0.00012	-0.000016	-0.000028	0.002665
47	Min	-0.000264	-0.011734	-0.006313	-0.001955	-0.00351	0.000031
48	Max	0.000176	0.001367	-0.000099	0.000011	-0.000048	0.00235
48	Min	-0.000329	-0.009782	-0.004726	-0.00052	-0.005107	0.000018
49	Max	0.000202	0.001376	-0.00011	-0.000048	0.009566	-0.000026
49	Min	-0.000289	-0.00812	-0.005151	-0.004825	0.000078	-0.001591
50	Max	0.000159	0.001371	-0.000098	0.000387	0.008759	0.000422
50	Min	-0.000986	-0.008886	-0.004338	-0.000014	0.000065	-4.299E-07
51	Max	0.001411	0.001399	-0.000122	-0.000066	0.004345	-0.000018
51	Min	-0.000257	-0.006465	-0.005908	-0.005852	0.000009968	-0.001567
52	Max	0.00235	0.001416	-0.000142	0.000038	0.001186	-0.000023
52	Min	-0.000238	-0.003946	-0.006775	-0.004243	-0.000006162	-0.002015
53	Max	0.002045	0.001448	-0.000142	-0.000093	0.000007412	0.000001502
53	Min	-0.000236	-0.002101	-0.007679	-0.00659	-0.000331	-0.000516
54	Max	0.001472	0.001417	-0.000142	0.000038	0.000006131	0.001198
54	Min	-0.000234	-0.00265	-0.00734	-0.003039	-0.001033	0.000022
55	Max	0.002094	0.0014	-0.000123	-0.000066	-0.000009769	0.001589
55	Min	-0.000217	-0.004726	-0.006637	-0.005121	-0.003474	0.000017
56	Max	0.003868	0.001377	-0.00011	-0.000048	-0.000077	0.002079
56	Min	-0.000191	-0.006643	-0.005523	-0.004545	-0.008196	0.000026
57	Max	0.005605	0.001372	-0.000098	0.000015	-0.000067	0.000368

57	Min	-0.00016	-0.007566	-0.004312	-0.000172	-0.007931	-0.000000446
58	Max	0.004719	0.001368	-0.000109	0.0044	-0.000078	-0.000026
58	Min	-0.00019	-0.008314	-0.00509	0.000048	-0.008747	-0.001586
59	Max	0.003212	0.00135	-0.000122	0.00631	-0.00001	-0.000017
59	Min	-0.000216	-0.010033	-0.006006	0.000067	-0.005008	-0.001599
60	Max	0.002359	0.001308	-0.000142	0.004789	0.000006069	-0.000023
60	Min	-0.000232	-0.012424	-0.006804	-0.000037	-0.00113	-0.001933
61	Max	0.002642	0.001303	-0.000142	0.006673	0.000151	0.000001764
61	Min	-0.000235	-0.014397	-0.00787	0.000094	-0.000007032	-0.000511
62	Max	0.003159	0.001307	-0.000142	0.004567	0.001564	0.001235
62	Min	-0.000236	-0.01357	-0.007335	-0.000038	-0.000006151	0.000023
63	Max	0.002695	0.001349	-0.000122	0.005148	0.004093	0.001383
63	Min	-0.000256	-0.011727	-0.006835	0.000066	0.000009562	0.000017
64	Max	0.001001	0.001367	-0.000109	0.004561	0.007729	0.002186
64	Min	-0.000288	-0.009862	-0.005776	0.000048	0.000077	0.000026
65	Max	0.002279	0.001381	-0.000131	0.001365	-0.00005	-0.000016
65	Min	-0.000264	-0.007461	-0.007317	-0.000012	-0.005548	-0.001238
66	Max	0.000962	0.001372	-0.000108	0.000019	-0.000037	0.000196
66	Min	-0.00029	-0.008831	-0.006099	-0.000026	-0.004939	-0.000006753
67	Max	0.002895	0.001402	-0.000132	0.004128	6.196E-07	-0.000004088
67	Min	-0.000244	-0.005778	-0.007365	0.000052	-0.002963	-0.000793
68	Max	0.002757	0.001408	-0.000123	0.007009	-0.000047	-0.000013
68	Min	-0.00024	-0.004147	-0.006801	0.000036	-0.003934	-0.001202
69	Max	0.002173	0.001441	-0.000139	0.010401	0.000009081	0.000003574
69	Min	-0.000238	-0.001968	-0.007929	0.000167	-0.000036	-0.000374
70	Max	0.001411	0.001408	-0.000123	0.007379	0.003849	0.000664
70	Min	-0.000236	-0.003143	-0.007009	0.000036	0.000047	0.000012
71	Max	0.000993	0.001403	-0.000133	0.004531	0.003506	0.000745
71	Min	-0.000231	-0.004328	-0.00768	0.000052	-5.492E-07	0.000003884
72	Max	0.001886	0.001382	-0.000131	0.001066	0.005444	0.001528

72	Min	-0.000216	-0.006179	-0.007389	-0.000012	0.00005	0.000016
73	Max	0.003742	0.001373	-0.000109	0.000019	0.004217	0.000235
73	Min	-0.000182	-0.007639	-0.005988	-0.000134	0.000036	-0.00000678
74	Max	0.00248	0.001362	-0.000131	0.000012	0.004733	-0.000016
74	Min	-0.000215	-0.00898	-0.007229	-0.00079	0.000049	-0.001289
75	Max	0.001742	0.001348	-0.000133	-0.000052	0.003798	-0.00000401
75	Min	-0.00023	-0.010742	-0.007465	-0.004641	-6.631E-07	-0.000724
76	Max	0.001976	0.001329	-0.000123	-0.000036	0.003929	-0.000013
76	Min	-0.000234	-0.012252	-0.006849	-0.007641	0.000047	-0.001216
77	Max	0.002529	0.001307	-0.000139	-0.000167	0.00022	0.00000239
77	Min	-0.000235	-0.014529	-0.00811	-0.010579	-0.000009238	-0.000298
78	Max	0.003283	0.001328	-0.000123	-0.000036	-0.000047	0.000701
78	Min	-0.000238	-0.013216	-0.007153	-0.008703	-0.004339	0.000013
79	Max	0.003783	0.001347	-0.000133	-0.000052	4.155E-07	0.000585
79	Min	-0.000242	-0.01213	-0.007867	-0.004874	-0.004096	0.000004022
80	Max	0.002955	0.001361	-0.000131	0.000012	-0.00005	0.001615
80	Min	-0.000264	-0.010323	-0.007611	-0.000973	-0.005197	0.000016
81	Max	0.000943	0.001369	-0.000112	0.000004784	0.001325	-0.000018
81	Min	-0.000283	-0.008352	-0.006076	-0.001843	-0.000012	-0.002277
82	Max	0.000139	0.00137	-0.000074	0.000331	0.000003041	0.000417
82	Min	-0.001353	-0.008759	-0.004173	-0.000049	-0.00139	-0.000044
83	Max	0.001913	0.001363	-0.000106	0.000746	0.001022	0.000985
83	Min	-0.000264	-0.007595	-0.005772	-0.000031	-0.000004571	0.000015
84	Max	0.001761	0.001341	-0.000068	0.001874	0.000011	-0.000012
84	Min	-0.000259	-0.007725	-0.003646	-0.000079	-0.000447	-0.001314
85	Max	0.00233	0.00138	-0.000105	-0.000052	0.000007138	0.000006582
85	Min	-0.000241	-0.004993	-0.005412	-0.004078	-0.000075	-0.000327
86	Max	0.002676	0.001342	-0.000068	0.00209	0.000813	0.001173
86	Min	-0.000216	-0.006878	-0.003626	-0.000079	-0.000011	0.000011
87	Max	0.002278	0.001364	-0.000106	0.000965	0.000004427	-0.000015

87	Min	-0.000211	-0.006346	-0.005771	-0.000031	-0.000959	-0.001205
88	Max	0.003313	0.00137	-0.000113	0.00000492	0.000012	0.002527
88	Min	-0.000188	-0.007163	-0.006044	-0.001647	-0.000733	0.000018
89	Max	0.005963	0.001371	-0.000075	0.000284	0.002057	0.000044
89	Min	-0.000139	-0.007704	-0.004133	-0.000049	-0.000002919	-0.000151
90	Max	0.00368	0.001379	-0.000113	0.001406	0.000012	-0.000018
90	Min	-0.000187	-0.008206	-0.006143	-0.000004697	-0.000787	-0.002072
91	Max	0.002856	0.001374	-0.000107	0.000031	0.000004236	0.001073
91	Min	-0.00021	-0.008875	-0.005758	-0.000349	-0.001719	0.000016
92	Max	0.002974	0.001386	-0.000068	0.000079	0.00072	-0.000011
92	Min	-0.000213	-0.008642	-0.00367	-0.00097	-0.00001	-0.001699
93	Max	0.002438	0.001345	-0.000105	0.003839	0.000006952	0.000005184
93	Min	-0.000238	-0.011361	-0.00546	0.000052	-0.000071	-0.000236
94	Max	0.001982	0.001386	-0.000068	0.000079	0.00001	0.00113
94	Min	-0.000257	-0.009401	-0.003709	-0.000569	-0.000252	0.000011
95	Max	0.002332	0.001373	-0.000106	0.000031	0.001188	-0.000016
95	Min	-0.000262	-0.009997	-0.005778	-0.000897	-0.000004693	-0.001079
96	Max	0.001406	0.001378	-0.000112	0.001255	0.000228	0.002216
96	Min	-0.000282	-0.009292	-0.006146	-0.000004823	-0.000012	0.000018
97	Max	0.004434	0.001404	-0.000109	-0.000006772	0.005757	-0.000066
97	Min	-0.000213	-0.006546	-0.005971	-0.00202	0.000046	-0.00442
98	Max	0.000132	0.001377	-0.00008	0.000018	-0.000016	0.000384
98	Min	-0.002864	-0.008818	-0.004575	-0.000101	-0.001996	-0.000034
99	Max	0.004644	0.0014	-0.000103	-0.00004	0.004408	0.003472
99	Min	-0.000212	-0.005634	-0.00569	-0.004375	0.000034	0.000055
100	Max	0.00117	0.001357	-0.000073	0.002248	-0.000001797	-0.000036
100	Min	-0.000278	-0.009464	-0.003999	0.000027	-0.000807	-0.002412
101	Max	0.002327	0.0015	-0.000098	-0.000095	0.000035	0.000003753
101	Min	-0.000242	-0.001233	-0.005204	-0.005584	-0.000004574	-0.000225
102	Max	0.003391	0.001357	-0.000073	0.002418	0.000871	0.002108

102	Min	-0.000214	-0.008781	-0.003979	0.000027	0.000001811	0.000035
103	Max	0.000211	0.001401	-0.000103	-0.00004	-0.000034	-0.000055
103	Min	-0.000522	-0.004314	-0.005683	-0.004608	-0.004523	-0.003703
104	Max	0.000213	0.001405	-0.000109	-0.000006784	-0.000046	0.004824
104	Min	-0.000269	-0.005373	-0.005944	-0.002116	-0.006024	0.000066
105	Max	0.007903	0.001378	-0.000081	0.000018	0.002373	0.000034
105	Min	-0.000132	-0.007757	-0.004528	-0.000075	0.000016	-0.000159
106	Max	0.000244	0.001344	-0.000109	0.002461	-0.000046	-0.000066
106	Min	-0.000254	-0.010064	-0.006037	0.000006845	-0.006435	-0.004417
107	Max	0.000254	0.001333	-0.000103	0.003991	-0.000034	0.003621
107	Min	-0.000263	-0.010811	-0.00568	0.00004	-0.003893	0.000055
108	Max	0.003606	0.001455	-0.000074	-0.000027	0.00081	-0.000035
108	Min	-0.000211	-0.007124	-0.004024	-0.002427	0.000001743	-0.002633
109	Max	0.002453	0.001233	-0.000099	0.005844	0.000049	0.000004594
109	Min	-0.000239	-0.016559	-0.005247	0.000096	-0.000004542	-0.000345
110	Max	0.001559	0.001454	-0.000073	-0.000027	-0.000001874	0.002166
110	Min	-0.000276	-0.008196	-0.004064	-0.002105	-0.000669	0.000035
111	Max	0.005069	0.001332	-0.000103	0.004434	0.004268	-0.000055
111	Min	-0.00021	-0.011949	-0.005693	0.00004	0.000034	-0.003487
112	Max	0.004997	0.001343	-0.000109	0.002554	0.006841	0.004411
112	Min	-0.000212	-0.011141	-0.006032	0.000006874	0.000046	0.000066
113	Max	0.005617	0.001424	-0.000107	0.000021	0.000003384	-0.000093
113	Min	-0.000183	-0.005964	-0.005962	-0.000016	-0.001774	-0.006493
114	Max	0.00011	0.001375	-0.000086	0.000066	-0.000025	0.000381
114	Min	-0.004944	-0.008819	-0.00493	-0.000008222	-0.002399	-0.000028
115	Max	0.005687	0.001398	-0.000101	0.002194	-0.000002927	0.005931
115	Min	-0.000197	-0.005098	-0.005685	0.000021	-0.000943	0.000095
116	Max	0.000317	0.001325	-0.000078	0.002868	-0.000012	-0.000057
116	Min	-0.000294	-0.011817	-0.004307	0.000035	-0.000999	-0.003438
117	Max	0.002349	0.002158	-0.000096	-0.000003687	0.00000712	0.000009467

117	Min	-0.000246	-0.001184	-0.005153	-0.000866	-0.000001834	-0.000173
118	Max	0.004256	0.001325	-0.000078	0.002861	0.00101	0.003007
118	Min	-0.000203	-0.011181	-0.004286	0.000036	0.000012	0.000056
119	Max	0.000197	0.001399	-0.000101	0.002228	0.000944	-0.000095
119	Min	-0.001613	-0.003693	-0.005671	0.000021	0.000002783	-0.006234
120	Max	0.000183	0.001425	-0.000107	0.000017	0.001901	0.007063
120	Min	-0.001308	-0.004723	-0.005929	-0.000016	-0.000003337	0.000093
121	Max	0.010211	0.001376	-0.000086	0.000062	0.002622	0.000028
121	Min	-0.00011	-0.007762	-0.004883	-0.00000817	0.000025	-0.000194
122	Max	0.000182	0.001337	-0.000107	0.000016	0.001758	-0.000093
122	Min	-0.001402	-0.010841	-0.006009	-0.000039	-0.000003491	-0.006507
123	Max	0.000195	0.001314	-0.000102	-0.000021	0.000912	0.006239
123	Min	-0.000737	-0.011214	-0.005694	-0.002174	0.000002704	0.000096
124	Max	0.004483	0.001498	-0.000079	-0.000035	0.001041	-0.000056
124	Min	-0.0002	-0.004678	-0.004329	-0.002903	0.000012	-0.003555
125	Max	0.002497	0.001184	-0.000097	0.000737	0.000022	0.00001
125	Min	-0.000243	-0.018506	-0.005205	0.000003771	-0.000001834	-0.000445
126	Max	0.00076	0.001497	-0.000079	-0.000035	-0.000012	0.003164
126	Min	-0.000291	-0.005913	-0.004368	-0.002794	-0.000969	0.000056
127	Max	0.005957	0.001313	-0.000101	-0.000021	-0.000003023	-0.000096
127	Min	-0.000195	-0.012387	-0.005701	-0.002433	-0.001125	-0.005974
128	Max	0.006415	0.001336	-0.000107	0.000016	0.00000319	0.006392
128	Min	-0.000182	-0.011861	-0.006006	-0.000174	-0.002141	0.000094
129	Max	0.005602	0.00143	-0.000105	-0.000006012	0.002082	-0.000119
129	Min	-0.000166	-0.005893	-0.005956	-0.000573	0.00003	-0.007746
130	Max	0.000085	0.001377	-0.00009	0.000003326	-0.000027	0.000384
130	Min	-0.007195	-0.00885	-0.005203	-0.000002136	-0.002487	-0.000024
131	Max	0.005746	0.0014	-0.0001	-0.000025	0.001433	0.007548
131	Min	-0.000187	-0.005512	-0.005674	-0.001379	0.000026	0.000123
132	Max	0.000192	0.001296	-0.000082	0.002811	-0.000012	-0.000068

132	Min	-0.000619	-0.014371	-0.00454	0.000032	-0.001031	-0.004388
133	Max	0.002352	0.002377	-0.000094	-0.000016	0.000001465	0.000011
133	Min	-0.000247	-0.001159	-0.005143	-0.000588	-0.000001223	-0.000151
134	Max	0.005198	0.001296	-0.000083	0.00281	0.001035	0.00385
134	Min	-0.000191	-0.01372	-0.004521	0.000032	0.000012	0.000067
135	Max	0.000187	0.001401	-0.0001	-0.000025	-0.000027	-0.000123
135	Min	-0.001687	-0.004069	-0.005647	-0.00139	-0.001401	-0.007833
136	Max	0.000166	0.001431	-0.000105	-0.000005978	-0.00003	0.008395
136	Min	-0.001249	-0.004633	-0.005915	-0.000556	-0.002036	0.000119
137	Max	0.012616	0.001378	-0.000091	0.0000043	0.002664	0.000024
137	Min	-0.000086	-0.00779	-0.005161	-0.000002099	0.000027	-0.000235
138	Max	0.000165	0.001329	-0.000106	0.000672	-0.00003	-0.000119
138	Min	-0.001475	-0.010983	-0.005985	0.00000608	-0.0022	-0.00783
139	Max	0.000185	0.00131	-0.000101	0.001366	-0.000026	0.007924
139	Min	-0.000806	-0.010818	-0.005692	0.000025	-0.001427	0.000123
140	Max	0.005469	0.001536	-0.000083	-0.000032	0.001077	-0.000067
140	Min	-0.000189	-0.002105	-0.004562	-0.002833	0.000012	-0.004422
141	Max	0.002523	0.001159	-0.000094	0.000654	0.000017	0.000012
141	Min	-0.000244	-0.018728	-0.005205	0.000016	-0.000001221	-0.000492
142	Max	0.000189	0.001536	-0.000083	-0.000032	-0.000013	0.0041
142	Min	-0.000342	-0.003412	-0.004595	-0.002761	-0.001021	0.000068
143	Max	0.005975	0.00131	-0.0001	0.001417	0.001427	-0.000123
143	Min	-0.000185	-0.01194	-0.005692	0.000025	0.000026	-0.007571
144	Max	0.006406	0.001328	-0.000105	0.000682	0.002311	0.007613
144	Min	-0.000165	-0.011954	-0.005989	0.000006073	0.00003	0.000119
145	Max	0.006835	0.001436	-0.000102	0.000013	0.000787	-0.000126
145	Min	-0.000156	-0.005429	-0.00588	-0.000546	-0.000061	-0.008274
146	Max	0.00008	0.001378	-0.000101	0.000009122	0.002089	0.000426
146	Min	-0.006896	-0.008864	-0.005808	-0.000002809	-0.000002115	-0.000024
147	Max	0.006699	0.001403	-0.000098	0.000077	0.000848	0.008278

147	Min	-0.000183	-0.004882	-0.0056	-0.000149	-0.000044	0.000135
148	Max	0.000189	0.001284	-0.000092	0.000032	0.000768	-0.000073
148	Min	-0.000582	-0.014562	-0.005082	-0.001424	-0.000002943	-0.004678
149	Max	0.002356	0.00354	-0.000089	0.00002	0.000019	0.00001
149	Min	-0.000248	-0.001151	-0.004985	-0.001844	-0.000001341	-0.000178
150	Max	0.005141	0.001283	-0.000092	0.000032	0.000002662	0.0041
150	Min	-0.000189	-0.01383	-0.005063	-0.001692	-0.000844	0.000073
151	Max	0.000182	0.001404	-0.000098	0.000078	0.000044	-0.000135
151	Min	-0.002664	-0.003379	-0.005559	-0.000324	-0.001023	-0.008511
152	Max	0.000156	0.001436	-0.000102	0.000013	0.000061	0.008916
152	Min	-0.002447	-0.004165	-0.005829	-0.000585	-0.000866	0.000126
153	Max	0.012283	0.001378	-0.000102	0.000031	0.000001903	0.000024
153	Min	-0.000081	-0.007806	-0.005787	-0.000002763	-0.002239	-0.00028
154	Max	0.000155	0.001326	-0.000102	0.000582	0.000061	-0.000126
154	Min	-0.002757	-0.011506	-0.005886	-0.000013	-0.000824	-0.008334
155	Max	0.00018	0.001309	-0.000099	0.000191	0.000044	0.008721
155	Min	-0.001753	-0.01147	-0.005628	-0.000077	-0.000846	0.000135
156	Max	0.005483	0.001548	-0.000092	0.001317	0.000002513	-0.000073
156	Min	-0.000186	-0.001901	-0.005105	-0.000032	-0.000711	-0.00474
157	Max	0.002542	0.00115	-0.00009	0.001906	0.000001936	0.000011
157	Min	-0.000246	-0.019979	-0.005052	-0.000019	-0.000001325	-0.000538
158	Max	0.000186	0.001547	-0.000092	0.001522	0.000791	0.004445
158	Min	-0.000331	-0.003255	-0.005118	-0.000032	-0.000003091	0.000073
159	Max	0.006932	0.001309	-0.000098	0.000199	0.000904	-0.000135
159	Min	-0.00018	-0.012593	-0.00562	-0.000078	-0.000045	-0.008348
160	Max	0.007728	0.001325	-0.000102	0.000581	0.000829	0.008133
160	Min	-0.000155	-0.012481	-0.005898	-0.000013	-0.000061	0.000126
161	Max	0.006359	0.001431	-0.000099	0.001125	0.000084	-0.000114
161	Min	-0.000162	-0.00584	-0.005845	-0.000004351	-0.001395	-0.007534
162	Max	0.0001	0.001378	-0.00011	0.000025	0.000142	0.00041

162	Min	-0.006127	-0.008882	-0.006307	-0.000001168	-0.000932	-0.000021
163	Max	0.00624	0.001402	-0.000097	0.001118	0.00006	0.007597
163	Min	-0.000188	-0.00546	-0.005567	-0.000074	-0.001372	0.000124
164	Max	0.000196	0.001291	-0.000099	0.001272	0.000055	-0.000066
164	Min	-0.000404	-0.014372	-0.00553	-0.000115	-0.000341	-0.004185
165	Max	0.002354	0.002081	-0.000086	0.004518	3.957E-07	0.000008753
165	Min	-0.000249	-0.001176	-0.004899	0.000012	-0.000026	-0.000186
166	Max	0.004929	0.001291	-0.000099	0.001696	0.0005	0.003621
166	Min	-0.000196	-0.013625	-0.005507	-0.000115	-0.000055	0.000066
167	Max	0.000187	0.001403	-0.000097	0.001483	0.001807	-0.000124
167	Min	-0.002141	-0.003981	-0.005507	-0.000074	-0.00006	-0.007768
168	Max	0.000162	0.001432	-0.0001	0.001254	0.001729	0.008102
168	Min	-0.001856	-0.004614	-0.00579	-0.000004319	-0.000085	0.000114
169	Max	0.011437	0.001379	-0.00011	0.000001467	0.000877	0.000021
169	Min	-0.000101	-0.007821	-0.006304	-0.000001133	-0.000143	-0.000283
170	Max	0.000161	0.001331	-0.0001	0.000004664	0.001559	-0.000114
170	Min	-0.002212	-0.011094	-0.005832	-0.00117	-0.000085	-0.007583
171	Max	0.000185	0.001317	-0.000098	0.000074	0.001308	0.008051
171	Min	-0.001321	-0.010952	-0.0056	-0.001052	-0.00006	0.000125
172	Max	0.005311	0.001532	-0.0001	0.000115	0.000361	-0.000066
172	Min	-0.000194	-0.002003	-0.005558	-0.001253	-0.000056	-0.00427
173	Max	0.002559	0.001175	-0.000086	-0.000012	0.00003	0.000009143
173	Min	-0.000246	-0.018552	-0.004964	-0.004336	-0.00000049	-0.000545
174	Max	0.00023	0.001531	-0.0001	0.000115	0.000055	0.004023
174	Min	-0.000303	-0.003392	-0.005549	-0.001573	-0.000466	0.000066
175	Max	0.00646	0.001317	-0.000097	0.000074	0.00006	-0.000125
175	Min	-0.000185	-0.012014	-0.005584	-0.001278	-0.001554	-0.007706
176	Max	0.00722	0.00133	-0.0001	0.000004532	0.000084	0.007397
176	Min	-0.000161	-0.012083	-0.005846	-0.001191	-0.00161	0.000115
177	Max	0.005582	0.001418	-0.000098	0.00021	0.000041	-0.000089

177	Min	-0.000182	-0.006538	-0.005824	0.000023	-0.000192	-0.005822
178	Max	0.000134	0.001379	-0.000116	0.000001488	0.004704	0.000406
178	Min	-0.004011	-0.008889	-0.00667	-0.00003	0.000014	-0.000016
179	Max	0.005453	0.001396	-0.000096	0.000176	-0.000034	0.005849
179	Min	-0.000202	-0.00617	-0.005548	0.000036	-0.000151	0.000096
180	Max	0.000326	0.001308	-0.000105	0.000005055	0.001592	-0.000049
180	Min	-0.000294	-0.013077	-0.005857	-0.003368	0.000001008	-0.003085
181	Max	0.002357	0.00147	-0.000084	0.001211	0.000045	0.000006606
181	Min	-0.00025	-0.001482	-0.004852	0.000069	-8.617E-07	-0.000215
182	Max	0.004243	0.001308	-0.000105	0.000004946	-0.000001154	0.002537
182	Min	-0.000209	-0.01228	-0.005821	-0.004006	-0.001784	0.000049
183	Max	0.000202	0.001397	-0.000096	0.000154	0.000151	-0.000097
183	Min	-0.001288	-0.004717	-0.005465	-0.000212	-0.000376	-0.005945
184	Max	0.000182	0.001419	-0.000098	0.000151	0.000191	0.0063
184	Min	-0.000998	-0.005349	-0.005772	0.000023	-0.000304	0.000089
185	Max	0.009224	0.001379	-0.000117	0.00002	-0.000014	0.000016
185	Min	-0.000135	-0.007831	-0.006681	-0.000001397	-0.004795	-0.000246
186	Max	0.000181	0.001343	-0.000099	-0.000023	0.000191	-0.000089
186	Min	-0.001312	-0.01037	-0.005797	-0.000226	0.00003	-0.00587
187	Max	0.000199	0.001333	-0.000097	-0.000036	0.000151	0.006288
187	Min	-0.000574	-0.010327	-0.005585	-0.000153	0.000003802	0.000097
188	Max	0.004668	0.001499	-0.000105	0.003242	-0.00000118	-0.000049
188	Min	-0.000207	-0.003254	-0.005892	-0.000004876	-0.001527	-0.003179
189	Max	0.002564	0.001231	-0.000084	-0.000068	0.000000635	0.000007068
189	Min	-0.000247	-0.015985	-0.004908	-0.001202	-0.000043	-0.000565
190	Max	0.000736	0.001498	-0.000105	0.003678	0.001691	0.002951
190	Min	-0.000291	-0.004657	-0.005857	-0.000004958	9.859E-07	0.000049
191	Max	0.005737	0.001333	-0.000096	0.0002	0.000335	-0.000097
191	Min	-0.0002	-0.011385	-0.005557	-0.000154	-0.000151	-0.006001
192	Max	0.006448	0.001342	-0.000098	-0.000023	0.000347	0.005739

192	Min	-0.000181	-0.011411	-0.005806	-0.000092	-0.000192	0.000089
193	Max	0.004535	0.001401	-0.000097	0.001446	0.000063	-0.000051
193	Min	-0.000212	-0.007403	-0.005831	3.496E-08	-0.002046	-0.003285
194	Max	0.000181	0.001379	-0.00012	0.000031	0.001749	0.000339
194	Min	-0.000819	-0.008892	-0.006909	-5.298E-07	0.000088	-0.000008361
195	Max	0.004447	0.001388	-0.000096	0.001528	0.000049	0.003237
195	Min	-0.000223	-0.007034	-0.005557	-0.000066	-0.001817	0.000054
196	Max	0.001386	0.001335	-0.000108	-0.000066	0.000674	-0.000026
196	Min	-0.000276	-0.010882	-0.006071	-0.001173	0.000029	-0.001658
197	Max	0.002383	0.001425	-0.000083	0.005213	0.000008635	0.000003921
197	Min	-0.00025	-0.003838	-0.004857	0.000017	-3.648E-07	-0.000347
198	Max	0.003096	0.001335	-0.000108	-0.000066	-0.00003	0.001066
198	Min	-0.000227	-0.009757	-0.006028	-0.000988	-0.000574	0.000025
199	Max	0.000222	0.001388	-0.000096	0.00186	0.002161	-0.000054
199	Min	-0.0004	-0.005459	-0.005455	-0.000066	-0.000049	-0.003208
200	Max	0.000218	0.001402	-0.000098	0.001546	0.002208	0.003734
200	Min	-0.000271	-0.006229	-0.00579	6.601E-08	-0.000064	0.000051
201	Max	0.005921	0.00138	-0.000121	6.162E-07	-0.000088	0.000008187
201	Min	-0.000182	-0.007836	-0.006928	-0.000009563	-0.00193	-0.000133
202	Max	0.00021	0.001359	-0.000098	-2.235E-08	0.002313	-0.000051
202	Min	-0.000294	-0.009458	-0.005794	-0.001538	-0.000064	-0.00333
203	Max	0.000392	0.001355	-0.000096	0.000066	0.001759	0.003594
203	Min	-0.000271	-0.009557	-0.005595	-0.001449	-0.000049	0.000055
204	Max	0.003634	0.001451	-0.000109	0.001299	-0.00003	-0.000026
204	Min	-0.000224	-0.005438	-0.006117	0.000066	-0.000715	-0.001709
205	Max	0.002563	0.001302	-0.000083	-0.000017	0.000035	0.000004493
205	Min	-0.000248	-0.012828	-0.004896	-0.005292	-3.219E-07	-0.000507
206	Max	0.001772	0.00145	-0.000109	0.000668	0.000471	0.001471
206	Min	-0.000273	-0.006817	-0.006058	0.000066	0.000029	0.000026
207	Max	0.00482	0.001355	-0.000096	0.000066	0.000049	-0.000055

207	Min	-0.000221	-0.010623	-0.005556	-0.001799	-0.002105	-0.003404
208	Max	0.005372	0.001359	-0.000097	-5.58E-08	0.000063	0.003282
208	Min	-0.000211	-0.010551	-0.005795	-0.001635	-0.002556	0.000051
209	Max	0.002703	0.00139	-0.000098	0.001005	-0.000023	-0.000014
209	Min	-0.000225	-0.008641	-0.005849	0.000016	-0.001484	-0.001024
210	Max	0.002037	0.001379	-0.000123	6.809E-07	0.003717	0.000428
210	Min	-0.000243	-0.008909	-0.007016	-0.000014	0.000056	-0.000003328
211	Max	0.002856	0.001394	-0.000096	0.00116	-0.000016	0.000833
211	Min	-0.00023	-0.008441	-0.005575	0.000013	-0.001209	0.000016
212	Max	0.002414	0.00139	-0.00011	-0.000033	0.001325	-0.000007236
212	Min	-0.000245	-0.008814	-0.006177	-0.002618	0.000017	-0.0005
213	Max	0.002395	0.001402	-0.000084	0.003226	5.297E-07	0.000001143
213	Min	-0.000251	-0.007779	-0.004893	0.000044	-0.000003025	-0.000226
214	Max	0.002271	0.00139	-0.000111	-0.000033	-0.000018	0.000152
214	Min	-0.000257	-0.008091	-0.006123	-0.002237	-0.001141	0.000007014
215	Max	0.001692	0.001394	-0.000096	0.001603	0.001672	-0.000016
215	Min	-0.00027	-0.007356	-0.005456	0.000014	0.000016	-0.000905
216	Max	0.001868	0.001391	-0.000098	0.000997	0.001458	0.001054
216	Min	-0.000273	-0.007499	-0.005813	0.000016	0.000023	0.000014
217	Max	0.002854	0.00138	-0.000124	0.000008396	-0.000056	0.000025
217	Min	-0.00026	-0.007836	-0.007044	-5.908E-07	-0.003948	-0.000003239
218	Max	0.001955	0.001369	-0.000098	-0.000016	0.001675	-0.000014
218	Min	-0.000272	-0.008154	-0.005805	-0.001066	0.000023	-0.001026
219	Max	0.001942	0.001364	-0.000097	-0.000013	0.001155	0.001071
219	Min	-0.000267	-0.008234	-0.00561	-0.00106	0.000016	0.000016
220	Max	0.002582	0.001373	-0.000111	0.002655	-0.000018	-0.000006881
220	Min	-0.000254	-0.007603	-0.006237	0.000033	-0.001334	-0.000373
221	Max	0.00258	0.001355	-0.000084	-0.000044	4.454E-07	0.000001504
221	Min	-0.000248	-0.008842	-0.004918	-0.003145	-0.000022	-0.000659
222	Max	0.00268	0.001373	-0.000111	0.002586	0.001315	0.000468

222	Min	-0.000242	-0.008571	-0.006139	0.000033	0.000017	0.00000683
223	Max	0.003042	0.001363	-0.000096	-0.000013	-0.000016	-0.000016
223	Min	-0.000228	-0.009046	-0.005551	-0.001197	-0.001253	-0.000989
224	Max	0.003192	0.001369	-0.000098	-0.000016	-0.000023	0.000812
224	Min	-0.000224	-0.009204	-0.005784	-0.001015	-0.001564	0.000014
225	Max	0.002171	0.001381	-0.000136	0.00188	0.00072	-0.000009701
225	Min	-0.000247	-0.008905	-0.006792	0.000051	-0.000235	-0.000502
226	Max	0.001854	0.00138	-0.000183	0.000001623	-0.000165	0.001159
226	Min	-0.00028	-0.009019	-0.007409	-0.002175	-0.003547	-0.000001399
227	Max	0.002688	0.001374	-0.00014	0.000179	-0.000073	0.000099
227	Min	-0.000249	-0.008598	-0.005905	-0.001382	-0.000491	0.000007547
228	Max	0.002064	0.001355	-0.00017	0.004112	-0.000048	0.000364
228	Min	-0.000259	-0.009594	-0.0076	0.000137	-0.00187	0.00000267
229	Max	0.002259	0.001365	-0.000146	0.001414	0.000468	0.000002466
229	Min	-0.000251	-0.008805	-0.006547	0.000083	-0.000003192	-0.000442
230	Max	0.002248	0.001355	-0.00017	0.002342	0.001443	-0.000002731
230	Min	-0.000245	-0.008506	-0.006722	0.000138	0.000048	-0.000774
231	Max	0.001495	0.001374	-0.00014	0.000179	0.000339	-0.000007766
231	Min	-0.000251	-0.007287	-0.00506	-0.002501	-0.000639	-0.000277
232	Max	0.001945	0.001381	-0.000136	0.001993	0.000234	0.000937
232	Min	-0.000251	-0.007527	-0.005909	0.000051	-0.002059	0.000009574
233	Max	0.003621	0.00138	-0.000184	0.000033	0.005977	0.000064
233	Min	-0.000224	-0.007816	-0.008331	-0.000001549	0.000165	-0.000001489
234	Max	0.002096	0.001379	-0.000136	-0.000051	0.000234	-0.000009072
234	Min	-0.00025	-0.008079	-0.006017	-0.001936	-0.002263	-0.0009
235	Max	0.001904	0.001385	-0.00014	0.002672	0.001229	0.000995
235	Min	-0.000249	-0.008161	-0.005594	-0.000179	0.000073	0.000008229
236	Max	0.003249	0.001407	-0.00017	-0.000137	0.002877	0.000352
236	Min	-0.000242	-0.006018	-0.009073	-0.006433	0.000048	0.000003165
237	Max	0.002793	0.001393	-0.000146	0.000042	0.000002939	0.000003143

237	Min	-0.000249	-0.008149	-0.006055	-0.000423	-0.002884	-0.001629
238	Max	0.003211	0.001407	-0.00017	0.001002	0.000665	-0.000003237
238	Min	-0.000257	-0.009439	-0.0046	-0.000595	-0.000225	-0.000481
239	Max	0.003536	0.001384	-0.00014	0.003521	0.001227	-0.000008233
239	Min	-0.000247	-0.009409	-0.004625	-0.000179	-0.000339	-0.0004
240	Max	0.004588	0.001379	-0.000136	0.000674	0.006576	0.000576
240	Min	-0.000247	-0.009768	-0.003364	-0.000233	-0.000235	0.000009037
241	Max	0.002051	0.001386	-0.000115	0.002208	0.000429	-0.000025
241	Min	-0.000235	-0.008993	-0.007058	-0.000074	0.000088	-0.001913
242	Max	0.001383	0.00138	-0.000171	0.000001711	0.001507	0.001775
242	Min	-0.000271	-0.009128	-0.008234	-0.002147	0.000165	-0.000001945
243	Max	0.002791	0.001382	-0.000123	-0.00008	0.000244	0.000964
243	Min	-0.00024	-0.008515	-0.005662	-0.000373	-0.000593	0.000027
244	Max	0.001996	0.001362	-0.000159	-0.000123	0.000219	0.000264
244	Min	-0.000255	-0.009707	-0.007872	-0.00272	0.000049	-0.000009662
245	Max	0.002129	0.001373	-0.000137	-0.000081	0.000826	0.00000331
245	Min	-0.000252	-0.008982	-0.006891	-0.000426	-0.000004013	-0.000702
246	Max	0.002002	0.001362	-0.000159	-0.000123	0.00013	0.000009416
246	Min	-0.000249	-0.008391	-0.006404	-0.003107	-0.00022	-0.000837
247	Max	0.001099	0.001382	-0.000123	-0.00008	0.00035	-0.000028
247	Min	-0.00026	-0.007039	-0.004246	-0.000638	-0.000244	-0.001154
248	Max	0.001639	0.001386	-0.000115	0.00196	-0.000088	0.002118
248	Min	-0.000264	-0.007385	-0.005347	-0.000074	-0.001415	0.000025
249	Max	0.003599	0.00138	-0.000171	0.0003	-0.000165	0.000184
249	Min	-0.000235	-0.007798	-0.00839	-0.000001625	-0.005005	-0.000001854
250	Max	0.001921	0.001374	-0.000116	0.000074	-0.000088	-0.000025
250	Min	-0.000264	-0.008146	-0.005678	-0.00247	-0.000429	-0.002182
251	Max	0.001635	0.001378	-0.000123	0.001759	0.001803	0.002425
251	Min	-0.000259	-0.008301	-0.005066	0.000081	-0.000244	0.000028
252	Max	0.003384	0.0014	-0.000159	0.003953	-0.000049	0.000615

252	Min	-0.000247	-0.005717	-0.00976	0.000123	-0.000222	-0.000009612
253	Max	0.003006	0.001387	-0.000137	0.000426	0.000003795	0.000003919
253	Min	-0.00025	-0.007744	-0.006753	-0.001528	-0.002925	-0.002494
254	Max	0.003178	0.0014	-0.000159	0.000547	0.000219	0.000653
254	Min	-0.000254	-0.008888	-0.005361	-0.002458	-0.000095	0.000001808
255	Max	0.002901	0.001378	-0.000123	0.000373	0.000244	-0.000028
255	Min	-0.000239	-0.008618	-0.006197	-0.003186	-0.004634	-0.001427
256	Max	0.004253	0.001374	-0.000115	0.000074	0.000429	0.00085
256	Min	-0.000234	-0.00964	-0.003797	-0.002543	-0.004832	0.000025
257	Max	0.002053	0.001385	-0.000116	0.00305	0.001894	-0.000023
257	Min	-0.000235	-0.009044	-0.007135	0.000075	-0.000242	-0.001636
258	Max	0.001634	0.00138	-0.000171	4.235E-07	-0.000127	0.002365
258	Min	-0.00027	-0.009126	-0.007912	-0.004208	-0.000658	-0.000001481
259	Max	0.00273	0.001381	-0.000125	0.000113	-0.000089	0.000552
259	Min	-0.00024	-0.008569	-0.00576	-0.001495	-0.000841	0.000025
260	Max	0.001918	0.00136	-0.000163	0.001119	-0.000038	0.000949
260	Min	-0.000255	-0.009778	-0.0081	0.000095	-0.001932	0.000004623
261	Max	0.002011	0.00137	-0.000147	0.000841	0.001345	0.000005017
261	Min	-0.000252	-0.009219	-0.007348	0.000074	-0.00000773	-0.001013
262	Max	0.001851	0.00136	-0.000163	0.001138	0.002819	-0.000004679
262	Min	-0.00025	-0.008416	-0.006335	0.000095	0.000038	-0.001739
263	Max	0.000978	0.001381	-0.000125	0.000112	0.001483	-0.000025
263	Min	-0.00026	-0.007044	-0.003994	-0.001067	0.000089	-0.000809
264	Max	0.001554	0.001386	-0.000116	0.004474	0.000241	0.002303
264	Min	-0.000265	-0.007401	-0.005192	0.000075	-0.00118	0.000023
265	Max	0.003546	0.001381	-0.000171	0.000311	0.003894	0.000288
265	Min	-0.000236	-0.007772	-0.008394	-3.422E-07	0.000127	-0.000001571
266	Max	0.001893	0.001376	-0.000116	-0.000075	0.000241	-0.000022
266	Min	-0.000265	-0.008087	-0.005627	-0.003968	-0.002318	-0.002182
267	Max	0.001704	0.00138	-0.000125	0.003681	0.003464	0.002581

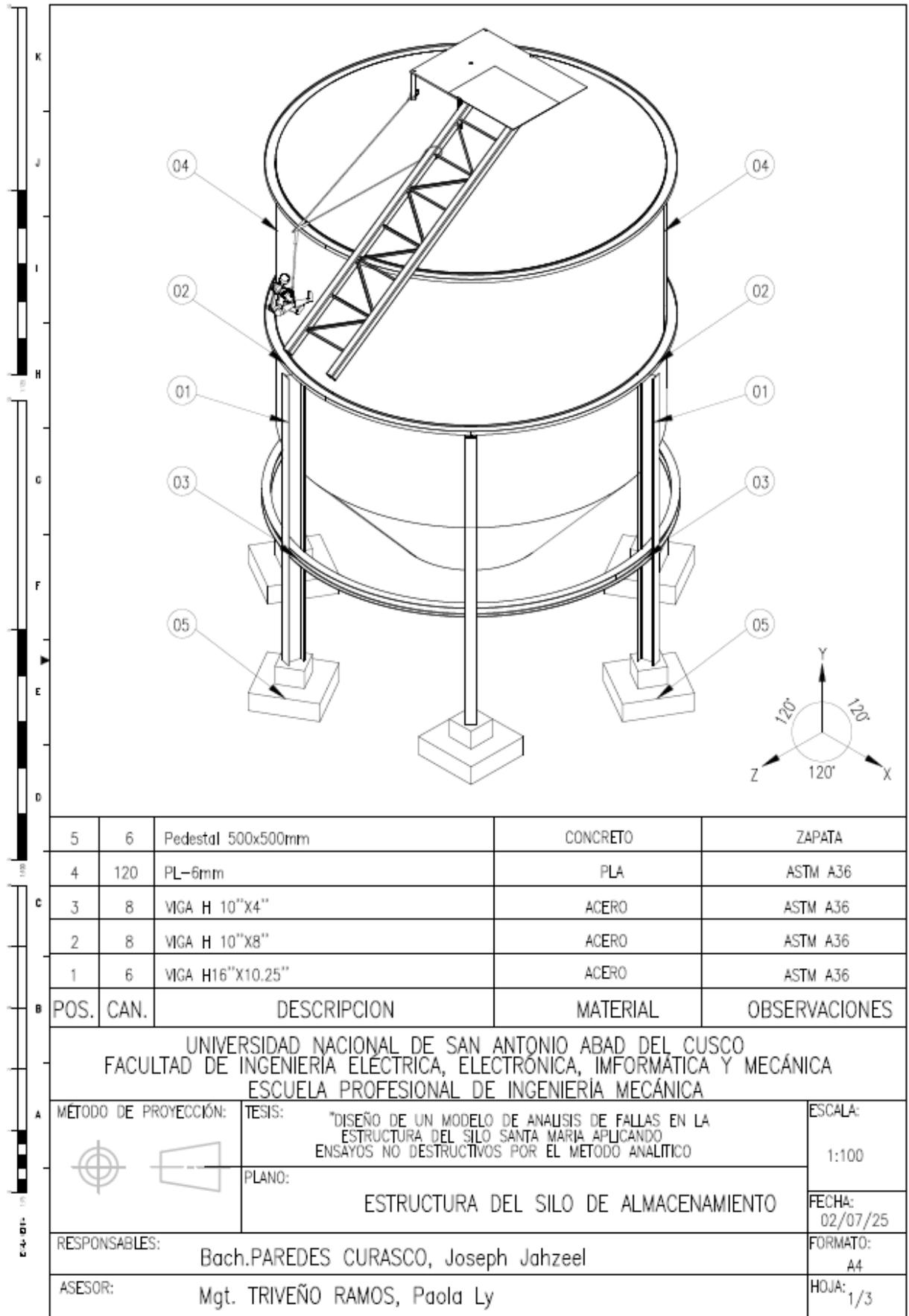
267	Min	-0.000259	-0.008221	-0.005162	-0.000112	0.000089	0.000026
268	Max	0.003459	0.001402	-0.000163	-0.000095	0.002576	0.001128
268	Min	-0.000249	-0.005604	-0.010155	-0.001934	0.000038	0.000005296
269	Max	0.003075	0.001391	-0.000147	0.001097	0.000007367	0.000005656
269	Min	-0.000251	-0.00766	-0.006964	-0.000359	-0.005606	-0.003234
270	Max	0.003375	0.001402	-0.000163	0.001847	0.001548	0.000046
270	Min	-0.000254	-0.009063	-0.00492	-0.000422	-0.000181	-0.000023
271	Max	0.003182	0.00138	-0.000125	0.004962	0.001473	-0.000025
271	Min	-0.00024	-0.008785	-0.005659	-0.000112	-0.000383	-0.001162
272	Max	0.004563	0.001375	-0.000116	-0.000072	0.004943	0.000702
272	Min	-0.000235	-0.009703	-0.003165	-0.000308	-0.000242	0.000022
273	Max	0.002078	0.001385	-0.000116	0.002258	0.000258	-0.000027
273	Min	-0.000235	-0.009091	-0.00718	0.000014	0.000058	-0.001662
274	Max	0.002224	0.001381	-0.000151	0.000002361	0.003054	0.003158
274	Min	-0.000256	-0.009081	-0.007061	-0.004963	0.000131	-0.000001129
275	Max	0.002374	0.001381	-0.000126	0.001215	-0.000003798	0.001159
275	Min	-0.000241	-0.00893	-0.006517	-0.000273	-0.003186	0.000038
276	Max	0.001833	0.001365	-0.000158	-0.000064	0.00005	0.000838
276	Min	-0.000254	-0.009765	-0.008203	-0.000543	-0.001604	0.000006637
277	Max	0.001934	0.001368	-0.000153	0.000325	0.002443	0.000005463
277	Min	-0.000252	-0.009307	-0.007578	-0.000137	-0.000008325	-0.00156
278	Max	0.001727	0.001365	-0.000158	-0.000064	0.002845	-0.000006681
278	Min	-0.000252	-0.008278	-0.006044	-0.003499	-0.000051	-0.002354
279	Max	0.000961	0.001381	-0.000127	-0.000066	0.000635	-0.000039
279	Min	-0.000261	-0.00716	-0.003973	-0.001748	0.00000507	-0.001439
280	Max	0.001346	0.001385	-0.000117	0.003526	-0.000057	0.003058
280	Min	-0.000267	-0.00742	-0.004867	0.000014	-0.003619	0.000026
281	Max	0.002849	0.001381	-0.000151	0.001166	-0.000131	0.000681
281	Min	-0.000251	-0.007755	-0.007403	-0.000002276	-0.005354	-0.000001126
282	Max	0.002075	0.001377	-0.000117	-0.000014	0.000189	-0.000026

282	Min	-0.000267	-0.007926	-0.005928	-0.003519	-0.000258	-0.002292
283	Max	0.002178	0.001381	-0.000127	0.001423	0.006096	0.003593
283	Min	-0.000261	-0.00781	-0.006069	0.000066	0.000003979	0.000039
284	Max	0.003383	0.001398	-0.000158	0.002585	0.001159	0.001077
284	Min	-0.000251	-0.005996	-0.009728	0.000064	-0.000051	0.000007282
285	Max	0.003089	0.001394	-0.000153	0.000137	0.000008006	0.000006065
285	Min	-0.000252	-0.00747	-0.00735	-0.00193	-0.006323	-0.004147
286	Max	0.003338	0.001398	-0.000158	0.000289	0.00005	-0.000007237
286	Min	-0.000253	-0.008824	-0.005226	-0.001458	-0.00131	-0.000224
287	Max	0.00338	0.001381	-0.000127	0.001089	-0.00000489	-0.000039
287	Min	-0.00024	-0.00888	-0.00527	0.000066	-0.002289	-0.001873
288	Max	0.004283	0.001377	-0.000116	-0.000014	0.000257	0.001129
288	Min	-0.000235	-0.0095	-0.003563	-0.002499	-0.001898	0.000026
289	Max	0.002365	0.00138	-0.00013	0.000016	0.001434	0.002939
289	Min	-0.000242	-0.009088	-0.006801	-0.004642	-0.000248	0.000021
290	Max	0.003102	0.001381	-0.000128	0.000001268	-0.000051	0.002542
290	Min	-0.000239	-0.008937	-0.005707	-0.003892	-0.002345	-0.000001217
291	Max	0.001874	0.001376	-0.00014	-0.000016	0.002657	0.001296
291	Min	-0.000248	-0.009395	-0.007581	-0.005424	-0.000142	0.000027
292	Max	0.001826	0.00137	-0.000152	-0.000071	0.004017	0.000074
292	Min	-0.000252	-0.00944	-0.00778	-0.007353	-0.000012	-0.000832
293	Max	0.001902	0.001367	-0.000156	-0.000087	0.003597	0.00000135
293	Min	-0.000252	-0.008977	-0.007133	-0.004997	-0.000001284	-0.002616
294	Max	0.001752	0.00137	-0.000152	0.000565	0.004714	-0.000021
294	Min	-0.000253	-0.008235	-0.005978	-0.000249	0.000002128	-0.002901
295	Max	0.001441	0.001376	-0.00014	0.004769	0.007485	-0.000027
295	Min	-0.000257	-0.007737	-0.005059	-0.000059	0.00004	-0.001391
296	Max	0.001363	0.00138	-0.00013	0.004242	0.00659	0.000579
296	Min	-0.000262	-0.007665	-0.005018	0.000003056	0.000073	-0.000075
297	Max	0.001769	0.001381	-0.000128	0.003331	0.001842	0.002428

297	Min	-0.000265	-0.007728	-0.005758	-0.000001181	0.00005	-0.000001217
298	Max	0.002479	0.001382	-0.00013	0.003567	0.000659	0.002901
298	Min	-0.000262	-0.007579	-0.006686	-0.000016	0.000074	0.000022
299	Max	0.002976	0.001386	-0.00014	0.005121	0.000141	0.001372
299	Min	-0.000257	-0.007265	-0.007536	0.000017	-0.001704	0.000027
300	Max	0.003042	0.001392	-0.000152	0.009591	0.000011	0.000074
300	Min	-0.000253	-0.007192	-0.007895	0.000072	-0.004766	-0.000705
301	Max	0.002973	0.001395	-0.000157	0.005157	4.521E-07	0.000001407
301	Min	-0.000252	-0.007631	-0.00717	0.000087	-0.003941	-0.002574
302	Max	0.003136	0.001392	-0.000152	0.000248	-0.000002184	-0.000021
302	Min	-0.000251	-0.008404	-0.005921	-0.00135	-0.005237	-0.003134
303	Max	0.00348	0.001386	-0.00014	0.000058	-0.00004	-0.000027
303	Min	-0.000248	-0.008947	-0.005003	-0.003802	-0.006824	-0.001488
304	Max	0.00355	0.001382	-0.00013	-0.000003001	-0.000072	0.000723
304	Min	-0.000242	-0.009011	-0.004852	-0.005088	-0.008611	-0.000075
306	Max	0	0	0	0	0	0
306	Min	0	0	0	0	0	0
307	Max	0	0	0	0	0	0
307	Min	0	0	0	0	0	0
308	Max	0	0	0	0	0	0
308	Min	0	0	0	0	0	0
309	Max	0	0	0	0	0	0
309	Min	0	0	0	0	0	0
310	Max	0	0	0	0	0	0
310	Min	0	0	0	0	0	0
311	Max	0	0	0	0	0	0
311	Min	0	0	0	0	0	0
312	Max	0.000022	0.000001503	-0.0000021	0.000034	0.000054	2.993E-08
312	Min	-0.000001759	-0.000014	-0.000098	-0.000003769	-0.000004435	2.867E-10
313	Max	0.000015	0.000001618	-0.000002266	0.000037	0.00004	-3.11E-10

313	Min	-0.000001851	-0.000015	-0.000105	-0.000004059	-0.000004607	-4.848E-08
314	Max	0.000021	0.000001942	-0.000002612	0.000027	0.000058	1.34E-09
314	Min	-0.000001354	-0.000011	-0.000125	-0.000004833	-0.000003356	-4.596E-09
315	Max	0.000008915	0.000001305	-0.000001751	0.000021	0.000019	8.493E-09
315	Min	-0.000001399	-0.0000083	-0.000086	-0.000003247	-0.000003603	-8.982E-10
316	Max	0.000023	0.00000155	-0.000002065	0.000014	0.000056	-3.083E-10
316	Min	-0.000001753	-0.000005317	-0.000095	-0.000003869	-0.000004421	-3.428E-08
317	Max	0.000008131	0.000001241	-0.000001656	0.000007819	0.000022	2.442E-08
317	Min	-0.000001396	-0.000002927	-0.000076	-0.000003097	-0.000003477	2.37E-10

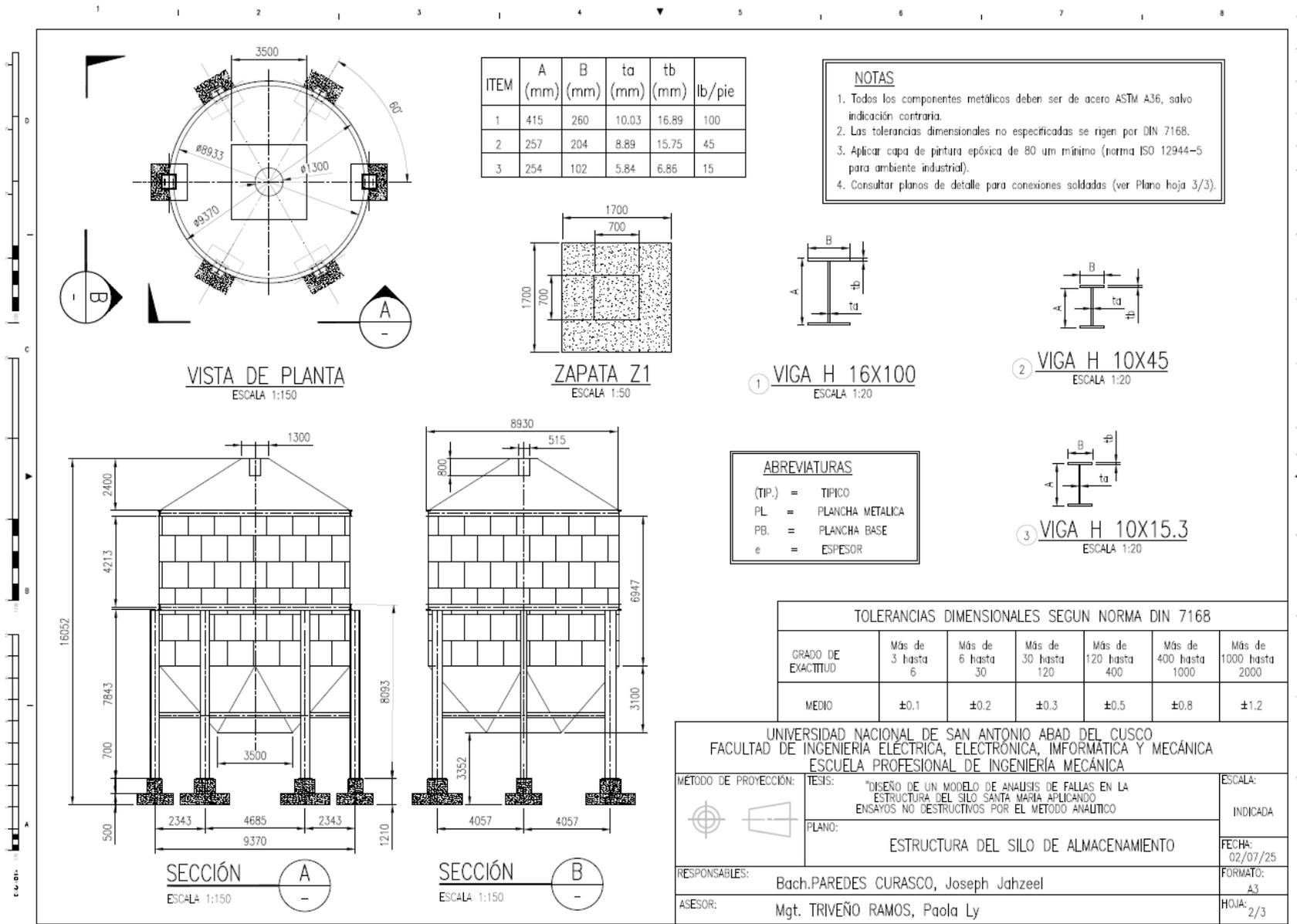
ANEXO K:
PLANOS DEL SILO SANTA MARÍA

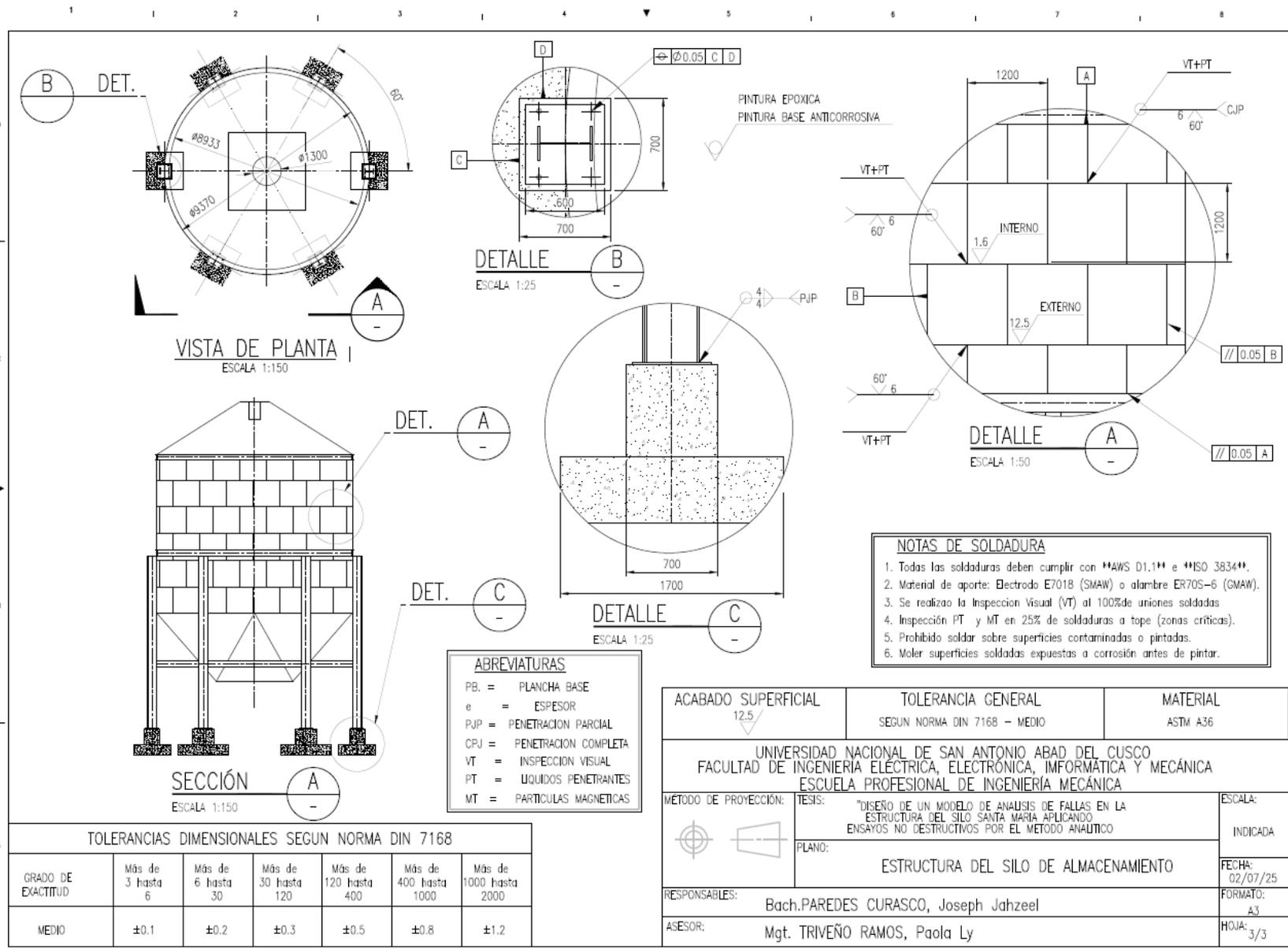


5	6	Pedestal 500x500mm	CONCRETO	ZAPATA
4	120	PL-6mm	PLA	ASTM A36
3	8	VIGA H 10"x4"	ACERO	ASTM A36
2	8	VIGA H 10"x8"	ACERO	ASTM A36
1	6	VIGA H16"x10.25"	ACERO	ASTM A36
POS.	CAN.	DESCRIPCION	MATERIAL	OBSERVACIONES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA, IMFORMÁTICA Y MECÁNICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN: 	TESIS: "DISEÑO DE UN MODELO DE ANALISIS DE FALLAS EN LA ESTRUCTURA DEL SILO SANTA MARIA APLICANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR EL METODO ANALITICO"	ESCALA: 1:100
	PLANO: ESTRUCTURA DEL SILO DE ALMACENAMIENTO	FECHA: 02/07/25
RESPONSABLES: Bach.PAREDES CURASCO, Joseph Jahzeel		FORMATO: A4
ASESOR: Mgt. TRIVEÑO RAMOS, Paola Ly		HOJA: 1/3





TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN NORMA DIN 7168						
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2

- NOTAS DE SOLDADURA**
1. Todas las soldaduras deben cumplir con **AWS D1.1** e **ISO 3834**.
 2. Material de aporte: Electrodo E7018 (SMAW) o alambre ER70S-6 (GMAW).
 3. Se realizo la Inspeccion Visual (VT) al 100% de uniones soldadas
 4. Inspección PT y MT en 25% de soldaduras a tope (zonas criticas).
 5. Prohibido soldar sobre superficies cortaminadas o pintadas.
 6. Moler superficies soldadas expuestas a corrosión antes de pintar.