

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Análisis experimental de la resistividad del acero corroído del doble fondo del
buque "Paola"

INGE – 2646

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Johanna Andreina Avilés Álvarez

Vicmar Steven Diaz Vizqueta

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Este trabajo de fin de carrera está dedicado a mi increíble familia, quienes, con amor y responsabilidad, han hecho de mí una persona íntegra y correcta, guiada por valores y con el deseo constante de superación. A cada uno de ustedes quiero expresarles que todo el esfuerzo y tiempo dedicados a mi educación están dando sus frutos, y me comprometo a seguir el ejemplo que me han inculcado con tanto cariño y dedicación.

Andreina Avilés.

Este trabajo es dedicado para mi familia, quienes han estado siempre y me han apoyado en todas las circunstancias y etapa de mi vida, gracias a dios siguen conmigo para disfrutar este logro en conjunto. Me seguiré esforzando para seguir escalando, lograr las metas que tengo propuesta y gozar de ellos en conjunto con mis seres queridos.

Vicmar Díaz.

Agradecimientos

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis madres, Susana Álvarez y Blanca Zambrano, quienes han sido mi mayor motor e inspiración para convertirme en una gran profesional y mujer. Asimismo, agradezco a mi padre, Carlos Avilés, a mi esposo, José Piedrahita, y a mis hermanos, Carlos Avilés y Marcelo Avilés, por ser un apoyo fundamental en mi vida y en la consecución de este, el logro más significativo de mi trayectoria hasta ahora.

Andreina Avilés.

Agradezco mucho a mis padres Mariuxi Vizqueta Castro y Victor Diaz Chiang, ellos han sido un gran apoyo y el motivo para convertirme en un profesional. Así mismo agradezco a mi tía Shirley Vizqueta Castro, quien es parte de mi por la formación que me inculcó desde mi niñez hasta adulto.

Vicmar Díaz.

Declaración Expresa

Nosotros, Johanna Andreina Avilés Álvarez y Vicmar Steven Diaz Vizueta reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 18 de febrero del 2025.

Johanna Andreina Avilés Álvarez

Vicmar Steven Diaz Vizueta

Evaluadores

MSc. María Tadea Quintuña Rodríguez

Profesor de Materia

PhD. Patrick Roger Townsend Valencia

Tutor de proyecto

Resumen

Este estudio experimental analiza el impacto de la corrosión en el doble fondo del buque carguero Paola, actualmente operado por la empresa GalapagueñaCorp. S.A. El objetivo principal de este proyecto es evaluar la resistividad de un tanque de doble fondo corroído mediante ensayos de compresión en la zona elástica del material. Para ello, se utilizaron probetas con niveles de corrosión del 0%, 5%, 10%, 20% y 25% en las estructuras verticales, con el fin de cuantificar el efecto de la corrosión en la integridad estructural a través de parámetros de falla adimensionales.

Los resultados obtenidos indican que una corrosión del 25% en las estructuras del buque compromete gravemente la viabilidad de la operación en zonas costeras, debido a que la estructura falla fácilmente bajo la carga aplicada, como consecuencia de la baja rigidez del material. En base a estos hallazgos, se concluye que el porcentaje máximo de corrosión aceptable en estructuras afectadas por este fenómeno es del 20%. En contraposición, a un 25% de corrosión, la afectación es considerable, aunque la sociedad clasificadora ABS establece que el límite de corrosión permitido es del 30%, con un riesgo elevado.

Palabras Clave: Estructuras, viabilidad, Falla adimensional, Carga, Compresión.

Abstract

This experimental study analyzes the impact of corrosion on the double bottom of the cargo ship Paola, currently operated by Galapagueña Corp. S.A. The main objective of this project is to evaluate the resistivity of a corroded double bottom tank through compression tests in the material's elastic zone. To this end, specimens with corrosion levels of 0%, 5%, 10%, 20%, and 25% were used in the vertical structures, to quantify the effect of corrosion on structural integrity using dimensionless failure parameters. The results obtained indicate that a 25% corrosion level in the ship's structures severely compromises the feasibility of operations in coastal areas, as the structure fails easily under the applied load due to the low rigidity of the material. Based on these findings, it is concluded that the maximum acceptable corrosion percentage in structures affected by this phenomenon is 20%. In contrast, at 25% corrosion, the damage is significant, although the classification society ABS establishes that the allowable corrosion limit is 30%, with a high-risk level.

Keywords: *Structure, Viability, Dimensionless failure, Load, Compression.*

Índice general	
Resumen.....	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X
Capítulo 1.....	11
1. Introducción.....	12
1.1 Descripción del Problema.....	14
1.2 Justificación del Problema.....	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 Marco teórico.....	17
1.4.1 Buques de carga general.....	17
1.4.2 Corrosión en las embarcaciones marítimas.....	17
1.4.3 Formulaciones teóricas.....	19
1.4.4 Gráfica esfuerzo vs deformación.....	20
Capítulo 2.....	22
2. Metodología.....	23
2.1 Diagrama de flujo.....	25

2.2	Diseño de probetas	25
2.3	Corte y ensamble de probetas.....	28
2.4	Preparación de probetas para ejecución de ensayos.....	29
2.5	Ensayos de compresión	30
2.6	Procesamiento de resultados	31
2.7	Cálculos teóricos	32
Capítulo 3.....		33
3.	Resultados y análisis	34
3.1	Resultados del experimento	34
3.1.1	Resultados obtenidos para la probeta con 0% de corrosión.....	34
3.1.2	Resultados obtenidos para la probeta con 5% de corrosión.....	37
3.1.3	Resultados obtenidos para la probeta con 10% de corrosión.....	40
3.1.4	Resultados obtenidos para la probeta con 15% de corrosión.....	43
3.1.5	Resultados obtenidos para la probeta con 20% de corrosión.....	44
3.1.6	Resultados obtenidos para la probeta con 25% de corrosión.....	48
3.2	Resultados de la comparación con Ansys	51
3.3	Análisis de resultados.....	53
3.3.1	Análisis del experimento.....	53
3.3.2	Análisis de la comparación con Ansys	57
3.3.3	Análisis de los parámetros de falla	57
Capítulo 4.....		59

4.	Conclusiones y recomendaciones	60
4.1	Conclusiones	60
4.2	Recomendaciones.....	61
5.	Referencias.....	62
	Apéndice A. Esquema de las probetas	57
	Apéndice B. Resumen obtenido del equipo de ensayos de compresión	57

Abreviaturas

ABS	American Bureau of Shipping
ANAVE	Asociación De Navieros Españoles
ASTM	American Society for Testing and Materials
FIMCT	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias De La Tierra
FOU	Unidades flotantes en alta mar
FPSO	Unidad Flotante De Producción, Almacenamiento y Descarga
FSO	Buques flotantes de almacenamiento y descarga
PH	Potencial De Hidrogeno
TIG	Tugsten Inert Gas

Simbología

ζ	Numero de años de la placa
d_w	Espesor de desgaste
$\delta^4 z(x)/\delta x^2$	Desplazamiento en dirección x
E	Módulo de Young
ε	Deformación unitaria
F	Fuerza
f_x	Carga aplicada en dirección x
mm	milímetros
N	Newton
n_y	Tiempo de desgaste
s	Segundos
X	Rigidez Flexural
z	Deformación
Δv_{cr}^ϕ	Cambio de esfuerzo por aligeramiento de corrosión
ϕ	Porcentaje de corrosión
$\Delta v_{\text{sin corrosión}}^\phi$	Esfuerzo sin efecto de corrosión
$\Delta v_{\text{corroído}}^\phi$	Esfuerzo con efecto de corrosión
σ	Esfuerzo

Índice de figuras

Figura 1. <i>Efecto de corrosión en el doble fondo del buque carguero Paola</i>	18
Figura 2. <i>Porcentajes de corrosión establecidos por ABS</i>	18
Figura 3. <i>Gráfico esfuerzo vs deformación unitaria de un metal</i>	20
Figura 4. <i>Diagrama de flujo de la metodología aplicada</i>	25
Figura 5. <i>Esquema de la sección del doble fondo en análisis</i>	26
Figura 6. <i>Esquema de las probetas diseñadas para la experimentación sub figuras, a), b), c), d), e) y f)</i>	27
Figura 7. <i>Segmentación de la plancha utilizando corte por plasma</i>	29
Figura 8. <i>Ensamble de las probetas mediante método de soldadura TIG con cordones discontinuos</i>	29
Figura 9. <i>Diagrama de ubicación de los strain gages en las probetas</i>	30
Figura 10. <i>Ejecución de los ensayos de compresión</i>	31
Figura 11. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 0% de corrosión</i>	35
Figura 12. <i>Gráfico fuerza vs strain de la probeta 0% de corrosión</i>	36
Figura 13. <i>Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 0% de corrosión</i>	36
Figura 14. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 5% de corrosión</i>	38
Figura 15. <i>Gráfico fuerza vs strain de la probeta 5% de corrosión</i>	39
Figura 16. <i>Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 5% de corrosión</i>	39
Figura 17. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 10% de corrosión</i>	41
Figura 18. <i>Gráfico fuerza vs strain de la probeta 10% de corrosión</i>	42
Figura 19. <i>Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 10% de corrosión</i>	42
Figura 20. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta al 15% de corrosión</i>	44
Figura 21. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 20% de corrosión</i>	46
Figura 22. <i>Gráfico fuerza vs strain de la probeta 20% de corrosión</i>	47

Figura 23. <i>Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 20% de corrosión ...</i>	47
Figura 24. <i>Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 25% de corrosión</i>	49
Figura 25. <i>Gráfico fuerza vs strain de la probeta 25% de corrosión</i>	50
Figura 26. <i>Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 25% de corrosión ...</i>	50
Figura 27. <i>Compilado de resultados de curvas fuerza vs strain de los experimentos</i>	51
Figura 28. <i>Compilado de resultados de curvas fuerza vs strain de los modelos matemáticos</i>	52
Figura 29. <i>Comparativo de la curva fuerza vs strain de la probeta al 10% de corrosión</i>	53
Figura 30. <i>Análisis de los parámetros de falla</i>	58

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Estado inicial y final de la probeta 0% de corrosión</i>	34
Tabla 2. <i>Estado inicial y final de la probeta 5% de corrosión</i>	37
Tabla 3. <i>Estado inicial y final de la probeta con 10% de corrosión</i>	40
Tabla 4. <i>Estado inicial y final de la probeta con 15% de corrosión</i>	43
Tabla 5. <i>Estado inicial y final de la probeta con 20% de corrosión</i>	45
Tabla 6. <i>Estado inicial y final de la probeta con 25% de corrosión</i>	48
Tabla 7. <i>Microfotografías con una ampliación de x150 respecto al tamaño real</i>	56

Capítulo 1

1. Introducción

La pérdida de espesor por corrosión es común en estructuras de acero expuestas al medio salino, pudiendo causar inestabilidad y daño estructural (Anyfantis, 2019). Esta problemática ocurre comúnmente en unidades flotantes (FOU) en alta mar como los FPSO y FSO; proceder con la soldadura requiere detener partes del buque, lo que provoca retrasos y altos costos de producción (D. McGeorge, 2008).

Las empresas navieras poseedoras de flotas de buques son las principalmente afectadas por el fenómeno de la corrosión, ya que la operación de sus unidades e incremento de sus ingresos depende del tiempo de navegación que mantengan las embarcaciones, por lo que cada buque está expuesto a la salinidad durante toda su vida útil. Una de las secciones estructurales más afectada por el fenómeno antes descrito es el doble fondo, el cual es común en embarcaciones de carga (Paulling, 2008), y se caracteriza por estar formado por la presencia de tanques. Esta estructura por lo general está construida en acero naval y conformada por refuerzos verticales, los cuales son comúnmente conocidos vagras y varengas; algunas de sus funciones incluyen el almacenamiento de líquidos y soporte de colisiones (Eyres & Buce, 2012).

Existen factores externos que causan daños a nivel estructural como la salinidad que es un fenómeno que degrada la superficie metálica que compone la estructura de un buque, a esta afectación se la conoce como corrosión (Yunhan Hu, 2024). El autor Haixian Liu realiza un estudio sobre los efectos de la corrosión en tuberías galvanizadas, obteniendo como resultados que, a condiciones ambientales de baja temperatura el galvanizado se corroe con mayor rapidez, la máxima tasa de corrosión obtenida fue de 20 mm/ año (Haixian Liu, 2024). También existe otro estudio propuesto por el autor Song Zhou (Song Zhou, 2023) el cual analiza planchas con diferentes porcentajes de corrosión bajo, modelado con condiciones iniciales de simplemente soportados y libre, obteniendo como resultados variaciones en el

desplazamiento vertical, para comprobar la resistencia de cada uno de los especímenes analizados y que fuerza limite pueden soportar cada uno de ellos.

De acuerdo con los antecedentes mencionados, se propone el diseño de seis probetas que representarán un elemento finito del tanque de doble fondo del buque analizado, cada espécimen comprenderá un grado diferente de corrosión, el cual se representará por medio de agujeros que serán realizados en el 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de la superficie total de los refuerzos verticales. Cabe recalcar que se propone colocar dos refuerzos verticales debido a la estabilidad estructural de la probeta, ya que al colocar un solo refuerzo se compromete la seguridad de los estudiantes, así como las probetas, ya que podrían dañarse o llegar a la rotura al colocar un solo refuerzo que soporte la presión generada en los ensayos de compresión.

Este proyecto ha sido desarrollado en función del interés de la compañía GalapagueñaCorp. S.A en una solución para la corrosión de la estructura del doble fondo del buque carguero “Paola”, mismo que fue construido en el año 1957, por lo que hasta la actualidad tiene 67 años operando, y se ha visto gravemente afectado por efectos de corrosión en las estructuras de doble fondo.

Para el desarrollo del presente proyecto, se introduce al lector en el tema tratado, planteando la problemática y justificación como sustentos para el desarrollo del tema propuesto. En la sección del desarrollo del experimento se llevan a cabo los ensayos necesarios con el fin de definir la resistividad de las probetas en función de su grado de corrosión. Finalmente se realizan simulaciones mediante el software de análisis estructural ANSYS, con el fin de validar los resultados obtenidos en los ensayos y obtener el grado de corrosión máximo al cual el buque “Paola” puede continuar su operación de forma segura.

1.1 Descripción del Problema

La empresa GalapagueñaCorp S.A. es propietaria del buque carguero “Paola”, el cual tiene 67 años en funcionamiento desde su fecha de construcción en el año 1957. Debido al extenso tiempo de operatividad del buque, su estructura se ha visto gravemente afectada por la salinidad, lo que ha generado severos daños por corrosión, especialmente en el doble fondo de este.

La Asociación de Navieros Españoles (ANAVE) de acuerdo con el boletín informativo N. 445, analiza los efectos de la corrosión acelerada en las estructuras de los tanques de carga y lastre de buques petroleros, y emite una alerta con respecto a los buques con problemas de corrosión debido a la falta de mantenimiento o bien mantenimiento insuficiente en áreas sensibles a la corrosión, ya que esto podría generar el debilitamiento de las estructuras así como peligros de infiltraciones en el casco o los tanques, y en escenarios peores podría degenerar incluso en un fallo estructural importante (ANAVE, 2005). En el caso del buque “Paola” podría causar infiltraciones en el doble fondo de la embarcación, lo cual traería como consecuencia aumentar el peso y del desplazamiento de la misma, lo que provocaría variaciones en la ubicación del centro de gravedad vertical, así como efectos de superficie libre generados por la presencia de aire en un área cerrada, otra de las complicaciones que traería consigo es la pérdida de estanqueidad que tendría como consecuencia de la incidencia de agua salada al interior del casco.

De acuerdo con la autora Nuria Varela-Fernández, algunos de los factores que afectan y aumentan la tasa de corrosión del acero son la composición y temperatura del agua donde se encuentre navegando el buque, esta se ve afectada por características como el pH del agua y el nivel de oxígeno presente, influyendo directamente en la aceleración de la corrosión del metal. De la misma forma, establece que el estado de operación influye en el aumento de la

tasa de corrosión del buque, y explica que sea el caso de que el buque se encuentre atracado, la corrosión será más acelerada y se generarán adherencias de microorganismos marinos en la obra viva (Varela-Fernandez, 2016).

Por las razones antes mencionadas, se considera de vital importancia el desarrollo del presente estudio, como búsqueda de una solución para el grave problema de corrosión del buque “Paola”, que ha venido en aumento con el pasar de los años debido al largo tiempo de navegación y operación del buque.

1.2 Justificación del Problema

Las embarcaciones cargueras sufren daño y colapso estructural en el doble fondo debido a la acción de fuerzas externas provocadas por factores como el peso de la carga a bordo, la cual genera deformaciones en el fondo y doble fondo de la embarcación, donde se concentra el peso de la estructura, así como los elementos contenidos y la tripulación a bordo, otro de los factores que provocan desgaste estructural es la salinidad del mar, lo cual provoca desgaste y debilitación del acero. Tal es el caso del buque Prestige (Mundo, 2022), en el cual se evidencia el daño infringido por los factores antes mencionados, teniendo como consecuencia el colapso del fondo, lo cual generó el derrame del crudo que transportaba. Es importante resaltar que el daño ocasionado por la salinidad provocó afectaciones en las estructuras metálicas, lo cual es más evidente cuando la estructura se encuentra sumergida por largos periodos (Perez, 2017).

Prolongar la vida útil de las embarcaciones para aumentar su tiempo de operatividad es lo más adecuado para aminorar costos y mantener una navegación segura, razón por la cual, el investigador Joseph Davies, propuso una metodología para evaluar la resistencia última del casco de un buque; dicho método fue validado con datos experimentales de vigas cajón corroídas, mostrando convergencia en los resultados (Feng, Chen, Wu, Qin, & Wei,

2022). Mientras que el autor Song Zhou realizó el estudio de placas de acero corroídas bajo compresión, el cual cuantifica la influencia de la corrosión en la resistencia última de las placas. En dicha investigación adoptó un modelo numérico que relaciona la anchura de la placa con su espesor; a su vez, elaboró un modelo de elementos finitos para realizar la comparación de los resultados con la formulación analítica empleada (Song Zhou, 2023).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar la resistividad de un tanque de doble fondo corroído, mediante ensayos de compresión, para cuantificar la afectación de la estructura por medio de parámetros de falla adimensionales.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Construir 6 probetas de un elemento finito de un tanque de doble fondo con orificios en el 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% del área de los refuerzos verticales, aplicando métodos de soldadura y corte en acero, para realizar ensayos de compresión.
2. Someter las probetas a ensayos de compresión, por medio de equipos para análisis de comportamiento mecánico de materiales, con el fin de obtener datos experimentales de deflexión.
3. Evaluar el impacto de la corrosión en las probetas mediante el desarrollo de una formulación empírica que permita cuantificar el desgaste del material, utilizando el análisis de parámetros adimensionales asociados a la falla.
4. Comparar los gráficos resultantes en la experimentación con resultados matemáticos por medio de un software de modelación para contrastar la convergencia existente.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Buques de carga general

Los buques de carga general son aquellos que llevan mercancía en espacios previamente designados, los cuales maniobran la carga mediante grúas incorporadas en áreas de cubierta, las cuales permiten realizar operaciones de carga y descarga en puertos y atracaderos. Dependiendo de los artículos transportados, los buques de carga se clasifican en dos grupos, los cuales corresponden al grupo A y B. Las embarcaciones pertenecientes al grupo A son aquellas que transportan líquidos, entre los cuales se encuentran, los buques tanqueros, buques petroleros, barcos de cargas químicas, entre otros; mientras que los buques pertenecientes al grupo B hacen referencia a todos aquellos que no correspondan al grupo A (Mercante, 2018).

1.4.2 Corrosión en las embarcaciones marítimas

La corrosión en las embarcaciones es un fenómeno ampliamente presente en buques que han estado por extensos periodos en contacto directo con el medio salino, lo que resalta la importancia de realizar inspecciones periódicas para garantizar el correcto funcionamiento de estas estructuras. A continuación, se presenta una imagen del doble fondo del buque Paola, capturada durante la inspección realizada antes de la ejecución del presente proyecto. En dicha imagen, es posible observar una de las secciones del doble fondo afectada por los efectos de la corrosión.

Figura 1.

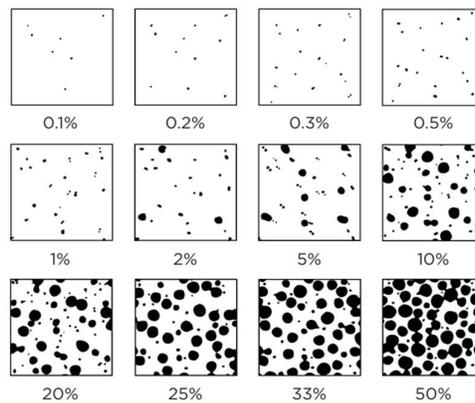
Efecto de corrosión en el doble fondo del buque carguero Paola



Por lo anteriormente mencionado, la sociedad clasificadora ABS establece que el porcentaje de corrosión presente en las estructuras metálicas puede identificarse mediante manchas irregulares. Este concepto se ilustra en la figura que se presenta a continuación.

Figura 2.

Porcentajes de corrosión establecidos por ABS



Como se observa en la Figura 2, la sociedad clasificadora ABS define distintos porcentajes de corrosión, entre los cuales algunos se asemejan al caso de estudio: 5%, 10%, 20% y 25%. Esto demuestra que el modelo establecido para las futuras probetas se encuentra dentro de un rango validado por dicha sociedad clasificadora.

Dependiendo del tiempo en que una embarcación se expone al medio salino, se genera un desgaste en el espesor del material del casco y estructuras que lo componen. Por ello la revista Latin American Journal of Structure Solids, escrito por Zorareh Mohammad (Nouri, Khedmati, & Roshanali, 2010) propone una ecuación con la que se puede estimar el tiempo del desgaste de espesor del material.

$$n_y = \frac{d_w}{0.34} \quad (1.1)$$

Donde:

- n_y : tiempo de desgaste [años].
- d_w : desgaste de espesor [mm].

1.4.3 Formulaciones teóricas

Los resultados del ensayo de compresión se evaluaron mediante diferencias finitas para establecer el Δv_{cr}^ϕ , el cual es el cambio en el esfuerzo por los aligeramientos de corrosión para cada porcentaje de reducción ϕ . Para esto se ajusta la ecuación correspondiente a la compresión de una placa plana dónde z es la deformación en la dirección x a considerar únicamente, X es la flexural rigidity y f_x es la carga aplicada en el ensayo por unidad de desplazamiento x .

$$X \frac{\delta^4 z(x)}{\delta x^2} + f_x \frac{\delta^2 z(x)}{\delta x^2} = 0 \quad (1.2)$$

Considerando el número de datos $[0, n] \therefore \Delta x = x_n - x_{n-1}$, la ecuación discretizada de X queda de acuerdo con la ecuación No. para $i = 0, 1 \dots n$ en la ecuación resumida.

$$X \frac{z_{i-2}}{\Delta x^4} - 4X \frac{z_{i-1}}{\Delta x^4} + \left(6X \frac{1}{\Delta x^4} + 2f_x \frac{1}{\Delta x^2} \right) z_i - 4X \frac{z_{i+1}}{\Delta x^4} + X \frac{z_{i+2}}{\Delta x^4} = 0 \quad (1.3)$$

Se calcula el esfuerzo obtenido en los ensayos v^ϕ relacionando X con el módulo de Young para establecer una comparación del porcentaje de degradación de las placas reproduciendo corrosión equivalente a Δv_{cr}^ϕ el cual se muestra en la ecuación No. 1.4.

$$\Delta v_{cr}^{\phi} = \frac{\Delta v_{\text{sin corrosión}}^{\phi} - \Delta v_{\text{corroído}}^{\phi}}{\Delta v_{\text{sin corrosión}}^{\phi}} \quad (1.4)$$

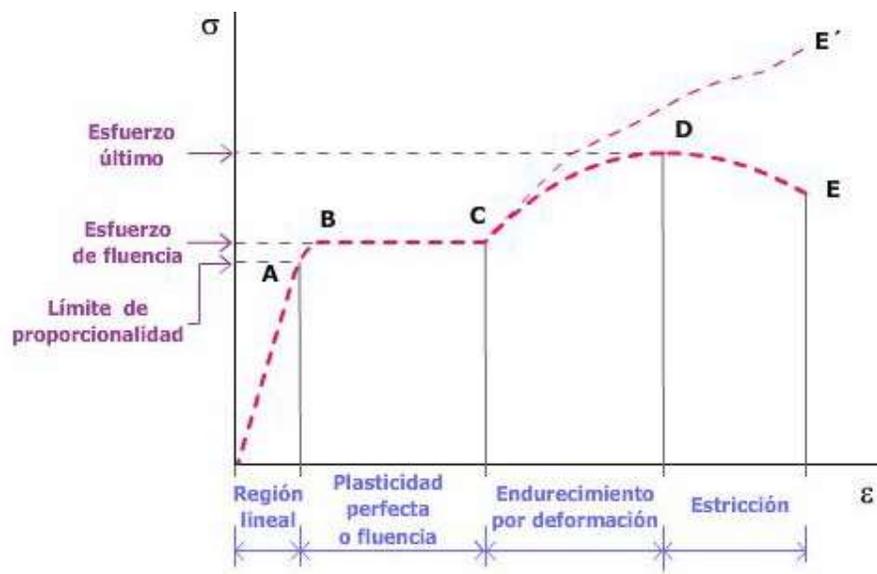
Para estructuras corroídas, es común considerar $\phi = 0.34\zeta$ de datos estadísticos de Nippon Kaiji Kyokai (NKK) a partir de corrosión en buques, dónde ϕ es el porcentaje de reducción correspondiente a cada ensayo ϕ , y ζ es el número de años de uso de la placa el cual se estimó a partir de los resultados.

1.4.4 Gráfica esfuerzo vs deformación

La gráfica esfuerzo vs deformación de un material proporciona información suficiente para conocer sus propiedades mecánicas, algunas de ellas son resiliencia, tenacidad, esfuerzo de rotura, límite elástico, plástico, entre otros, tal como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 3.

Gráfico esfuerzo vs deformación unitaria de un metal



El gráfico anterior, muestra el comportamiento de los metales, donde se puede observar que desde el origen hasta el límite de proporcionalidad es un segmento lineal, de

donde se deduce la relación de proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, conocida como ley de Hooke (P.Popov, 2000).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.5)$$

Donde:

- σ : Esfuerzo [N/m^2]
- E: Módulo de elasticidad [N/m^2]
- ε : Deformación unitaria

Otro punto de importancia en la gráfica es el límite de elasticidad, el material no recupera su forma original al ser sometido a tracción, y queda una deformación residual llamada de formación permanente (Pytel & Singer, 1987). No obstante, la región de interés para el caso de estudio es en la zona lineal y de esta forma estimar hasta qué punto el material resiste sin llegar a la zona plástica.

Capítulo 2

2. Metodología

El proyecto propuesto incluye un proceso integral que abarca la recopilación de datos experimentales y la verificación de los resultados obtenidos mediante análisis teóricos.

Adicionalmente, se desarrolla un modelo matemático con el propósito de evaluar la aproximación y convergencia de los resultados, así como de obtener información adicional para el análisis de la resistencia del elemento del casco del buque Paola, el cual ha sido afectado por corrosión.

Cómo primera parte del procedimiento propuesto, se realiza el diseño y la construcción de las probetas, las cuales representan un elemento finito de los refuerzos verticales del tanque de doble fondo del buque antes mencionado, con lo cual se pretende analizar la resistencia del elemento estructural a diferentes porcentajes de corrosión aplicadas en función del área del refuerzo vertical. Los porcentajes de corrosión que se aplicaron en cada una de las probetas corresponden al 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% del área del elemento finito analizado. Cabe recalcar que, para efectos de facilitar el análisis, se realizaron huecos en cada probeta quitando el área resultante del porcentaje de corrosión aplicado, esta área se representa por medio de círculos de 3 o 4 cm de diámetro distribuidos en zonas previamente seleccionadas en los refuerzos verticales de cada probeta.

El material que se ha utilizado para la construcción de las probetas corresponde a acero estructural A36, mientras que el espesor se ha determinado en función de la capacidad máxima de los equipos para realizar los ensayos de compresión, sabiendo que en la realidad el elemento estructural analizado no tiene un espesor menor a 6 mm, lo cual ha sido reducido con el fin de no superar la capacidad de los equipos disponibles. Por lo tanto, el espesor seleccionado para el refuerzo sometido a compresión es de 0.9 mm, mientras que los dos elementos horizontales en los cuales se apoya el elemento vertical tienen un espesor de

1.4mm. Por otro lado, para el corte y ensamble de las probetas se han utilizado métodos de corte por plasma y soldadura TIG.

Una vez finalizada la construcción de las probetas, se llevaron a cabo los ensayos mecánicos utilizando el equipo de compresión del laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias de la Tierra (FIMCT) de la ESPOL. Para analizar la resistencia de cada probeta, se realizaron ensayos de compresión con el objetivo de verificar la convergencia de los resultados obtenidos en cada prueba. Además, para evaluar la resistencia máxima de las probetas antes de superar el límite elástico del material, se aplicó una carga distribuida sobre la cara superior de las mismas. Las compresiones se realizaron cuidadosamente, evitando deformaciones permanentes en las probetas.

Para el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos, se llevó a cabo un proceso de depuración de los datos no válidos para garantizar la precisión del análisis. Además, se generaron gráficos que relacionan la fuerza aplicada con el desplazamiento vertical registrado por la máquina de compresión utilizada durante los ensayos.

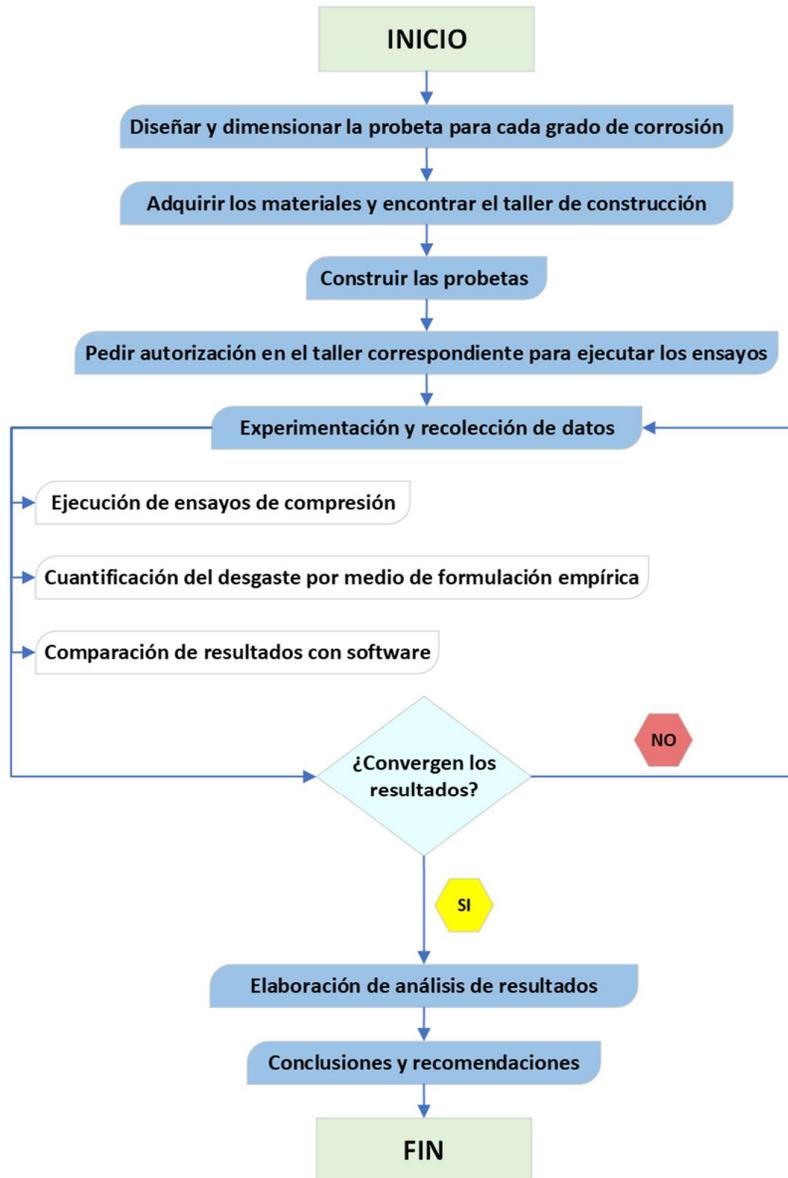
Para la determinación de la degradación por corrosión de cada probeta, se empleó la ecuación proporcionada por la revista Latin American Journal of Structural Solids. Esta formulación permite cuantificar el porcentaje de degradación por corrosión total debido a la compresión, estableciendo una relación entre el esfuerzo del material sin corrosión y aquel que presenta desgaste debido a la corrosión.

Para verificar los resultados obtenidos en los ensayos, se han ejecutado modelos matemáticos en el módulo de análisis estructural del software Ansys. Este enfoque permite corroborar los resultados obtenidos durante la ejecución del experimento, así como evaluar la similitud de los mismos con el comportamiento ideal del acero a distintos grados de corrosión.

2.1 Diagrama de flujo

Figura 4.

Diagrama de flujo de la metodología aplicada



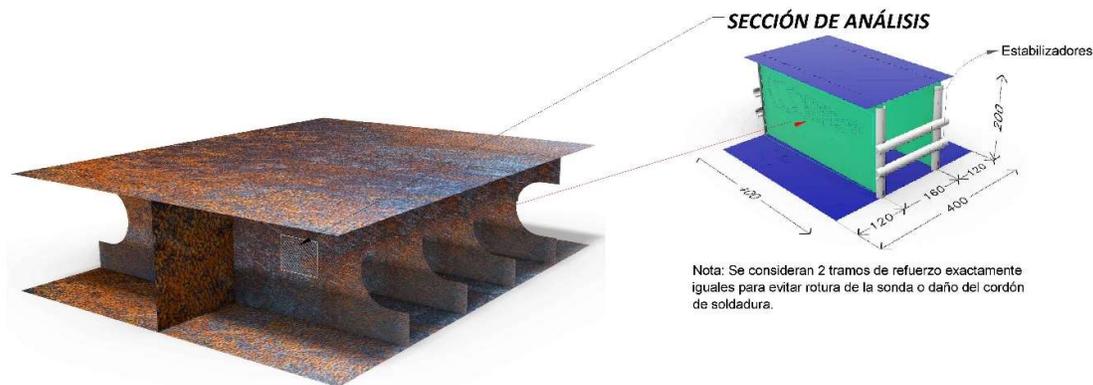
2.2 Diseño de probetas

La sección del doble fondo del buque Paola que se analizó corresponde a una parte mínima de uno de los refuerzos verticales de este, complementario a la sección de análisis se incluyen dos planchas horizontales las cuales sirven para crear una estructura compacta y

para poder distribuir la presión sobre el refuerzo vertical al realizar el ensayo de compresión. A continuación, se presenta un esquema de la sección de análisis del doble fondo del buque Paola.

Figura 5.

Esquema de la sección del doble fondo en análisis

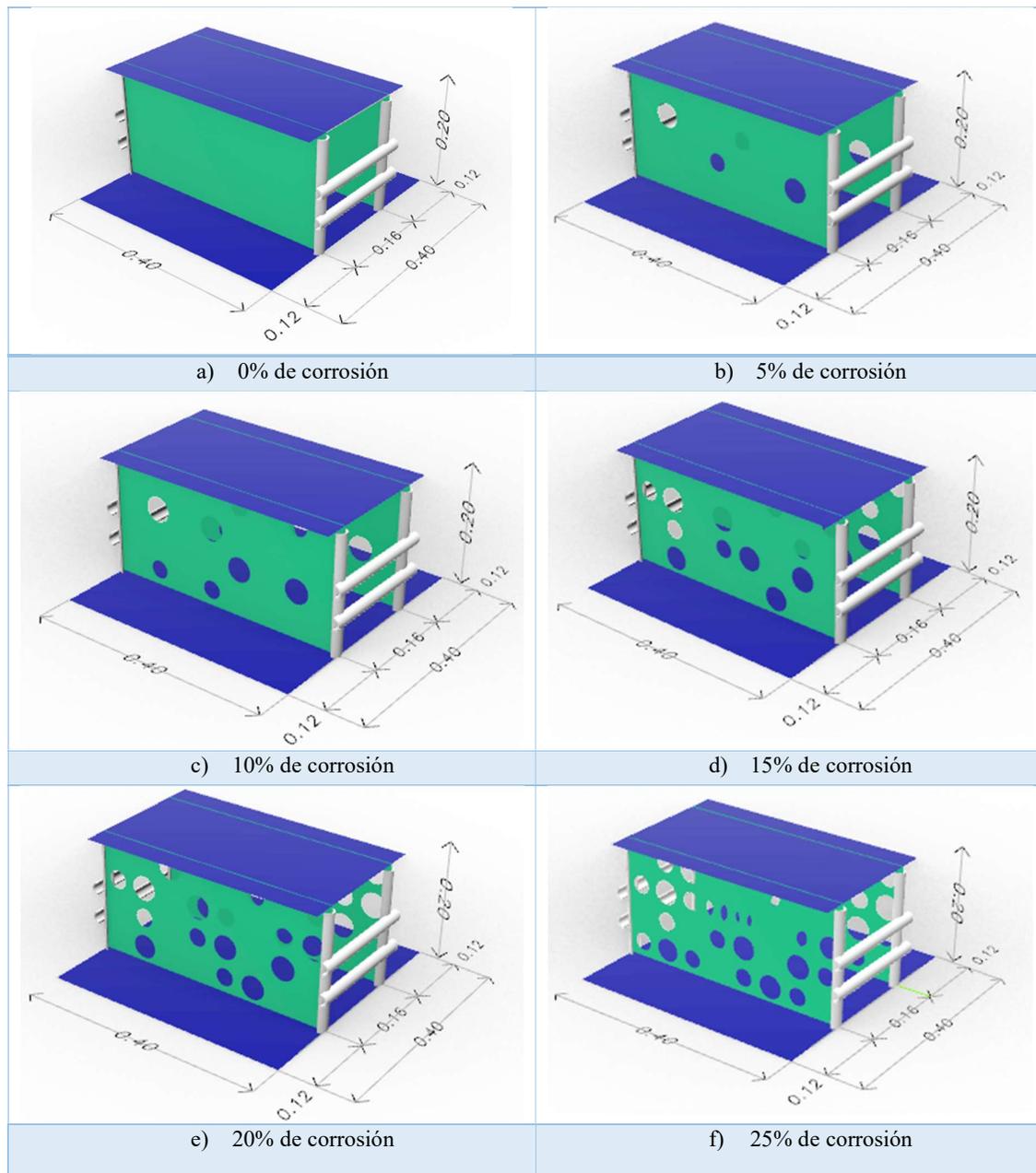


Se construyeron 6 probetas de acero estructural A36 de un elemento finito de un tanque de doble fondo afectado por corrosión. Las características geométricas de las probetas, las cuales corresponden a sus dimensiones (alto, largo, ancho y espesor), son consideradas variables independientes, por otro lado, las variables dependientes vienen dadas por el área de los círculos de las planchas verticales, los cuales tienen diámetros previamente definidos (3 y 4 cm) y tienen la finalidad simular el efecto de corrosión en el refuerzo vertical, los cuales para efectos de la experimentación han sido definidos como el 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% del área total del refuerzo. Otro factor por considerar al seleccionar los porcentajes de corrosión de cada probeta es el porcentaje de corrosión máximo aceptable en una estructura, el cual es considerado igual al 25% del área del refuerzo, por lo que se ha procurado mantener el análisis dentro del margen de seguridad aceptable.

A continuación, se presentan los esquemas de las probetas diseñadas para la experimentación.

Figura 6.

Esquema de las probetas diseñadas para la experimentación sub figuras, a), b), c), d), e) y f)



Como se puede observar en la Figura 6, cada una de las probetas son exactamente iguales, siendo el factor variable el porcentaje de área de los refuerzos verticales que ha sido extraído para simular la corrosión en las estructuras.

Por otro lado, cada probeta está compuesta de dos planchas horizontales, así como los refuerzos verticales, los cuales para efectos de la experimentación se han esquematizado en pares para brindar mayor estabilidad a la estructura, ya que, al analizar un elemento simple, se puede correr el riesgo de romper o dañar la probeta sin llegar a realizar la experimentación, por ende, se analizan los elementos verticales en pares. Además, se han implementado estabilizadores en los elementos verticales, los cuales han sido construidos de tubo de acero negro de ½" cedula 40. Estos cumplen con la función de rigidizar la estructura de tal forma que no se doble hacia uno de sus extremos, si no que se deforme y flexione de forma simétrica con respecto a su eje vertical.

2.3 Corte y ensamble de probetas

Se realizaron los cortes de las probetas en las planchas utilizando método de corte por plasma, mientras que los círculos se cortaron con pantógrafo. Al realizar los círculos se consideró que, al ser las distancias cortas entre los círculos y el perímetro de los cortes, además de tener probetas pequeñas, la plancha se calienta y se dobla ya que los espesores son pequeños, por lo cual para evitar este daño en el material se crearon dientes en las zonas donde los círculos son cercanos al perímetro del rectángulo y cuando la plancha se enfrió se utilizó tronadora o amoladora con disco de corte para dar un buen acabado.

Por otro lado, las probetas se ensamblaron mediante puntos de soldadura, los cuales sirvieron para fijar las piezas para proceder a realizar cordones discontinuos cada 10 cm mediante método de soldadura TIG.

Figura 7.

Segmentación de la plancha utilizando corte por plasma

**Figura 8.**

Ensamble de las probetas mediante método de soldadura TIG con cordones discontinuos



Cabe recalcar, que los rigidizadores verticales fueron soldados a la plancha inferior mediante puntos de soldadura, dejando 1 cm de holgura entre el tubo y la plancha superior, mientras que los rigidizadores horizontales fueron soldados a los rigidizadores verticales.

2.4 Preparación de probetas para ejecución de ensayos

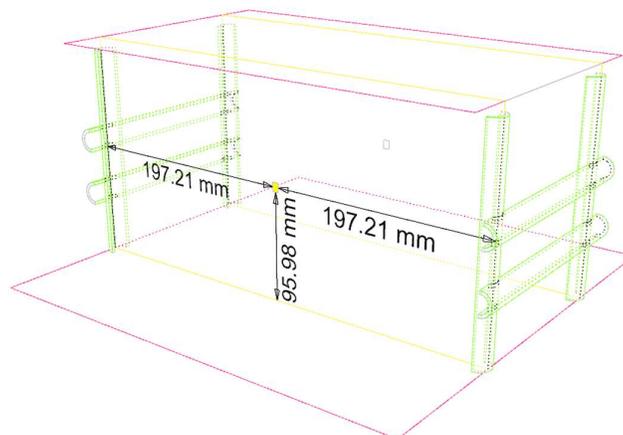
La preparación de las probetas consiste en la instalación de los extensómetros (strain gage) y la preparación del equipo “National Instrument” que lee la información de los extensómetros. Para esto, se utilizaron dos extensómetros (strain gage) en cada probeta para la toma de datos experimentales, con lo cual se obtuvieron registros de deflexiones en unidades adimensionales de mm/mm, lo cual es el resultado de la deformación de los refuerzos verticales al aplicar una carga externa que en este caso representa el peso de la

carga del buque. La ubicación de los extensómetros se configuró de la siguiente forma: 2 strain gage unidireccionales en las planchas verticales, ubicados en la mitad de la estructura para obtener la información en la zona de mayor deformación unitaria. Cada uno de ellos se ubicó al exterior de cada probeta para comodidad al realizar las pruebas.

A continuación, se presenta un diagrama que ilustra la ubicación de los Strain Gages en los refuerzos verticales de cada una de las probetas, conociendo que están ubicados de forma simétrica.

Figura 9.

Diagrama de ubicación de los strain gages en las probetas



Se utilizaron 2 canales del equipo de medición para el registro de datos antes de realizar las pruebas a modo de comprobación de una correcta instalación, se aplicaron pequeños disturbios sobre las probetas, de forma que el programa mostró gráficas cíclicas, las cuales son resultado de los impactos externos generados.

2.5 Ensayos de compresión

Una vez concluida la preparación de las probetas, se colocaron los ejemplares en el equipo de pruebas, para lo cual se ubicó el cilindro de compresión sobre la cara superior de cada probeta, de la misma forma, se colocó debajo del cilindro una plancha de aluminio

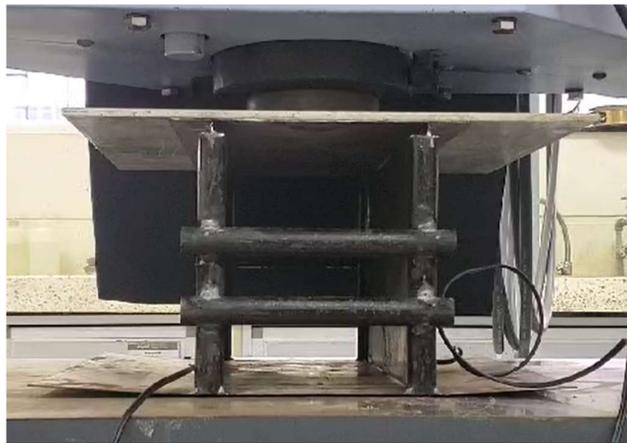
gruesa, de modo que se ejerza la carga de forma distribuida sobre la cara superior de la probeta.

Para configurar el equipo para proceder con la compresión del espécimen, se fijó la velocidad con la que se realizaría la compresión, la cual para el caso de este experimento fue de 1mm/min.

Una vez configurado por completo el equipo se dio inicio al experimento, donde se realizó una minuciosa supervisión para verificar que la probeta se comprima, mas no se deforme permanentemente, ya que no se busca llegar al colapso del material, el experimento se realiza únicamente en la zona elástica de este de acuerdo con las buenas prácticas de ingeniería.

Figura 10.

Ejecución de los ensayos de compresión



2.6 Procesamiento de resultados

Una vez finalizado el experimento, se dispone de una base de datos con los resultados obtenidos en unidades de mm/mm por los extensómetros y el equipo de compresión. A continuación, se procede con la selección y depuración de los datos no válidos. Los datos brutos son procesados mediante un código de programación, en el cual se registra el número

de puntos obtenidos por segundo, asegurando que la cantidad real de puntos requerida sea de 600 puntos por minuto, tanto en los extensómetros como en los datos proporcionados por la máquina de compresión. Posteriormente, estos datos serán utilizados para generar gráficos de fuerza vs. desplazamiento, fuerza vs. deformación unitaria y gráficos combinados que relacionan la fuerza con la deformación unitaria y el tiempo. Todos estos datos serán de utilidad para la comparación con el modelo matemático construido a partir del software Ansys.

2.7 Cálculos teóricos

Se utiliza la formulación presentada en la revista *Latin American Journal of Structural Solids*, escrita por Zorareh Mohammad (Nouri, Khedmati, & Roshanali, 2010), con el fin de cuantificar el desgaste por corrosión presente en cada una de las probetas.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Resultados del experimento

Esta sección se desarrolla en base a los datos experimentales obtenidos a partir de los ensayos a cada una de las probetas, esto se realizó utilizando la metodología del capítulo 2.

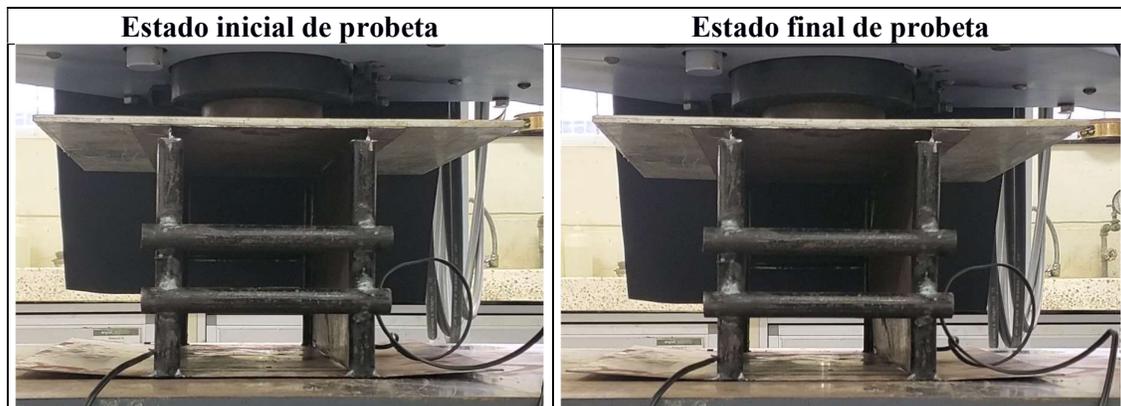
Para la elaboración de las pruebas experimentales se siguieron los lineamientos de seguridad apropiados respetando las normativas del laboratorio y con la supervisión de los encargados. A continuación, se describen los resultados obtenidos para los ensayos de compresión realizados a cada una de las probetas.

3.1.1 Resultados obtenidos para la probeta con 0% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión con un 0% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La Tabla 1 incluye una imagen que muestra la probeta antes y después del proceso de compresión.

Tabla 1.

Estado inicial y final de la probeta 0% de corrosión

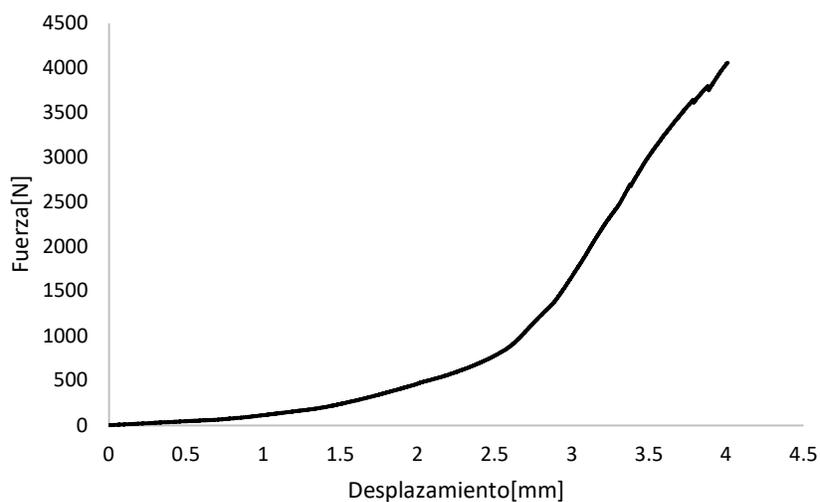


Como se observa en la Tabla 1, el estado inicial de la probeta es muy parecido al final. Esto se debe a que dicha probeta presenta un grado de corrosión del 0%, lo que indica que su resistencia estructural permanece intacta.

Durante la realización de los ensayos, se llevó a cabo el proceso asegurando que la probeta no exceda su límite elástico. En la Figura 11, fue generado el gráfico fuerza vs desplazamiento por el equipo de compresión.

Figura 11.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 0% de corrosión



Tal como se aprecia en Figura 11, al aplicar una fuerza de compresión de 4050 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento de 4 mm.

A continuación, se exponen los resultados del experimento mediante gráficos combinados y simples.

Figura 12.

Gráfico fuerza vs strain de la probeta 0% de corrosión

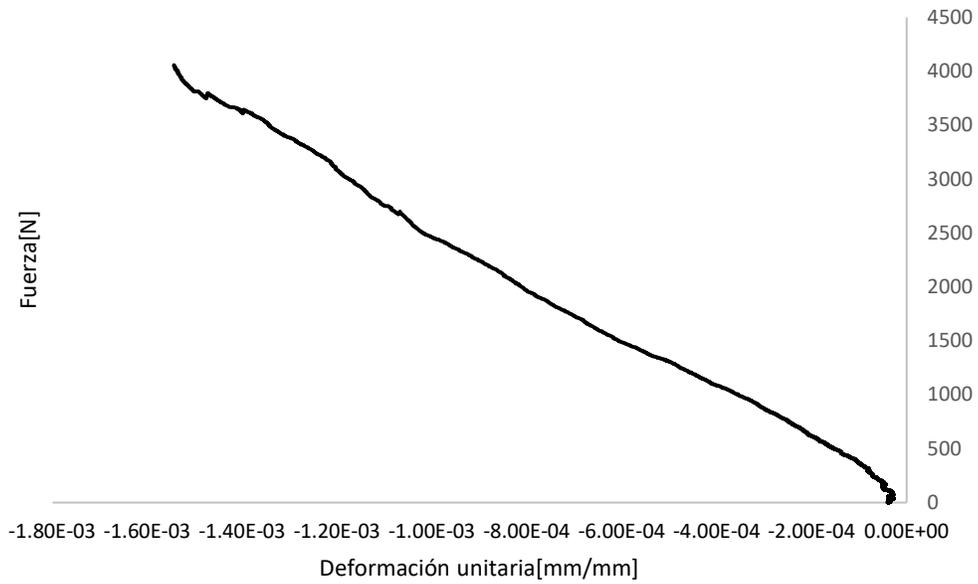
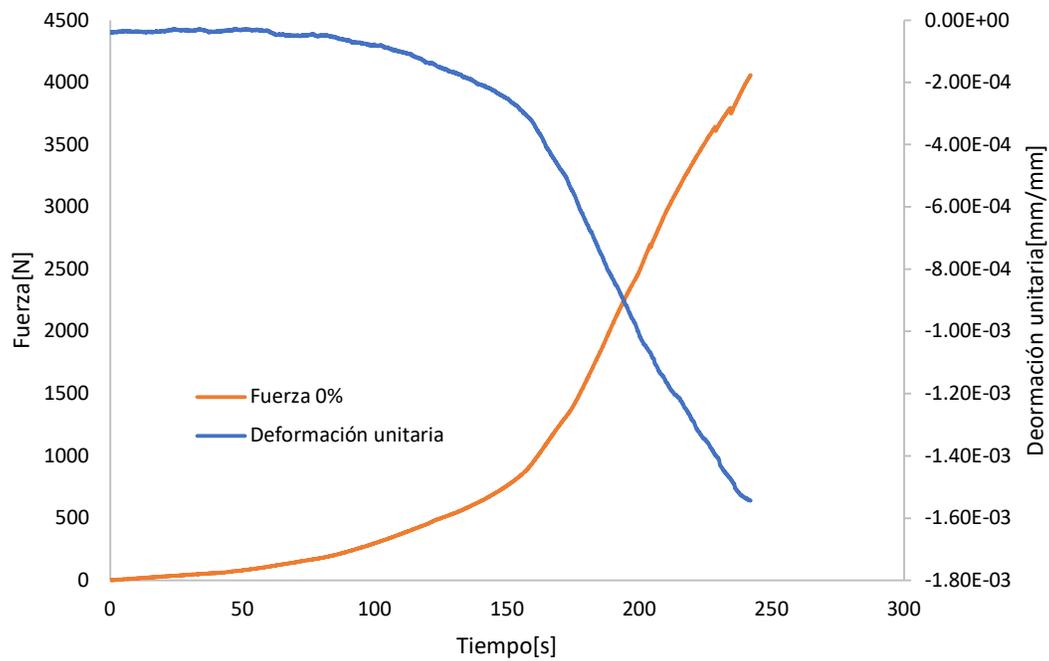
**Figura 13.**

Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 0% de corrosión

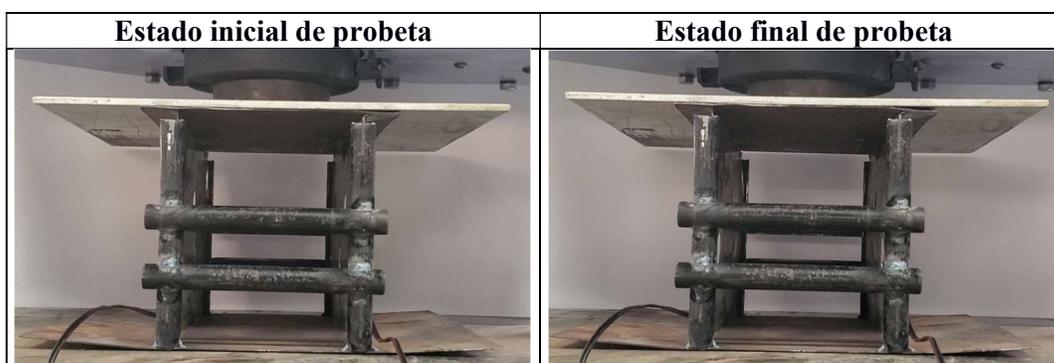


3.1.2 Resultados obtenidos para la probeta con 5% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión del ejemplar con un 5% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La siguiente tabla incluye una imagen que muestra el estado de la probeta antes y después del experimento.

Tabla 2.

Estado inicial y final de la probeta 5% de corrosión

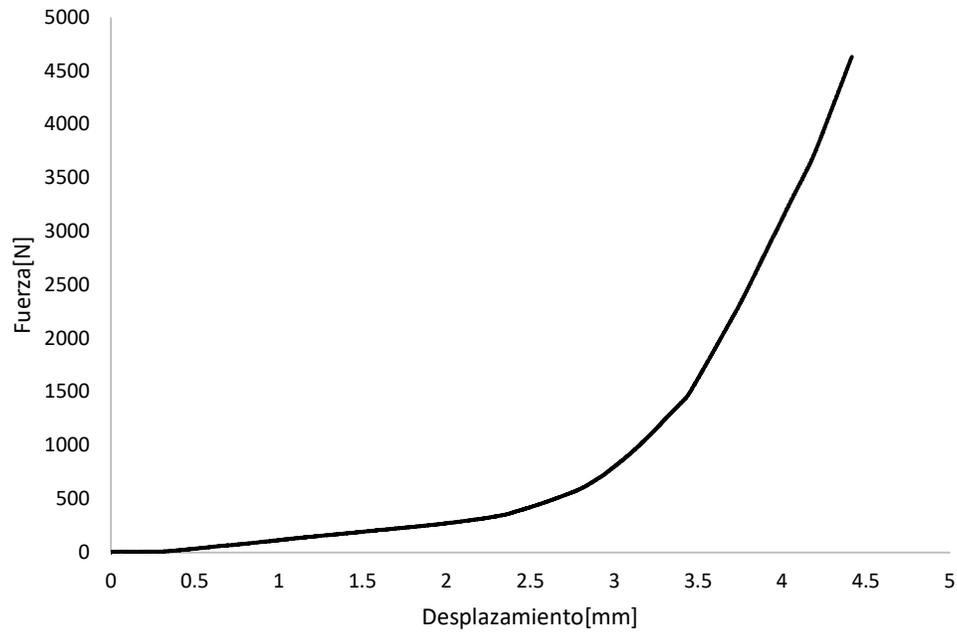


Como se puede observar en la Tabla 2, la flexión inicial y final de los elementos verticales del ejemplar muestra diferencias entre ambos gráficos. Esto se explica por el hecho de que la probeta presenta un grado de corrosión del 5%, lo cual refleja una disminución en su resistencia estructural.

Durante la realización de los ensayos sobre el ejemplar con un 5% de corrosión, se llevó a cabo el proceso de compresión, asegurando que la probeta no exceda su límite elástico. En la Figura 14 fue generado el grafico fuerza vs desplazamiento por el equipo de compresión.

Figura 14.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 5% de corrosión



Tal como se aprecia en la xx , al aplicar una fuerza de compresión de 4580 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento de 4.40 mm, alcanzando así su límite elástico.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos del experimento mediante la utilización de gráficos combinados y simples.

Figura 15.

Gráfico fuerza vs strain de la probeta 5% de corrosión

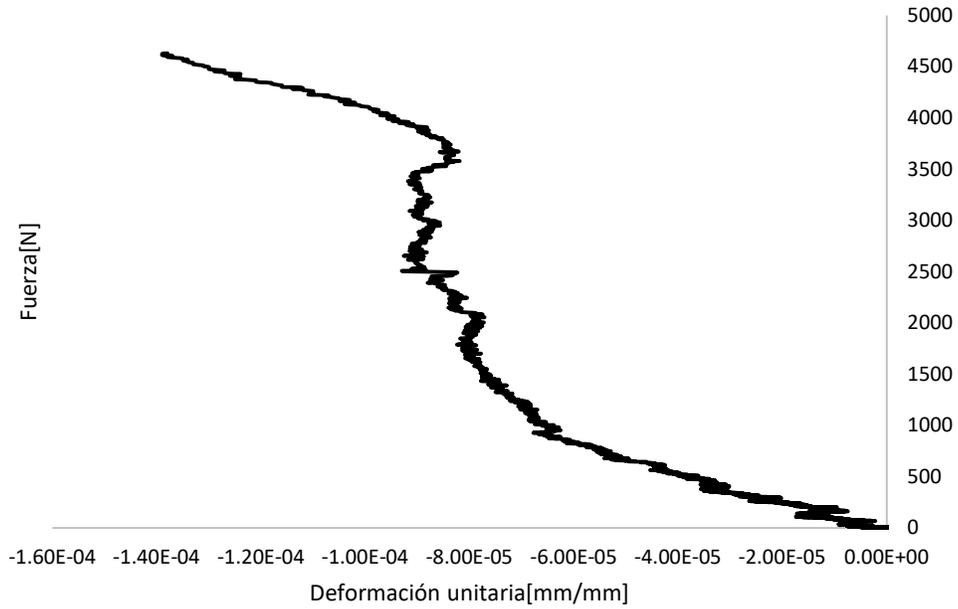
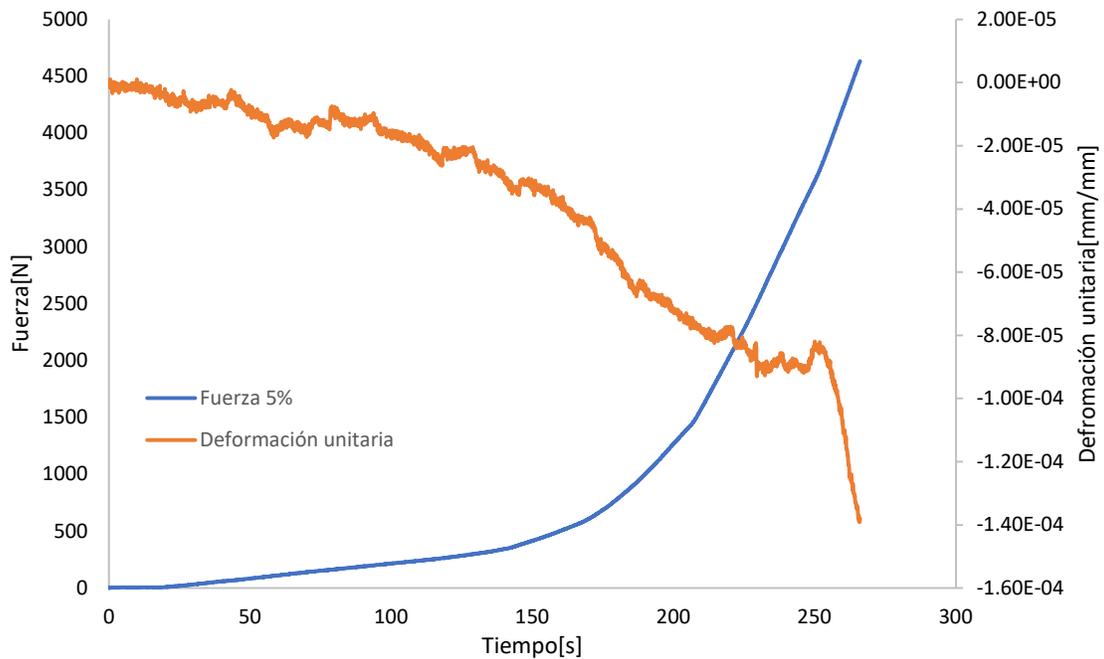
**Figura 16.**

Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 5% de corrosión

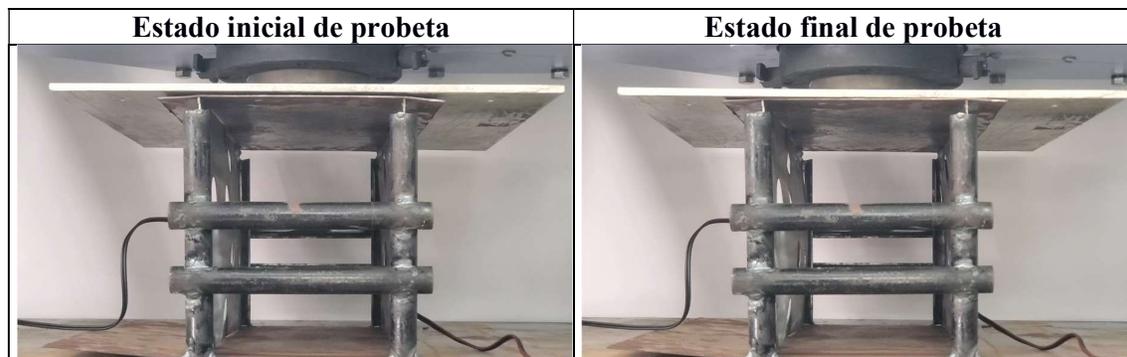


3.1.3 Resultados obtenidos para la probeta con 10% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión del ejemplar con un 10% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La siguiente tabla incluye una imagen que muestra el estado de la probeta antes y después del proceso de compresión.

Tabla 3.

Estado inicial y final de la probeta con 10% de corrosión

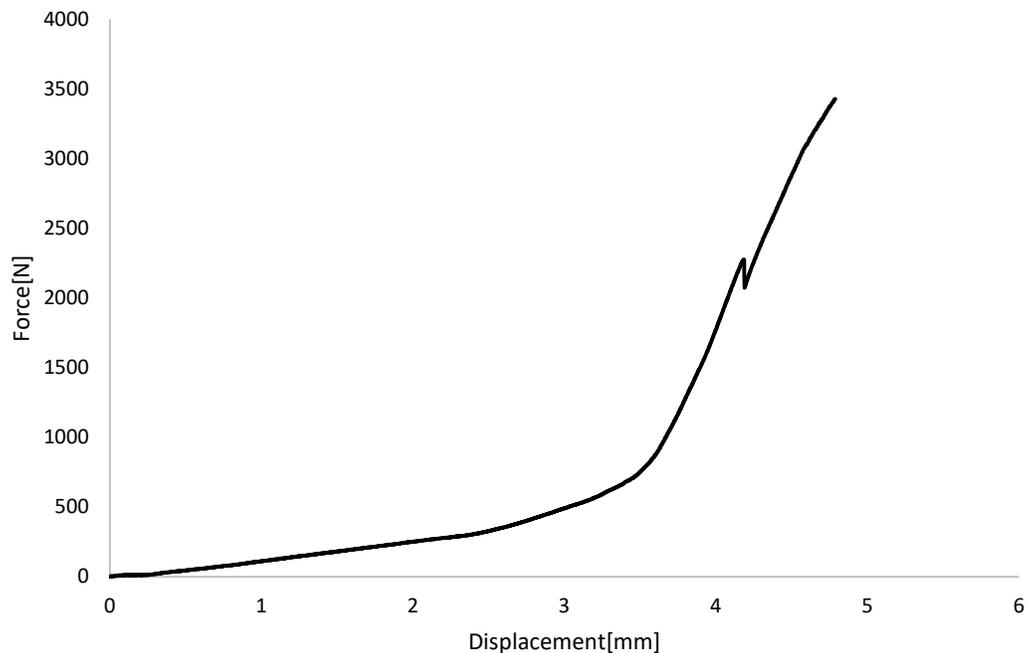


Como se puede observar en la Tabla 3, la flexión inicial y final de los elementos verticales del ejemplar muestra diferencias entre ambos gráficos. Esto se explica por el hecho de que la probeta presenta un grado de corrosión del 10%, lo cual refleja una disminución en su resistencia estructural.

Durante la realización de los ensayos sobre el ejemplar con un 10% de corrosión, se llevó a cabo el proceso de compresión de manera continua. El procedimiento se detuvo en el momento en que se observó un cambio en la pendiente del gráfico fuerza-desplazamiento, presentado en la Figura 17, el cual fue generado por los equipos.

Figura 17.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 10% de corrosión



Tal como se aprecia en el gráfico previamente presentado, al aplicar una fuerza de compresión de 3410 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento de 4.78 mm, alcanzando así su límite elástico.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos del experimento mediante la utilización de gráficos combinados y simples.

Figura 18.

Gráfico fuerza vs strain de la probeta 10% de corrosión

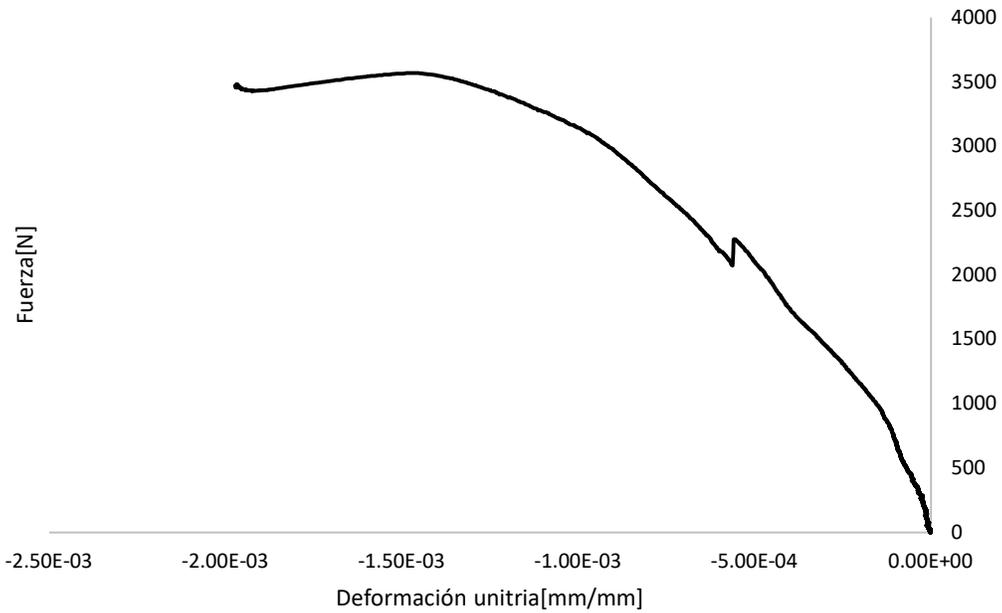
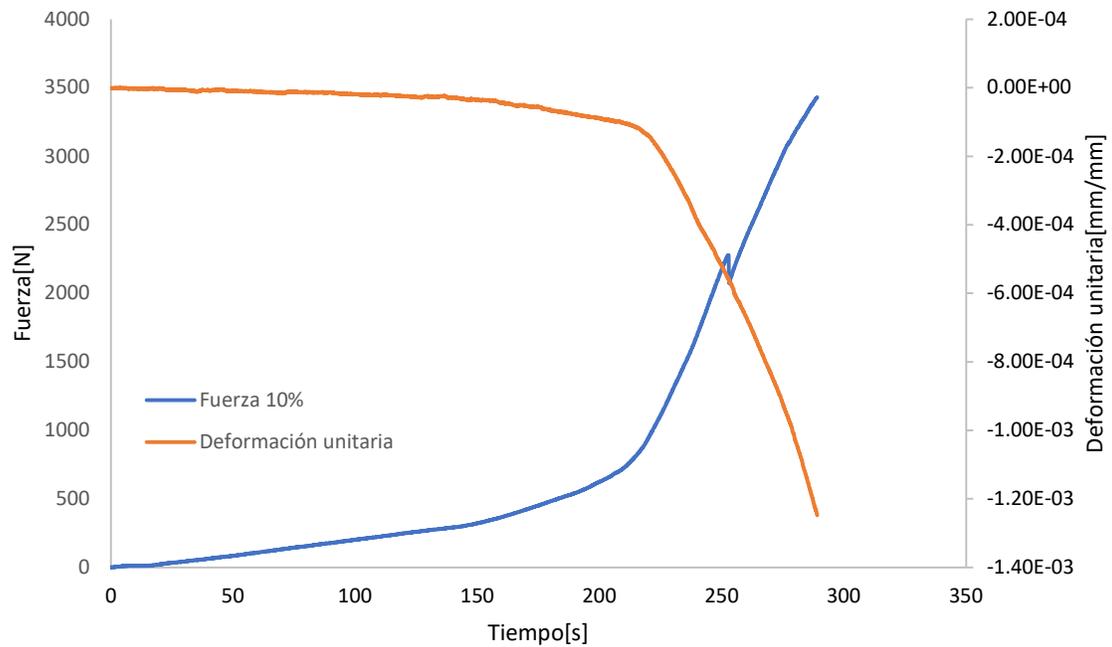
**Figura 19.**

Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 10% de corrosión

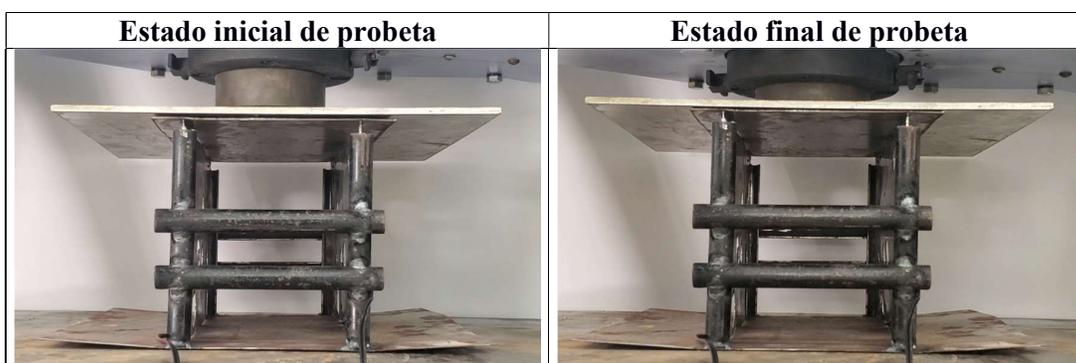


3.1.4 Resultados obtenidos para la probeta con 15% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión del ejemplar con un 15% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La siguiente tabla incluye una imagen referencial que muestra el estado de la probeta antes y después del proceso de compresión.

Tabla 4.

Estado inicial y final de la probeta con 15% de corrosión

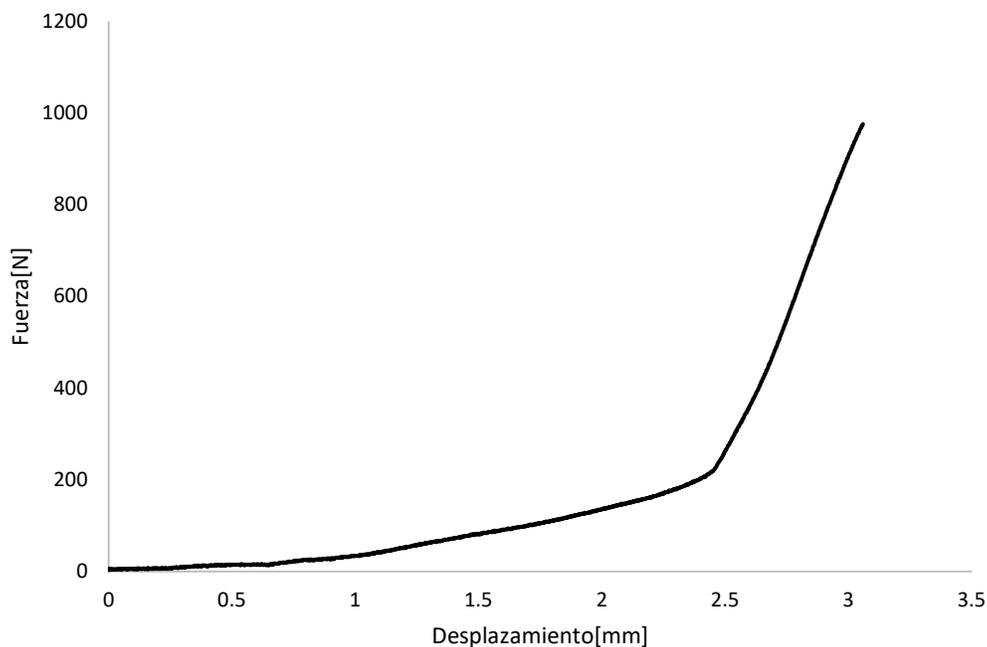


Como se puede observar en la Tabla 4, la flexión inicial y final de los elementos verticales del ejemplar muestra diferencias entre ambos gráficos. Esto se explica por el hecho de que la probeta presenta un grado de corrosión del 15%, lo cual refleja una disminución en su resistencia estructural.

Durante la realización de los ensayos sobre el ejemplar con un 15% de corrosión, se llevó a cabo el proceso de compresión. El procedimiento se detuvo en el momento en que se observó un cambio en la pendiente del gráfico fuerza-desplazamiento, presentado en la Figura 20, el cual fue generado por el equipo de compresión.

Figura 20.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta al 15% de corrosión



Tal como se aprecia en la Figura 20 previamente presentado, al aplicar una fuerza de compresión de 1240 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento de 2.90 mm, alcanzando su límite elástico.

Como se puede observar, los valores obtenidos en este ensayo difieren de los resultados registrados en los demás experimentos, lo cual podría atribuirse factores como la temperatura. En concordancia con lo expuesto, se ha determinado que no se realizarán análisis de la probeta con 15% de corrosión, dado que este ejemplar se considera fallido.

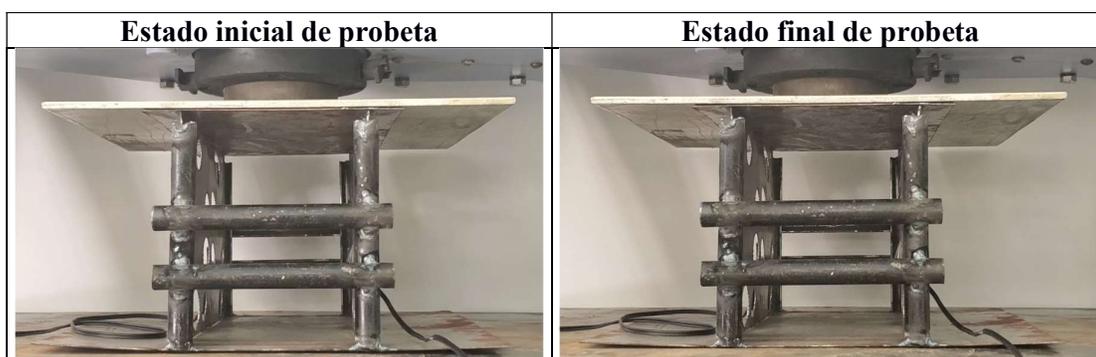
3.1.5 Resultados obtenidos para la probeta con 20% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión del ejemplar con un 20% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La

siguiente tabla incluye una imagen que muestra el estado de la probeta antes y después del proceso de compresión.

Tabla 5.

Estado inicial y final de la probeta con 20% de corrosión

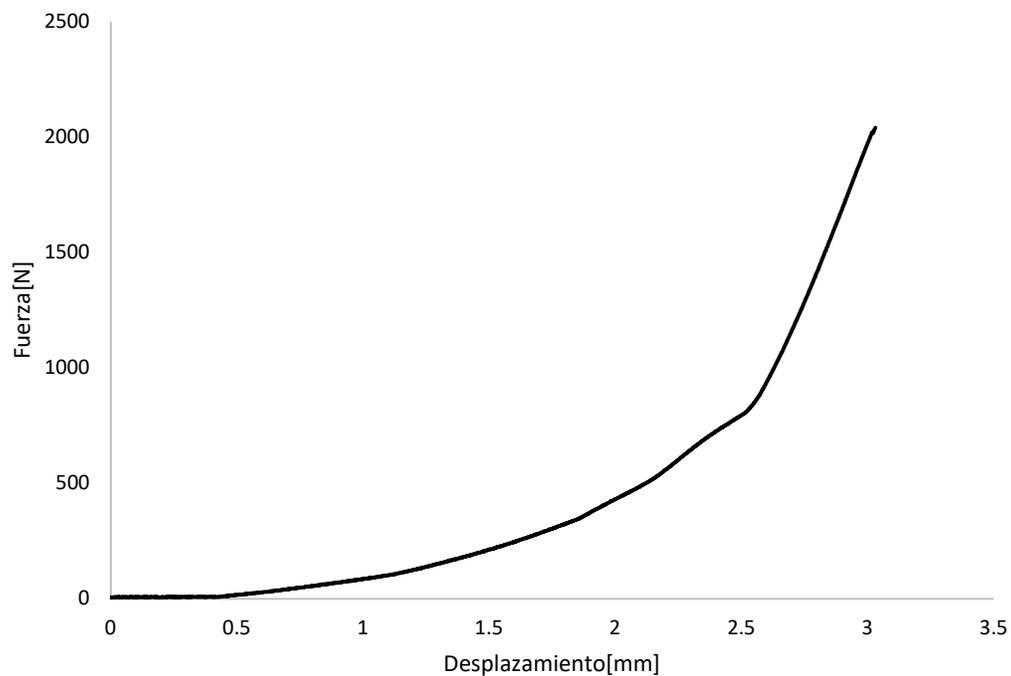


Como se puede observar en la Tabla 5, la flexión inicial y final de los elementos verticales del ejemplar muestra diferencias entre ambos gráficos. Esto se explica por el hecho de que la probeta presenta un grado de corrosión del 20%, lo cual refleja una gran disminución en su resistencia estructural como consecuencia del deterioro causado por la corrosión.

Durante la realización de los ensayos sobre el ejemplar con un 20% de corrosión, se llevó a cabo el proceso de compresión de manera continua. El procedimiento se detuvo en el momento en que se observó un cambio en la pendiente del gráfico fuerza-desplazamiento, presentado en la Figura 21, el cual fue generado por el equipo de compresión.

Figura 21.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 20% de corrosión



Tal como se aprecia en la Figura 21 previamente presentado, al aplicar una fuerza de compresión de 2030 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento 3.00 mm, alcanzando el límite elástico.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos del experimento mediante la utilización de gráficos combinados y simples.

Figura 22.

Gráfico fuerza vs strain de la probeta 20% de corrosión

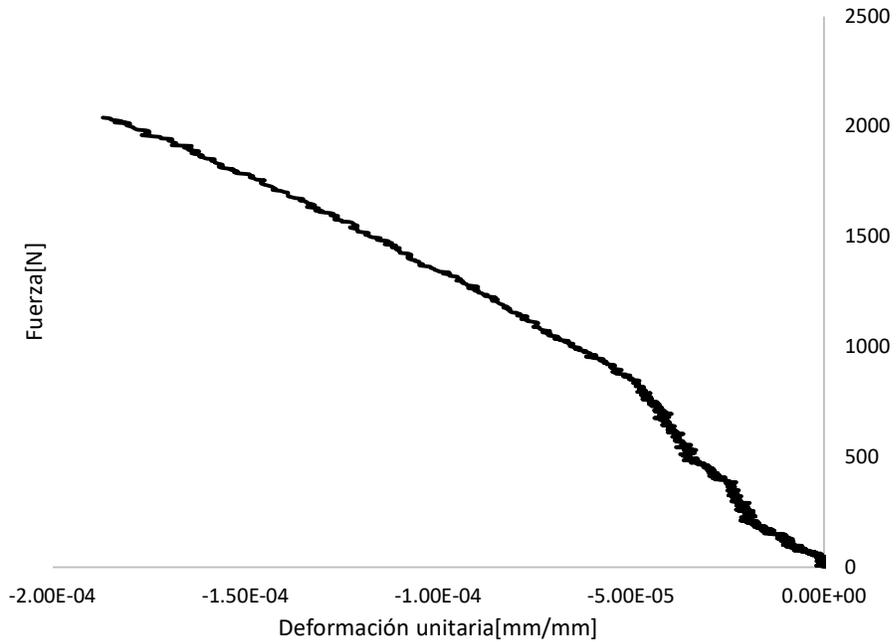
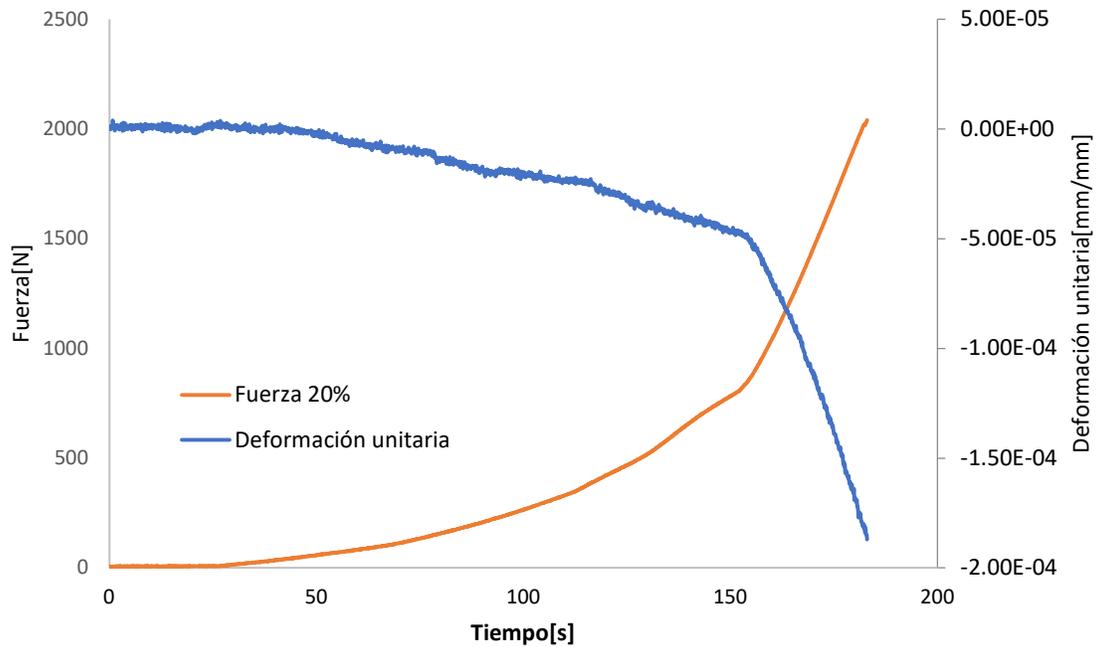
**Figura 23.**

Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 20% de corrosión

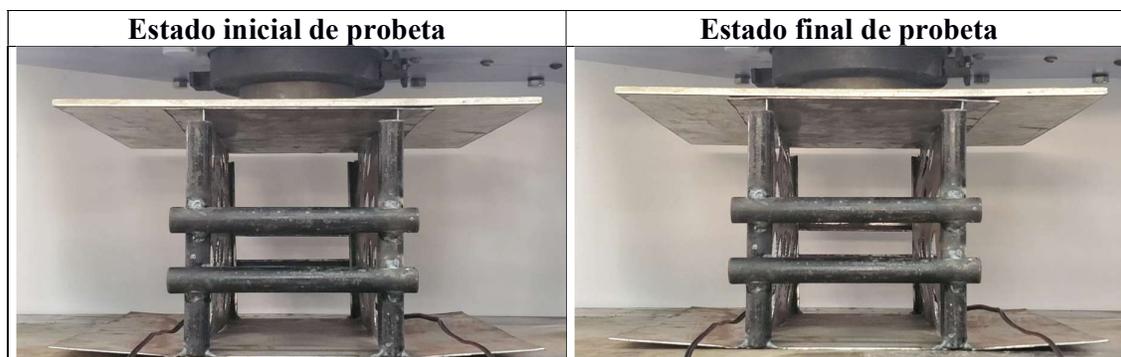


3.1.6 Resultados obtenidos para la probeta con 25% de corrosión

Durante el desarrollo del experimento se ha documentado por video el proceso de compresión del ejemplar con un 25% de corrosión a una velocidad de 1 mm/min. La siguiente tabla incluye una imagen referencial que muestra el estado de la probeta antes y después del proceso de compresión.

Tabla 6.

Estado inicial y final de la probeta con 25% de corrosión

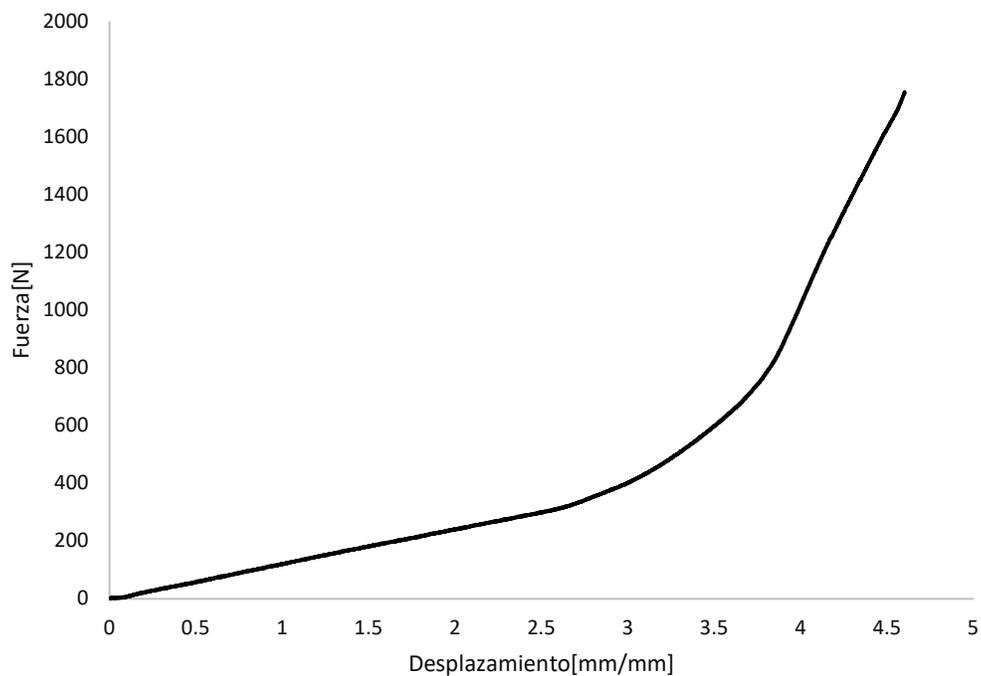


Como se puede observar en la Tabla 6, la flexión inicial y final de los elementos verticales del ejemplar muestra diferencias entre ambos gráficos. Esto se explica por el hecho de que la probeta presenta un grado de corrosión del 25%, lo cual refleja una gran disminución en resistencia estructural.

Durante la realización de los ensayos sobre el ejemplar con un 25% de corrosión, se llevó a cabo el proceso de compresión. El procedimiento se detuvo en el momento en que se observó un cambio en la pendiente del gráfico fuerza-desplazamiento, presentado en la Figura 24, el cual fue generado por el equipo de compresión.

Figura 24.

Gráfico fuerza vs desplazamiento de la probeta 25% de corrosión



Tal como se aprecia en la Figura 24 previamente presentado, al aplicar una fuerza de compresión de 1740 N sobre la probeta, esta experimenta un desplazamiento 4.60 mm, alcanzando así su límite elástico.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos del experimento mediante la utilización de gráficos combinados y simples.

Figura 25.

Gráfico fuerza vs strain de la probeta 25% de corrosión

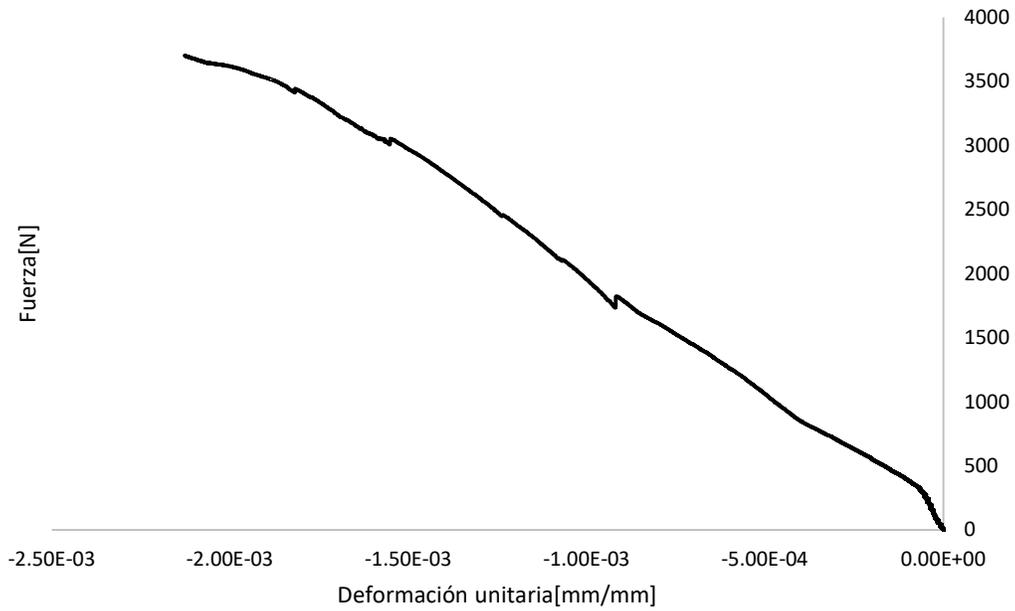
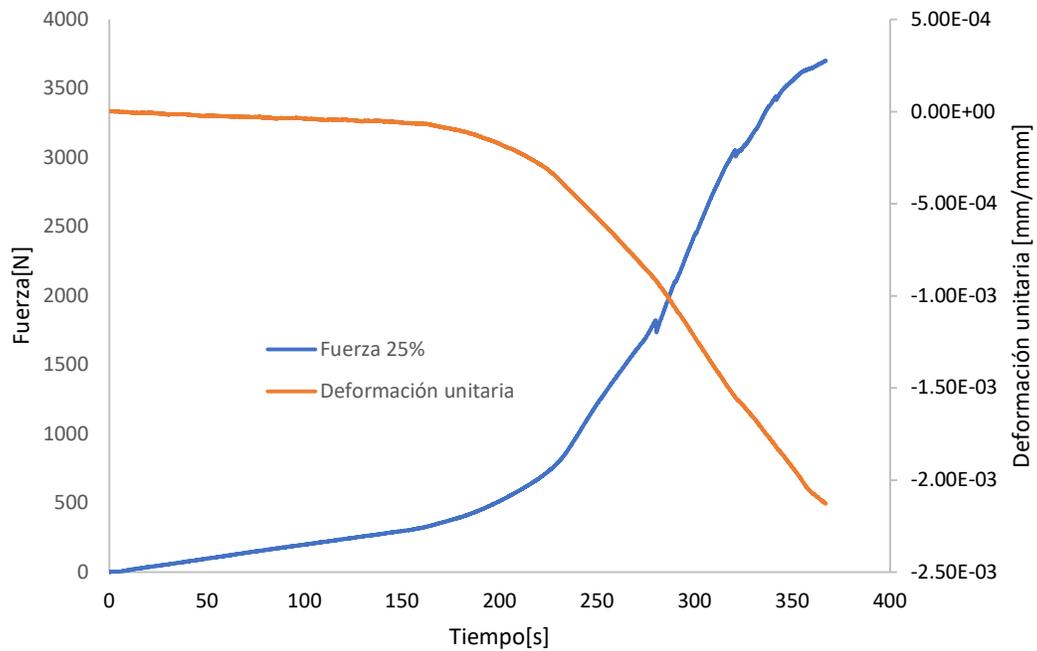
**Figura 26.**

Gráfico combinado fuerza y strain vs tiempo de la probeta 25% de corrosión



3.2 Resultados de la comparación con Ansys

A continuación, se presenta el conjunto de resultados obtenidos, tanto de los gráficos de fuerza vs strain derivados de la experimentación, como de aquellos generados mediante el modelo matemático implementado en el software Ansys. Este modelo matemático asume un comportamiento lineal, al representar el acero bajo las condiciones simuladas.

Figura 27.

Compilado de resultados de curvas fuerza vs strain de los experimentos

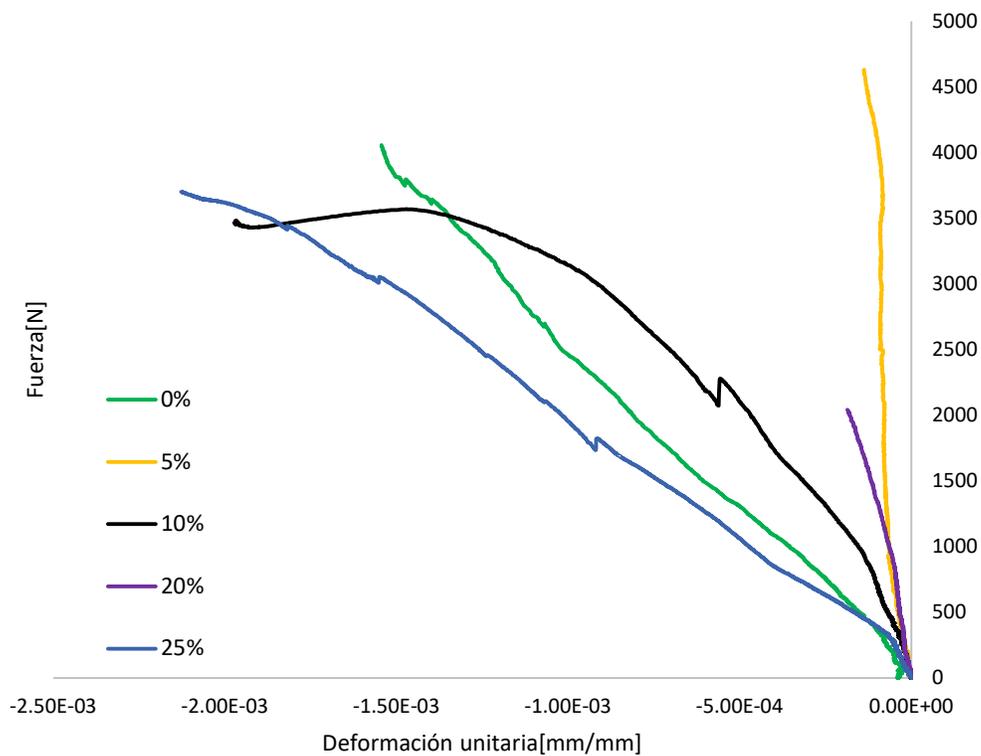
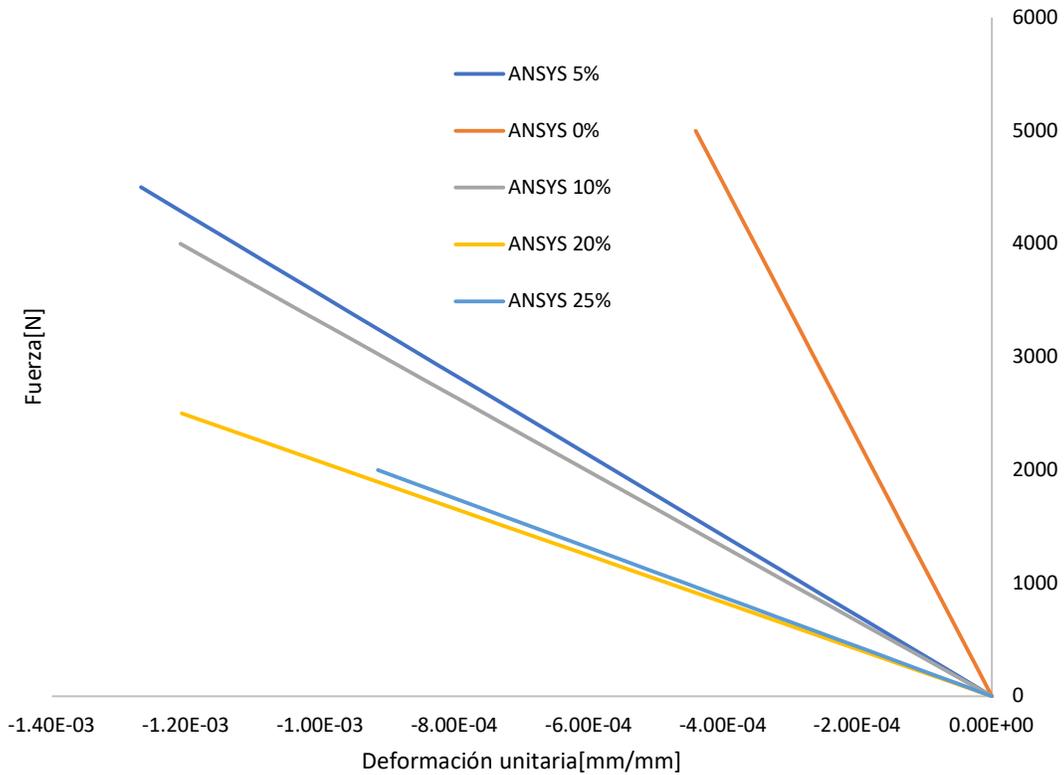


Figura 28.

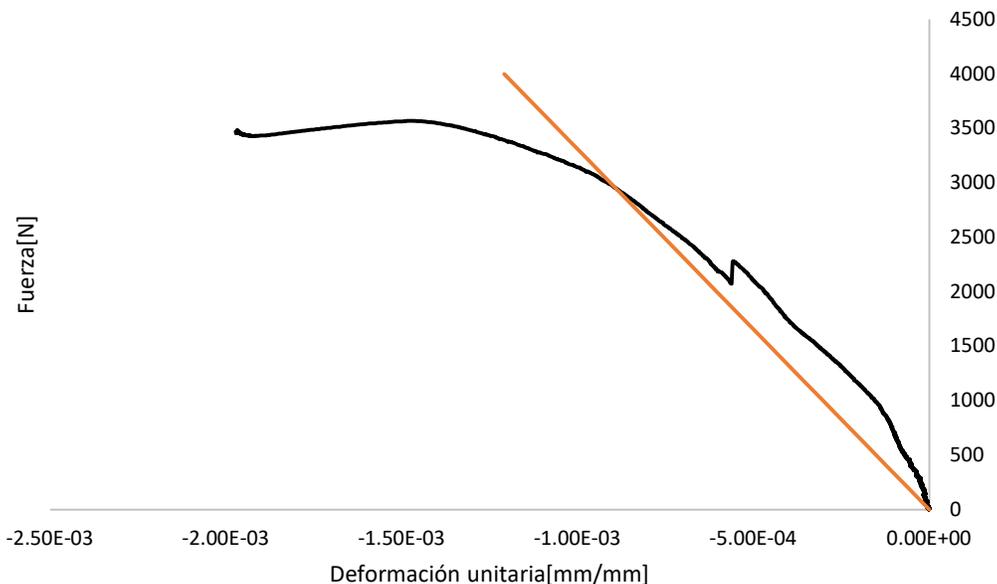
Compilado de resultados de curvas fuerza vs strain de los modelos matemáticos



De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la mejor convergencia de los resultados se presenta en la probeta con un 10% de corrosión, la cual destacó por ser uno de los ensayos con mejores resultados, debido a la precisión en su ensamblaje. A continuación, se presenta la curvatura previamente descrita.

Figura 29.

Comparativo de la curva fuerza vs strain de la probeta al 10% de corrosión



3.3 Análisis de resultados

3.3.1 Análisis del experimento

Se generaron gráficos combinados que ilustran la relación entre fuerza y deformación unitaria en función del tiempo, fuerza frente a desplazamiento y fuerza frente a deformación unitaria, abarcando únicamente la zona elástica, donde el material puede recuperar su forma original. Aunque las probetas exhiben un comportamiento similar, algunas tienen características particulares que son cruciales para el análisis.

Los gráficos combinados de las probetas con grados de corrosión del 0%, 5%, 15% y 20% muestran una tendencia con una pequeña curva inicial, seguida de un tramo recto que representa la zona lineal del material. Los gráficos fueron delimitados según la fuerza o deformación unitaria en el punto donde se detecta un cambio de curvatura. Estos cambios aparecen como picos, después de los cuales la gráfica comienza a descender, indicando el inicio de la zona plástica.

Las probetas con grados de corrosión del 10% y 25% presentan picos en las gráficas, pero continúan con un crecimiento constante, lo que indica que aún están dentro de la zona lineal. Este comportamiento se debe a cruídos percibidos durante los ensayos de compresión en esos puntos específicos.

En los gráficos de fuerza vs. desplazamiento, las probetas muestran un comportamiento decreciente, excepto la probeta con un 5% de corrosión, que presenta un desplazamiento significativamente mayor en comparación con la sin corrosión (0%). El valor máximo de fuerza aplicada fue de 4580 N para la probeta con un 5% de corrosión, mientras que la probeta con un 25% de corrosión registró un máximo de 1740 N. Este comportamiento se debe a la influencia de los agujeros que simulan la corrosión, reduciendo la resistencia de las probetas. Como resultado, alcanzan su límite elástico con menos fuerza aplicada, mientras que el desplazamiento aumenta, evidenciando una relación inversa entre la fuerza aplicada y el desplazamiento.

Durante la experimentación, la probeta con un 25% de corrosión se destacó por su notable capacidad de absorción de energía de deformación en la máquina de compresión. Como resultado, alcanzó una deformación vertical de entre 4.5 y 5 mm con la menor fuerza aplicada.

El comportamiento de los datos experimentales muestra una estrecha similitud con los resultados de desplazamiento, lo cual es coherente dado que el strain es un parámetro adimensional. Sin embargo, a diferencia de los gráficos previos, en los gráficos de desplazamiento se identifican con mayor frecuencia picos asociados a ciertas probetas, los cuales no eran tan evidentes en las gráficas combinadas.

En los gráficos de fuerza vs strain, se analizan los valores de deformación unitaria obtenidos durante las pruebas. Dado que las probetas están fabricadas en acero, se esperaba

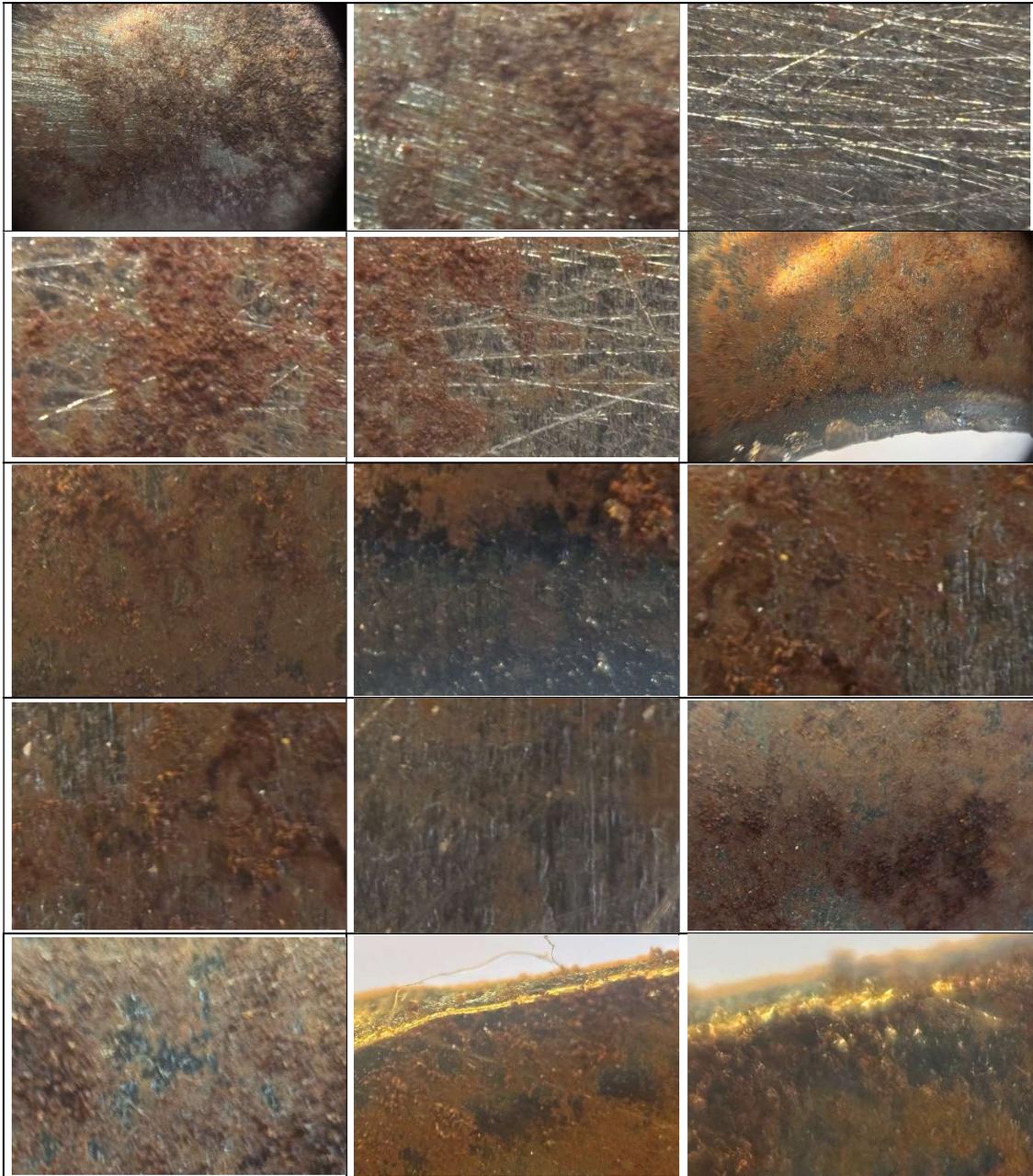
un comportamiento lineal, sin embargo, esto no sucede de manera ideal. El comportamiento no lineal observado en las gráficas se atribuye a los procesos mecánicos a los que fue sometido el material, incluyendo cortes por plasma, soldadura. Estas modificaciones alteran las características físicas del material, influyendo en la relación entre la fuerza aplicada y la deformación unitaria en dirección vertical, lo que genera desviaciones respecto al comportamiento lineal esperado.

Uno de los factores que contribuyen a la discontinuidad observada en los resultados presentados en los gráficos de fuerza vs strain es la redistribución de la fuerza de compresión ejercida por el equipo sobre cada probeta. Esto se debe a que la cantidad de orificios varía en función del porcentaje de corrosión analizado. Dichas aberturas están relacionadas con los ensayos de fatiga y se manifiestan como discontinuidades en la superficie, lo que afecta la compresión del elemento.

Aunque los resultados del ensayo no permiten identificar con precisión a qué aberturas corresponden las discontinuidades, estos datos se complementan con microfotografías que analizan posibles fallas o deformaciones en las aberturas. A continuación, se presentan microfotografías con una ampliación de x150 respecto al tamaño real.

Tabla 7.

Microfotografías con una ampliación de x150 respecto al tamaño real



Las microfotografías revelan en detalle los daños en la probeta, mostrando que la presencia de huecos afecta significativamente su integridad estructural. La distribución irregular de estos defectos y las micro fisuras asociadas sugieren que el fallo de la probeta se

debe tanto a factores del proceso de fabricación como a la carga aplicada en los ensayos de compresión.

También se identifican discontinuidades, como fisuras en los orificios circulares y evidencia de corrosión, atribuida tanto a la exposición del material durante su fabricación como a las condiciones de los ensayos mecánicos.

3.3.2 Análisis de la comparación con Ansys

Los gráficos generados por el software siguen una tendencia lineal, reflejando el comportamiento ideal del material. Sin embargo, a medida que aumenta el desgaste por corrosión, las pendientes de los gráficos muestran un comportamiento decreciente. Esto se debe a que los orificios circulares en las probetas afectan la rigidez del material; cuanto mayor es el desgaste, menor es la resistencia del material.

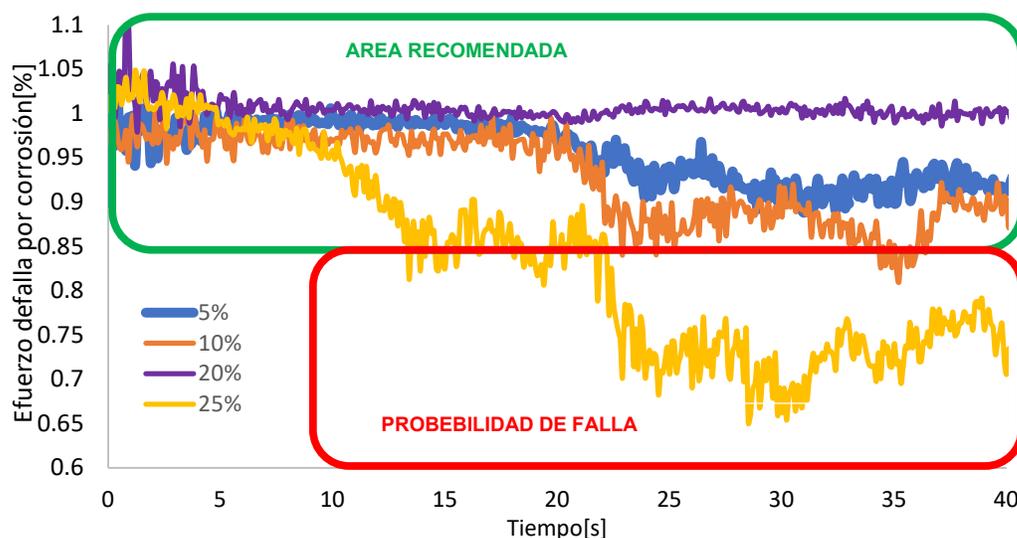
Es importante señalar que el software utilizado para el análisis de los modelos no considera los cambios en las propiedades físicas del material. Por lo tanto, los resultados experimentales y los obtenidos mediante el software no son directamente comparables. La presencia de orificios afecta significativamente la distribución de los resultados, por lo que cualquier modelo debería incluir estas características para establecer restricciones adecuadas. Este aspecto no se incluyó en los objetivos de la tesis, pero como recomendación para futuros investigadores, se sugiere realizar un análisis que considere las variaciones en las propiedades físicas del material debido al desgaste.

3.3.3 Análisis de los parámetros de falla

Con el propósito de facilitar la comprensión del análisis de los parámetros de falla, se presenta a continuación un gráfico comparativo que muestra la relación entre el porcentaje de degradación de los especímenes y el tiempo de aplicación de la fuerza. Este gráfico ha sido elaborado exclusivamente para las probetas que presentan corrosión.

Figura 30.

Análisis de los parámetros de falla



En la Figura 30 de porcentaje de falla, se distinguen dos áreas principales: una zona verde, donde el material no es propenso a fallar, y una zona roja, con alta probabilidad de falla. La zona de no falla corresponde a las probetas con porcentajes de corrosión del 5%, 10% y 20%, que alcanzan el límite. Esto se debe a que la corrosión reduce mínimamente el espesor efectivo en la sección del refuerzo vertical, lo que permite mantener una mayor capacidad estructural.

La probeta con un 25% de corrosión muestra la mayor probabilidad de falla, debido a que la rigidez del material se ve gravemente afectada por la gran cantidad de orificios en los refuerzos verticales, lo que reduce significativamente su capacidad de carga. Esto se refleja en un porcentaje de falla del 35%, lo que indica que no es viable operar embarcaciones con estructuras que presenten este nivel de corrosión. Para verificar la precisión de los resultados, se consulta la normativa de la sociedad clasificadora ABS, que establece que la corrosión se considera seria o grave cuando supera el 30% en la estructura metálica.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- a) De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de compresión realizados en las probetas, se determinó que aquella fabricada con un 25% de corrosión alcanza únicamente el 65% de la resistencia original del acero. Este hallazgo evidencia la importancia de que las embarcaciones operen con precaución cuando presentan un desgaste del 25% en su estructura. Asimismo, se concluye que un nivel de corrosión del 25% no es adecuado para garantizar la operatividad de las estructuras de un barco, siendo el porcentaje máximo aceptable de corrosión un 20%.
- b) Se llevaron a cabo los ensayos de compresión en las probetas; sin embargo, la probeta con un 15% de corrosión presentó resultados anómalos debido a problemas en la construcción y el ensamblaje de sus componentes estructurales, los cuales se vieron comprometidos, generando resultados erróneos e inconsistentes. Por esta razón, los datos correspondientes a dicha probeta no fueron considerados en el análisis de los resultados experimentales.
- c) La probeta con un 10% de corrosión presentó la mejor correlación entre los resultados teóricos y experimentales, gracias a la precisión en su ensamblaje durante el proceso de construcción. Esta precisión permitió que la curvatura se aproximara de manera más exacta al comportamiento ideal, lo cual se refleja particularmente en la pendiente de la gráfica Fuerza vs. Deformación (Strain).
- d) La formulación empírica del esfuerzo de falla permitió identificar cuáles probetas son más propensas a fallar bajo compresión. Según la normativa “American Bureau of Shipping” (ABS), las estructuras con un 30% de corrosión son consideradas de alto riesgo. En este sentido, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que la

probeta con un 25% de corrosión ya no es apta para la operación del buque, lo que valida los resultados y los criterios establecidos por esta sociedad clasificadora.

4.2 Recomendaciones

- a) Al realizar las simulaciones en el software ANSYS, es necesario establecer condiciones de frontera en los agujeros que representan el efecto de la corrosión, con el propósito de obtener una comparación más precisa entre los valores teóricos y los resultados experimentales.
- b) Es fundamental evitar que el armado de las estructuras genere curvaturas en los refuerzos donde se coloquen los strain gages, ya que dichas deformaciones afectan la precisión en la medición de los datos experimentales durante los ensayos de compresión. En caso de que se presenten pequeñas curvaturas, será necesario medirlas y restarlas de los resultados finales de las deformaciones obtenidas en el experimento, con el fin de garantizar la exactitud de los datos registrados.
- c) Se recomienda realizar inspecciones periódicas al buque *Paola* para garantizar que las estructuras se encuentren dentro de límites seguros. Aunque el barco puede continuar operando, es imprescindible llevar a cabo una inspección general al doble fondo con el propósito de verificar que ninguna estructura presente un nivel de corrosión cercano al 25%, asegurando así la integridad y operatividad del buque conforme a los estándares establecidos.

5. Referencias

- ANAVE. (2005). Petroleros de doble casco, Informe realizado por el panel de expertos de alto nivel de la Agencia Europea de Seguridad Marítima. *Tribuna Profesional*, 1.
- Anyfantis, K. N. (2019). Preliminary design assessment of an alternative repair method for corroded. *Elsevier*.
- D. McGeorge, A. T. (2008). Reparación de unidades flotantes en alta mar con materiales compuestos de fibra aglomerada. *Elsevier*.
- EYRES, D. J., & BRUCE, G. J. (2012). SHIP CONSTRUCTION. En D. J. EYRES, & G. J. BRUCE, *SHIP CONSTRUCTION* (pág. 387).
- Feng, J., Chen, Z., Wu, C., Qin, C., & Wei, X. (2022). Corrosion mechanism and damage characteristic of Q235B steel under the effect of stray current in NS4 simulated soil solution. *ELSERVER*, 12.
- Gursahib Singh Bhatia, A. H. (2024). Post impact repair of in-situ polymerisable thermoplastic based carbon fibre composite and its assessment under compression after impact loading. *Elsevier*.
- Haixian Liu, H. G. (2024). *Haixian Liu, Hongmei Gao, Jiongming Chen, Ruoling Liu, Yi Zhang, Yansheng Yin, Hongfang Liu, Shaojia Fan, Hongwei Liu*, 43.
- Ivan Grabovac, D. W. (2008). Application of bonded composites in the repair of ships structures – A 15-year service experience. *Elsevier*.
- Industriales, E. d. (2014). Resistencia de materiales. *California*.
- J. M. L. Reis, E. M. (2022). Strength of dissimilar adhesively bonded DCB joints and its connection with. *Elsevier*.
- Martin, D. W. (2014). Fundamentos de la corrosión - Protección de metales. *Cienfuegos - Cuba*.
- Mercante, D. C. (2018). *Convenio internacional sobre líneas de carga*.

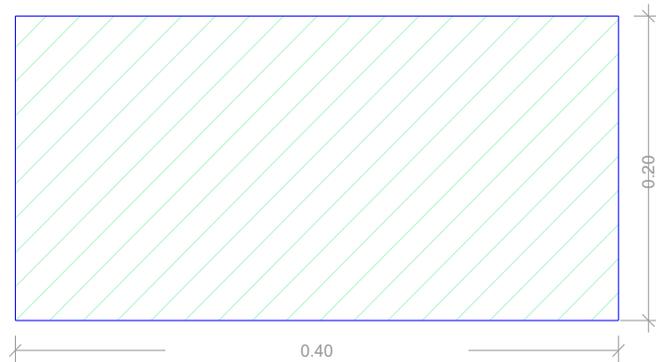
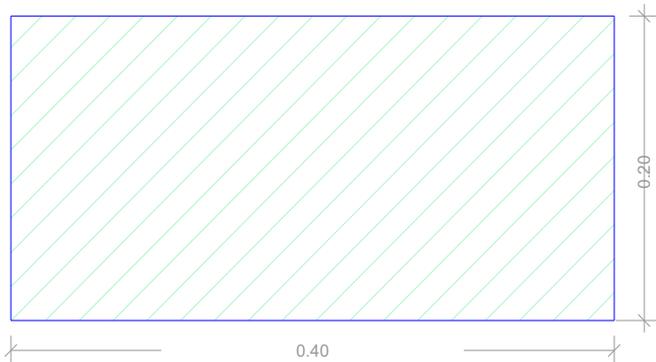
- Mundo, B. N. (13 de Noviembre de 2022). *Caso prestige*. Obtenido de BBC News Mundo:
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-63588107>
- P.Popov, E. (2000). *Mecanica de sólidos*. California: Pearson Education.
- Paulling, J. R. (2008). The Principles of Naval Architecture Series. En J. R. Paulling, *The Principles of Naval Architecture Series* (pág. 223).
- Perez. (12 de Octubre de 2017). *Linkedin*. Obtenido de LinkedIn:
<https://es.linkedin.com/pulse/mecanismo-de-corrosi%C3%B3n-estructuras-acero-en-agua-mar-abel>
- Renhua Wang, J. J. (2024). Ultimate strength assessment of randomly pitted stiffened panels considering stiffener corrosion. *Elsevier*.
- Song Zhou, T. S. (2023). Compression capacity of corroded plates with three sides simply supported and one side free. *ELSEVIER*, 10.
- Soti, P. R. (2019). Structural Behavior of Steel Plate Embedded Hybrid GFRP Shapes. *West Virginia University*.
- Varela-Fernandez, N. (2016). Tesis Doctoral: Comportamiento mecánico y corrosión marina de diversas aleaciones férricas utilizadas en buques y en sus componentes. *Core*, 270 - 273.
- Yujia Wei, A. I. (2023). A hydroelasticity analysis of a damaged ship based on a two-way coupled CFD-DMB method. *ELSEVIER*.
- Yun Teng, J. Z. (2024). Composite repair method for internally damaged cylinders subjected to. *Elsevier*.
- Yunhan Hu, Y. L. (2024). Corrosion behavior of Laves precipitates in FeCrAl-1Nb alloy at 290 °C and 7 MPa: The size effect and critical role of pH. *ELSERVIER*, 16.
- Zihan Zheng, Y. D. (2020). Experimental and theoretical studies of FRP-steel composite plate under static tensile loading. *Elsevier*.

Apéndice A. Esquema de las probetas

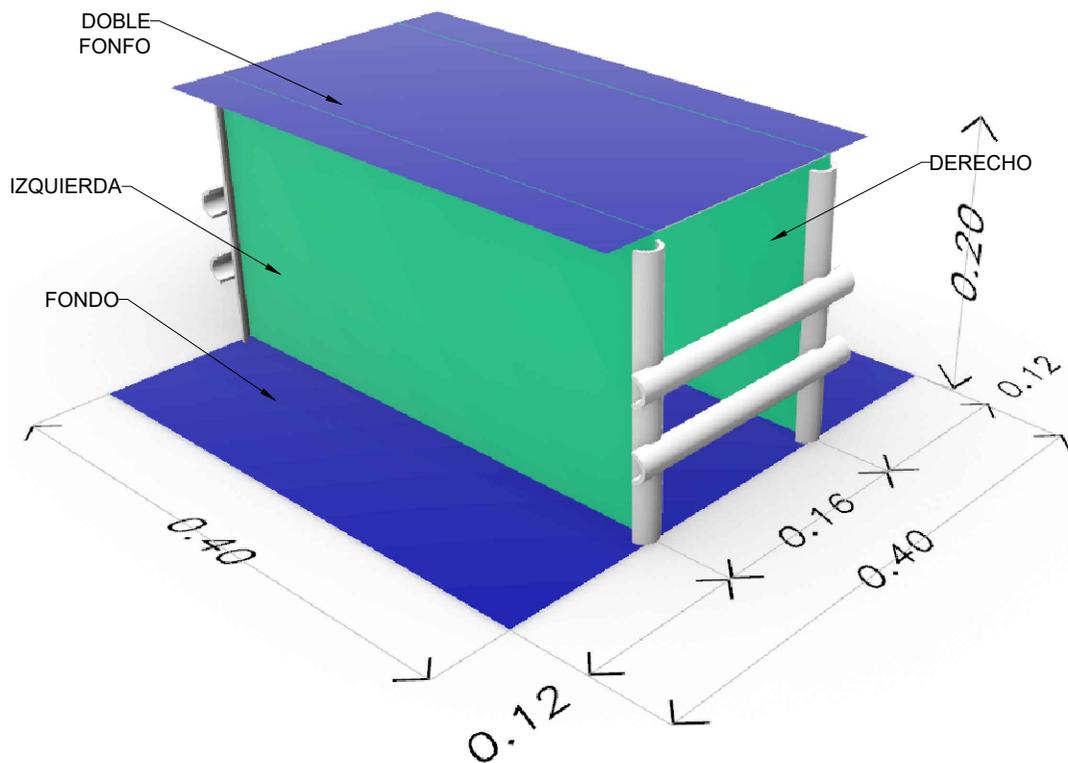
PROBETA CON 0% DE CORROSIÓN

IZQUIERDA

DERECHO



ESCALA 1:5



CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

- Material: ASTM A36 acero estructural
- Espesor de doble fondo y fondo: 1.4 mm
- Espesor de refuerzo longitudinal: 0.9 mm

CONTENIDO: PROBETA CON 0% DE CORROSIÓN

ELABORADO POR: ANDREINA AVILÉS & VICMAR DÍAZ

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL)



FECHA: 24/01/2025

ESCALA: INDICADAS N° DIBUJO: 1/6

FORMATO: A4

E

D

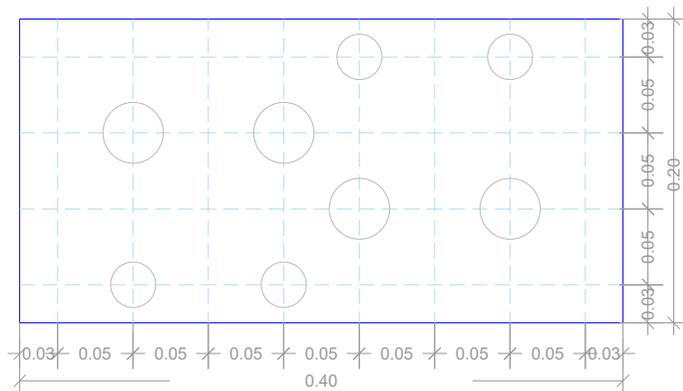
C

B

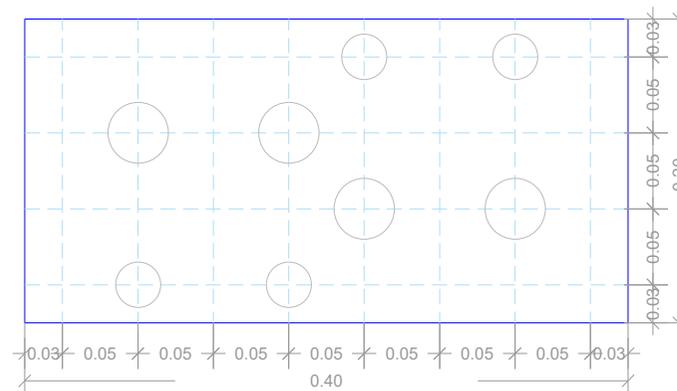
A

PROBETA CON 10% DE CORROSIÓN

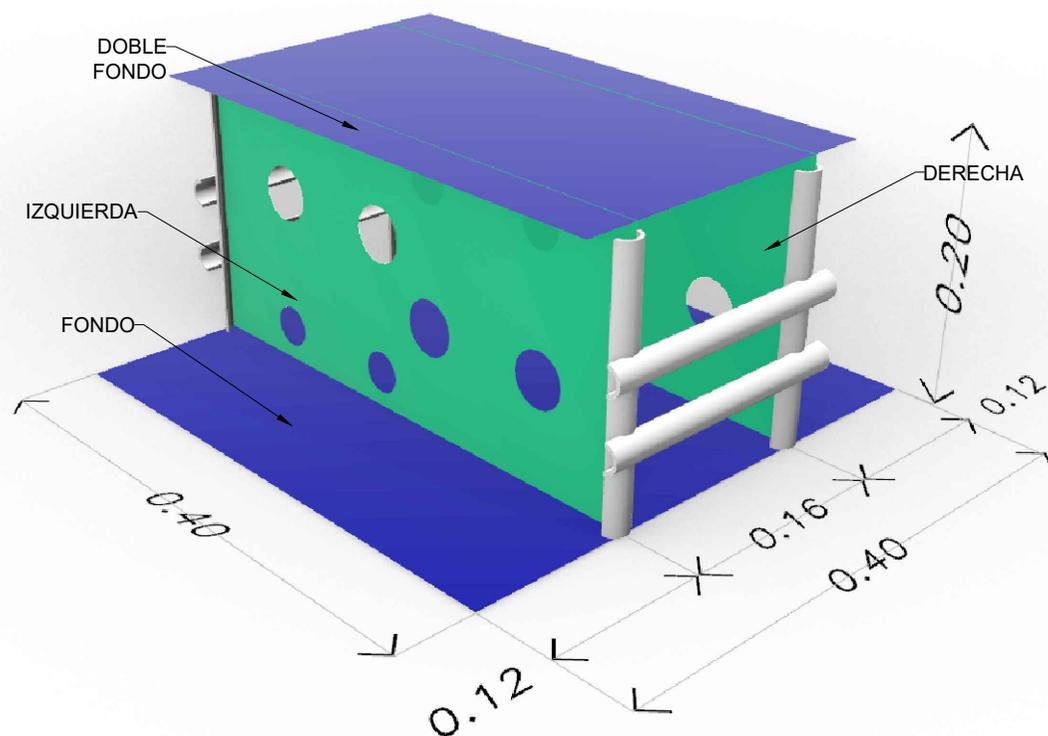
IZQUIERDA



DERECHA



ESCALA 1:5



CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

- Material: ASTM A36 acero estructural
- Espesor de doble fondo y fondo: 1.4 mm
- Espesor de refuerzo longitudinal: 0.9 mm

CONTENIDO: PROBETA CON 10% DE CORROSIÓN

ELABORADO POR: ANDREINA AVILÉS & VICMAR DÍAZ

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
DEL LITORAL (ESPOL)

espol

FECHA: 24/01/2025

ESCALA: INDICADAS N° DIBUJO: 3/6

FORMATO: A4

E

D

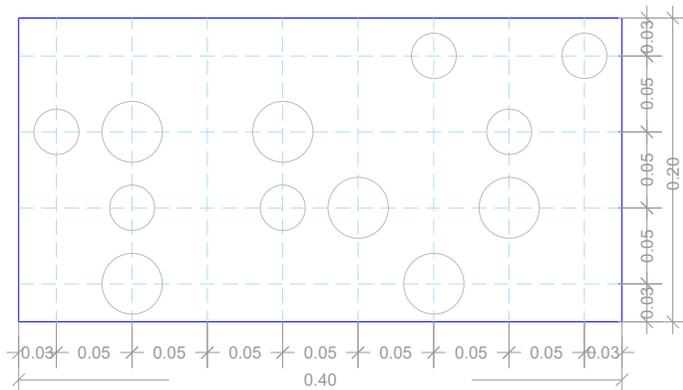
C

B

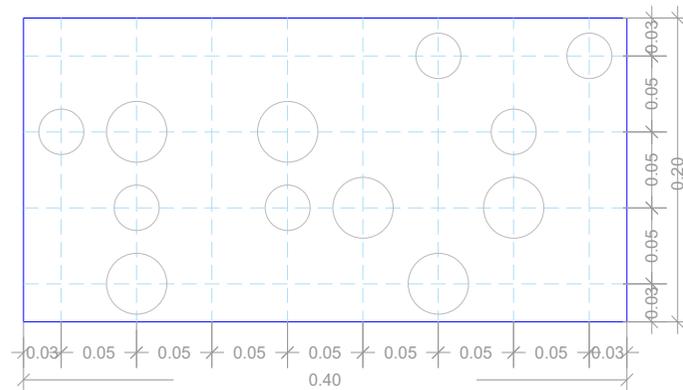
A

PROBETA CON 15% DE CORROSIÓN

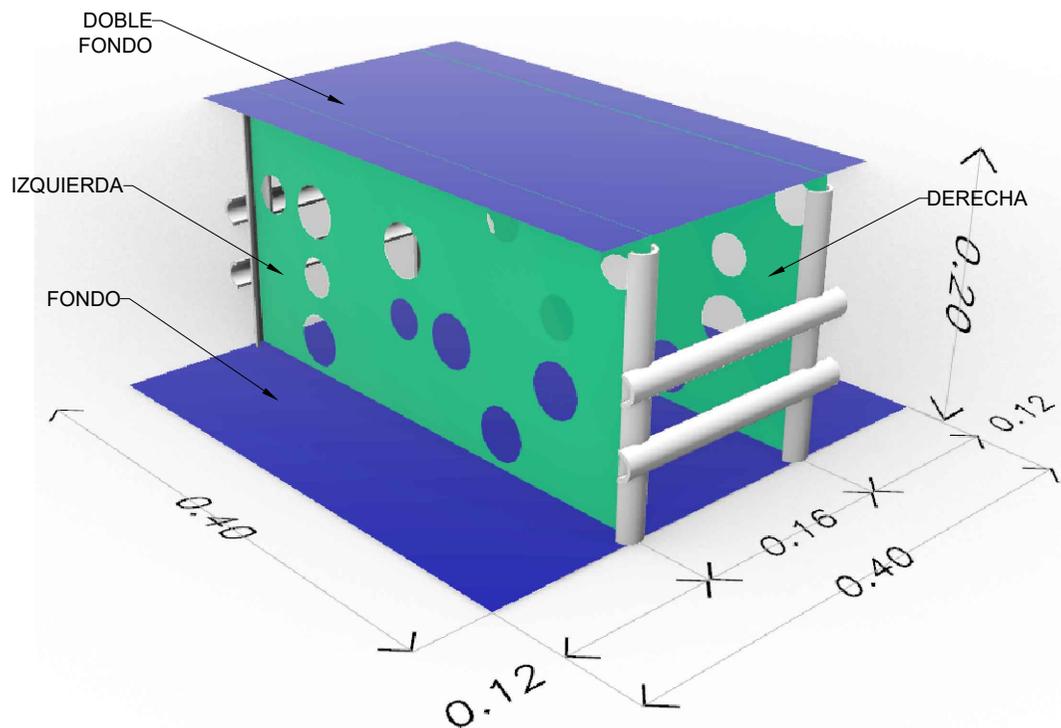
IZQUIERDA



DERECHA



ESCALA 1:5



CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

- Material: ASTM A36 acero estructural
- Espesor de doble fondo y fondo: 1.4 mm
- Espesor de refuerzo longitudinal: 0.9 mm

CONTENIDO: PROBETA CON 15% DE CORROSIÓN

ELABORADO POR: ANDREINA AVILÉS & VICMAR DÍAZ

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL)



FECHA: 24/01/2025

ESCALA: INDICADAS N° DIBUJO: 4/6

FORMATO: A4

E

D

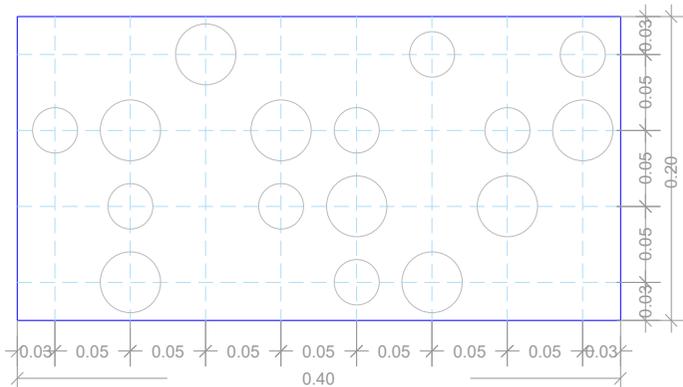
C

B

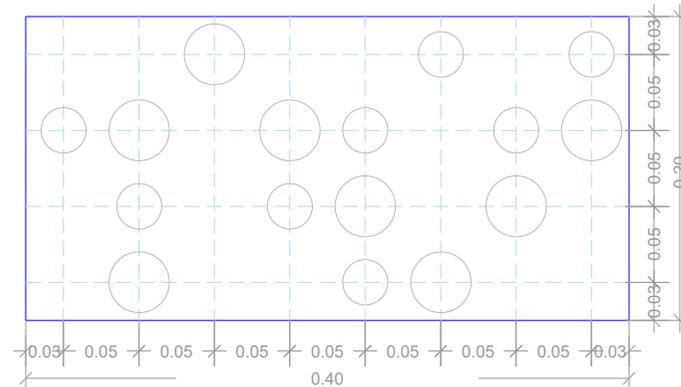
A

PROBETA CON 20% DE CORROSIÓN

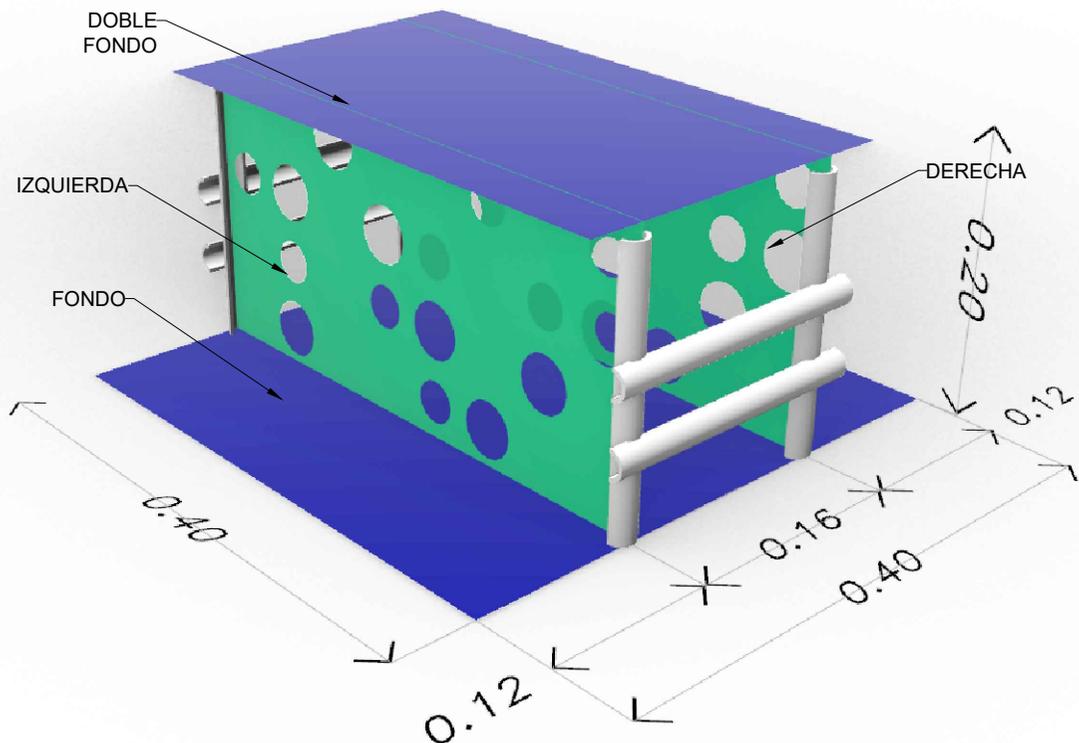
IZQUIERDA



DERECHA



ESCALA 1:5



CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

- Material: ASTM A36 acero estructural
- Espesor de doble fondo y fondo: 1.4 mm
- Espesor de refuerzo longitudinal: 0.9 mm

CONTENIDO: PROBETA CON 20% DE CORROSIÓN

PREPARED BY: ANDREINA AVILÉS & VICMAR DÍAZ

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL)



FECHA: 24/01/2025

ESCALA: INDICADAS N° DIBUJO: 5/6

FORMATO: A4

E

D

C

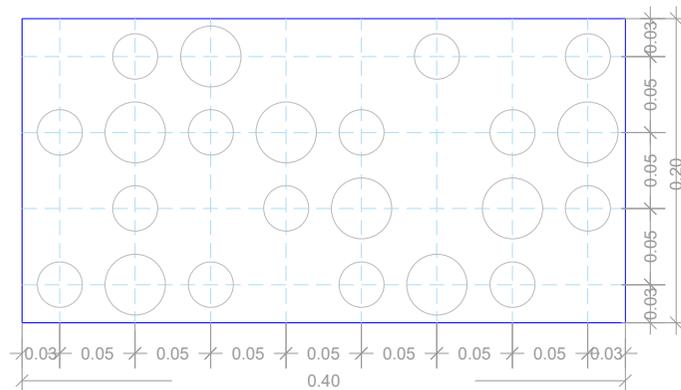
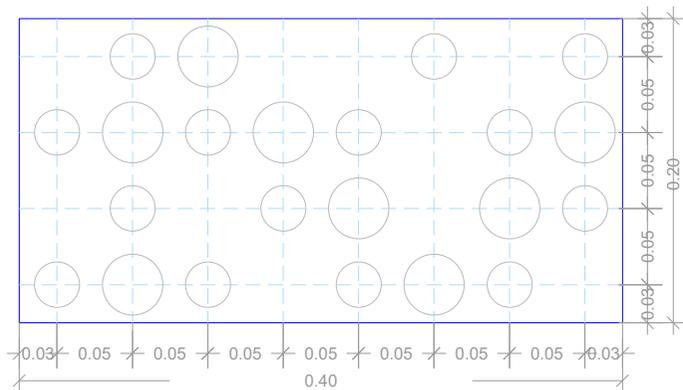
B

A

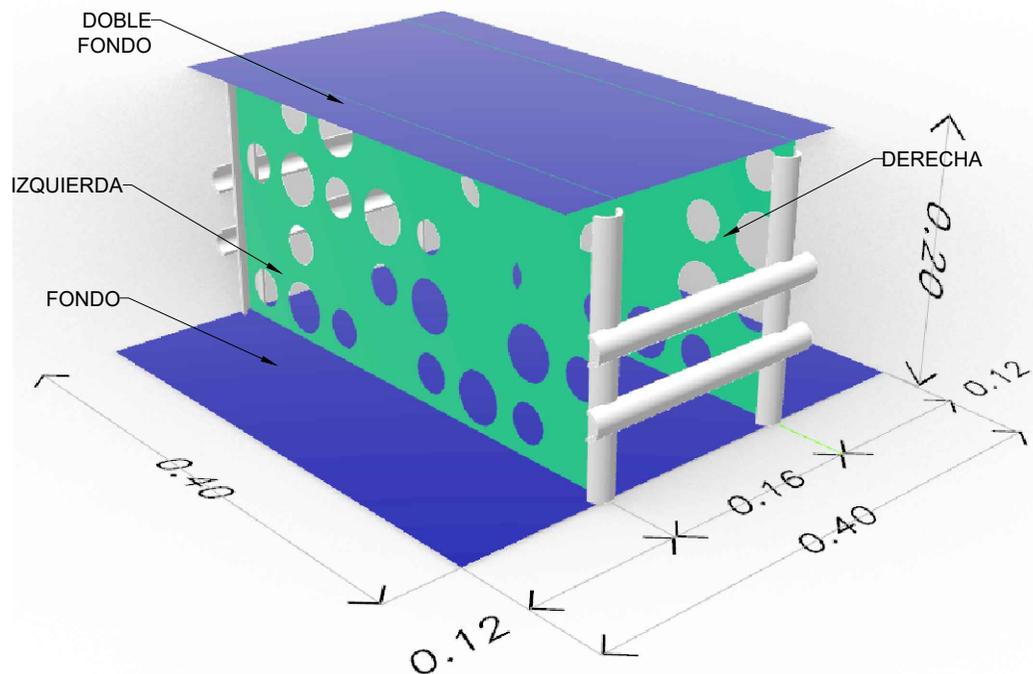
PROBETA CON 25% DE CORROSIÓN

IZQUIERDA

DERECHA



ESCALA 1:5



CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA
- Material: ASTM A36 acero estructural
- Espesor de doble fondo y fondo: 1.4 mm
- Espesor de refuerzo longitudinal: 0.9 mm

CONTENIDO:	PROBETA CON 25% DE CORROSIÓN
ELABORADO POR:	ANDREINA AVILÉS & VICMAR DÍAZ

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL) 	FECHA: 24/01/2025
	ESCALA: INDICADAS N° DIBUJO: 6/6
	FORMATO: A4

E

D

C

B

A

Apéndice B. Resumen obtenido del equipo de ensayos de compresión

RESUMEN ENSAYOS DE COMPRESION

