

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias de la Mar**

Evaluación experimental de características estáticas y dinámicas en especímenes  
de acero naval corroído por exposición real

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Michelle Paola López Buñay

Liliana Maribel Vega Caiza

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

Este proyecto lo dedico a mis padres Luis López y Olga Buñay por su apoyo incondicional supieron proporcionarme la mejor herencia la educación.

A mis hermanos Katherine y Wagner que siempre me apoyaron con palabras de aliento y consejos para cumplir mi meta.

*Michelle Paola López Buñay*

Este proyecto se lo dedico a mis queridos padres José Vega y María Caiza, por su esfuerzo, apoyo incondicional y sus consejos para forjarme a ser un buen ser humano, también a mis hermanas Ana y Marisol por sus consejos y su apoyo moral.

*Liliana Maribel Vega Caiza*

## Agradecimientos

---

Profundo agradecimiento a José R. Marín nuestro tutor por su orientación y paciencia. Su retroalimentación y valiosos consejos fueron fundamentales para la realización de este proyecto. Al MSc. Isaac Mendoza por su guía en el laboratorio, también a la PhD. María José Marín por su apoyo moral.

A nuestros padres por su apoyo incondicional y sacrificios que realizaron para cumplir nuestra meta. También agradecemos a nuestros hermanos y familiares por su apoyo constante.

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Michelle Paola López Buñay y Liliana Maribel Vega Caiza y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Michelle Paola López  
Buñay



---

Liliana Maribel Vega  
Caiza

## **Evaluadores**

---

**MSc. David Andrés Plaza Mendoza**

Profesor de Materia

---

**PhD. José Rolando Marín López**

Profesor Tutor

---

**PhD. Patrick Roger Townsend Valencia**

Profesor Co -Tutor

## Resumen

La corrosión por los años de servicio es una de las principales causas del colapso de estructuras locales en la flota pesquera ecuatoriana. Algunas embarcaciones en Ecuador no cumplen con la resolución establecida por DIRNEA sobre el máximo años de vida permitido y como consecuencia soportan deterioro estructural. De manera que, es necesario identificar los efectos de la corrosión en las características estáticas y dinámicas de los materiales empleados en estructura naval. Para desarrollar este proyecto se estableció una etapa preliminar y otra experimental. En la preliminar se construyó especímenes empleando la norma ASTM E8 para pruebas de tensión simple, posteriormente con la norma ISO 8407 se realizó la limpieza química y seguidamente para describir la superficie se usó herramientas estadísticas y curvas de nivel. En la etapa experimental se desarrollaron pruebas de tensión simple, pandeo elástico y plástico, vibraciones resonantes y flexión de 4 puntos. Probetas con diferente relación de esbeltez se probaron en compresión axial hasta el pandeo elástico y plástico. También se desarrollaron pruebas vibratorias resonantes siguiendo el estándar ASTM E756, y flexión de 4 puntos, con ASTM G39. Los resultados muestran que la corrosión no tiene efectos en el esfuerzo de fluencia y último del material, mientras que en las pruebas de pandeo causó una reducción del 48% en carga última. La prueba de vibraciones resonantes no causó impactos apreciables en el factor de amortiguamiento en probetas en cantilibrío. En cambio, en flexión de 4 puntos la corrosión causó una reducción del 35% en la carga última.

**Palabras Clave:** pitting, vibración resonante, pandeo, características mecánicas.

## **Abstract**

*Corrosion due to years of service is one of the main causes of the collapse of local structures in the Ecuadorian fishing fleet. Some vessels in Ecuador do not comply with the resolution established by DIRNEA on the maximum years of life allowed and as a consequence endure structural deterioration. Corrosion due to years of service is one of the main causes of the collapse of local structures in the Ecuadorian fishing fleet. Some vessels in Ecuador do not comply with the resolution established by DIRNEA on the maximum years of life allowed and as a consequence they suffer structural deterioration. Therefore, it is necessary to identify the effects of corrosion on the static and dynamic characteristics of the materials used in naval structures. In order to develop this project, a preliminary and an experimental stage were established. In the preliminary stage, specimens were built using the ASTM E8 standard for simple tension tests, then with the ISO 8407 standard, chemical cleaning was performed and then statistical tools and contour lines were used to describe the surface. In the experimental stage, single tension, elastic and plastic buckling, resonant vibrations and 4-point bending tests were performed. Specimens with different slenderness ratios were tested in axial compression, elastic and plastic buckling. Resonant vibration tests were also developed with ASTM E756 standard and ASTM G39 4-point bending. The results show that corrosion has no effect on the yield stress and ultimate stress of the material, while in the buckling tests it caused a reduction in ultimate load of 48%. In the resonant vibration test, it did not cause appreciable impacts on the damping factor in cantilever specimens. While, in 4-point bending, corrosion caused a 35% reduction in ultimate load. Finally, corrosion causes reduction effects.*

**Keywords:** *pitting, resonance vibration, buckling, mechanical characteristic.*

## Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	X
Capítulo 1.....	1
1.    Introducción.....	2
1.1    Descripción del problema.....	2
1.2    Justificación del problema.....	5
1.3    Objetivos.....	6
1.3.1    Objetivo general.....	6
1.3.2    Objetivos específicos.....	6
1.4    Marco teórico.....	6
1.4.1    Descripción del perfil de la superficie no uniforme afectado por la corrosión.....	6
1.4.2    Variación de las propiedades mecánicas en materiales corroídos.....	7
1.4.3    Estudio experimental de tracción en platinas con efecto corrosivo.....	9
1.4.4    Pandeo de columnas corroídas.....	9
1.4.5    Estudio del factor de amortiguamiento en material corroído.....	12
1.4.6    Estudio experimental de la deflexión en platinas bajo el efecto de la corrosión.....	13
Capítulo 2.....	15
2.    Metodología.....	16
2.1    Descripción del procedimiento.....	16
2.2    Pasos preliminares.....	18
2.2.1    Detalles de la construcción de los especímenes.....	18

2.2.2	Limpieza de los especímenes .....	19
2.2.3	Medición de la superficie .....	20
2.3	Pruebas experimentales .....	20
2.3.1	Pruebas de tensión simple .....	22
2.3.2	Pruebas de pandeo .....	22
2.3.3	Pruebas de vibración resonante .....	24
2.3.4	Pruebas de flexión de 4 puntos .....	26
Capítulo 3	.....	30
3.	Resultados y análisis .....	31
3.1	Resultados de la prueba de tensión simple .....	31
3.1.1	Descripción del perfil de la superficie no uniforme con herramientas estadísticas	31
3.1.2	Resultados de las pruebas de tensión .....	35
3.2	Resultados de la prueba de pandeo .....	35
3.2.1	Descripción de la superficie no uniforme .....	36
3.2.2	Resultados de las pruebas de pandeo .....	38
3.2.3	Espesor equivalente de los especímenes .....	41
3.3	Resultados de las pruebas vibraciones resonantes .....	42
3.3.1	Descripción de la superficie no uniforme de probetas .....	42
3.3.2	Resultados experimentales .....	43
3.4	Resultados de la prueba de flexión .....	45
3.4.1	Descripción de la superficie no uniforme de probetas .....	46
3.4.2	Resultados experimentales .....	48
Capítulo 4	.....	51
4.1	Conclusiones y recomendaciones .....	52
4.1.1	Conclusiones .....	52
4.1.2	Recomendaciones .....	53
Referencias	.....	55

Apéndice A.....	58
Apéndice B.....	63
Apéndice C.....	68

## **Abreviaturas**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIRNEA	Dirección Nacional de Espacios Acuáticos
CNP	Cámara Nacional de Pesquería
DOP	Degree of pitting intensity
SCI	Steel Construction Institute
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales, FIMCP
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
Simar	Laboratorio de Sistemas Marinos
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

## Simbología

$\omega$	Frecuencia, rad/seg
$\xi$	Factor de amortiguamiento
mm	Milímetro
L	Longitud
kzz	Radio de giro
Hz	Hercios
$P_{Ult}$	Carga última
$\sigma_y$	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_m$	Esfuerzo promedio
$\sigma_{res}$	Esfuerzo residual
$\sigma_{el}$	Esfuerzo elástico crítico (Euler)
$\sigma_f$	Esfuerzo del límite elástico
$\sigma_{cr}$	Esfuerzo crítico de pandeo por compresión
$t_{eff}$	Espesor efectivo
$\beta$	Razón de esbeltez
$t$	Espesor
$b_{eff}$	Ancho efectivo de placa corroída
$b$	Ancho de placa
$P_u$	Carga total última
$a$	Separación entre soportes interior y exterior
$h$	Espesor sobre 2
$E$	Módulo de Young
m	Pendiente de fuerza sobre deformación unitaria

$\varepsilon_x$	Deformación unitaria
$m^*$	Masa por unidad de longitud
$t_{prom.}$	Espesor promedio de la probeta
$b_{prom.}$	Ancho promedio de la probeta
$I_c$	Momento de inercia de la sección de una viga
$R_{jc}$	Correlación de Ryan Joiner
$v$	Deflexión de la viga

## Índice de figuras

Figura 1.1 Diagrama de intensidad de picadura (Paik et al, 2003) .....	7
Figura 1.2 Espécimen rectangular para pruebas de tracción (ASTM E8/E8M, 2016).....	9
Figura 1.3 Curva de acortamiento de carga en placas con diferentes condiciones de corrosión (Rahbar-Ranji, 2012).....	11
Figura 1.4 Diagrama de cargas axiales en la placa (PhD. José Marín, 2021) .....	12
Figura 1.5 Método de ancho de banda de media potencia (Himanshu Mevada, 2015) .....	13
Figura 1.6 Esquema de la prueba de cuatro puntos.....	14
Figura 2.1 Procedimiento general .....	16
Figura 2.2 Plano distribución general BT "Libertad I" (CORPETROLSA S.A, 2018).....	17
Figura 2.3 Desarrollo de los pasos preliminares .....	18
Figura 2.4 Desarrollo de las pruebas experimentales.....	21
Figura 2.5 Base de soporte simple para las pruebas de pandeo .....	23
Figura 2.6 Empotramiento por norma (ASTM E 756, 2004).....	25
Figura 2.7 Sistema de empotramiento adaptado para la prueba.....	26
Figura 2.8 Prueba de flexión de 4 puntos.....	27
Figura 2.9 Distribución de esfuerzo en la fuerza máxima.....	28
Figura 3.1 Distribución de espesores por longitud – probeta N°9542 .....	32
Figura 3.2 Distribución de espesores - probeta N° 9542.....	33
Figura 3.3 Distribución de pitting - probeta N° 9542 .....	33
Figura 3.4 Curva de nivel de la probeta corroída N°9542 .....	34
Figura 3.5 Probeta corta después de la limpieza .....	34
Figura 3.6 Esfuerzo máximo .....	35
Figura 3.7 Distribución de espesores - probeta corta N° 4.1.....	37
Figura 3.8 Curva de nivel de la probeta corta de 155 mm .....	38
Figura 3.9 Probeta corta después de la limpieza .....	38
Figura 3.10 Prueba de pandeo de probeta corta no corroída.....	39
Figura 3.11 Fuerza vs desplazamiento - probetas cortas.....	39
Figura 3.12 Relación de esbeltez vs esfuerzo crítico .....	40
Figura 3.13 Cociente de espesor equivalente y espesor original.....	41
Figura 3.14 Distribución de espesores de Probeta N°1 – L: 200 mm .....	43
Figura 3.15 Resultado de prueba de vibración resonante – probeta corroída 1, L: 215 mm .....	44
Figura 3.16 Factor de amortiguamiento experimental - corroído y no corroído.....	45

Figura 3.17 Distribución de frecuencia de espesores - probeta 1.....	46
Figura 3.18 Perfil no uniforme de la superficie superior e inferior generado por el pitting – probeta 1.....	47
Figura 3.19 Vista Isométrica de la distribución de pitting.....	48
Figura 3.20 Resultados de Fuerza vs tiempo.....	49

### Índice de tablas

Tabla 1.1 Designación para las pruebas estáticas y dinámicas de placas de acero naval .....	8
Tabla 1.2 Dimensiones estándar de espécimen tipo lámina (ASTM E8/E8M, 2016) .....	9
Tabla 2.1 Dimensiones de platinas para los ensayos destructivos y no destructivos.....	19
Tabla 2.2 Dimensiones de los especímenes de Tensión simples .....	19
Tabla 2.3 Especímenes para prueba de pandeo.....	23
Tabla 2.4 Especímenes para prueba de vibración .....	25
Tabla 3.1 Resultados de estadística descriptiva en probetas de tensión.....	32
Tabla 3.2 Resultados estadísticos para probetas corroídas de pandeo .....	36
Tabla 3.3 Cuantificación de espesores por probetas .....	37
Tabla 3.4 Cuadro de resumen – características de las probetas cortas.....	40
Tabla 3.5 Parámetros estadísticos de las probetas para pruebas de vibración resonante y flexión .....	42
Tabla 3.6 Frecuencia natural experimental, teórica y f1 y f2.....	44
Tabla 3.7 Resultados estadísticos de las distribuciones de espesor .....	46
Tabla 3.8 Resultados de fuerza de fluencia y fuerza última teórico .....	49
Tabla 3.9 Resultados de espesor efectivo.....	50

# Capítulo 1

## **1. INTRODUCCIÓN**

Ecuador cuenta con flotas de embarcaciones con diferentes edades de operación. La Dirección General de la Marina Mercante y del Litoral en la resolución No. 139/01 en el Anexo 22 NOT3, establece que “el tiempo de vida útil para embarcaciones de acero, aluminio y fibra de vidrio es 30 años” (DIRNEA, 2001). Sin embargo, en la revista Líderes el presidente de la Cámara Nacional de Pesquería (CNP) Bruno Leone mencionó “que la flota atunera tiene en promedio 40 años” (Pesantes, 2018). Es decir, algunas embarcaciones pesqueras industriales ecuatorianas superan los años establecidos por la resolución de la DIRNEA. Como consecuencia, las embarcaciones al superar los años de operación con exposición a un ambiente salino soportan deterioro en su material estructural y es necesario evaluar su resistencia en esas condiciones.

Algunos registros de los accidentes y fallas estructurales en buques nacionales muestran que son causados por la corrosión. El deterioro por corrosión en materiales metálicos produce reducción del espesor con irregularidad en la superficie por las picaduras. Además, algunos expertos indican que el grado de afectación por este fenómeno varía de acuerdo al agresivo ambiente al que está expuesto el material. De manera que este efecto produce una reducción en la resistencia de miembros estructurales (Nakai y Yamamoto, 2008). Como consecuencia de este deterioro algunas embarcaciones pesqueras en Ecuador han sufrido colapso en estructuras del mástil; por ejemplo, últimamente se produjeron colapsos en los buques pesqueros “Miranda” (Delgado R, 2021/05) y “Rosa” (Soria M, 2022/06), generando pérdidas económicas para los armadores y con peligro de pérdidas humanas y ambientales.

### **1.1 Descripción del problema**

La corrosión es un fenómeno electroquímico que causa diferentes efectos sobre materiales metálicos. El libro Marine and Offshore Corrosión explica que la corrosión en un ambiente salino

es similar a una celda electroquímica, que consiste básicamente en la composición de dos electrodos sumergidos en un electrolito, esto es, un líquido conductor de electricidad (Chandler, 1985). También, dicho autor describe que la corrosión ocurre en el ánodo, mientras que, el cátodo es el electrodo que recibe una corriente positiva desde la solución. Además, Melchers en el capítulo 4 del libro “Condition assessment of aged structures” explica que el producto de la corrosión se caracteriza por el color marrón rojizo y con el paso del tiempo produce una acumulación de capas de óxido en el acero corroído. Este apilamiento impide la difusión de oxígeno a la superficie corroída, causando un retraso en el proceso de corrosión (R. E. Melchers, 2008). Por otra parte, de acuerdo con el grado de afectación del material los expertos (Nakai y Yamamoto, 2008) establecen dos tipos de corrosión: general que produce un grado de afectación total en la superficie del material y localizada o picadura (“pitting”) que genera superficies muy irregulares por las ampollas de óxido. Finalmente, los efectos que causa la corrosión en los metales es uno de los factores dominantes que limitan la vida del material generando reducción del espesor y posibles cambios en sus propiedades mecánicas.

Varios investigadores comentan que la corrosión causada en miembros estructurales afecta las características mecánicas del material, sin embargo, otros indican que no cambian. (Nakai y Yamamoto, 2008) mencionan que la capacidad máxima de carga en miembros estructurales es afectada por corrosión, debido a que uno de los efectos es la disminución del espesor promedio. Previamente se ha descrito los tipos de corrosión general y localizada, los investigadores anteriormente mencionados han determinado experimentalmente que la resistencia a la tracción nominal de las planchas con pitting es mayor que aquellas con corrosión general debido a la pérdida de espesor promedio. Cabe recalcar que, ellos analizaron las cuadernas de bodegas de buques graneleros formando vigas tipo I. Ellos encontraron que los efectos de corrosión por pitting más severos se producen en las almas de las vigas, porque generalmente son más delgadas que

otros elementos estructurales como el planchaje de la cuaderna o el ala. Asimismo, es posible que las características dinámicas como el factor de amortiguamiento sufran cambios por el efecto corrosivo; este factor mide la capacidad de disipación de energía y ayuda a reducir la amplitud de vibración. Además, en el análisis de las propiedades mecánicas de (Woloszk y Garbatov, 2022), quienes trabajaron con probetas corroídas en un ambiente salino mencionan que “al considerar la pérdida del espesor promedio, determinaron que el porcentaje de corrosión supera el 20% y la pérdida de propiedades mecánicas como el Módulo de Young y la tensión última es evidente”. Finalmente, la reducción de propiedades mecánicas como el módulo de Young y las características geométricas como el espesor causadas por la corrosión reduce la resistencia de la estructura y produce una disminución en la máxima carga que puede soportar. De igual manera, las características dinámicas en miembros estructurales se ven afectados por la corrosión generando cambios en la capacidad de disipación de energía del material.

El proceso de corrosión origina superficies con perfiles irregulares no permite realizar cálculos determinísticos de una estructura que sufre este efecto. Al no tener certeza en los cambios de las características estáticas y dinámicas de las estructuras con perfiles aleatorias, es complejo desarrollar cálculos analíticos ya que es poco real trabajar con un espesor promedio. Por ejemplo, en el análisis de vigas de sección cajón naturalmente corroídas (Fiolek and Jakubowski, 2021), consideraron un espesor promedio de vigas y como resultado observaron que “no causaron una reducción apreciable de las propiedades de resistencia del material de acero”. Sin embargo, otros autores muestran que “además de la reducción del espesor, la corrosión tiene un efecto adicional al cambiar las propiedades mecánicas del material” (C. Guedes Soares, 2012). Por esta razón es necesario realizar y aplicar localmente pruebas experimentales a especímenes afectados por corrosión que permitan identificar los cambios que este fenómeno produce en el material.

## **1.2 Justificación del problema**

La corrosión causa en las planchas superficies muy complejas de describir y esto no permite realizar una estimación confiable de las características estructurales. El desgaste que causa este fenómeno electroquímico genera un perfil de forma irregular y como consecuencia el espesor no es uniforme en toda la superficie. Para determinar los efectos producidos por la corrosión en las características del material una opción es desarrollar pruebas mecánicas destructivas y no destructivas. Por ejemplo, para obtener las características estáticas en elementos con influencia de la corrosión de vigas y columnas se pueden desarrollar pruebas de tensión simple, flexión en 4 puntos y pandeo elástico y plástico. Con estas pruebas se puede determinar las propiedades mecánicas y la resistencia última del elemento estructural. Finalmente, para obtener las características dinámicas como el factor de amortiguamiento se pueden desarrollar pruebas de vibración forzada en vigas prismáticas y a través de la respuesta en zonas de resonancia se puede estimar el coeficiente de disipación de energía.

Actualmente, en embarcaciones pesqueras ecuatorianas se han suscitado varios accidentes por colapso de estructuras locales como se mencionó en la primera parte de este reporte. Una de las principales causas que produce dichos colapsos es el desgaste y deterioro de las propiedades mecánicas por efecto de la corrosión, causando una disminución en la capacidad de carga de la estructura. Dichos accidentes pueden causar pérdidas humanas e impactos ambientales y económicos. Por consiguiente, amerita determinar experimentalmente las propiedades del material estructural para finalmente estimar la reducción en su resistencia al colapso.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Identificar los efectos de la corrosión en características estáticas y dinámicas de especímenes de acero naval a través de pruebas experimentales para representar adecuadamente su efecto y evitar el futuro colapso de estructuras en buques.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

1. Describir el perfil de la superficie no uniforme de planchas afectadas por corrosión con exposición real, empleando herramientas estadísticas.
2. Determinar las características mecánicas de material corroído por exposición real mediante pruebas estándares.
3. Comparar las características mecánicas de especímenes corroídos y sin corrosión obtenidos mediante la aplicación de ensayos estáticos y dinámicos.

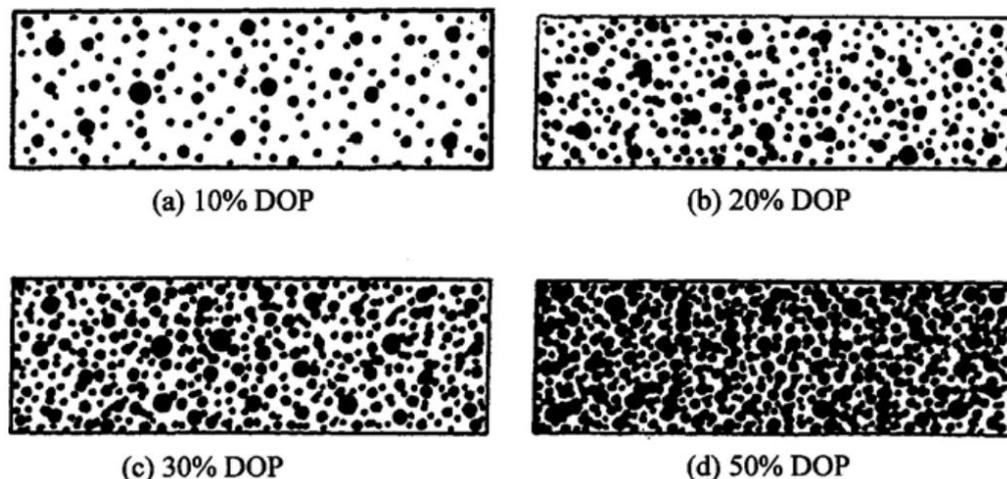
## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Descripción del perfil de la superficie no uniforme afectado por la corrosión**

Las planchas afectadas por corrosión tienden a reducir su espesor de manera no uniforme con el tiempo. Varios investigadores han clasificado a la corrosión de acuerdo al grado de afectación como general y localizada. (Paik et al, 2003), en su estudio de placas con desgaste por corrosión, desarrolló un método de evaluación que utiliza el “grado de intensidad de corrosión por picadura (DOP) como el porcentaje entre la relación del área superficial corroída y área superficial original de la placa”. Los investigadores japoneses (Nakai y Yamamoto, 2008) tomaron muestras de vigas tipo I de un buque granelero de 13 años de servicio para estudiar el grado de intensidad por picadura y se evidenció que la disminución del espesor varía en la superficie obteniendo un rango de afectación en el alma de viga de 7% a 98%. Finalmente, dichos investigadores determinaron

que al existir una disminución de espesor de 2 mm el DOP alcanza el 100% del área, originando el progreso de corrosión general.

El efecto corrosivo ocasionado con el tiempo puede representarse con el grado de intensidad de corrosión por picadura. A continuación, la Figura 1.1 presenta el diagrama de intensidad de picadura (DOP) establecido por (Paik et al, 2003). Los autores tomaron muestras del fondo del tanque de buques petroleros, y asumieron que la forma de corrosión por picadura es tipo circular y dispersa en la placa debido a la afectación. Ellos tomaron como afectación mínima del 10% del DOP debido a la menor incidencia de pitting a lo largo de la placa, mientras que, una afectación del 30% del DOP muestra mayor presencia de pitting y cercanía entre picadura a lo largo de la placa. Una afectación del 50% del DOP presenta mayor incidencia de pitting a lo largo de la placa en el cual no se puede divisar la geometría de la picadura.



**Figura 1.1 Diagrama de intensidad de picadura (Paik et al, 2003)**

#### **1.4.2 Variación de las propiedades mecánicas en materiales corroídos**

Existen controversias entre algunos investigadores por el cambio que sufren las propiedades mecánicas causadas por el efecto de corrosión. Por ejemplo, (R. E. Melchers, 2008) indica que el efecto de la corrosión del acero puede cambiar sus propiedades elásticas y dinámicas. Mientras

que, (Fiolek and Jakubowski, 2021) en su experimentación con probetas con material bajo corrosión natural determinaron que los procesos de corrosión no causan una reducción apreciable de las propiedades de resistencia del material. Estas controversias obligan a seguir investigando el efecto que provoca el fenómeno de la corrosión sobre las propiedades mecánicas de materiales estructurales.

Organizaciones para normalización de materiales proporcionan ensayos estandarizados para el análisis de propiedades mecánicas de planchas bajo efectos corrosivos. Estas pruebas estándar para planchas de acero corroídas incluyen pruebas destructivas y no destructivas como (ASTM E8/E8M, 2016), (ASTM G 39, 2019), (ASTM E 756, 2004), (SCI, 2012). A continuación, en la Tabla 1.1 se presenta un listado de pruebas estandarizadas estáticas y dinámicas tanto para especímenes corroídos como no corroídos.

**Tabla 1.1** Designación para las pruebas estáticas y dinámicas de placas de acero naval

<b>Siglas</b>	<b>Estándar</b>	<b>Prueba</b>
<sup>1</sup> ASTM	E-8/E-8M	Métodos de ensayo normalizado para ensayos de tracción de materiales metálicos.
	G-39	Preparación y uso de probetas de ensayo de corrosión bajo tensión.
<sup>2</sup> SCI	ED008	Pandeo elástico y plástico para determinar el esfuerzo último de probetas corroídas.
ASTM	E-756	Determinación del factor de amortiguamiento de materiales.

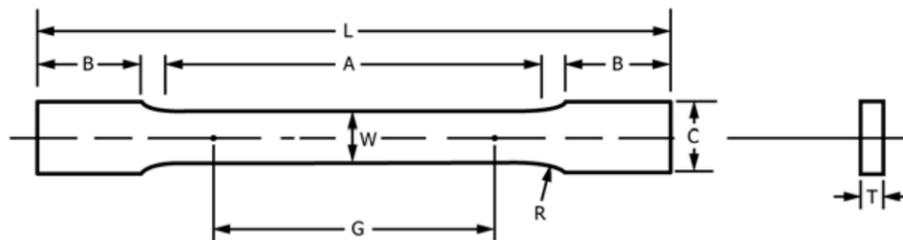
---

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials

<sup>2</sup> Steel Construction Institute

### 1.4.3 Estudio experimental de tracción en platinas con efecto corrosivo

Ensayos mecánicos estandarizados de tracción simple permiten evaluar las propiedades mecánicas de materiales estructurales. Por ejemplo, la norma (ASTM E8/E8M, 2016), establece longitudes calibradas para la prueba de tracción de materiales metálicos. A continuación, en la Figura 1.2 se muestra las dimensiones estándar para probetas de acero rectangular tipo lámina con ancho de 12.5 mm. Estas probetas deben ser construidas rigiéndose a las medidas dadas por la norma para desarrollar exitosamente un ensayo de tracción.



**Figura 1.2** Espécimen rectangular para pruebas de tracción (ASTM E8/E8M, 2016).

**Tabla 1.2** Dimensiones estándar de espécimen tipo lámina (ASTM E8/E8M, 2016)

Espécimen Estándar	mm [in]
G – Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
W – Width	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
T – Thickness	Thickness of material
R – Radius of fillet, min	12.5 [0.500]
L – Overall length, min	200 [8]
A – Length of reduced parallel section, min	57 [2.25]
B – Length of grip section, min	20 [2]
C – Width of grip section, approximate	20 [0.750]

### 1.4.4 Pandeo de columnas corroídas

El fenómeno de pandeo en especímenes corroídos se produce a una menor carga crítica que en especímenes no corroídas. El pandeo es un fenómeno en el que se produce abruptamente una

deflexión lateral de un elemento sometido a compresión. El desgaste que genera la corrosión en las estructuras produce una reducción de la inercia seccional y por tanto la posibilidad de pandear con una carga menor a la original. Por tal razón existen varios estudios de pandeo con materiales corroídos. Por ejemplo, el investigador (Rahbar-Ranji, 2012) analizó la carga última de placas corroídas bajo compresión en el plano; para determinar la carga última utilizó un método aproximado mediante el uso de una distribución de tensión uniforme empleando la ecuación (1.3) considerando el espesor uniforme y el esfuerzo de fluencia del material. Además, el investigador propuso la ecuación (1.4) para el esfuerzo último en función de imperfección de la placa ( $w_p$ ), esfuerzo residual ( $\sigma_{red}$ ), esbeltez ( $\beta$ ) y ancho ( $b$ ).

La ecuación de la resistencia última de la placa por (Rahbar-Ranji, 2012) es:

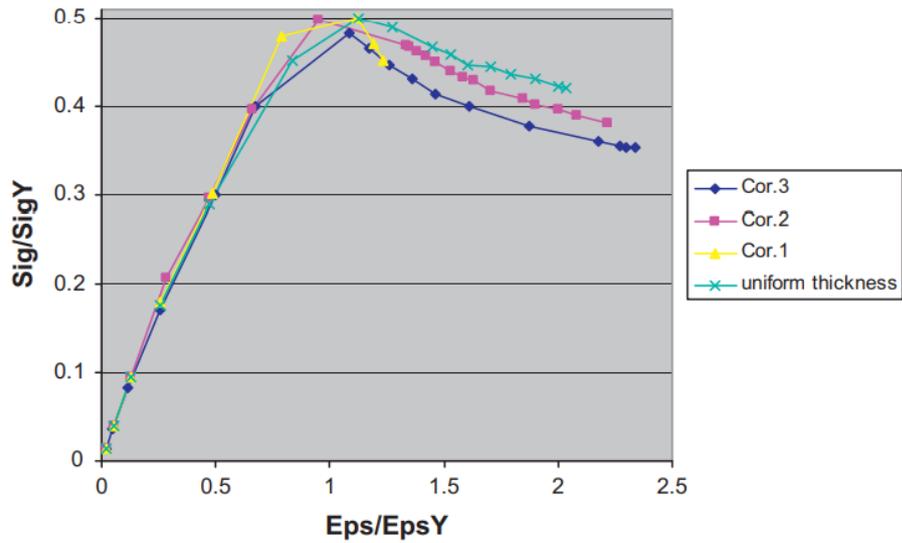
$$P_{Ult} = b t \sigma_m = b_{eff} t \sigma_y \quad (1.1)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} = f\left(\beta, \sigma_{red}, w_p, \frac{a}{b}\right) \quad (1.2)$$

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1.3)$$

$$w_p = 0.1\beta^2 t \quad (1.4)$$

Uno de los resultados que obtuvieron se muestran en la Figura 1.3 que presenta el acortamiento vs carga para placas con diferentes condiciones de corrosión con espesor uniforme y superficies irregulares.

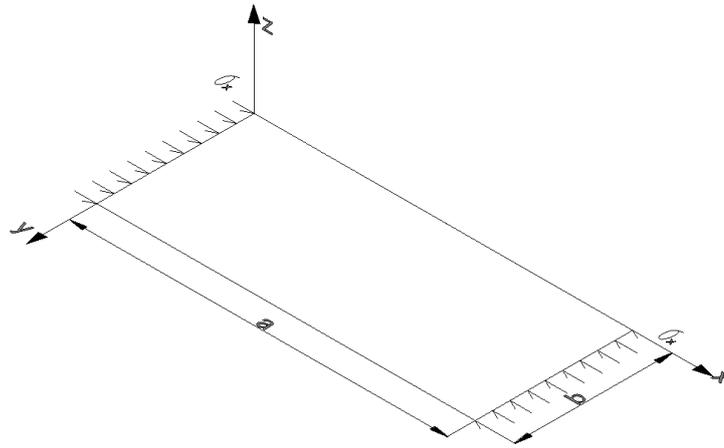


**Figura 1.3 Curva de acortamiento de carga en placas con diferentes condiciones de corrosión (Rahbar-Ranji, 2012)**

Para evaluar el pandeo, el libro “Mecánica de Sólidos” de Popov presenta la ecuación de la carga última para pandeo elástico, ecuación (1.5) que incluye dimensiones de la plancha y del material. En el denominador aparece la relación de esbeltez ( $L/k_{zz}$ ) parámetro importante que influye en la estabilidad de la placa.

$$\sigma_{el} = \frac{\pi^2 EI_C}{\left(\frac{L}{K_{zz}}\right)^2} \quad (1.5)$$

El diagrama de distribución de fuerza permite mostrar el método de prueba aplicado, carga ó desplazamiento uniformes en una plancha. En la Figura 1.4 se muestra una aplicación uniforme de fuerza axial en el plano. Este esquema clásico permite estimar empleando métodos de energía el esfuerzo para alcanzar el pandeo de una plancha.



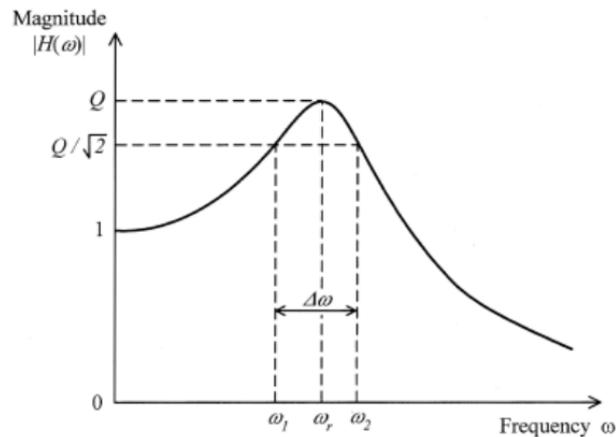
**Figura 1.4 Diagrama de cargas axiales en la placa (PhD. José Marín, 2021)**

#### **1.4.5 Estudio del factor de amortiguamiento en material corroído**

La corrosión desarrollada en un elemento estructural es posible que afecte su capacidad de disipación de energía. Para evaluar la capacidad de disipación energía del elemento se puede utilizar el factor de amortiguamiento determinado en forma experimental. Por ejemplo, (Himanshu Mevada, 2015) en su artículo para estimar el factor de amortiguamiento en vigas empleó el método de estudio “Half power bandwidth method”, como se muestra en la Figura 1.5. Este es también conocido como el método “Sharpness of resonance” por (Thomson & Dillon Dahleh, 2005) y menciona que en las vibraciones forzadas existe una cantidad de amplitud de respuesta ( $Q$ ) relacionada con el amortiguamiento que es una medida de agudez de resonancia.

Una forma común de expresar el amortiguamiento es a través de  $\xi$  que representa el porcentaje del amortiguamiento crítico. Para determinar este parámetro se puede emplear la ecuación (1.6) la cual relacionan las variables de la Figura 1.5 que depende de la frecuencia natural ( $\omega_r$ ) y del rango de frecuencias a una respuesta igual a la máxima  $Q$ , dividida para ( $\sqrt{2}$ ).

$$\xi = \frac{1\Delta\omega}{2\omega_r} \quad (1.6)$$



**Figura 1.5 Método de ancho de banda de media potencia (Himanshu Mevada, 2015)**

Finalmente, los resultados del factor de amortiguamiento que obtuvo el investigador mencionado para una viga de acero fue 0.0069, teniendo una reducción del 11% con respecto al factor del material de acero dulce no corroído.

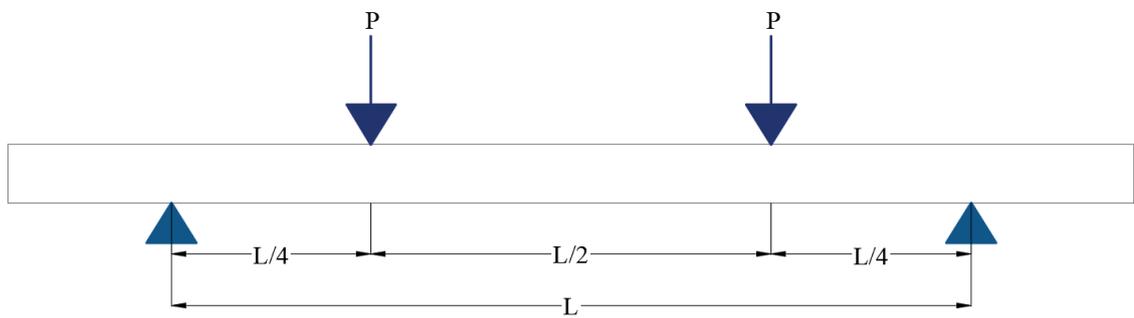
#### **1.4.6 Estudio experimental de la deflexión en platinas bajo el efecto de la corrosión**

La máxima deflexión en una viga permite medir la capacidad de carga de un elemento estructural en flexión. En la prueba de 4 puntos se aplica una fuerza puntual total y este se distribuye de manera uniforme a través de dos soportes. El momento máximo en el centro desarrollado por la fuerza permite determinar la deflexión máxima y a través de ella se puede medir la carga última que se puede aplicar sobre la viga. En el estudio realizado por (C. Guedes Soares, 2012), se analiza vigas con pruebas de 4 puntos produciendo un momento de flexión hasta el colapso. El investigador reporta que la capacidad de carga de una viga cajón se redujo al 65% por desgaste por corrosión, y la fractura ocurrió en los refuerzos de la caja severamente corroídas. Para analizar la flexión descrita, (Popov E. P, 2000) presenta la ecuación diferencial gobernante de la deflexión de viga para la prueba de cuatro puntos en la ecuación (1.7) que relaciona las características geométricas de la viga con la fuerza a la cual se encuentra sometida.

$$v = -\frac{11L^3P}{384EI}\sigma_{el} \quad (1.7)$$

donde  $E$  es el módulo de Young del material,  $L$  la longitud de la viga y  $I_c$  es el momento de inercia de la sección.

A continuación, en la Figura 1.6 se presenta el diagrama de cuerpo libre del análisis de deflexión de 4 puntos.



**Figura 1.6 Esquema de la prueba de cuatro puntos**

## **Capítulo 2**

## 2. METODOLOGÍA

Los efectos de la corrosión sobre la resistencia estructural son complejos y dejan algunas incógnitas para su consideración. Para determinar los efectos que causan la corrosión originada por los años de operación en embarcaciones nacionales, en este trabajo se empezó con una visita técnica al buque tanquero Libertad I, Figura 2.2 (Apéndice A), en la que se tomaron muestras de desechos y de material nuevo que se estaba empleando para reemplazarlo. Este trabajo se dividió en dos etapas preliminar y experimental.

### 2.1 Descripción del procedimiento

Para alcanzar el objetivo del proyecto, fue necesario dividir el procedimiento en etapas preliminar y experimental. En la Figura 2.1 se muestran los pasos que se realizaron para el desarrollo del proyecto.

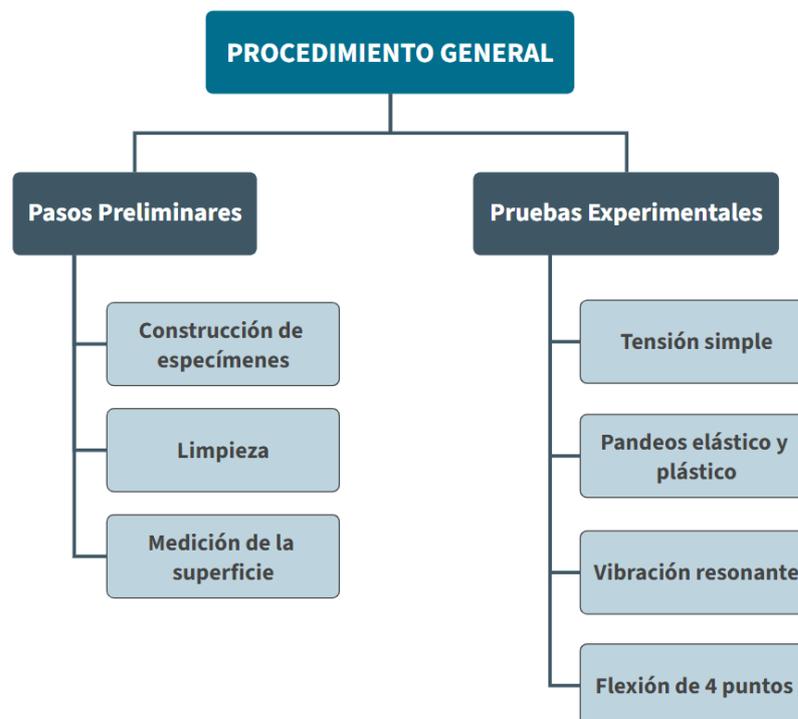
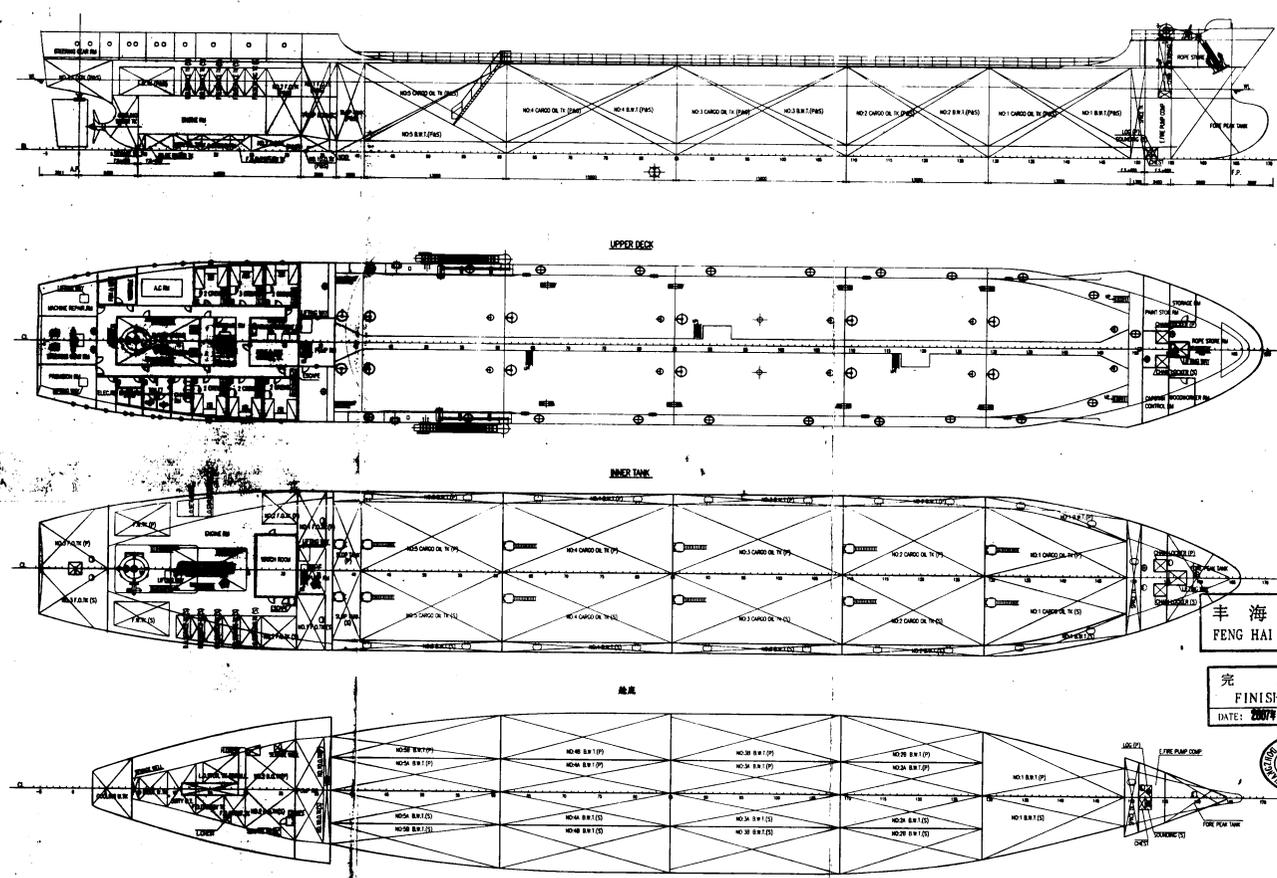


Figura 2.1 Procedimiento general



REVISION RECORD				
REV. NO.	REV. QUANTITY	REASON	REVISION BASIS	DATE

DEADWEIGHT SCALE						
MAIN DECK LINE	DWT (Tons)	DISPLAC. MET. TONNAGE		DWT (Tons)	DWT (Tons)	TARE (Tons)
		(CUBIC)	(CUBIC)			
7.00	10245	9048	15.82	126.75	0.81	
	10292	7982	15.36	118.51		
	10339	7139	15.50	116.36		
	10386	7265	15.43	117.02		
6.00	8963	7532	15.36	116.78		
	9010	7530	15.30	115.54	1.31	
	9057	7128	15.23	113.31		
	9104	6979	15.17	112.98		
5.00	8332	6952	15.10	110.98		
	8379	6551	15.03	108.85		
	8426	6233	14.97	106.61	1.81	
	8473	6374	14.90	102.25		
4.00	8127	6207	14.83	100.87		
	8174	6081	14.76	101.69		
	8221	6034	14.69	103.36		
	8268	5798	14.62	102.08	2.21	
3.00	8063	6047	14.75	103.36		
	8110	5889	14.67	99.43		
	8157	5500	14.60	98.15		
	8204	5432	14.53	96.15		
2.00	8098	5098	14.50	95.65	2.81	
	8145	4942	14.43	95.45		
	8192	4786	14.36	92.25		
	8239	4631	14.29	90.36		
1.00	8033	4502	14.22	88.41	3.31	
	8080	4346	14.15	86.41		
	8127	4190	14.08	84.42		
	8174	4034	14.01	82.42		
0.00	8068	4087	13.94	80.42		
	8115	3931	13.87	78.42		
	8162	3775	13.80	76.42		
	8209	3619	13.73	74.42		
-1.00	8003	3463	13.66	72.42		
	8050	3307	13.59	70.42		
	8097	3151	13.52	68.42		
	8144	2995	13.45	66.42		
-2.00	7938	2839	13.38	64.42		
	7985	2683	13.31	62.42		
	8032	2527	13.24	60.42		
	8079	2371	13.17	58.42		
-3.00	7881	2215	13.10	56.42		
	7928	2059	13.03	54.42		
	7975	1903	12.96	52.42		
	8022	1747	12.89	50.42		
-4.00	7824	1691	12.82	48.42		
	7871	1535	12.75	46.42		
	7918	1379	12.68	44.42		
	7965	1223	12.61	42.42		
-5.00	7767	1067	12.54	40.42		
	7814	911	12.47	38.42		
	7861	755	12.40	36.42		
	7908	599	12.33	34.42		
-6.00	7710	801	12.36	32.42		
	7757	645	12.29	30.42		
	7804	489	12.22	28.42		
	7851	333	12.15	26.42		
-7.00	7653	645	12.08	24.42		
	7700	489	12.01	22.42		
	7747	333	11.94	20.42		
	7794	177	11.87	18.42		

COMPARTMENT NAME	FRAME NO.	VOLUME (m <sup>3</sup> )	CAPACITY (t)	VCG (m)	LCG (m)
NO.28 B.W.T (S)	FR 109 - 129	165.329	168.462	3.544	24.075
NO.1 B.W.T (S)	FR 129 - 149	195.71	190.55	3.876	36.858
NO.1 B.W.T (S)	FR 129 - 149	182.71	180.35	3.875	36.508
FORMER PEAK TANK	FR 135 - 8	182.63	181.19	5.002	50.943
NO.1 CARGO OIL TK (P)	FR 129 - 149	449.96	449.96	5.383	38.271
NO.1 CARGO OIL TK (S)	FR 129 - 149	449.96	449.96	5.383	38.271
NO.2 CARGO OIL TK (P)	FR 109 - 129	855.28	855.28	5.150	23.949
NO.2 CARGO OIL TK (S)	FR 109 - 129	855.28	855.28	5.150	23.949
NO.3 CARGO OIL TK (P)	FR 85 - 109	820.80	820.80	5.103	9.80
NO.3 CARGO OIL TK (S)	FR 85 - 109	820.80	820.80	5.103	9.80
NO.4 CARGO OIL TK (P)	FR 61 - 85	820.35	820.35	5.104	-5.796
NO.4 CARGO OIL TK (S)	FR 61 - 85	820.35	820.35	5.104	-5.796
NO.5 CARGO OIL TK (P)	FR 41 - 61	843.80	843.80	5.204	-19.958
NO.5 CARGO OIL TK (S)	FR 41 - 61	843.80	843.80	5.204	-19.958

COMPARTMENT NAME	FRAME NO.	VOLUME (m <sup>3</sup> )	CAPACITY (t)	VCG (m)	LCG (m)
NO.5A B.W.T (P)	FR 37 - 61	54.563	55.927	0.551	-21.368
NO.5A B.W.T (S)	FR 37 - 61	54.563	55.927	0.551	-21.368
NO.5B B.W.T (P)	FR 37 - 61	191.816	198.811	3.773	-21.287
NO.5B B.W.T (S)	FR 37 - 61	191.816	198.811	3.773	-21.287
NO.4A B.W.T (P)	FR 61 - 85	54.855	56.021	0.550	-5.800
NO.4A B.W.T (S)	FR 61 - 85	54.855	56.021	0.550	-5.800
NO.4B B.W.T (P)	FR 61 - 85	198.817	203.582	3.235	-5.740
NO.4B B.W.T (S)	FR 61 - 85	198.817	203.582	3.235	-5.740
NO.5A B.W.T (P)	FR 85 - 109	54.855	56.021	0.550	8.800
NO.5A B.W.T (S)	FR 85 - 109	54.855	56.021	0.550	8.800
NO.3B B.W.T (P)	FR 85 - 109	199.871	204.888	3.213	9.790
NO.3B B.W.T (S)	FR 85 - 109	199.871	204.888	3.213	9.790
NO.2A B.W.T (P)	FR 109 - 129	45.444	46.684	0.502	24.100
NO.2A B.W.T (S)	FR 109 - 129	45.444	46.684	0.502	24.100
NO.2B B.W.T (P)	FR 109 - 129	165.329	168.462	3.544	24.075

COMPARTMENT NAME	FRAME NO.	VOLUME	CAPACITY	VCG	LCG
NO.3 F.O.TK (P)	FR 8 - 5	71.884	66.662	7.627	-52.324
NO.3 F.O.TK (S)	FR 8 - 5	71.884	66.662	7.627	-52.324
F.W.TK (P)	FR 14	24.587	24.267	7.288	-48.398
F.W.TK (S)	FR 14	24.587	24.267	7.288	-48.398
L.O.SETTLING TK (P)	FR 15 - 18	4.147	3.733	7.427	-42.487
L.O.SETTLING TK (S)	FR 15 - 18	3.664	3.289	7.29	-40.878
L.O.STORM TK FOR M.E.	FR 18 - 19	10.127	8.966	7.162	-42.122
F.O.SERVICE TK (S)	FR 18 - 24	17.315	16.103	7.036	-38.202
F.O.SETTLING TK (S)	FR 24 - 27	12.462	11.580	6.897	-36.657
NO.2 F.O.TK (P)	FR 27 - 32	23.478	21.833	6.907	-34.041
NO.2 F.O.TK (S)	FR 27 - 32	23.478	21.833	6.907	-34.041
NO.1 F.O.TK (P)	FR 32 - 36	44.191	41.096	7.150	-31.139
NO.1 F.O.TK (S)	FR 32 - 36	44.191	41.096	7.150	-31.139
SLOP TANK (P)	FR 37 - 41	115.93	115.93	5.404	-27.889
SLOP TANK (S)	FR 37 - 41	115.93	115.93	5.404	-27.889
COOLING W.TK	FR 8	20.385	20.285	3.481	-48.383
BILGE W.TK	FR 10 - 14	7.832	7.832	0.971	-45.249
DRIFT O.I.	FR 14 - 18	11.328	11.328	0.923	-42.738
L.O.STORM TK FOR M.E.	FR 18 - 24	8.915	8.023	0.985	-39.158
F.O.SERVICE TK	FR 18 - 22	8.084	5.840	0.985	-40.143
F.O.DRIFT O.I.	FR 22 - 25	5.970	5.552	0.948	-37.822
NO.2 D.O.TK (P)	FR 25 - 32	23.459	19.705	0.907	-34.804
NO.2 D.O.TK (S)	FR 25 - 32	23.417	19.611	0.907	-34.804
NO.1 D.O.TK (P)	FR 32 - 36	14.324	12.032	0.781	-31.226
NO.1 D.O.TK (S)	FR 32 - 36	14.221	12.029	0.781	-31.226

**PRINCIPLE PARTICULARS**

LENGTH O.A. ~113.08 m  
 LENGTH B.P. ~103.80 m  
 BREADTH MLD. ~16.70 m  
 DEPTH MLD. ~8.40 m  
 DEPTH DESIGNED ~8.40 m

DEADWEIGHT  
 (d=4.4m) ~2500 t  
 (d=4.90m) ~4300 t

丰海油 1  
 FENG HAI YOU 1

完工图  
 FINISHED PLAN  
 DATE: 2007年 11月 30日



广州市锦东造船设计有限公司 XED Guangzhou XED Ship Design Co., Ltd.  
 Tel: +86-20-3488277 Fax: +86-20-3488277

88888888 Product Oil Tanker XED308-103-02

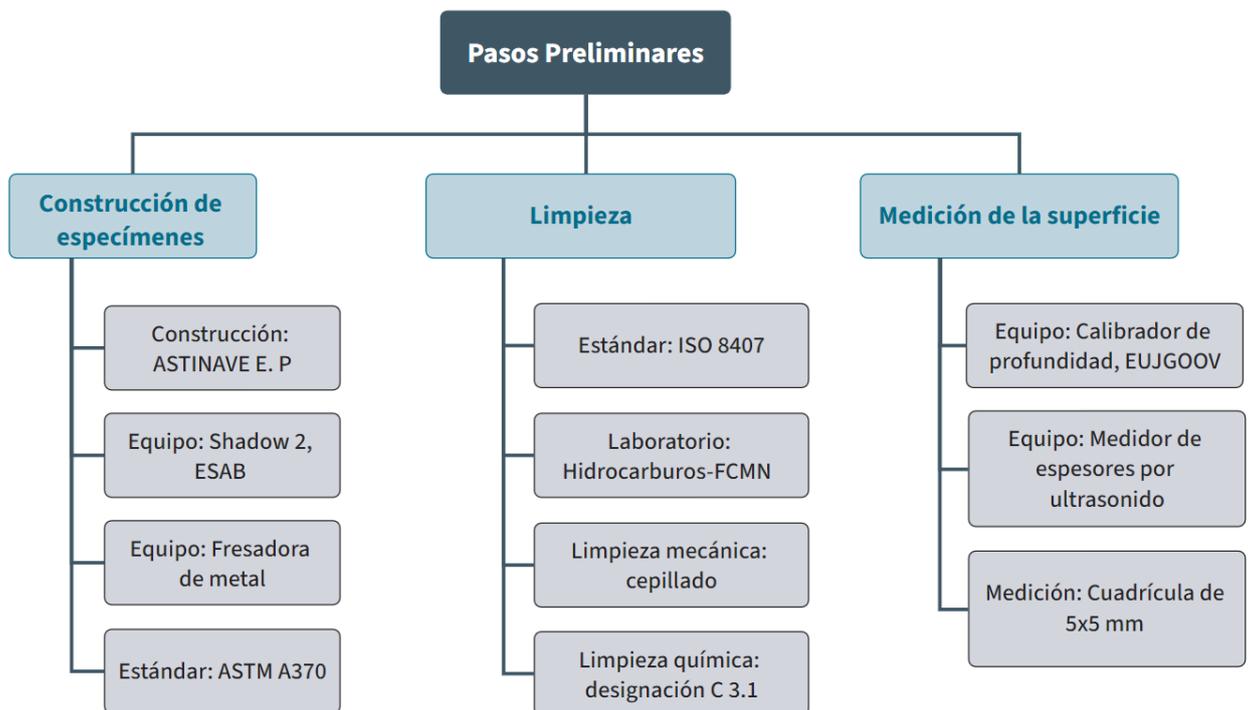
Capacity Plan

1/1 1/200

Figura 2.2 Plano distribución general BT "Libertad I" (CORPETROLSA S.A, 2018)

## 2.2 Pasos preliminares

La etapa preliminar incluye 3 subetapas que permiten llegar a la etapa experimental con los especímenes construidos con planchaje corroído de la cubierta del bolsillo 7 de la banda de babor del buque, como se muestra la Figura 2.2. Luego en la Figura 2.3 se muestra un resumen de los pasos que se realizaron en construcción de especímenes, limpieza química y finalmente la medición de espesores en cada espécimen corroído.



**Figura 2.3 Desarrollo de los pasos preliminares**

### 2.2.1 Detalles de la construcción de los especímenes

Las platinas para los diferentes ensayos fueron seccionadas en una cortadora CNC de pórtico con tracción de dos lados. Este equipo es de la marca ESAB modelo Shadow 2, el cual realiza el corte por plasma con antorcha PT- 35 (ESAB, 2006). Por otra parte, los especímenes para el ensayo de tensión simple fueron mecanizados de acuerdo con el estándar (ASTM E8/E8M, 2016) empleando una fresadora. En la Tabla 2.1 se presentan las dimensiones de las platinas para

los ensayos destructivos y no destructivos. Mientras que en la Tabla 2.2 se muestra las dimensiones de los especímenes según designación E8/E8M.

**Tabla 2.1** Dimensiones de platinas para los ensayos destructivos y no destructivos

N° probetas	Tipo de ensayo	Material	Dimensiones [mm]
5	Destructivo	No Corroído	430x40
5	Destructivo	Corroído	430x40
1	No destructivo	Corroído	470x40

**Tabla 2.2** Dimensiones de los especímenes de Tensión simples

N° probetas	Material	Dimensiones [mm]
1	No Corroído	238.1 x 20
1	No Corroído	238.2 x 20
1	Corroído – esmerilado*	238.6 x 20
1	Corroído – esmerilado*	238.6 x 20
1	Corroído	237.9 x 20
1	Corroído	238.0 x 20

\*Nota: Estas probetas fueron esmeriladas parcialmente, por error del operador.

### 2.2.2 Limpieza de los especímenes

Para la eliminación de corrosión de las muestras se empleó la norma (ISO 8407, 2013). que establece como procedimiento general la limpieza mecánica empleando el cepillado bajo un chorro de agua. De esta manera se eliminaron residuos de corrosión ligeramente adheridos al metal. Posteriormente, se realizó el procedimiento químico establecido por la norma como se presenta en el (Apéndice B). Cabe recalcar que dicha norma menciona la disminución de la masa al emplear el método químico, el cual fue cuantificado.

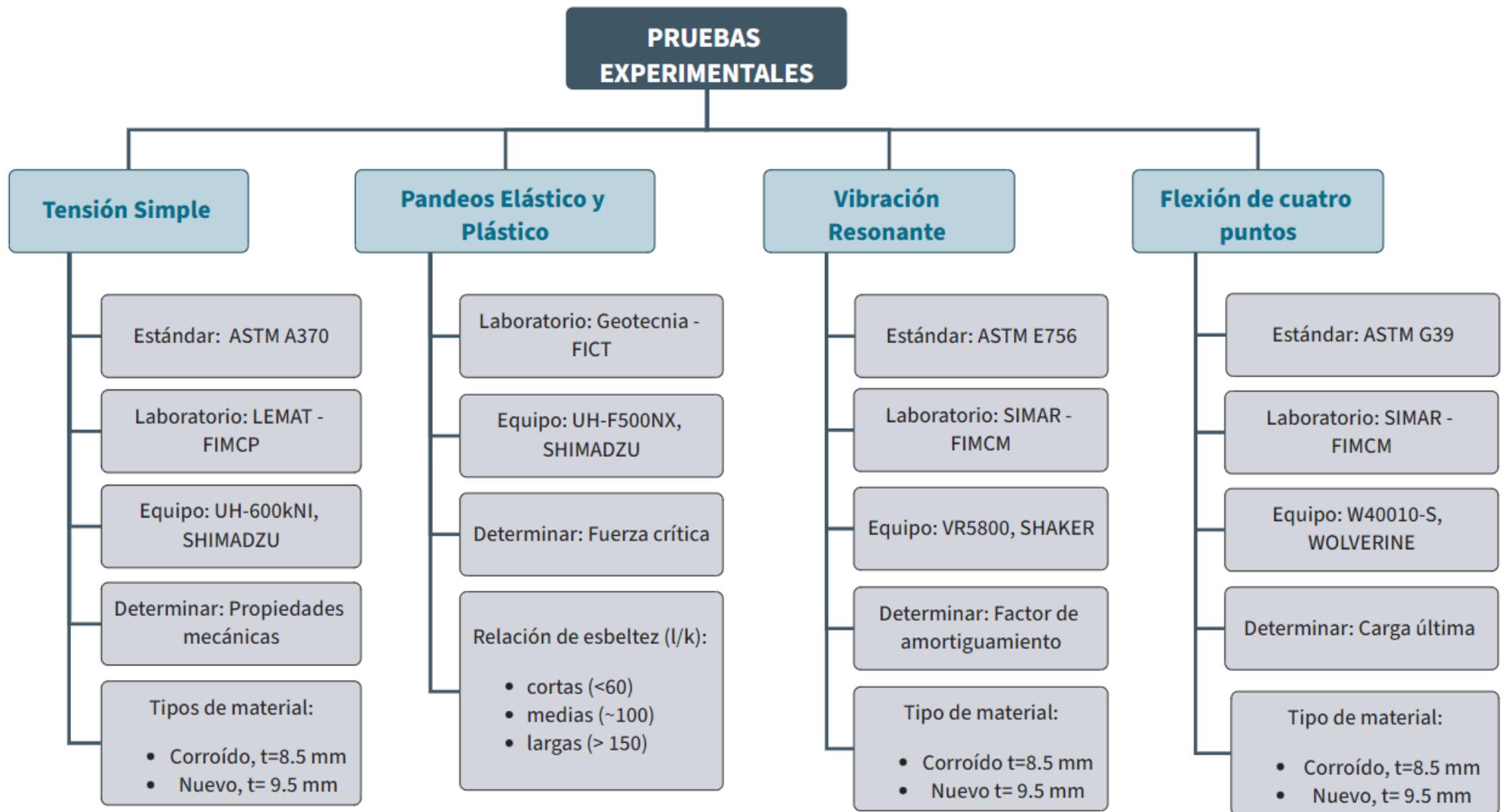
### **2.2.3 Medición de la superficie**

Una de las formas para describir las irregularidades del perfil de los especímenes causados por la corrosión es midiendo espesores y profundidad de picaduras. Para cuantificar las irregularidades de la superficie por picaduras se empleó un calibrador digital de profundidad de la marca Eujgoov con resolución de 0.01 milímetro. Además, se utilizó el medidor de espesores de ultrasonido marca T+M modelo TT100 con resolución 0.1 milímetro (TIME, 2023).

Para describir estadísticamente las superficies irregulares de las muestras fue necesario determinar un adecuado número de mediciones. Para ello, en cada probeta se realizó una cuadrícula de 5x5 mm, y luego en cada cuadrícula se tomó alrededor de 7 medidas de espesor por cada columna.

### **2.3 Pruebas experimentales**

A continuación, en la Figura 2.4 se describen los equipos empleados para cada una de las pruebas desarrolladas.



**Figura 2.4 Desarrollo de las pruebas experimentales**

### **2.3.1 Pruebas de tensión simple**

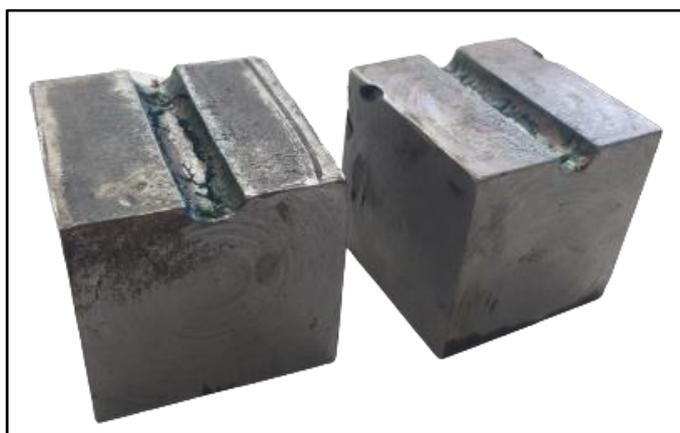
La prueba de tensión simple permite conocer las características mecánicas del material mediante la aplicación de fuerza controlada al espécimen hasta la fractura. Estas pruebas se realizaron con el equipo de ensayo universal hidráulico del laboratorio LEMAT. La máquina es de la marca Shimadzu, modelo UH-600kNI y con capacidad nominal de 3000 KN.

Los especímenes de análisis fueron contruidos de plancha de acero ASTM A131, con un esfuerzo máximo esperado de 550MPa. Para comparar los resultados de las pruebas se clasificó a los especímenes como: corroído-esmerilado, corroído y no corroído, y se determinó el área mínima en cada probeta. Esto permitió establecer la medida de la presión interna del cilindro para cada ensayo.

### **2.3.2 Pruebas de pandeo**

La prueba de pandeo consiste en aplicar carga axial compresiva hasta alcanzar una carga máxima luego de producirse un desplazamiento lateral de la probeta. Esta prueba fue realizada en el laboratorio de Geotecnia en la facultad de Ciencias de la Tierra. Se empleó una máquina de ensayo universal marca Shimadzu, modelo UH-F500NX (KAN, 2023). La capacidad máxima de fuerza del equipo es de 500 KN.

Los soportes en las fronteras de las columnas son importantes y para evitar pérdida de magnitud de carga. Las condiciones de frontera de las pruebas de pandeo en los especímenes fueron de simple soporte. Para representar estas condiciones se construyeron dos bases metálicas ranuradas semicilíndricas de 10 mm de diámetro y se las lubricó con grasa como se muestra en la Figura 2.5. Finalmente, para que las probetas se asienten adecuadamente en la base el extremo de las probetas, fueron biselados.



**Figura 2.5 Base de soporte simple para las pruebas de pandeo**

Para determinar las dimensiones de los especímenes de esta prueba se emplearon como referencia soluciones analíticas. Por ejemplo, la longitud de las placas se obtuvo a partir de la ecuación de carga crítica del capítulo 1 en marco teórico, para ello se consideraron razones de esbeltez ( $L/k$ ) de 150, 100, 80 y 60, con espesores promedio de 8.5 y 9.5 mm. En la Tabla 2.3 se muestra la clasificación de las probetas. Finalmente, la prueba de pandeo permite determinar la carga crítica hasta alcanzar el límite de fluencia.

**Tabla 2.3 Especímenes para prueba de pandeo**

<b>N° probetas</b>	<b>Material</b>	<b>Descripción</b>	<b>L/k</b>
13	Corroído	Largas	175
	Corroído	Medianas	112
	Corroído	Cortas	63
	No Corroído	Mediana	100
	No Corroído	Mediana -corta	78
	No Corroído	Cortas	62

### 2.3.2.1 Proceso para determinar el espesor efectivo de las probetas

El espesor efectivo es una propiedad del material que se usa para describir la reducción efectiva respecto al espesor original. Como la corrosión causa reducción de espesor no uniforme, se requiere determinar un valor de espesor efectivo de las probetas corroídas. Para el caso de probetas largas el pandeo es tipo elástico y para estimar la capacidad se emplea la ecuación (2.1), ecuación de Euler. Pero en probetas medianas y cortas, el pandeo es de tipo plástico y para estimar la capacidad se evaluó con la ecuación (2.3) establecido por (DNV, 2001) donde  $\sigma_f$  es el esfuerzo de fluencia del material, que en este caso se tomó 276 MPa del promedio de las pruebas de tensión simple.

$$\sigma_{el} = \frac{\pi^2 EI_c}{AL^2} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{cr} = \sigma_{el} ; \quad \sigma_{el} < \frac{\sigma_f}{2} \quad (2.22)$$

$$\sigma_{cr} = \left(1 - \frac{\sigma_f}{4\sigma_{el}}\right) ; \quad \sigma_{el} > \frac{\sigma_f}{2} \quad (2.33)$$

Obtenido el esfuerzo crítico de DNV se calcula el espesor efectivo:

$$t_{eff} = \sqrt{\frac{\sigma_{el} L^2 12}{\pi^2 E}} \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Pruebas de vibración resonante

La prueba de vibración resonante permite determinar la característica de amortiguamiento en material. Para esta prueba se siguió la norma (ASTM E 756, 2004), que tiene como objetivo medir las propiedades de amortiguación del material como ( $\xi$ ) y el módulo de Young ( $E$ ). La

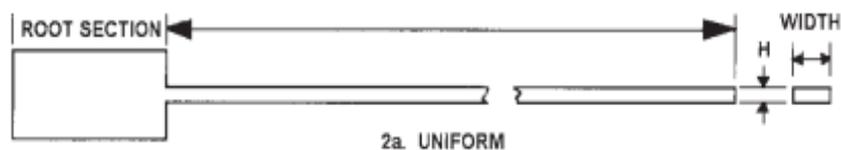
norma establece un rango de frecuencia de 50 a 5000 [Hz], y dimensiones del sistema de empotramiento y especímenes.

Las dimensiones de los especímenes para las probetas de vibración resonante no siguieron las del estándar precisamente mencionado debido al espesor que se manejó y en la Tabla 2.4 se mencionan las probetas analizadas. El sistema de empotramiento si cumple con las dimensiones requeridas.

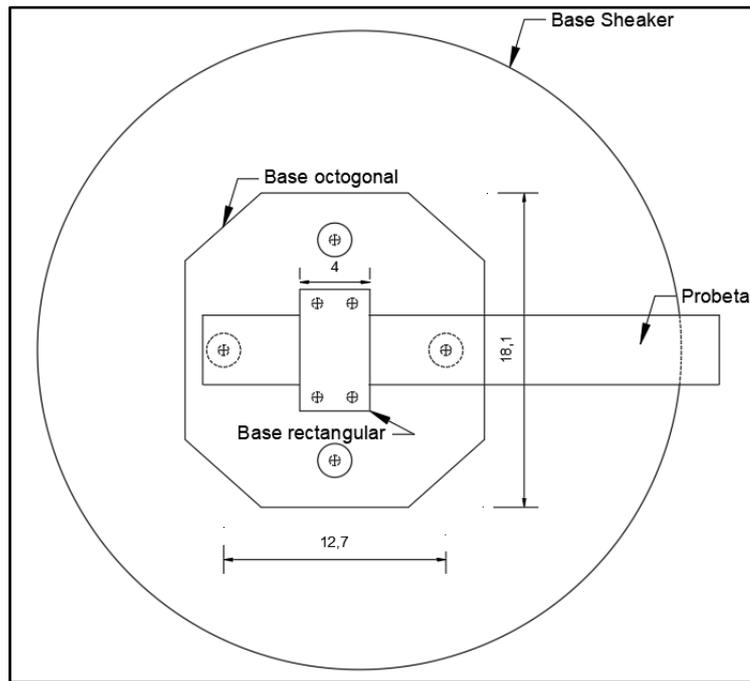
**Tabla 2.4** *Especímenes para prueba de vibración*

N° probeta	Descripción	Material
2	Mediano	Corroído
1	Mediano	No Corroído

Esta prueba se realizó en el laboratorio SiMarLab en la facultad FIMCM. El equipo vibrador (“shaker”) empleado es de marca Vibration Research, modelo VR5800, que tiene un rango de frecuencia fundamental de 3000 a 4000 Hz. Como el sistema de empotramiento por ASTM E756 era un rectángulo de 4 cm de ancho mostrada en la Figura 2.6 y el shaker tiene 4 tornillos. Se procedió a construir un sistema que permita adaptar el empotramiento en las probetas como se muestra en la Figura 2.6. Este dispositivo está formado por una base octagonal, dos bases rectangulares de acero con un espesor de 9 mm, 4 tornillos conectados al base del shaker y 4 a la otra base.



**Figura 2.6** Empotramiento por norma (ASTM E 756, 2004)



**Figura 2.7 Sistema de empotramiento adaptado para la prueba**

Se realizaron 6 pruebas de vibración resonante con tres probetas según la Tabla 2.4 con longitudes de 200 y 215 mm. Para determinar la primera frecuencia natural (Thomson & Dillon Dahleh, 2005), se empleó la siguiente fórmula (2.5), donde  $(\beta_1 L)^2$  es el primer modo de vibración y vale 3.52.

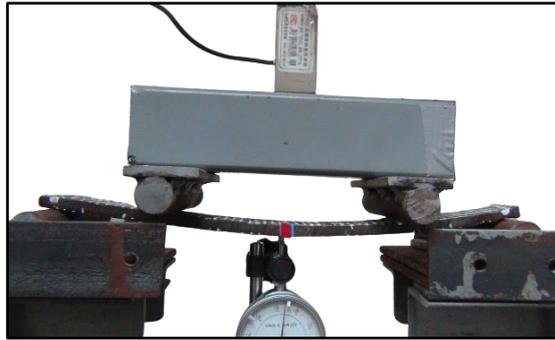
$$\omega^2 = (\beta_1 L)^2 \frac{Eb_{prom}.t_{prom}^3}{12 m^* L^4} \quad (2.5)$$

$m$  es la masa-longitud de la viga.

### 2.3.4 Pruebas de flexión de 4 puntos

Existen varios tipos de prueba de flexión para especímenes con material corroído. Por ejemplo, la norma (ASTM G 39, 2019) establece flexión de 2, 3 y 4 puntos. En este caso, se consideró la prueba de flexión de 4 puntos, que consiste en aplicar 2 fuerzas de igual magnitud a una separación de  $\frac{1}{4} L$ . Los soportes en la base son redondos para permitir una elevada deflexión y no causar efectos axiales. Esta norma es específicamente para material corroído por tal razón

establecen parámetros tanto en la estructura como en la probeta. El soporte está diseñado por un material que resista la fluencia y la dimensión de la probeta debe estar en el rango 125/254 mm de longitud y 25/40 mm de ancho. A continuación, la Figura 2.8 muestra el diagrama de la prueba de flexión de 4 puntos establecido por el ASTM – G39.



**Figura 2.8 Prueba de flexión de 4 puntos**

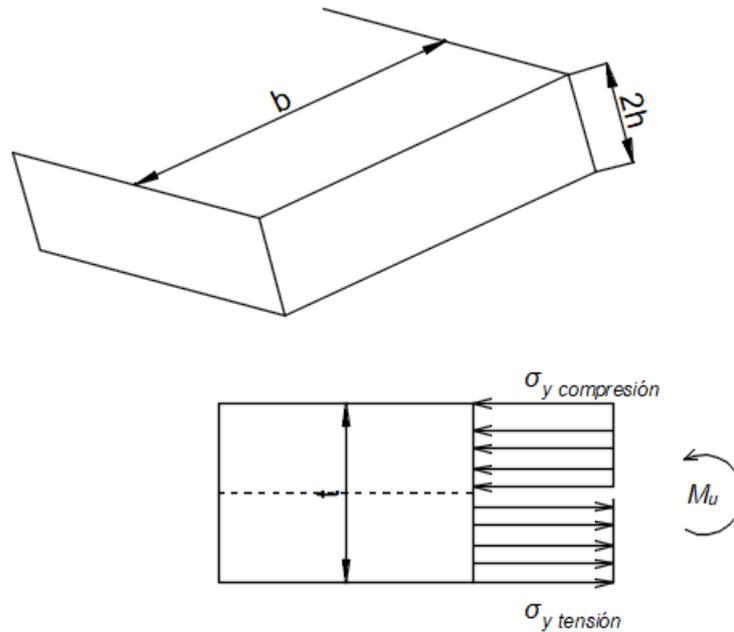
Para desarrollar la prueba de flexión de 4 puntos según la norma ASTM G-39 se utilizaron los equipos del laboratorio de FIMCM. El equipo que desarrolla este tipo de prueba consiste en un cilindro hidráulico de marca Wolverine, modelo W40010-S, que tiene una capacidad nominal de 10 toneladas, que aplica la fuerza a través de una celda de carga de 2 toneladas. Además, este equipo está adaptado en una estructura metálica, que por sus juntas de soldadura tiene una carga máxima de aproximadamente 6 toneladas.

El parámetro por evaluar en la prueba de 4 puntos es la fuerza máxima que pueden soportar las probetas corroídas. La superficie irregular de los especímenes no permite medir la deformación unitaria, por tal razón se utilizó el medidor de carátula para registrar la deflexión. En la probeta no corroída, se instaló un extensómetro para medir la deformación unitaria.

#### **2.3.4.1 Proceso para determinar el espesor efectivo de las probetas**

Para determinar el espesor efectivo de las probetas en las pruebas de flexión, se consideró que el momento último ( $M_u$ ) ocurre cuando todo el sector sobre y bajo el eje neutro llega al

esfuerzo de fluencia con signo opuesto como se muestra la Figura 2.9 y a partir de esta relación se puede determinar el espesor efectivo ecuación (2.6), conociendo la máxima fuerza que se puede aplicar a la probeta.



**Figura 2.9 Distribución de esfuerzo en la fuerza máxima**

Donde:

$$M_u = \sigma_{yield} b h^2$$

$$M_u = P_u a \tag{2.6}$$

Finalmente:

$$t_{eff} = \sqrt{\frac{4 P_u a}{\sigma_{yield}}} \tag{2.77}$$

En el caso de la prueba del espécimen con material no corroído se pudo registrar la variación de la fuerza y de la correspondiente deformación unitaria. Luego a partir de la curva de fuerza versus deformación unitaria se calcula la pendiente (m).

$$m = \frac{F}{\varepsilon_x} \quad (2.8)$$

Empleando la ecuación de deflexión de la viga de (Popov E. P, 2000), la ley de Hooke (2.9) y de momento flector (2.10), relacionando la pendiente se obtiene la ecuación de espesor efectivo (2.11):

$$\sigma = E\varepsilon_x \quad (2.9)$$

$$M = Fa \quad (2.10)$$

$$t_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3 m a}{b E}} \quad (2.11)$$

## Capítulo 3

### **3. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presenta una descripción de las superficies no uniformes de cada probeta analizada empleando herramientas estadísticas y curvas de nivel de los espesores obtenidos en cada medición. Además, se describen los resultados obtenidos con probetas con material no corroído y corroído para las pruebas: ensayo de tensión, pandeo elástico y plástico, vibraciones resonantes, y deflexión de cuatro puntos.

#### **3.1 Resultados de la prueba de tensión simple**

Esta prueba permite evaluar los esfuerzos de fluencia y último con especímenes de material corroído, corroído – esmerilado y no corroído.

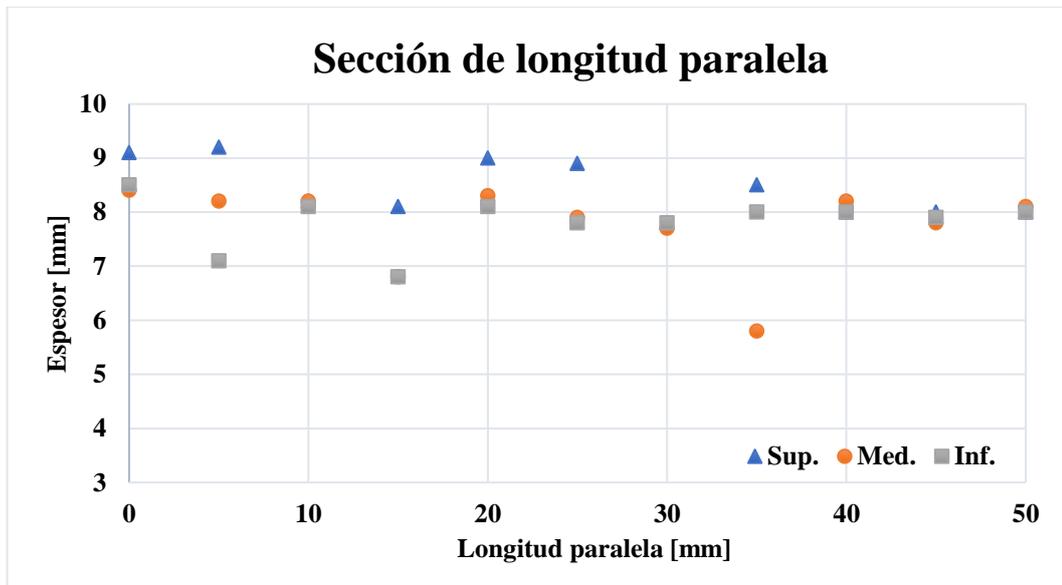
##### **3.1.1 Descripción del perfil de la superficie no uniforme con herramientas estadísticas**

La superficie no uniforme de las probetas fue descrita con herramientas estadísticas y representación topográfica de los espesores. Se prepararon histogramas y se compararon con las que se obtendrían aplicando una distribución normal. Mientras que para la representación topográfica se empleó curvas de nivel. A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta los resultados estadísticos de las probetas para las pruebas de tensión simple con material corroído. Se incluye el factor Ryan-Joiner que permite determinar cuán cercanos están la frecuencia de los valores del espesor de una distribución Normal, ( $R_j$ ). Cuando este parámetro se acerca a la unidad los datos se acerca a la distribución normal. Caso contrario, se cumple la hipótesis nula (Ukponmwan H. Nosakhare, 2017, pág. 3).

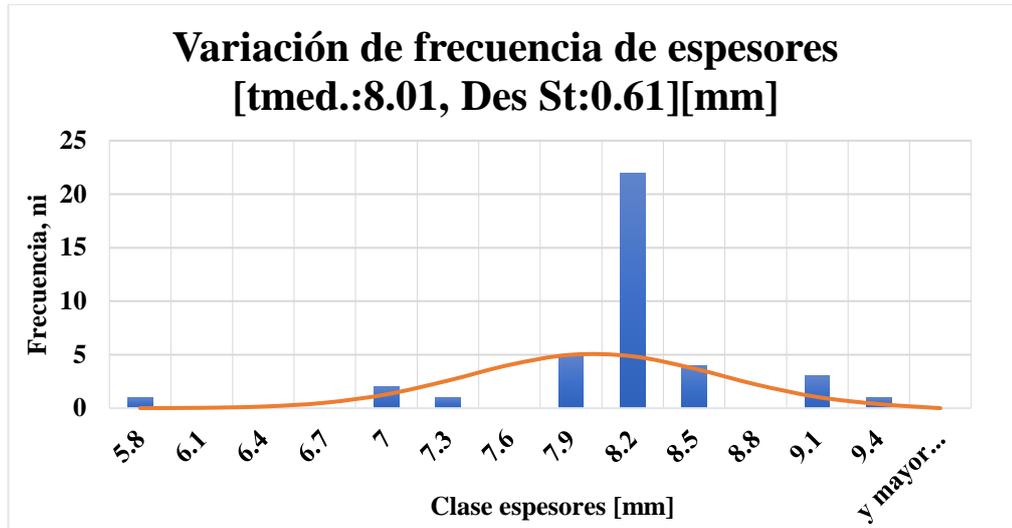
**Tabla 3.1** Resultados de estadística descriptiva en probetas de tensión

N° de probeta	Probeta	t promedio [mm]	Des. St. [mm]	t mínimo [mm]	t máximo [mm]	Muestra	Ryan – Joiner (Rj)
9540	Corroído -	6.87	0.33	5.80	7.50	36	-0.01
9541	Esmerilada	6.47	0.54	4.40	7.70	36	-0.02
9542	Corroído	8.01	0.61	5.80	9.20	39	-0.66
9543		8.46	0.86	4.20	9.40	36	-0.19

A continuación, se presenta una gráfica de la variación del espesor en dirección longitudinal de la probeta N°3 (probeta N° 9542 para el laboratorio Lemat), Figura 3.1. Esta distribución se usa para describir la región crítica en la prueba de tensión. Información similar para las probetas restantes, se presenta en el Apéndice de este reporte. Las distribuciones de espesores corresponden a trayectorias superior, medio e inferior del ancho de la probeta. Se nota que la fila del medio presenta el menor valor de toda la probeta 5.8 mm, mientras que la superior tiene un espesor máximo de 9.2 mm en la zona inicial de la sección.

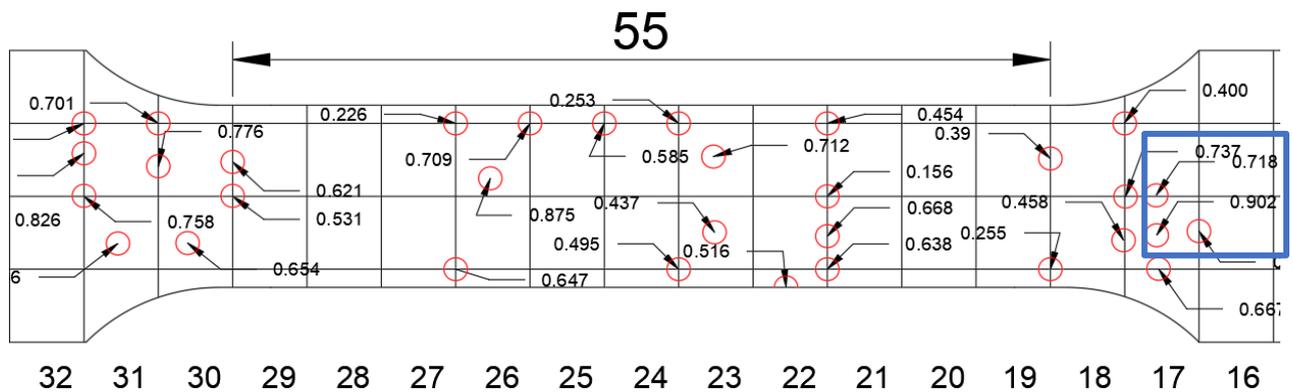


**Figura 3.1** Distribución de espesores por longitud – probeta N°9542



**Figura 3.2 Distribución de espesores - probeta N° 9542**

La Figura 3.2 ilustra la distribución de frecuencia de espesores dentro de la misma zona crítica. Este gráfico destaca que el espesor con mayor frecuencia es de 8.2 mm, también se observa que la media tiene un valor similar. También se observa que la distribución normal tiene una correlación  $R_j$  de -0.66, por tanto, la muestra no sigue la distribución normal. Se muestra en la Figura 3.3 la distribución de las profundidades del pitting en mm, para dicha probeta.

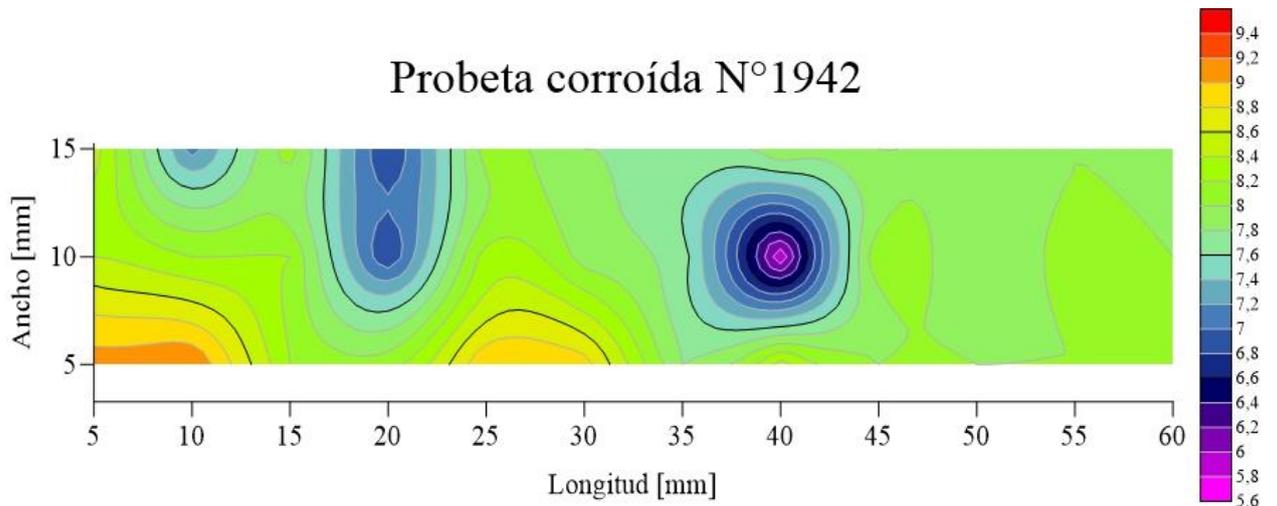


**Figura 3.3 Distribución de pitting - probeta N° 9542**

La distribución del pitting en las probetas para el ensayo de tensión son descritas por profundidad en la sección. Por ejemplo, en la Figura 3.3 se muestra que esta distribución de la

probeta 9542. con una profundidad máxima de 0.902 mm, como se muestra en el cuadro azul. Estas picaduras permiten identificar el grado de profundidad por picadura alcanzando (DOP), de 18% DOP.

También la distribución de espesores se presenta como curvas de nivel en la región activa de la probeta en la Figura 3.4 con valores máximos y mínimos mostrados en color rojo y violeta respectivamente, alcanzando un valor mínimo de 5.6 mm. Además, se muestra un corte transversal en el cual se observa el perfil irregular de los espesores a la longitud de 30 mm con una picadura mínima que mantiene un espesor de 7.65 mm. Como complemento con esta figura, en la Figura 3.5 se observa el perfil irregular del espécimen N° 9542, en el que se puede apreciar las picaduras a lo largo de la sección paralela después de la eliminación de residuos de corrosión. Se nota mayor afectación por picadura en la parte inferior del espécimen.



**Figura 3.4 Curva de nivel de la probeta corroída N°9542**



**Figura 3.5 Probeta corta después de la limpieza**

### 3.1.2 Resultados de las pruebas de tensión

La Figura 3.6 muestra el resumen de los resultados de la prueba de tensión simple de las probetas corroídas y no corroídas. Se muestran los esfuerzos de fluencia y últimos de las seis probetas probadas. El esfuerzo de fluencia promedio de las probetas es 276 MPa, y se puede apreciar que no hay influencia apreciable de la corrosión.

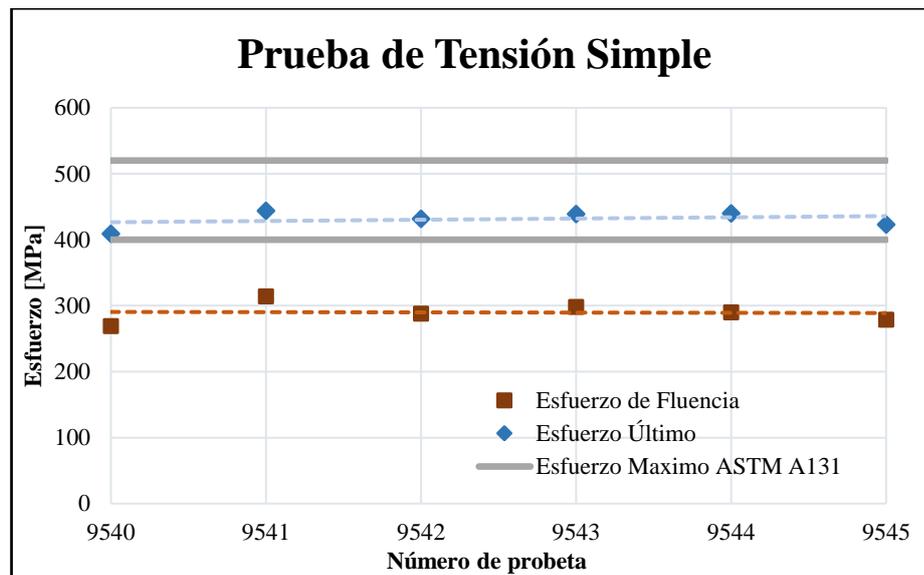


Figura 3.6 Esfuerzo máximo

Debido a que el material en análisis es el (ASTM A131, 19), el esfuerzo último debe estar en el rango entre 400 y 520 MPa, que se ha marcado en la figura. Se puede apreciar que este parámetro tampoco fue afectado por la corrosión. Es decir, la corrosión no influye en la resistencia del material.

### 3.2 Resultados de la prueba de pandeo

La prueba de pandeo permite determinar la carga última compresiva que puede soportar una probeta. Con la fuerza máxima aproximando la carga crítica, se puede calcular el espesor efectivo equivalente. Es necesario empezar por describir la superficie de los especímenes corroídos probados.

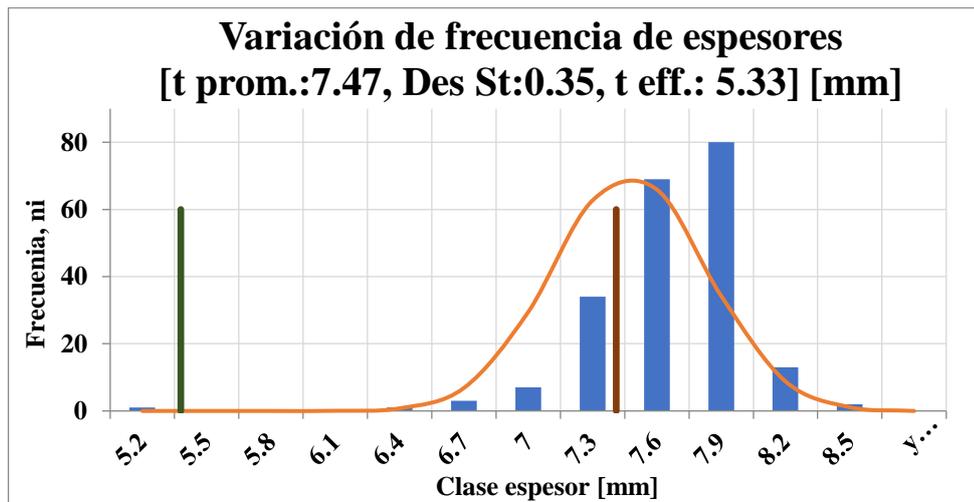
### 3.2.1 Descripción de la superficie no uniforme

Para describir la distribución del espesor en las probetas construidas con material corroído, para las pruebas de pandeo se empleó histogramas de frecuencia y curvas de nivel. Las características de cada probeta se muestran en la Tabla 3.2 que incluyen el índice Ryan-Joiner para evaluar cuán cercana está la distribución de una de tipo Normal.

**Tabla 3.2** Resultados estadísticos para probetas corroídas de pandeo

N° de probeta	Clasificación	t promedio [mm]	Des. St. [mm]	t mínimo [mm]	t máximo [mm]	Muestra	Ryan – Joiner (Rj)
5.1	Largas	7.64	0.49	3.80	9.10	595	-0.06
3.1		7.49	0.70	3.10	9.30	595	-0.01
2.2	Medianas	7.44	0.77	3.50	9.30	378	0.04
4.2		7.50	0.65	4.10	9.90	378	-0.06
2.1	Cortas	7.74	0.70	3.90	9.10	210	-0.14
4.1		7.47	0.36	5.20	8.30	210	0.13
6.1		7.65	0.52	3.30	8.90	231	-0.07

La Figura 3.7 muestra la variación de frecuencia de las mediciones de espesores para la probeta corta N°4.1. Se observa que el valor que se presenta con mayor frecuencia es 7.9 mm y con un valor medio de 7.47 mm. En esta figura se incluye el espesor efectivo a partir de la prueba de pandeo en dicha probeta, 5.33 mm, valor menor que el promedio, con una razón de 0.71. Finalmente analizando los resultados de la distribución de espesores para probeta corta N°4, la Tabla 3.2 revela que la correlación de la prueba de Ryan Joiner es 0.13. Este valor lleva a aceptar la hipótesis de nula normalidad, ya que la correlación es inferior a 1.

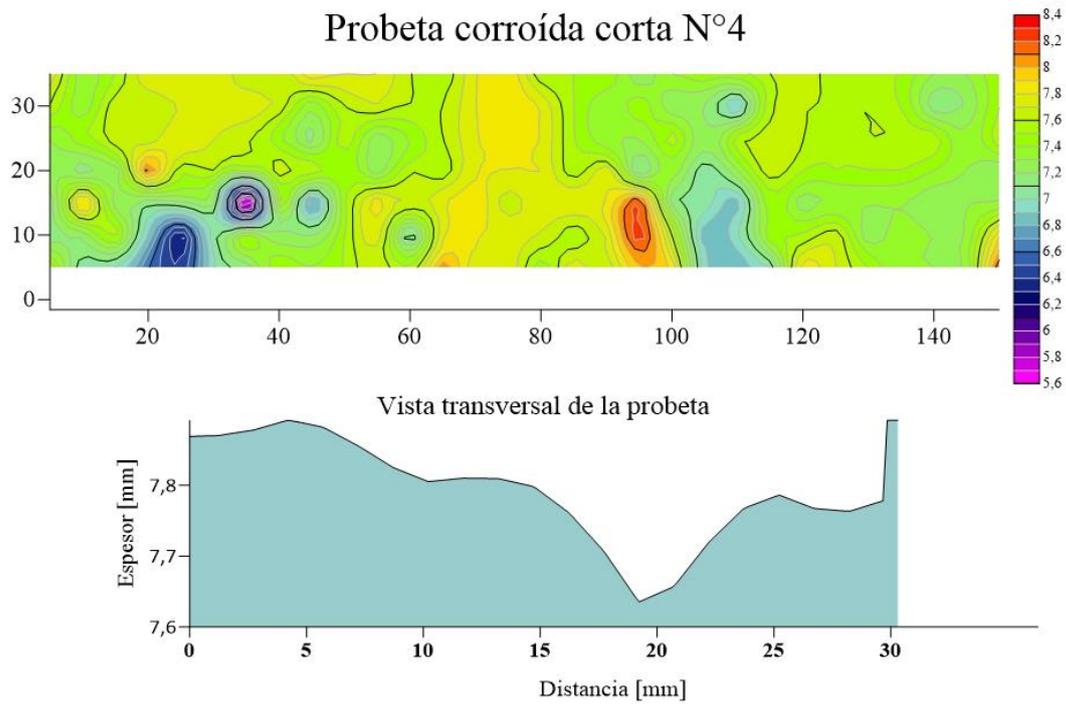


**Figura 3.7 Distribución de espesores - probeta corta N° 4.1**

También se presenta el mapeo topográfico, es decir por curvas de nivel de la distribución de espesor. Para ello se consideraron únicamente los espesores de la sección transversal de cada probeta. En la Tabla 3.3 se presenta el número de espesores medidos por clasificación de probeta, considerando su razón de esbeltez. En la Figura 3.8 la superficie de la probeta corta 4 con dimensiones (155x40) mm se describe mediante curvas de nivel, con un valor mínimo de 5.2 mm representado por el color violeta y el espesor más alto, mostrado con color rojo de 8.4 mm. El espesor promedio de la probeta es de 7.47 mm y dicho valor se observa en la región central de la placa. Además, en la Figura 3.9 se muestra la superficie no uniforme de la probeta después de la limpieza donde se pudo observar las zonas críticas y determinar el grado de afectación por pitting de 23% DOP. Información sobre las restantes probetas se encuentra en el apéndice.

**Tabla 3.3 Cuantificación de espesores por probetas**

<b>Clasificación de probetas</b>	<b>Número mediciones de espesor</b>
Largas	595
Medianas	378
Cortas	210



**Figura 3.8 Curva de nivel de la probeta corta de 155 mm**



**Figura 3.9 Probeta corta después de la limpieza**

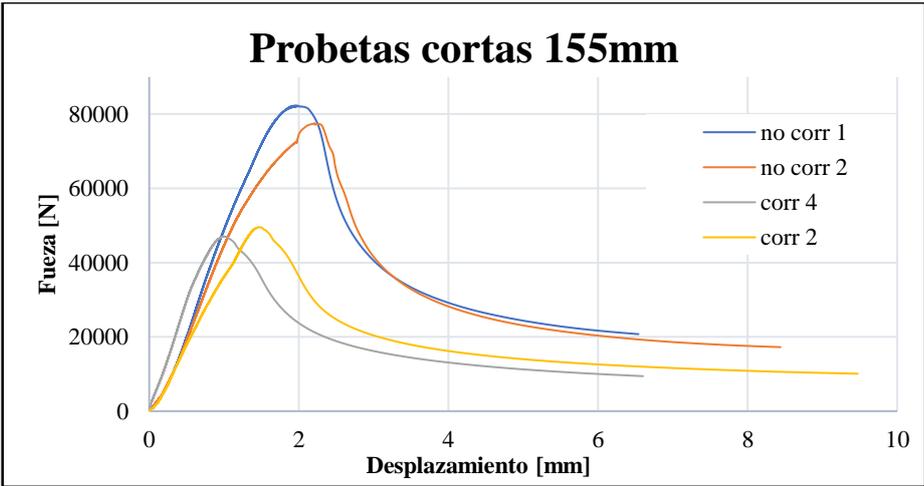
### 3.2.2 Resultados de las pruebas de pandeo

En las pruebas de pandeo se aplicó fuerza compresiva hasta alcanzar un valor máximo, Figura 3.10. Los registros de fuerza obtenidos de las pruebas con probetas cortas corroídas y no corroídas se muestra en la Figura 3.11. De igual manera, los resultados para las probetas largas y medianas se muestran en la sección de Anexos Apéndice C. Las probetas corroídas alcanzan una carga máxima entre 4000 a 5000 N, con un desplazamiento axial entre 0.86 a 1.6 mm, mientras que en las no corroídas la carga máxima está entre 70 y 80 KN, con un desplazamiento de 2 mm.

Empleando la ecuación de la hipérbola de Euler (Popov E. P, 2000), se determinó la carga crítica para cada probeta. Para el cálculo de la inercia se empleó el espesor promedio. En la Tabla 3.4 se resumen los resultados teóricos y experimentales de las pruebas con probetas cortas.



**Figura 3.10 Prueba de pandeo de probeta corta no corroída**

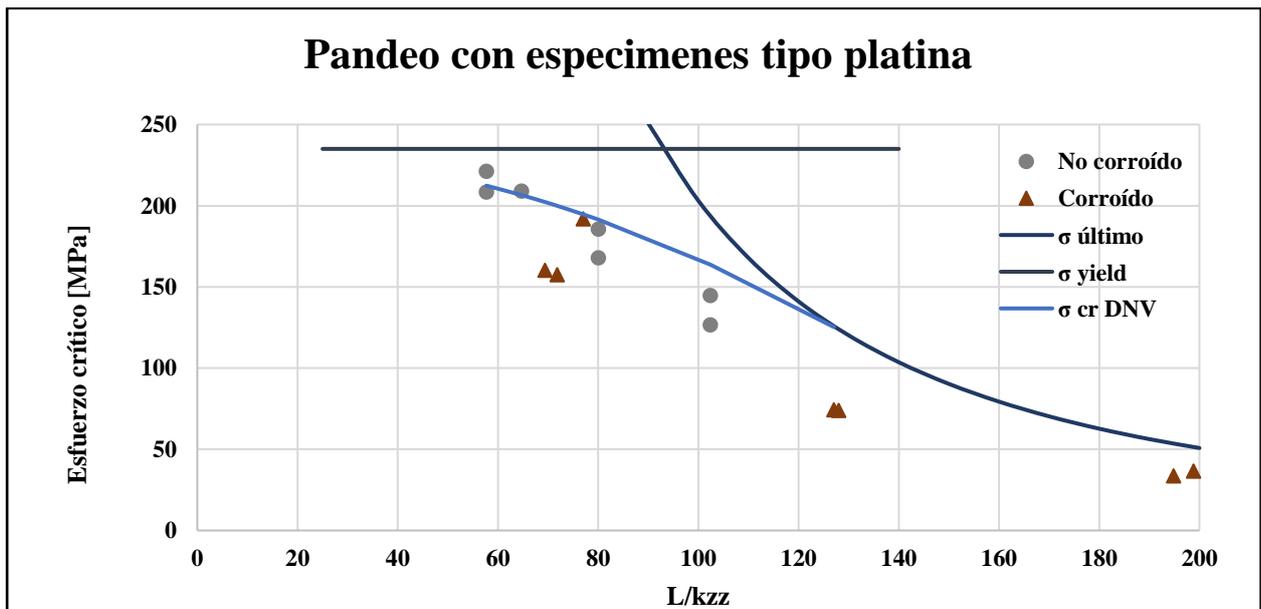


**Figura 3.11 Fuerza vs desplazamiento - probetas cortas**

**Tabla 3.4 Cuadro de resumen – características de las probetas cortas**

Probetas cortas					
N° probeta	Corroídas		No corroídas		Unidades
	2	4	1	2	
<b>E</b>	2.06E+11	2.06E+11	2.06E+11	2.06E+11	N/m <sup>2</sup>
<b>I<sub>c</sub></b>	1.54E-09	1.39E-09	2.68E-09	2.68E-09	m <sup>4</sup>
<b>P crítico</b>	130455	117536	226678	226678	N
<b>P<sub>yield</sub></b>	72716	70231	87420	87420	N
<b>P<sub>ultimo</sub></b>	49544	47050	82302	77529	N
<b>σ<sub>ultimo</sub></b>	160	157	221	208	N/mm <sup>2</sup>

La Figura 3.12 muestra los resultados de las pruebas de pandeo en función de la relación de esbeltez. Se ha incluido la curva de Euler que está representada por el color azul oscuro. Para razones de esbeltez menores a 90 se requiere mayor esfuerzo que el de fluencia para llegar al pandeo, región conocida como pandeo plástico. Para su evaluación se incluye la curva establecida por DNV de color azul claro que evalúa el esfuerzo crítico para columnas cortas considerando el esfuerzo de fluencia. Los resultados experimentales mostrando el efecto de la corrosión en la resistencia se presentan con triángulos marrones, mientras que los obtenidos con probetas no corroídas se muestran con círculos grises.



**Figura 3.12 Relación de esbeltez vs esfuerzo crítico**

### 3.2.3 Espesor equivalente de los especímenes

El cociente del espesor equivalente con el original permite determinar el porcentaje con el que la resistencia al pandeo es reducida por la corrosión. Para esto se tomó un espesor original de 23/64 pulgadas (9.13 mm) de acuerdo con el plano estructural del buque (CORPETROLSA S.A, 2018). La Figura 3.13 presenta esta razón entre espesores para probetas corroídas, no corroídas; se incluyó también los resultados de aplicar la formulación de Nakai. Se observa que las tres curvas tienen tendencias semejantes. Pero, la curva de material no corroído por su mayor espesor tiene valores de esbeltez únicamente hasta 120. Adicionalmente se puede observar que las curvas de especímenes corroídos y con la fórmula de Nakai tienen valores menores a las no corroídas, es decir, que la corrosión influye en la reducción de espesor efectivo. Es importante mencionar que las curvas muestran un comportamiento diferente cuando la razón de esbeltez es menor a 130, dado que la ecuación de espesor efectivo empleando la ecuación de Euler no es la adecuada.

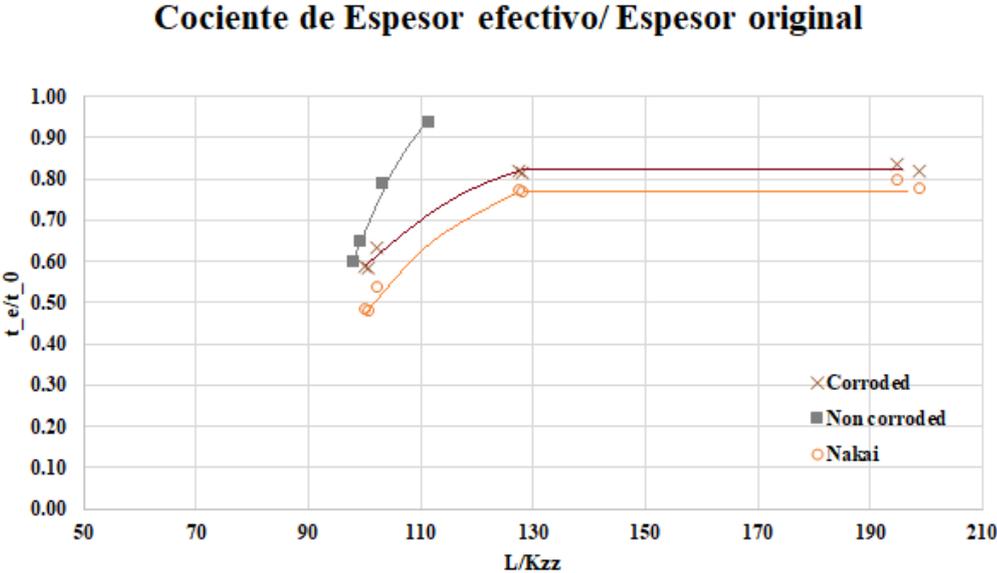


Figura 3.13 Cociente de espesor equivalente y espesor original

### 3.3 Resultados de las pruebas vibraciones resonantes

Los resultados de estas pruebas permiten determinar la característica de amortiguamiento de un material dado.

#### 3.3.1 Descripción de la superficie no uniforme de probetas

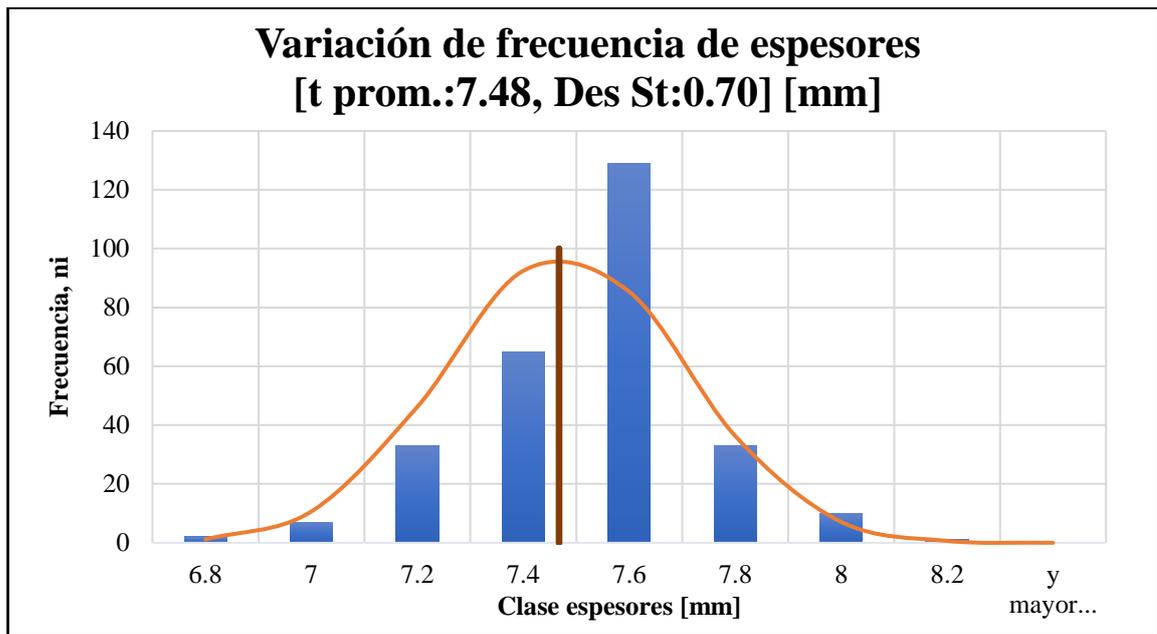
Los resultados de las mediciones de espesor que describen las probetas empleadas en las pruebas de vibraciones se muestran en la Tabla 3.5 el cual presenta espesor promedio, desviación estándar, espesor mínimo y máximo de las probetas corroídas a una longitud de 215 mm.

**Tabla 3.5** *Parámetros estadísticos de las probetas para pruebas de vibración resonante y flexión*

N°	L probeta	L cantilibre [mm]	Probeta	t promedio [mm]	Des. Stv. [mm]	t mínimo [mm]	t máximo [mm]
1	297	215	Corroído	7.36	0.73	3.40	9.00
6	258	215		7.67	0.40	4.90	8.90
5	259	215	No corroído	9.09	--	--	--

Nota: La prueba se realizó para tres probetas, pero con diferente longitud.

La Figura 3.14 presenta el histograma de frecuencia de espesores de la probeta N°1. La muestra tiene 280 valores, obteniendo mayor frecuencia el espesor de 7.6 mm. Se incluye la función de distribución normal con media y desviación estándar de 7.48 y 0.7 mm, respectivamente. Se observa que la distribución normal no se ajusta a la distribución normal.



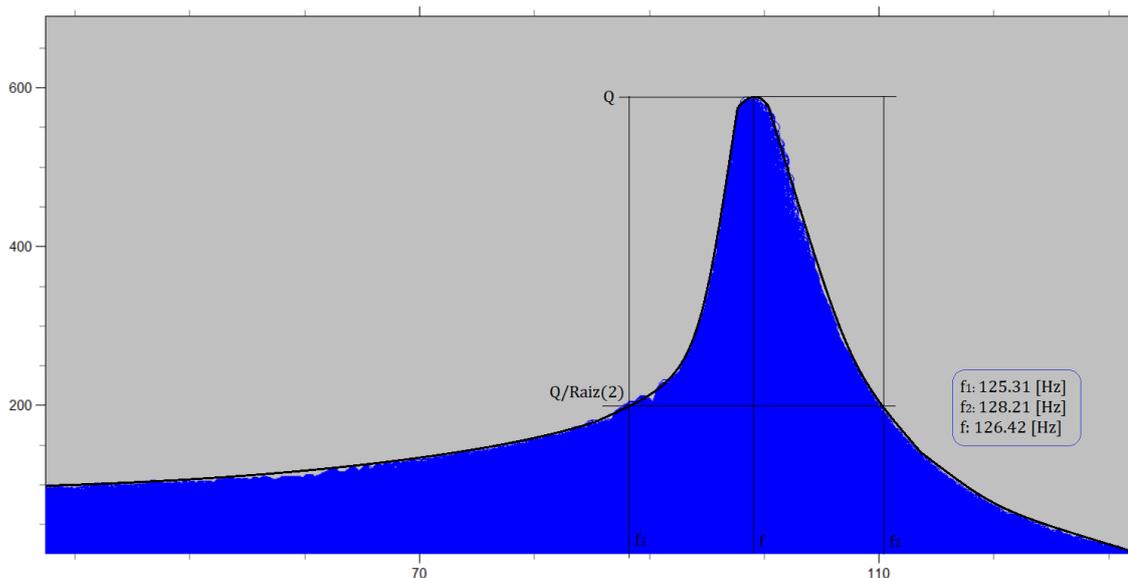
**Figura 3.14 Distribución de espesores de Probeta N°1 – L: 200 mm**

### 3.3.2 Resultados experimentales

Para las pruebas de vibración resonante primero se determinó la primera frecuencia natural a partir de la ecuación (2.4) del capítulo 2. Se consideró el espesor promedio para cada longitud de probeta establecida, y dado que el ancho (b) de la probeta no es constante a lo largo de la probeta (L), se tomó un valor medio. También se pesó el espécimen y se calculó la masa por unidad de longitud  $m^*$ , considerándola como uniforme.

La Figura 3.15 presenta la variación de la amplitud conforme la frecuencia de movimiento de la barra cambia lentamente. Para determinar el factor de amortiguamiento se empleó el método de ancho de banda ecuación (3.1) descrito en el capítulo 1.

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f} \quad (3.1)$$



**Figura 3.15 Resultado de prueba de vibración resonante – probeta corroída 1, L: 215 mm**

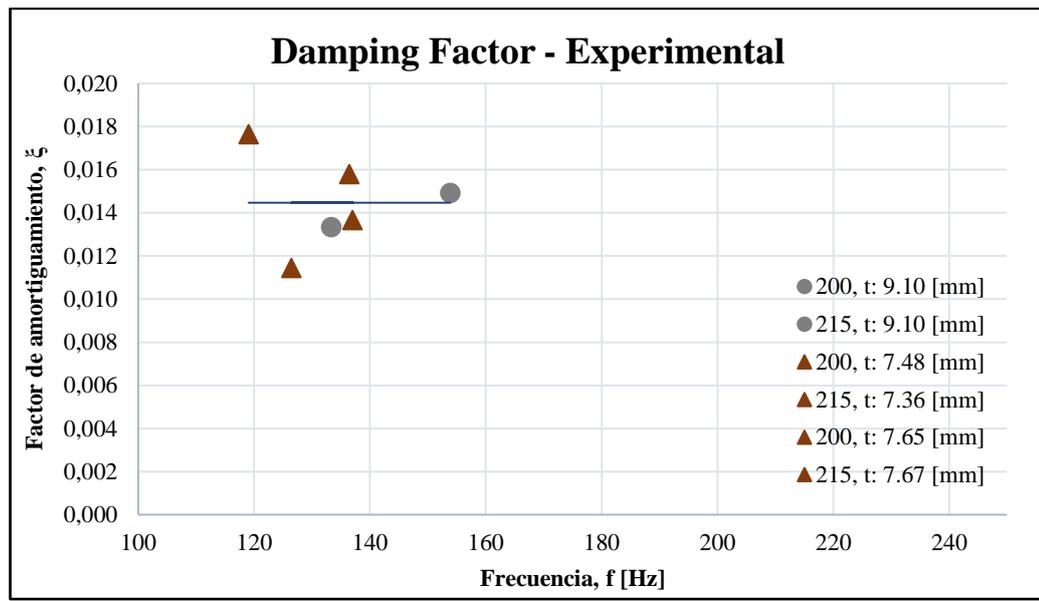
A continuación, se presenta en la Tabla 3.6 el resumen de las primeras frecuencias naturales experimentales y teóricas, para las probetas corroídas y no corroídas con diferente longitud de análisis. En la última columna se presenta el cálculo del factor de amortiguamiento obtenido en cada prueba. Nótese que en la prueba con material no corroído la frecuencia natural experimental están por debajo de la teórica. Posiblemente se debe a la flexibilidad del dispositivo para agarrar la probeta, que reduce la rigidez del conjunto.

**Tabla 3.6 Frecuencia natural experimental, teórica y  $f_1$  y  $f_2$**

N°	Probeta	L [mm]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f exp. [Hz]	f teórico [Hz]	$\xi$
5	No corroída	200	149.3	153.8	153.8	192.1	0.0149
		215	131.6	135.1	133.3	166.3	0.0133
1	Corroída	200	134.8	139.1	136.4	157.8	0.0158
		215	125.3	128.2	126.4	125.7	0.0114
6	Corroída	200	135.1	138.9	137.0	164.8	0.0137
		215	116.3	120.5	119.0	143.0	0.0176

La Figura 3.16 presenta el factor de amortiguamiento versus la frecuencia natural para diferentes longitudes de las probetas con material corroído y no corroído. Los resultados de las probetas corroídas están representados por triángulos y las no corroídas por círculos. Se observa

poca diferencia en los valores del factor de amortiguamiento entre material corroído y no corroído, es decir, la corrosión no afecta la capacidad de disipación de energía del material. Sin embargo, debe enfatizarse que este resultado corresponde a una muestra pequeña.



**Figura 3.16 Factor de amortiguamiento experimental - corroído y no corroído**

### 3.4 Resultados de la prueba de flexión

Los resultados de la prueba de flexión de 4 puntos en las probetas corroídas y no corroídas permiten determinar el efecto de la corrosión en la carga última. Para ello primero se presenta el resultado de la descripción de las probetas, luego se muestra gráficas de resultados de Fuerza vs Deformación unitaria para la probeta no corroída, y finalmente una gráfica fuerza aplicada versus tiempo para probetas corroídas. Los resultados completos se presentan en la sección de Anexos Apéndice C.

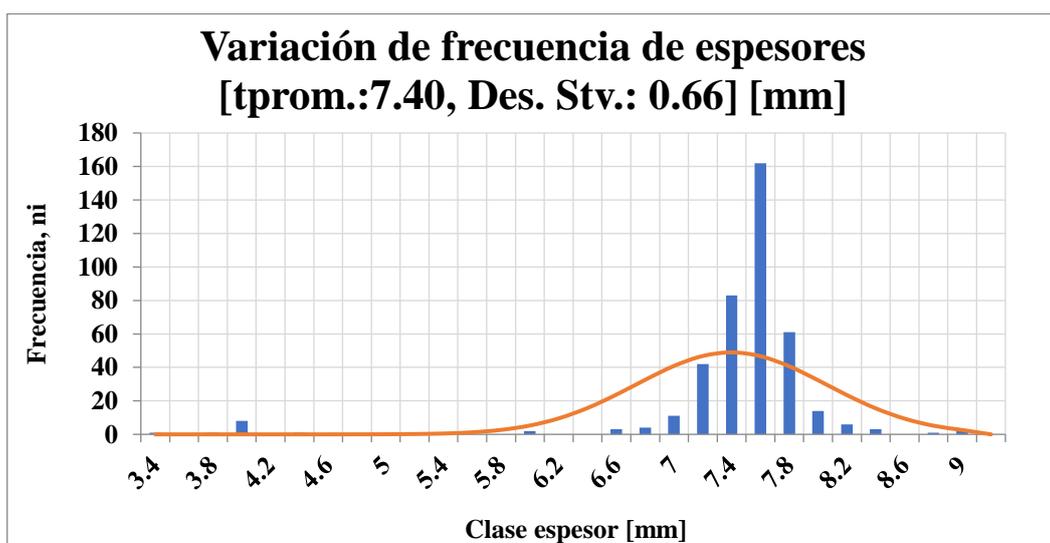
### 3.4.1 Descripción de la superficie no uniforme de probetas

La superficie de las probetas corroídas de esta prueba se describió con espesor y profundidad por pitting. Las variaciones de espesor se presentan con histogramas de frecuencia y el pitting fue descrita por mapeo. A continuación, se muestra ejemplos de la descripción en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Resultados estadísticos de las distribuciones de espesor

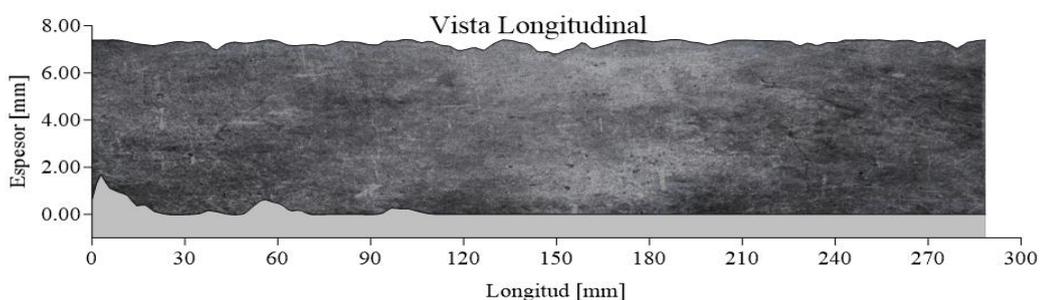
N°	Probeta	t promedio [mm]	Des. Stv. [mm]	t mínimo [mm]	t máximo [mm]	Muestra	Ryan – Joiner (Rj)
1	Corroída	7.40	0.66	3.4	9.00	406	-0.01
6	Corroída	7.68	0.38	4.90	8.90	357	-0.17
5	No corroída	9.09	--	--	--		

La Figura 3.17 muestra para la probeta 1, la variación de frecuencia de espesores. Se observa que, el valor con mayor concentración de la muestra es de 7.6 mm, e incluye valores tan bajos como 3.4 mm y altos hasta de 9 mm. Finalmente, se observa que la función de distribución normal no se ajusta a la distribución de frecuencia de espesores ya que la correlación de Ryan Joiner (Rj) es menor a 1.



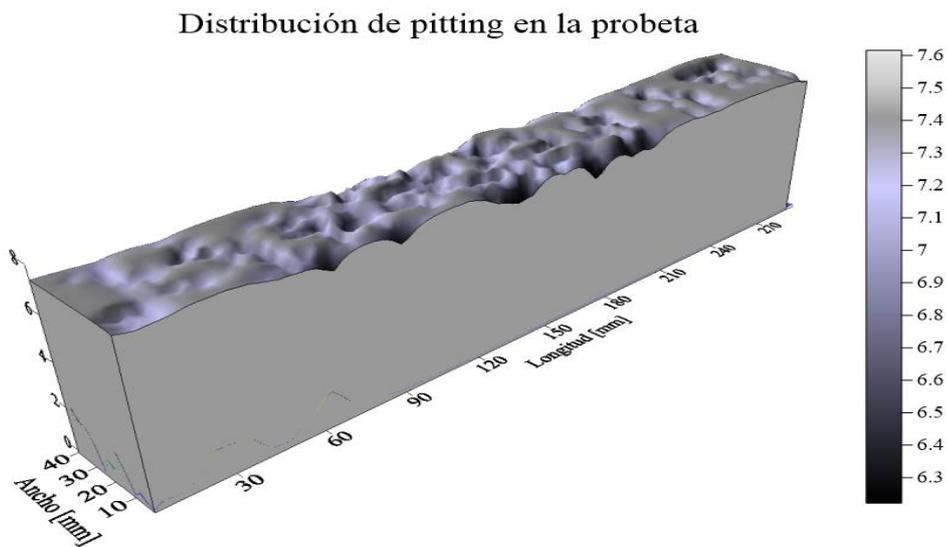
**Figura 3.17** Distribución de frecuencia de espesores - probeta 1

La descripción por mapeo de pitting en la probeta número 1 con una vista longitudinal se muestra en la Figura 3.18 que presenta el perfil superior e inferior de la placa en la cual se observa claramente las picaduras generadas por la corrosión. La superficie inferior alcanza una máxima profundidad de 2.21 mm a la longitud de 7.8 mm y el mínimo a 0.34 mm a longitud de 103 mm. Mientras que, para la superficie superior alcanza una profundidad de 1.25 mm a longitud de 150 mm y el mínimo fue 0.012 mm.



**Figura 3.18 Perfil no uniforme de la superficie superior e inferior generado por el pitting – probeta 1**

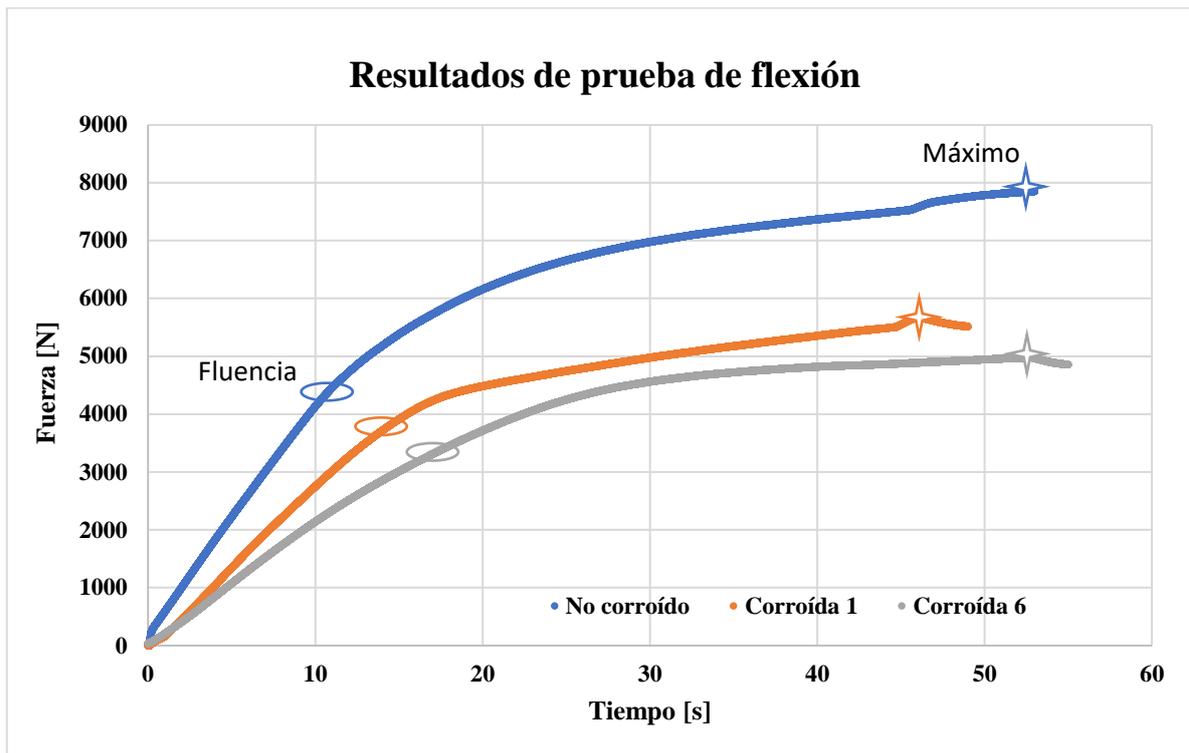
La superficie no uniforme generada por la presencia de pitting en cara superior e inferior se grafica en la Figura 3.19 que presenta la vista longitudinal de la probeta. El espesor promedio es de 7.40 mm. El pitting máximo en la cara superior es representado por el color negro que se presenta en la posición longitudinal de 150 mm y tiene un valor de 1.25 mm de profundidad.



**Figura 3.19 Vista Isométrica de la distribución de pitting**

### 3.4.2 Resultados experimentales

La prueba de flexión de 4 puntos se realizó para 2 probetas corroídas y uno sin corrosión. Esta prueba consiste en aplicar una fuerza puntual, el cual es distribuida de manera simétrica a través de dos soportes cilíndricos hasta alcanzar la fuerza máxima que cada espécimen puede soportar. Como resultado se pudo obtener la Figura 3.20 que presenta la fuerza aplicada en función del tiempo. Se presentan 3 curvas, azul, naranja y gris. En estas curvas se han incluido los puntos en que se espera el material alcance el punto de fluencia y la carga última. Se observa que la curva de la probeta no corroída requiere mayor carga para llegar al esfuerzo máximo de fluencia, pero esto se debe a que el espesor de dicha probeta es mayor las restantes ver Tabla 3.9. En estos resultados también incide la longitud de las probetas, por ello, la probeta corroída con mayor longitud requiere de menor carga para llegar a la zona plástica.



**Figura 3.20 Resultados de Fuerza vs tiempo**

A continuación, la Tabla 3.8 muestra el espesor promedio de las probetas corroídas y no corroídas, y la carga máxima que soporta cada probeta.

**Tabla 3.8 Resultados de fuerza de fluencia y fuerza última teórico**

Material	N° Probeta	L [mm]	b [mm]	a [mm]	E [N/m <sup>2</sup> ]	P fluencia [N]	P último [N]	t promedio [mm]
No corroída	5	239	40.90	60	2.058E+11	4343	7805	9.09
Corroída	6	237	40.60	60		3663	5580	7.68
	1	259	39.50	60		3112	4606	7.40

Con los resultados obtenidos de la Fuerza máxima, empleando la ecuación (2.7) del capítulo 2 se obtiene el espesor efectivo de cada probeta. Cabe mencionar que el esfuerzo de fluencia para estos cálculos fue 276 [MPa] un promedio de los resultados de la prueba de tensión simple aquí obtenidos.

**Tabla 3.9** *Resultados de espesor efectivo*

<b>Material</b>	<b>N° Probeta</b>	<b>L[m]</b>	<b>t eff/t prom</b>
No corroído	5	0,24	0,98
Corroído	6	0,237	0,79
	1	0,259	0,79

Los resultados de espesor efectivo de la Tabla 3.9 claramente muestran que la corrosión si influye en la reducción del espesor, ya que se observa una reducción de 21% en las probetas corroídas 1 y 6 con respecto al espesor promedio de cada una de ellas. En cambio, en el caso de la probeta de material no corroído prácticamente el efectivo corresponde al espesor inicial.

## **Capítulo 4**

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

En este capítulo se mencionarán las conclusiones obtenidas luego de las descripciones estadísticas de las superficies de las probetas corroídas y de los resultados de las características mecánicas del material de las pruebas y de haber comparado resultados entre probetas corroídas y no corroídas.

### **4.1.1 Conclusiones**

En las probetas usadas en los ensayos se marcaron particiones de 5x5 mm para registrar los espesores locales. Con los datos obtenidos se compararon las distribuciones de espesores con los que resultan de la distribución probabilística Normal. Sin embargo, al aplicar la prueba de Ryan - Joiner las muestras por cada probeta generaron correlaciones ( $R_j$ ) inferiores al establecido por el método. Algo similar se observó al agrupar las mediciones de todas las probetas con un total de 3507 mediciones. Lo cual nos lleva a aceptar la hipótesis de nula normalidad. Por lo tanto, la descripción del espesor de las probetas corroídas no corresponde a una distribución normal.

Mediante la prueba de tensión simple estándar (ASTM E8/E8M, 2016) se analizó la resistencia a la tracción de especímenes de acero naval corroídos y no corroídos. Se observó que la corrosión no influye en el esfuerzo de fluencia de los especímenes analizados. De igual manera, el esfuerzo último en todas las seis pruebas se encuentra dentro del rango establecido por (ASTM A131, 19) para el material original. De manera que, el fenómeno electroquímico no influye en las propiedades de resistencia del material probado.

Se realizaron 13 pruebas de pandeo plástico y elástico para probetas cortas (155x40) mm, medianas (275x40) y largas (430x40) algunas con material corroído y otras con no corroído. Al realizar la comparación de la fuerza última que soporta cada espécimen se observó que las probetas

corroídas tienen una menor resistencia al pandeo comparando con el espesor promedio. En definitiva, la corrosión causó una disminución notable en la carga última de pandeo.

En la prueba vibración resonante se detectó la primera frecuencia natural de cada probeta y se calculó el factor de amortiguamiento para dos longitudes de cada una empleando el método de agudeza de la resonancia. Los resultados de las primeras frecuencias naturales experimentales fueron menores a los valores teóricos esperado tanto para probetas corroídas y no corroídas. Sin embargo, el factor de amortiguamiento presenta poca diferencia entre probetas corroídas y no corroídas. Por tanto, se concluye que la corrosión no afecta el factor de amortiguamiento del material.

En las pruebas de flexión con 4 puntos realizada para 3 probetas, dos corroídas y una no corroída, se pudo determinar el efecto que causa la corrosión en la carga última. Se observó que el espesor efectivo es inferior en 21% respecto del espesor medio del espécimen. Es decir que la corrosión si causa una reducción en el espesor de probeta.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

Desarrollar análisis numéricos representando el perfil irregular de las probetas corroídas, con el fin comparar con los resultados experimentales obtenidos. Considerando los elevados costos y tiempos para la preparación de las pruebas, se podría investigar la influencia de otros parámetros. Por ejemplo, a nivel lineal se podrían calcular la carga crítica en pandeo, la frecuencia natural fundamental y la rigidez flexural, incluyendo el efecto de superficie corroída de las probetas.

Desarrollar pruebas con modelos de estructuras construidos con materiales corroídos de una embarcación, con el fin de observar los resultados y el comportamiento de deformación en los

elementos estructurales en las pruebas aplicadas. Los resultados actuales de espesor efectivo en especímenes simples podrían compararse con las obtenidas usando geometrías más complejas.

## Referencias

- ASTM A131, /. -1. (19). Standard Specification for Structural Steel for Ships. *American Society for Testing and Materials*, 8.
- ASTM E 756. (2004). Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials. *American Society for Testing and Materials*, 13.
- ASTM E8/E8M. (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *American Society for Testing and Materials*, 30. doi:10.1520/E0008\_E0008M-22
- ASTM G 39. (2019). *Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens*. United States: American Society for Testing and Materials.
- C. Guedes Soares, S. S.-E. (2012). Effect of corrosion degradation on ultimate strength of steel box girders. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 12. doi:10.1179/1743278212Y.0000000005
- Chandler, K. A. (1985). *Marine and Offshore Corrosion*. UK: Butterworth.
- CORPETROLSA S.A. (2018). *Memoria Técnica Descriptiva BT "Libertad I" N° OMI 7003403*. Guayaquil: CORPETROLSA S.A.
- DIRNEA, D. G. (2001). *Resolución No. 139/01*. Guayaquil: DIGMER. Obtenido de [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/LOTAIP2015\\_Resoluci-%C2%A6n-DIGMER-139-01.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/LOTAIP2015_Resoluci-%C2%A6n-DIGMER-139-01.pdf)
- DNV. (2001). Part 3 Hull structural design ships with length 100 meters and above. In DNV, *Rules for classification of ships* (p. 134). Norway: Det Norske Veritas.
- ESAB. (2006). *ESAB CUTTING SYSTEMS*. Obtenido de SHADOW 2 Dual Side Drive Cutting Machine: <http://www.meta-lab.com/docs/ESABShadow2PDS.pdf>
- Fiolek and Jakubowski, P. F. (2021). Assessment of the Bending Moment Capacity of Naturally Corroded Box-Section Beams. *MDPI Materials*, 18. doi:10.3390/ma14195766

- Himanshu Mevada, D. P. (2015). Experimental determination of structural damping of different materials. 6.
- Instruments, I. (2023). *INTEC Instruments*. Retrieved from UHF-3000kNX: [https://www.intecinstruments.com/product/product\\_detail/17](https://www.intecinstruments.com/product/product_detail/17)
- ISO 8407. (2013). Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens. *International Organization for Standardization* .
- Jiang et al, Y. J. (2021). Time-dependent reliability of corroded circular steel tube structures: Characterization of statistical models for material properties. *Structures*, 12. doi:10.1016/j.istruc.2021.04.091
- KAN. (2023, Julio 9). Retrieved from KAN: [https://www.intecinstruments.com/product/product\\_detail/17](https://www.intecinstruments.com/product/product_detail/17)
- Nakai y Yamamoto, T. N. (2008). Corroded structures and residual strength. En J. K. Melchers, *Condition assessment of aged structures* (pág. 552). United States: Woodhead Publishing.
- Paik et al, J. M. (2003). Ultimate compressive strength of plate elements with pit corrosion wastage. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 16. doi:10.1177/147509020321700402
- Pesantes, E. (2018, Octubre 2). La flota pesquera ecuatoriana tiene más de 650 embarcaciones. *Líderes*. Retrieved from <https://www.revistalideres.ec/lideres/flota-pesca-ecuador-embarcaciones-informe.html>
- PhD. José Marín. (2021). Pandeo de planchas. En J. Marín, *Notas de Clases de Estructuras de Buque* (pág. 99). Guayaquil.
- Popov E. P, B. T. (2000). *Mecánica de Sólidos*. México: Pearson Education.
- R. E. Melchers, T. U. (2008). Corrosion wastage in aged structures. En J. K. Melchers, *Condition assessment of aged structures*. Woodhead Publishing.

- Rahbar-Ranji, A. (2012). Ultimate strength of corroded steel plates with irregular surfaces. *Ocean Engineering*, 9.
- SCI, S. C. (2012). *Determining the buckling resistance of steel and composite bridge structures*. UK: Steel Construction Institute.
- Soria M. (2022/06). *Colapso de mástil, Comunicación personal*. Guayaquil.
- SSC, S. S. (1997). *Strength assessment of pitted plate panels*. G-M Technical Resources Center. Obtenido de <http://www.shipstructure.org/pdf/394.pdf>
- Thomson , W. T., & Dillon Dahleh, M. (2005). *Theory of Vibration with Applications* (Vol. Fifth Edition). Pearson Education.
- TIME, T. (2023). *Trade combine*. Obtenido de Ultrasonic Thickness Gauge TT100: <http://www.tradecombine.com/download/TT100.pdf>
- Ukponmwan H. Nosakhare, A. F. (2017). Evaluation of Techniques for Univariate Normality Test Using Monte Carlo Simulation. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 11. doi:10.11648/j.ajtas.s.2017060501.18
- Woloszk y Garbatov, K. W. (2022). Advances in Modelling and Analysis of Strength of Corroded Ship Structures. *MDPI*, 17. doi:10.3390/jmse10060807

## **Apéndice A**

INFORMACIÓN	
Fecha:	2023-05-12
N° Informe:	1
Lugar:	Astinave Planta Sur – Dique “Orellana” – BT “Libertad I”
Responsable del Acta:	Michelle López Liliana Vega
Objetivo:	Identificar el material afectado por la corrosión del BT “Libertad I” que se tomará para el análisis de las características estáticas y dinámicas.

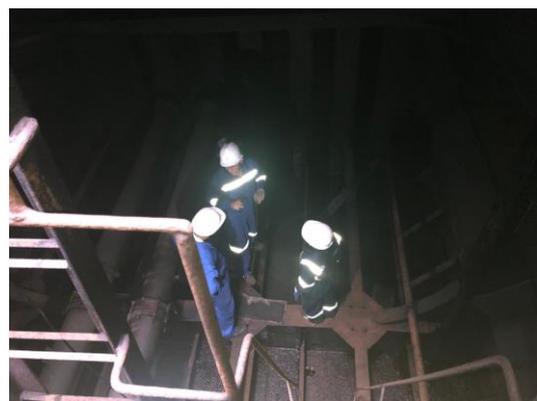
INFORME DE LA VISITA TECNICA
<p>El Buque Tanquero “Libertad I” cuenta con 53 años de servicio el cual realiza cabotaje nacional en la ruta Libertad – Guayaquil. El buque tanquero cuenta con las siguientes características: Eslora: 103.35 m, Manga: 12.13 m, Puntal: 8.50 m, Calado: 6.29 m y su capacidad de carga (DWT) de 4409 t. Actualmente, la embarcación se encuentra en carenamiento en la planta Sur de la Astinave – Dique “Orellana”.</p> <p>Ciertas zonas de carga y del tanque de agua de popa superan el porcentaje de corrosión general permitido por la sociedad clasificadora del buque y deben ser reemplazadas. Tal que, la sociedad clasificadora Lloyd’s Register establece en la revisión 5.6 Thickness measurement and close up survey guidance que el material que ha superado el 25 % del porcentaje de desgaste debe ser reemplazado. Este efecto se evidencio en los tanques de carga 03 de fuel oil de las bandas de Estribor y Babor, el mamparo transversal corrugado de 8 mm de espesor tiene presencia de corrosión general. De tal manera que, al ser evaluado por los técnicos mediante la toma de espesores, el material supero el porcentaje de desgaste. También se evidenció esta anomalía en el tanque de pique de popa que transporta agua dulce, en el mamparo longitudinal de la banda de Babor. Las evidencias se muestran en el Anexo I y II.</p>

Las zonas corroídas afectadas por la humedad de carga en el buque. Muestra un tipo de corrosión por pitting y este se puede identificar a partir del grado de intensidad de la picadura el cual se define como la relación del área de la superficie picada con el área de superficie total. En el Buque Tanquero Libertad I, en el bolsillo del tanque 06 de la banda de Babor se observa la presencia de corrosión en la cubierta, mismo que se produjo por la presencia de gases de la carga transportada. Por otra parte, este tipo de corrosión se puede identificar de manera visual, como se muestra en el anexo III.

**MATERIAL IDENTIFICADO PARA CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS**

N°	MATERIAL	UBICACIÓN	ESPEJOR ORIGINAL
1	Mamparo transversal corrugado	Tanque de carga 03	8 mm
2	Planchaje de cubierta	Bolsillo del tanque de carga 06	8.5 mm
3	Mamparo longitudinal	Pique de popa	7.5 mm

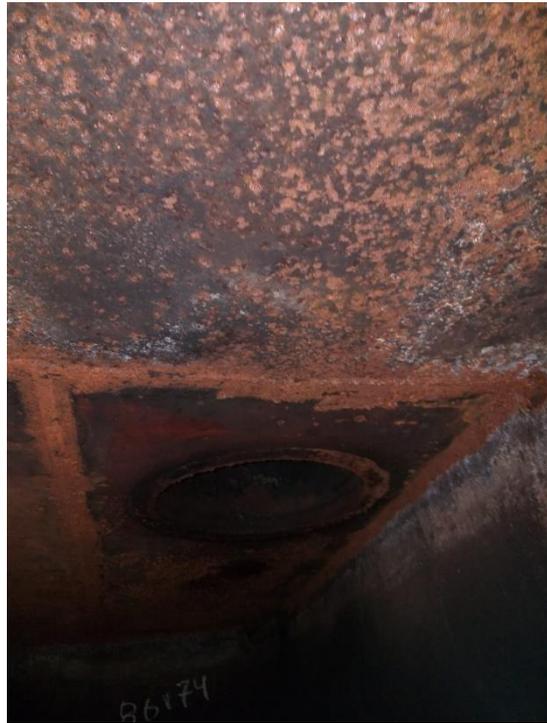
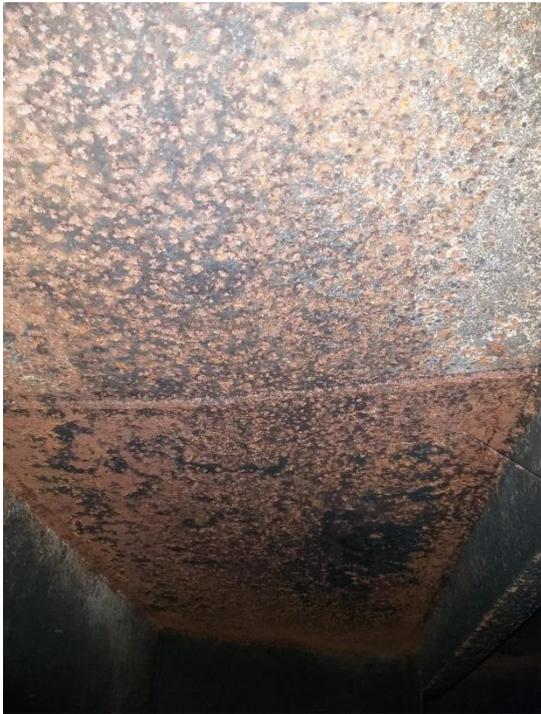
Anexo I. Mamparo transversal 74, entre tanques de carga 3



Anexo II. Mamparo longitudinal en el tanque de agua 12



Anexo III. Plancha de cubierta sobre el bolsillo 7 banda de Babor del tanque 6





Anexo IV. Buque Tanquero Libertad I



## **Apéndice B**

<b>INFORMACIÓN</b>	
Fecha:	2023-06-27
N° Informe:	1
Lugar:	Laboratorio de Hidrocarburos - FCNM
Responsable del Acta:	Michelle López Liliana Vega
Objetivo:	Aplicación de la norma ISO 8407: 2013 para la eliminar corrosión de las muestras de acero.

<b>LIMPIEZA DE MUESTRAS DE ACERO NAVAL</b>				
<p>La norma específica tres tratamientos que pueden aplicarse para la limpieza de las muestras de acero bajo efectos de corrosión. Los tratamientos son químico, electrolítico y mecánico con maquinaria; deben ser tratados por el proceso de limpieza mecánica mediante la utilización de cepillos de cerdas suaves en exposición de un chorro de agua para remover las capas de corrosión adheridas ligeramente al metal (ISO 8407, 2013).</p> <p>Las platinas y especímenes de acero de cada prueba fueron sometidos a inmersión de una solución química como establece la norma en la Tabla A.1. Designación C.3.1 para el tratamiento de limpieza química. Además, el intervalo de tiempo determinado puede variar bajo circunstancias de exposición del metal. En anexos se adjunta los valores de masa obtenido de cada probeta antes y después de cada limpieza y evidencia fotográfica.</p>				
<b>TABLA A.1</b>				
<b>Designación</b>	<b>Material</b>	<b>Productos químicos</b>	<b>Tiempo Total</b>	<b>Temperatura</b>
C.3.1	Hierro y Acero	500 ml de ácido Clorhídrico 1000 ml Agua destilada	10 min	20°C a 25°C

**ANEXO I. DESCRIPCIÓN DE PESOS DE LAS PROBETAS PARA LA PRUEBA DE TENSIÓN**

Probetas con corrosión de (225*20) mm	Punto de probeta	Antes de la limpieza	Después de la limpieza
		peso (g)	peso (g)
	1	234,07	234,00
	2	233,87	228,00
	3	247,74	248,00
	4	252,92	242,00

Probetas no corroídas de (225*20) mm	Punto de probeta	Antes de la limpieza	Después de la limpieza
		peso (g)	peso (g)
	1	294,81	294,00
	2	293,61	294,00

**ANEXO II. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA ANTES Y DESPUÉS DE LA LIMPIEZA**

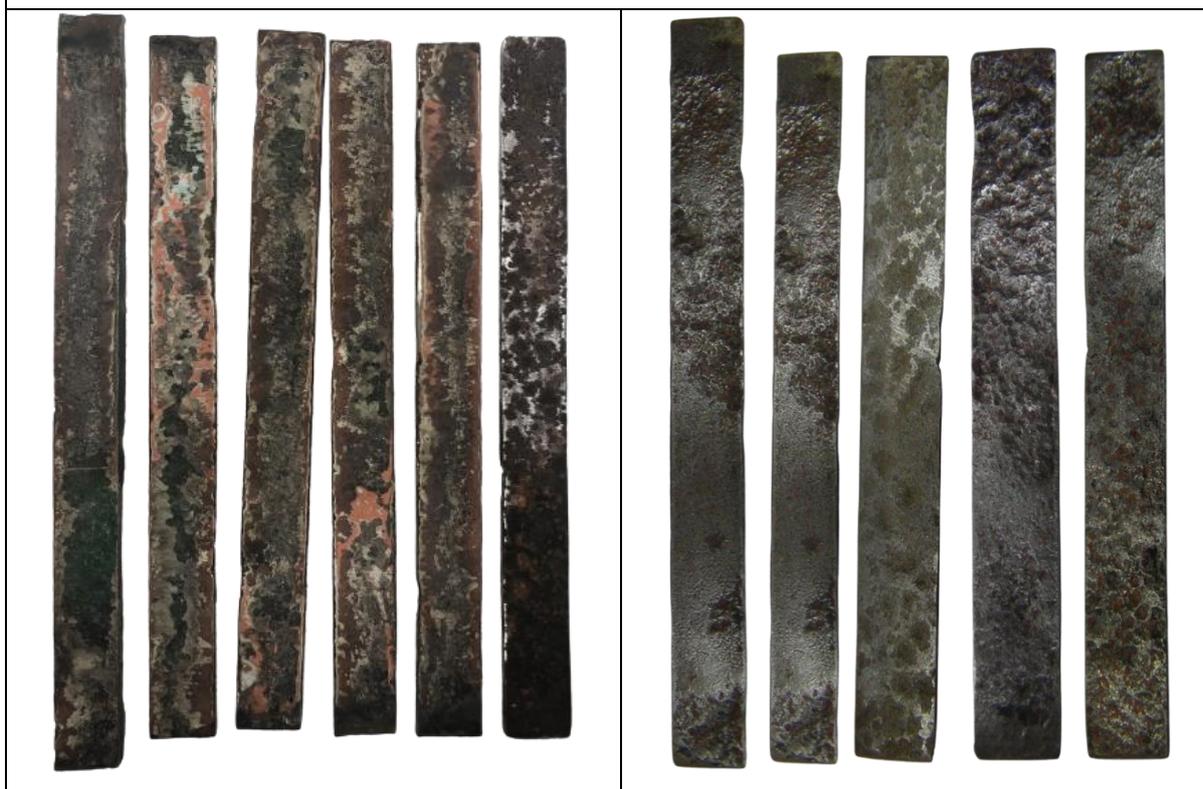


**ANEXO III. DESCRIPCIÓN DE PESOS DE LAS PLATINAS PARA PRUEBAS  
DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS**

	<b>Punto de probeta</b>	<b>Antes de la limpieza</b>	<b>Después de la limpieza</b>
		<b>peso (g)</b>	<b>peso (g)</b>
<b>Platinas con corrosión de (430*40) mm</b>	1	1067,93	1045,00
	2	938,15	925,00
	3	1006,54	995,00
	4	901,44	895,00
	5	1006,60	995,00
	6	1004,13	995,00

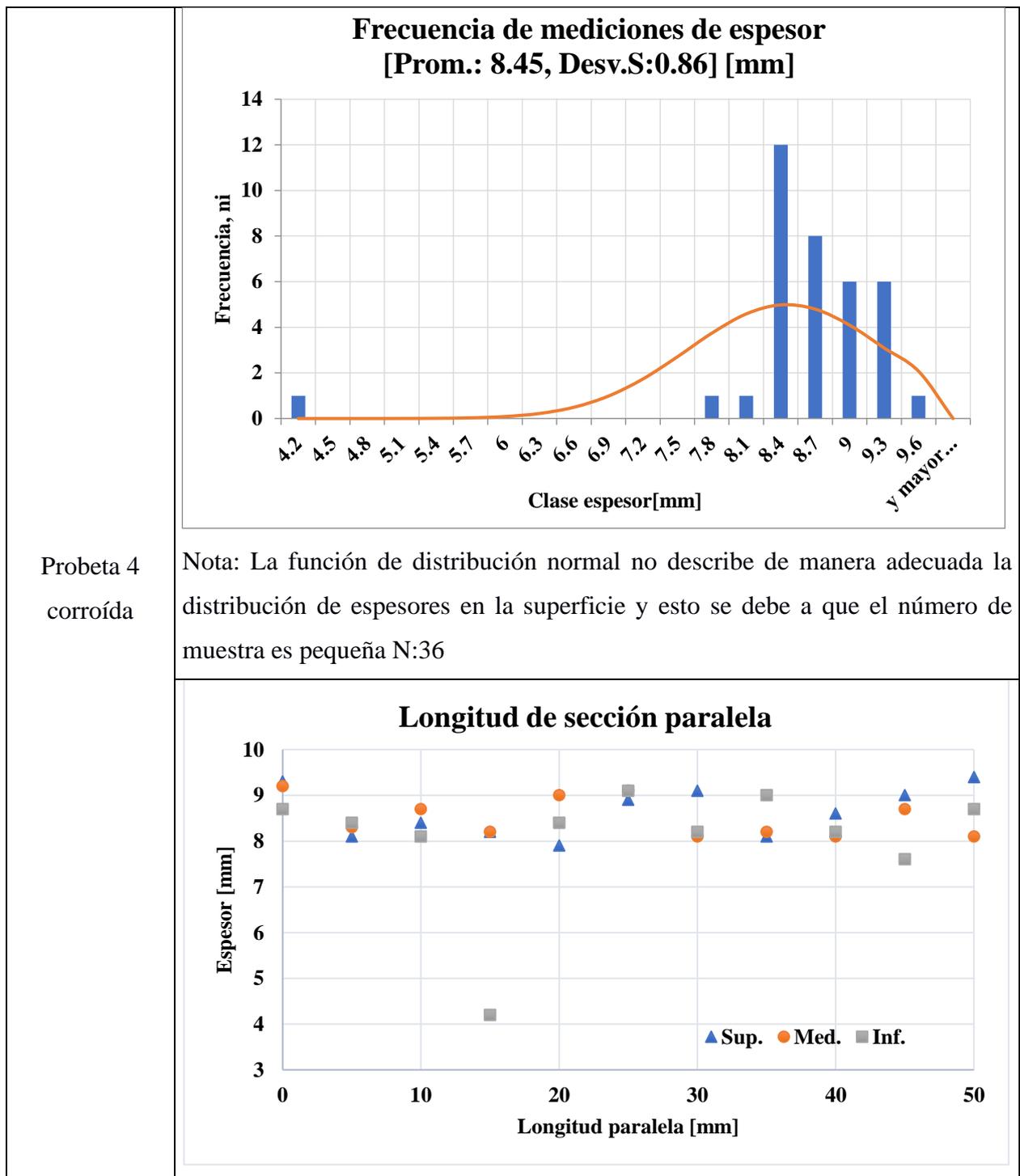
	<b>Punto de probeta</b>	<b>Antes de la limpieza</b>	<b>Después de la limpieza</b>
		<b>peso (g)</b>	<b>peso (g)</b>
<b>Platinas sin corrosión de (430*40) mm</b>	1	1224,40	1222,00
	2	1177,18	1172,00
	3	1202,43	1198,00
	4	1213,62	1208,00
	5	1206,75	1200,00

**ANEXO II. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA ANTES Y DESPUÉS DE LA LIMPIEZA**



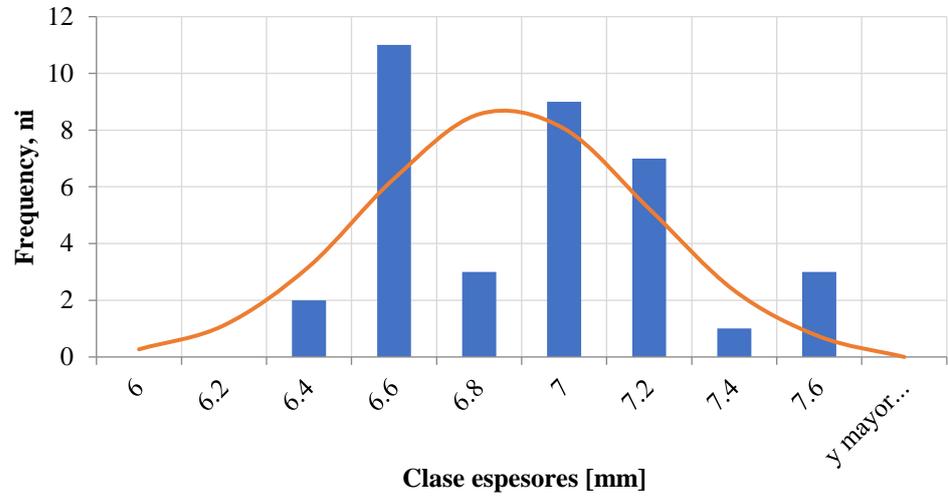
## **Apéndice C**

**Histogramas de frecuencia de mediciones de espesor de las probetas para pruebas de tensión.**

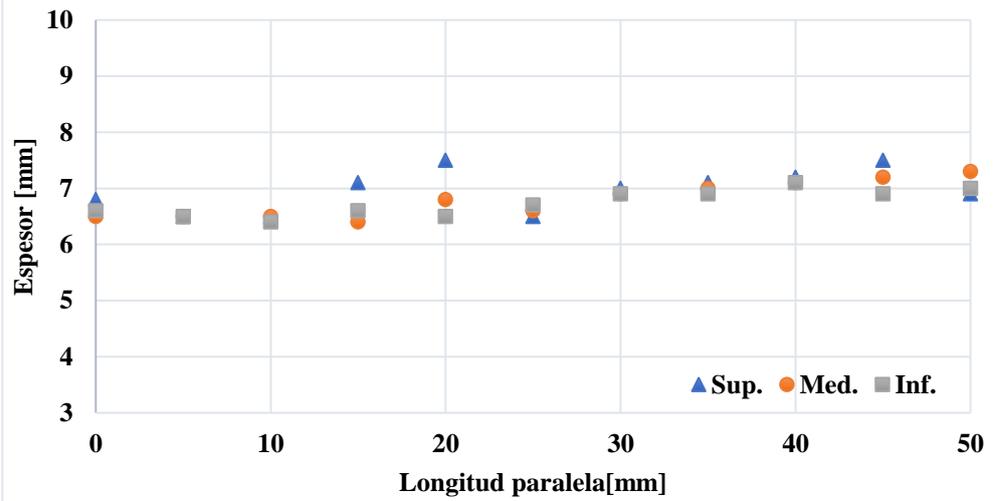


Probeta  
corroída 2  
esmerilado

**Frecuencia de mediciones de espesor**  
[Prom.: 6.87, Desv.S: 0.33] [mm]

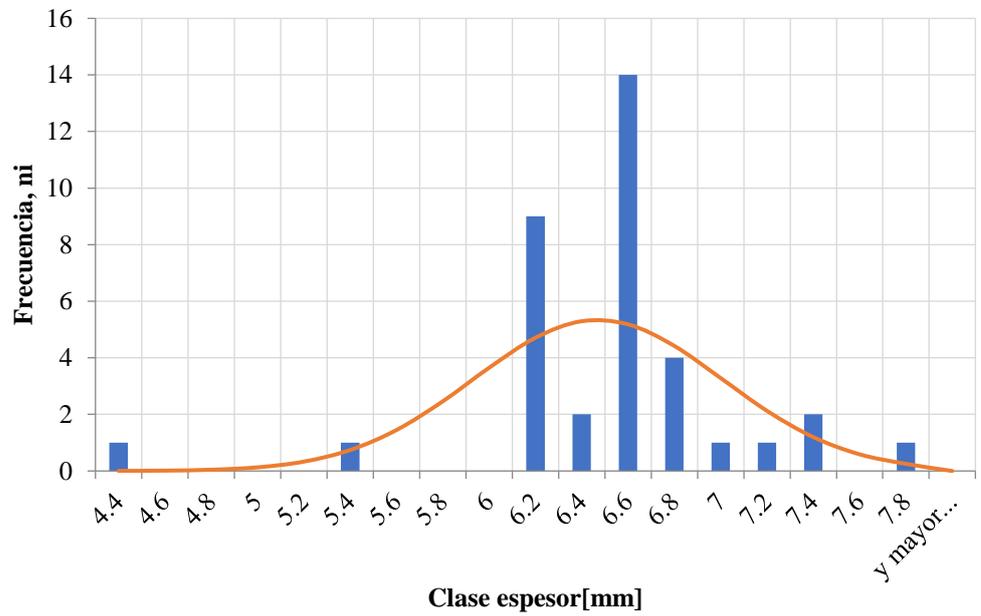


**Longitud de sección paralela**

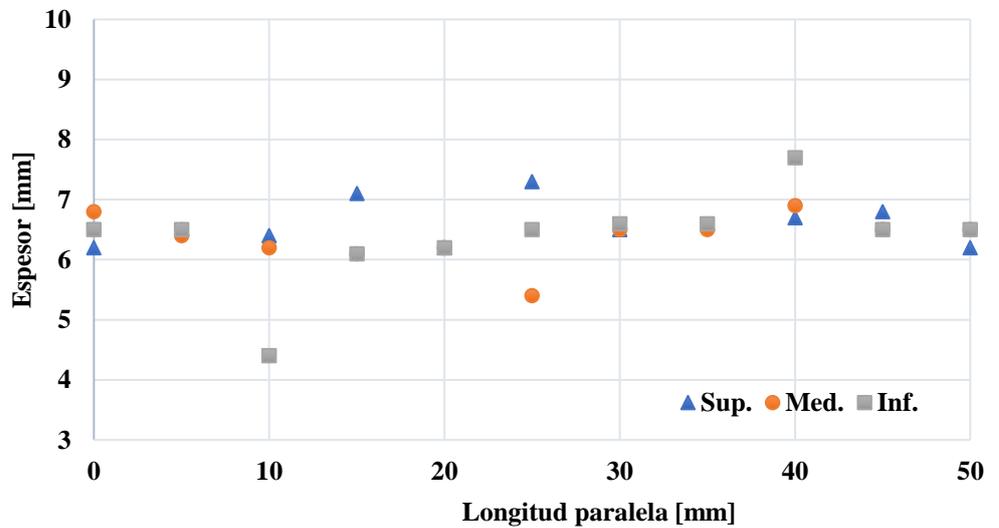


Probeta  
corroída 1  
esmerilado

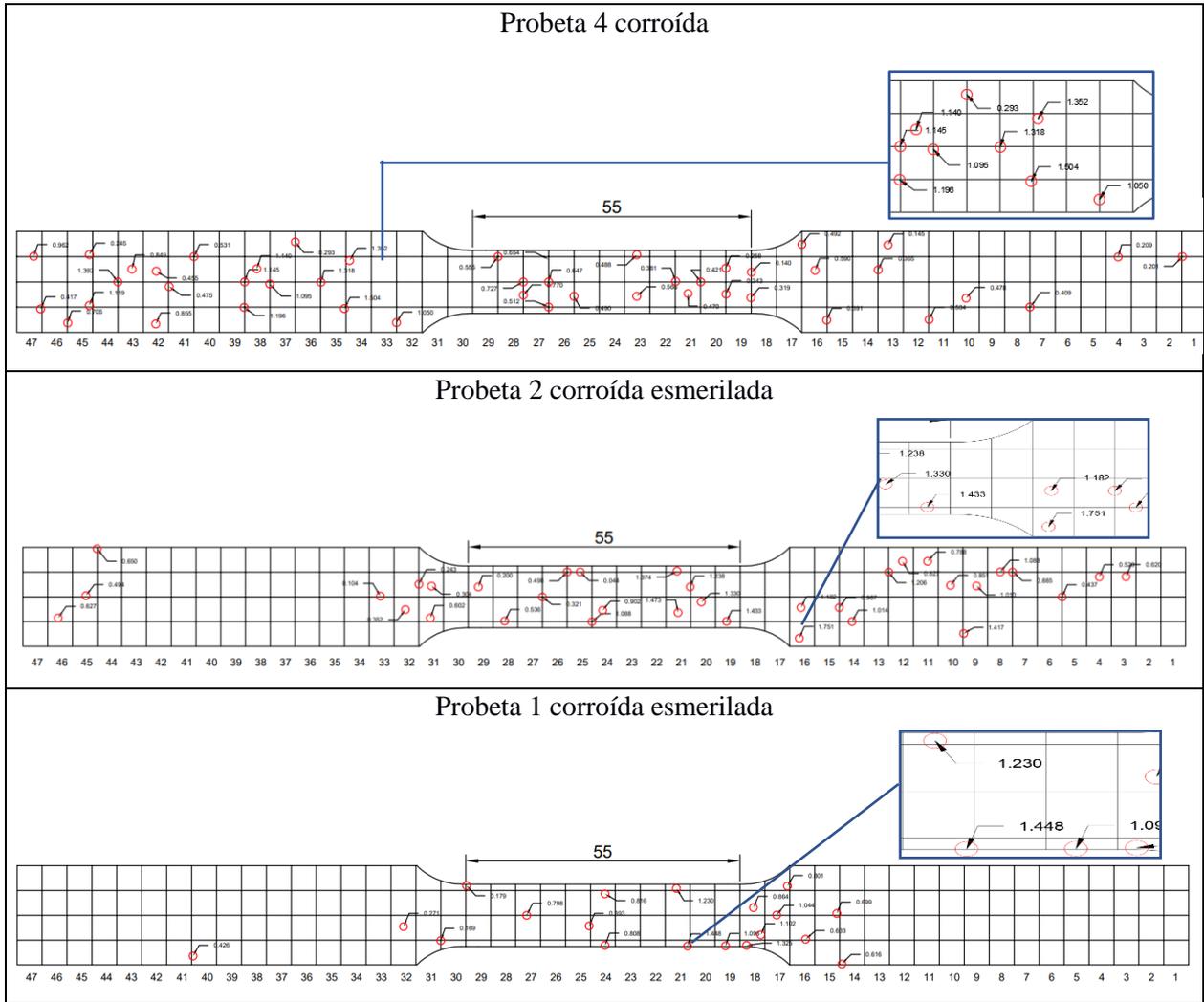
**Frecuencia de mediciones de espesor**  
[Prom.: 6.47, Desv.S: 0.54] [mm]



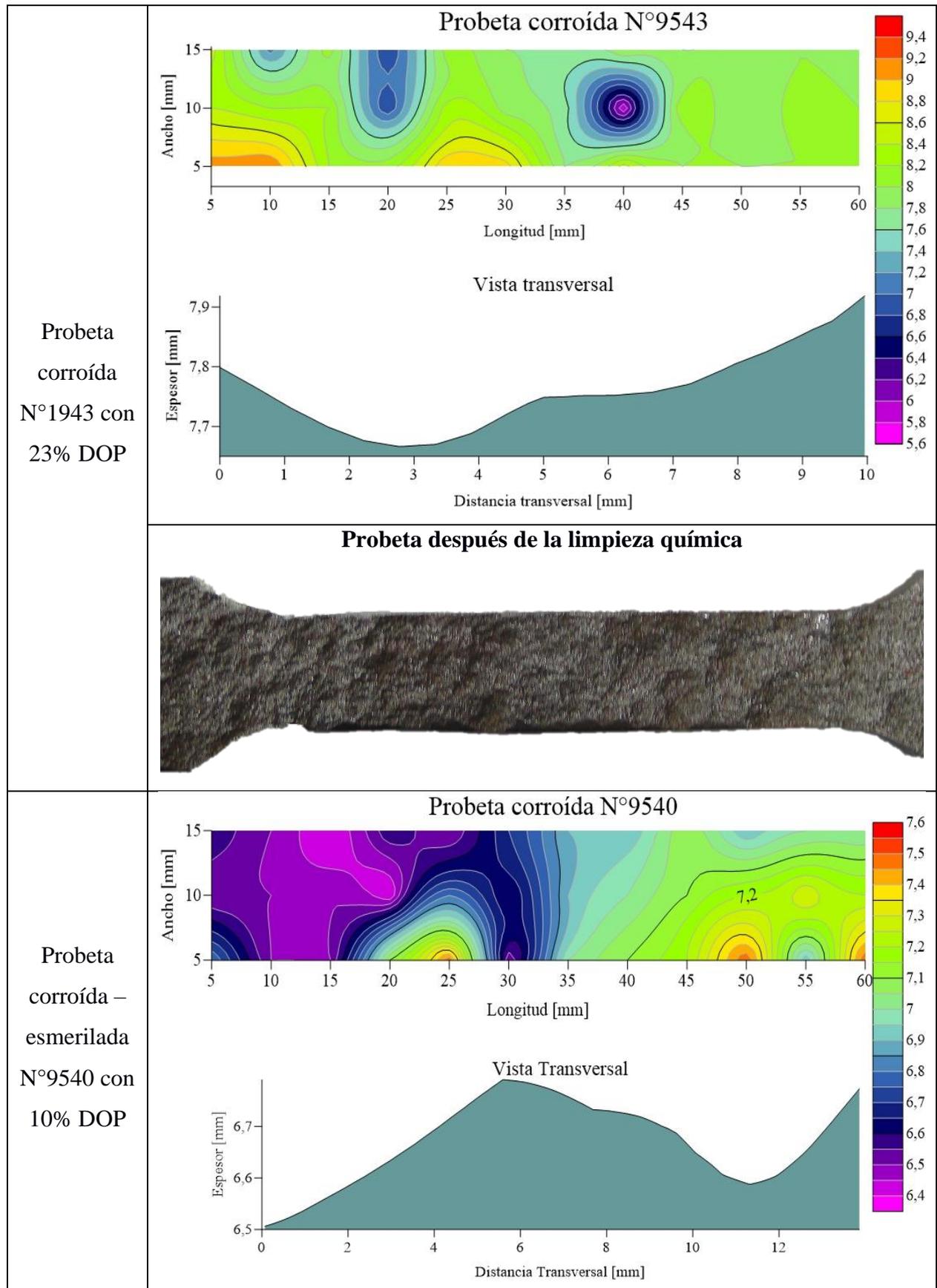
**Longitud de sección paralela**

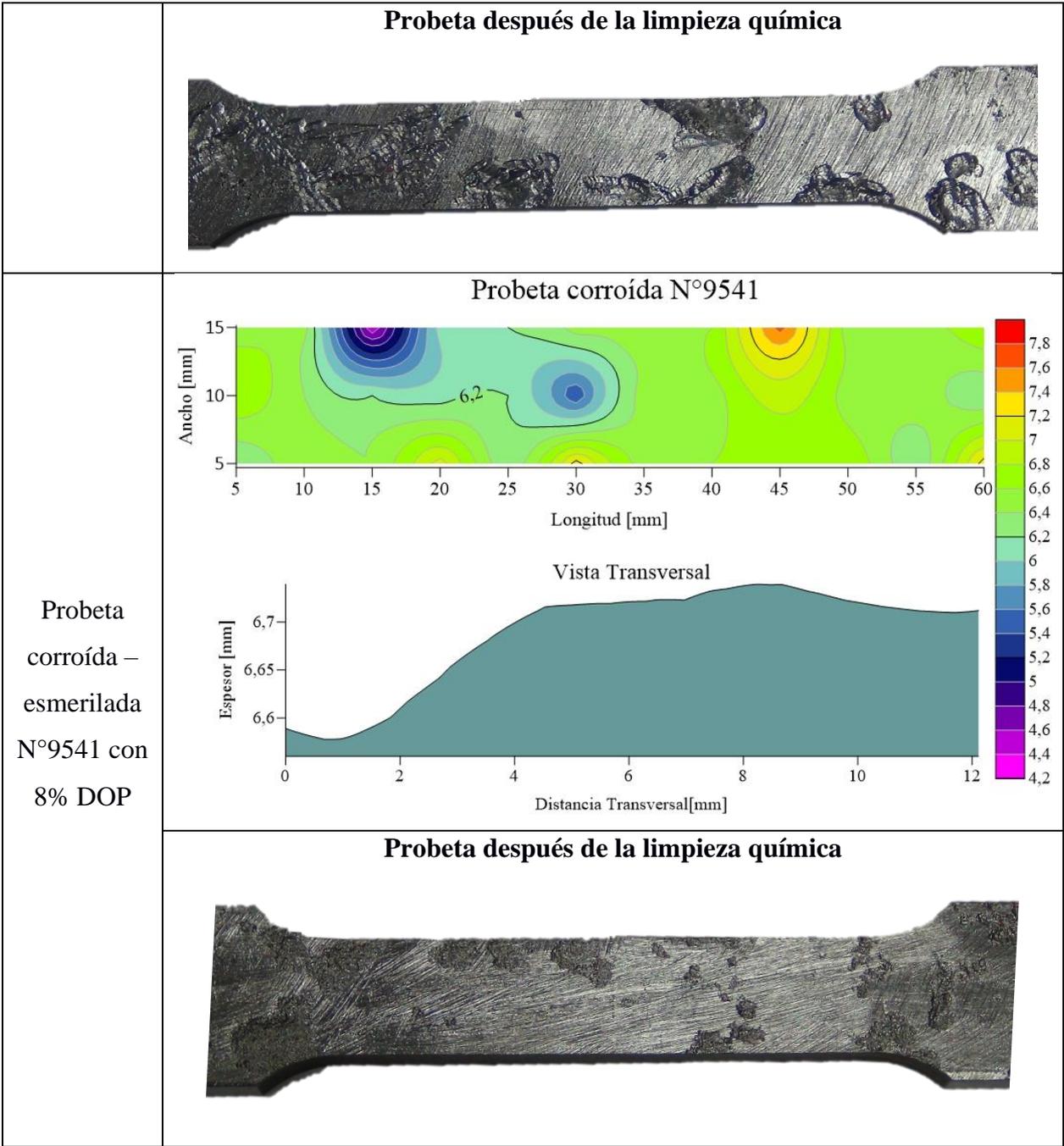


## Distribuciones de pitting en probetas para pruebas de tensión.

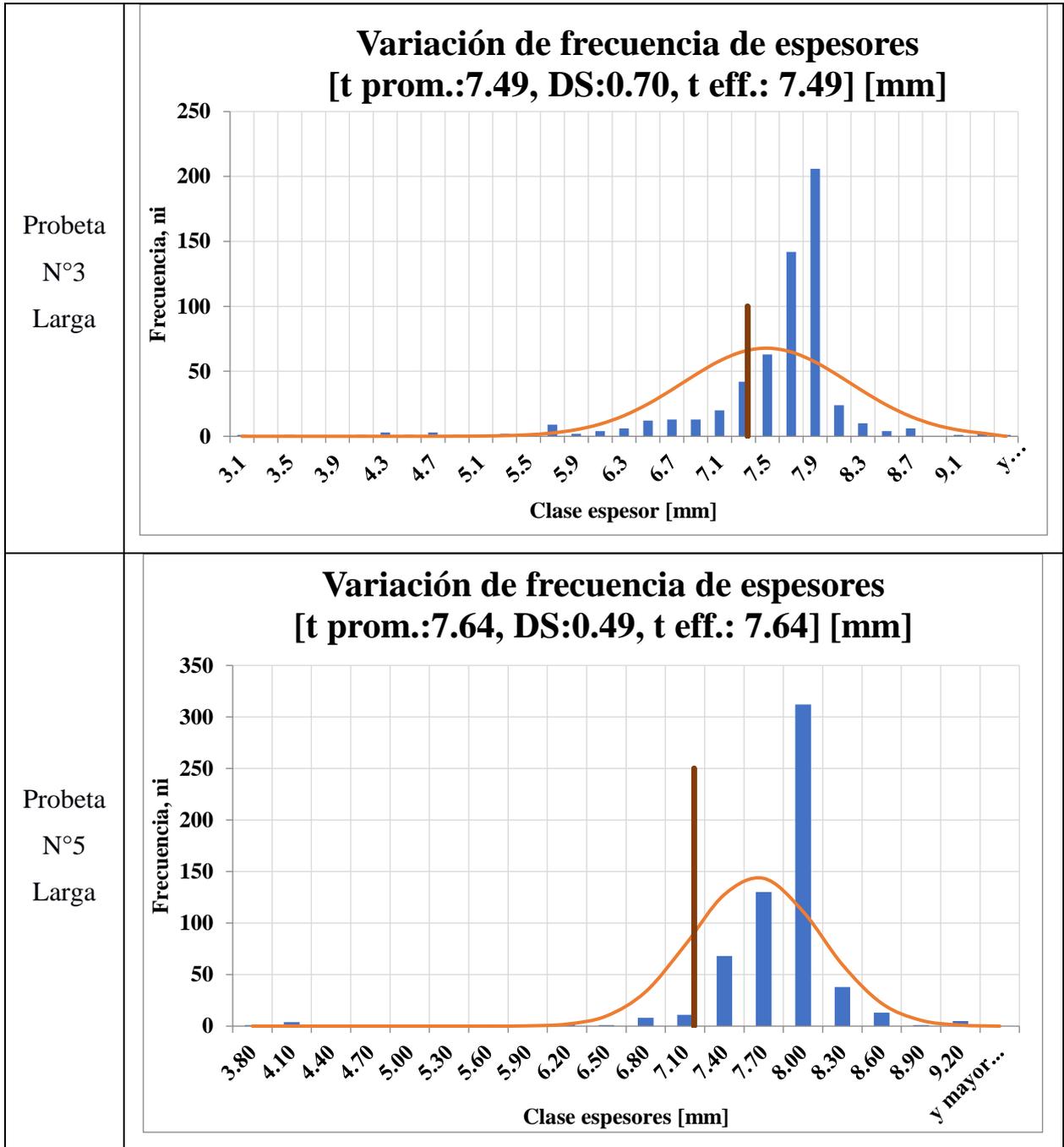


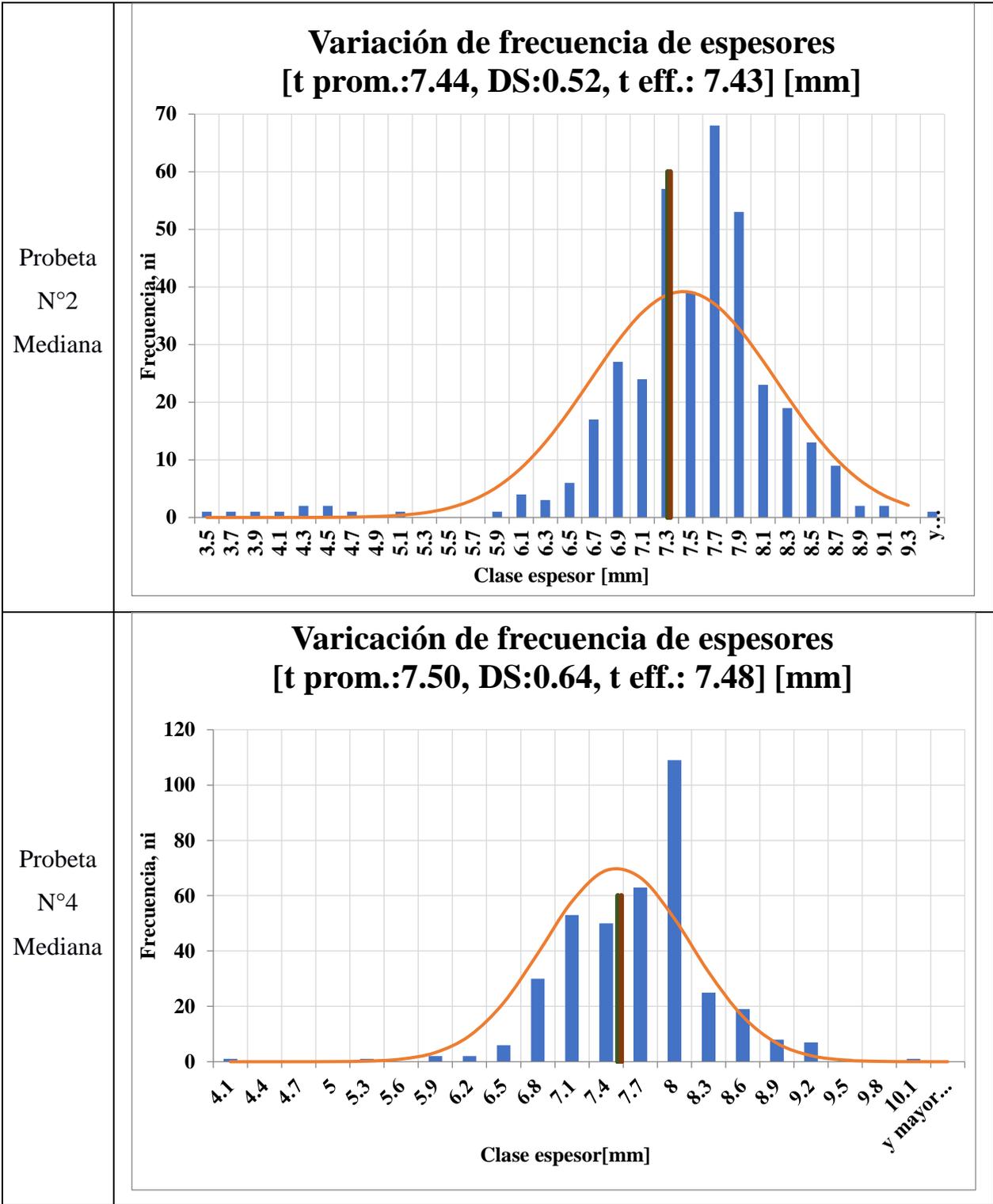
**Curvas de nivel de espesores de las probetas para pruebas de tensión.**

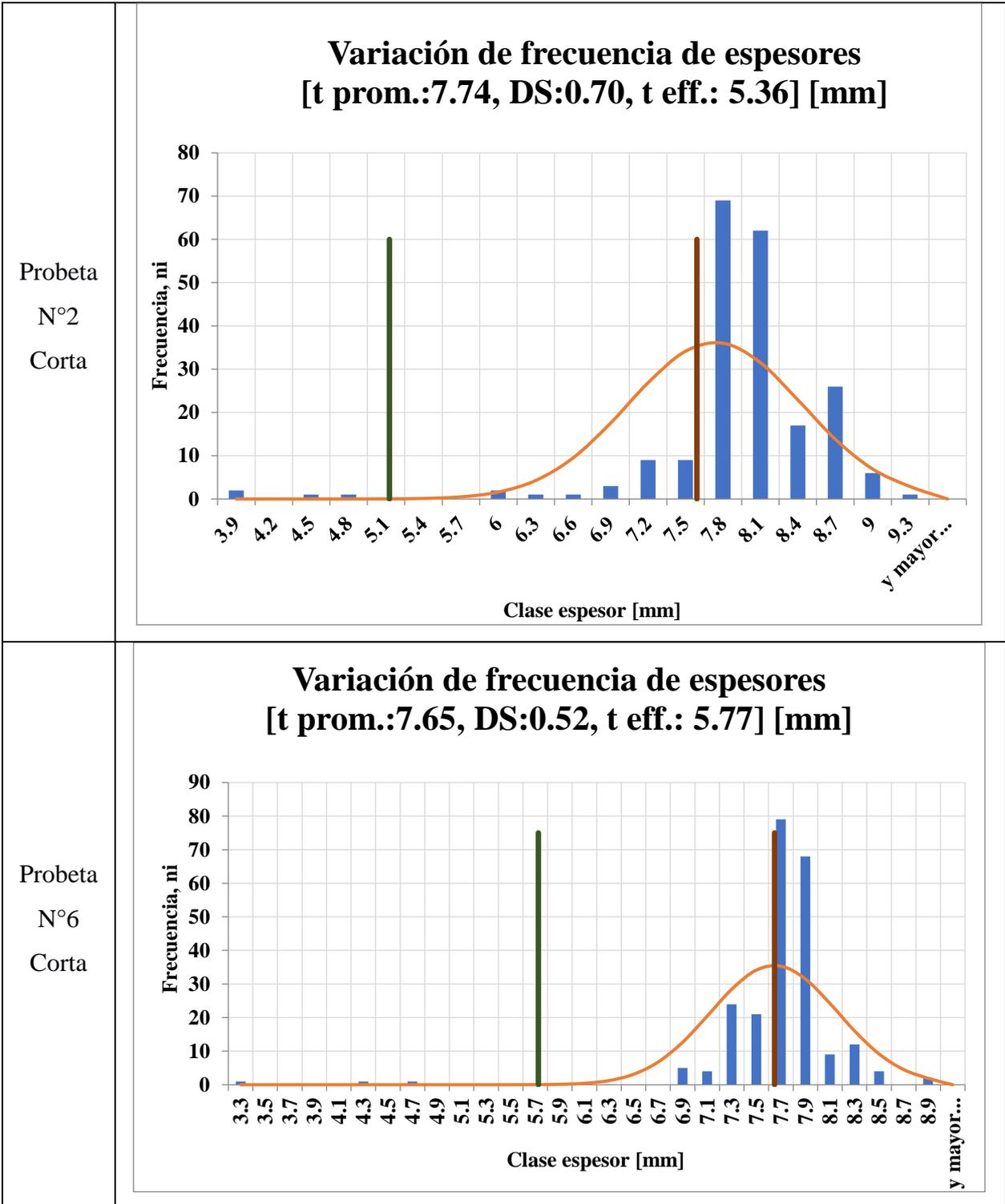




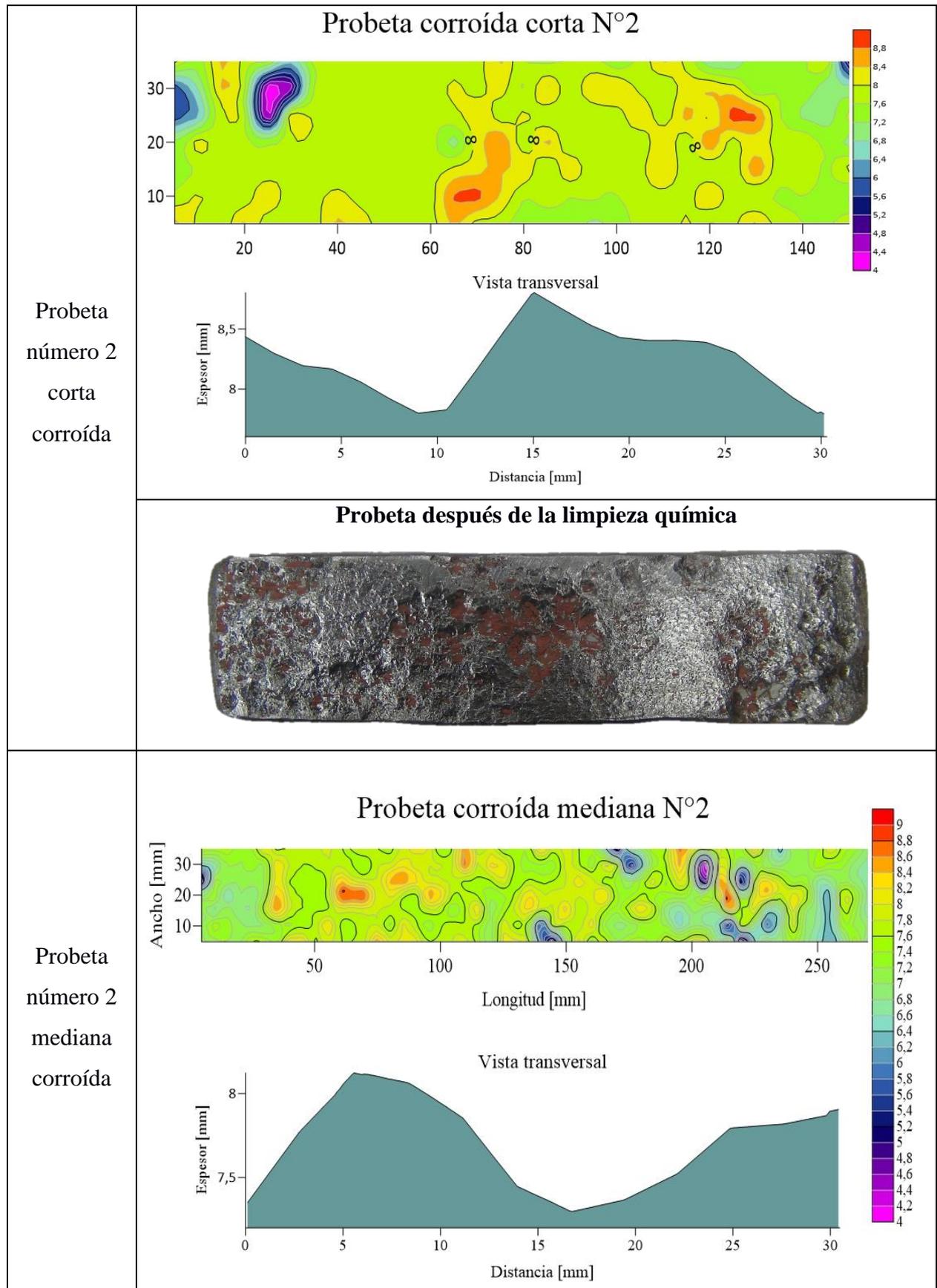
**Resultados de la distribución de espesores para probetas de la prueba de Pandeo**

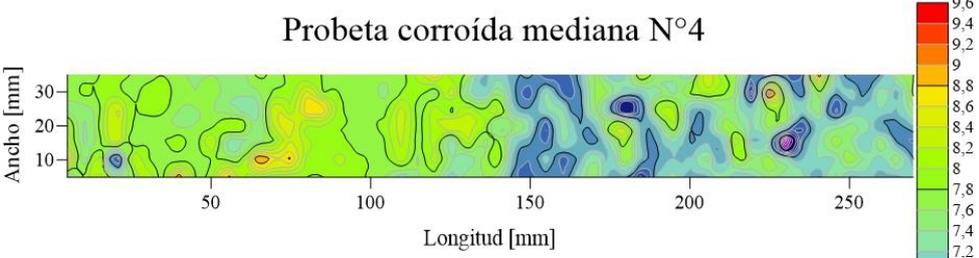
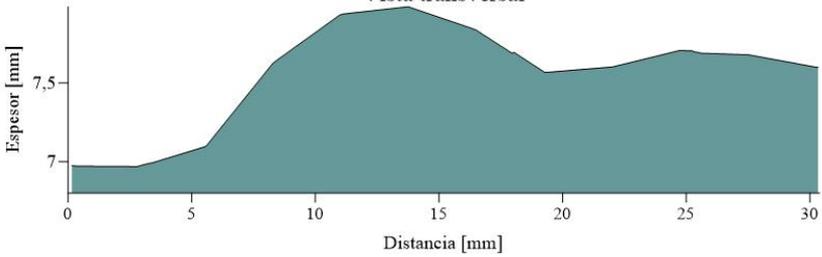
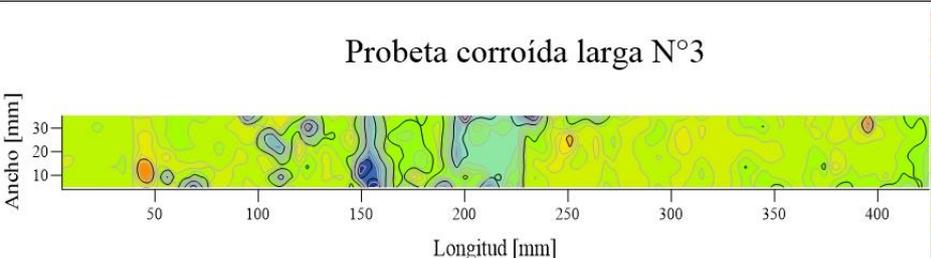
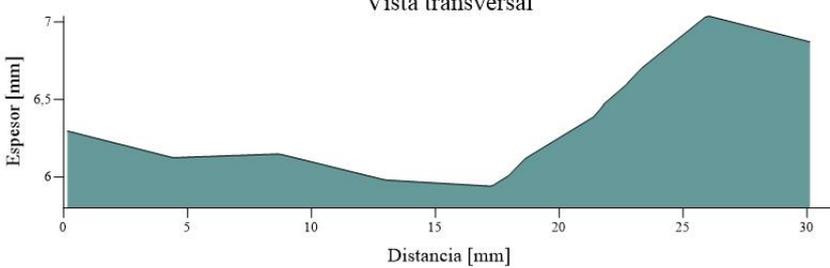


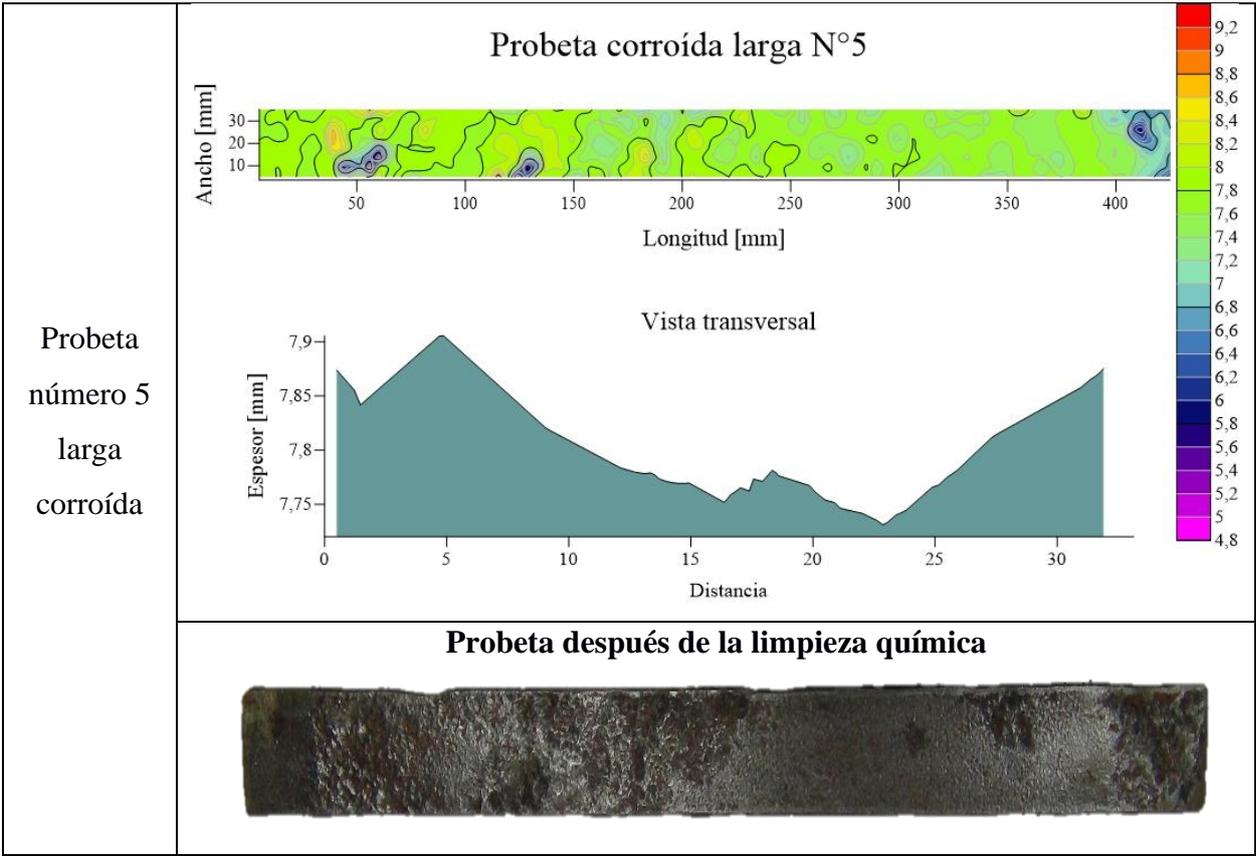




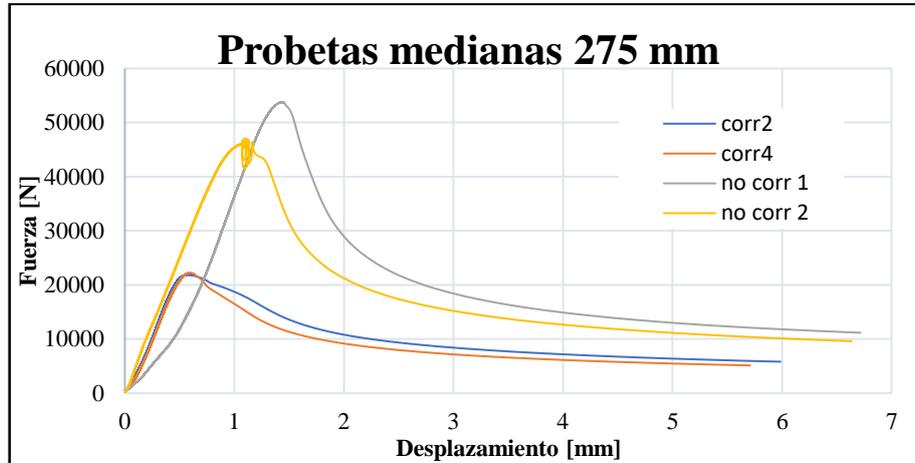
**Curvas de nivel de espesores de las probetas para pruebas de pandeo.**



	<p style="text-align: center;"><b>Probeta después de la limpieza química</b></p> 
<p>Probeta número 4 mediana corroída</p>	<p style="text-align: center;"><b>Probeta corroída mediana N°4</b></p>  <p style="text-align: center;">Vista transversal</p> 
	<p style="text-align: center;"><b>Probeta después de la limpieza química</b></p> 
<p>Probeta número 3 larga corroída</p>	<p style="text-align: center;"><b>Probeta corroída larga N°3</b></p>  <p style="text-align: center;">Vista transversal</p> 
	<p style="text-align: center;"><b>Probeta después de la limpieza química</b></p> 



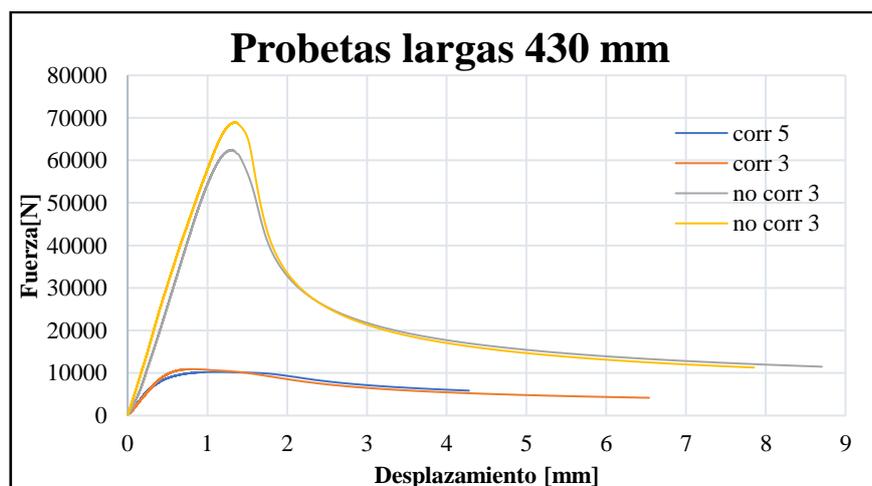
## Resultado experimental de la prueba de pandeo



Fuerza vs Desplazamiento - probetas medianas

Cuadro de resumen - probetas medianas

Probetas medianas					
N° probeta	Corroídas		No corroídas		Unidades
	2	4	1	2	
E	2,058E+11	2,058E+11	2,058E+11	2,058E+11	N/m <sup>2</sup>
Ic	1,37E-09	1,40E-09	2,68E-09	2,68E-09	m <sup>4</sup>
P crítico	36873	37726	72012	72012	N
P yield	69938	70473	87420	87420	N
P ultimo	21992	22248	53840	47073	N
σ ultimo	74	74	145	127	N/mm <sup>2</sup>



Fuerza vs Desplazamiento - probetas largas

Cuadro de resumen - probetas largas

Probetas largas					
N° probeta	Corroídas		No corroídas		Unidades
	5	3	3	3	
<b>E</b>	2,058E+11	2,058E+11	2,058E+11	2,058E+11	N/m <sup>2</sup>
<b>Ic</b>	1,49E-09	1,40E-09	2,68E-09	2,68E-09	m4
<b>P crítico</b>	16355	15394	117814	117814	N
<b>P yield</b>	71854	70418	87420	87420	N
<b>P último</b>	10252	10928	62483	68999	N
<b>σ último</b>	34	36	168	185	N/mm <sup>2</sup>

Tabla de resumen de espesor efectivo para placas corroída y no corroídas.

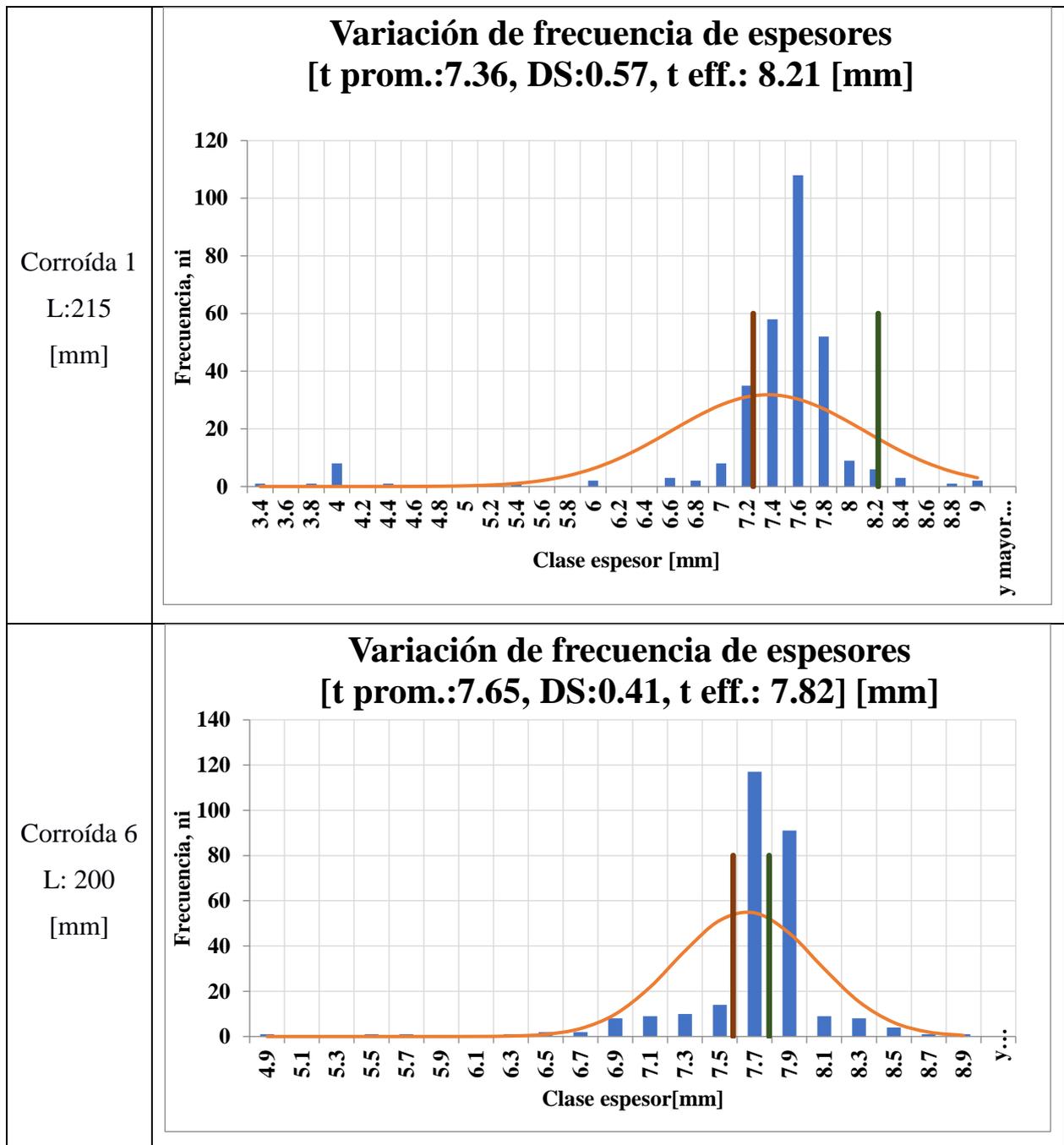
Cuadro de resumen de espesor equivalente

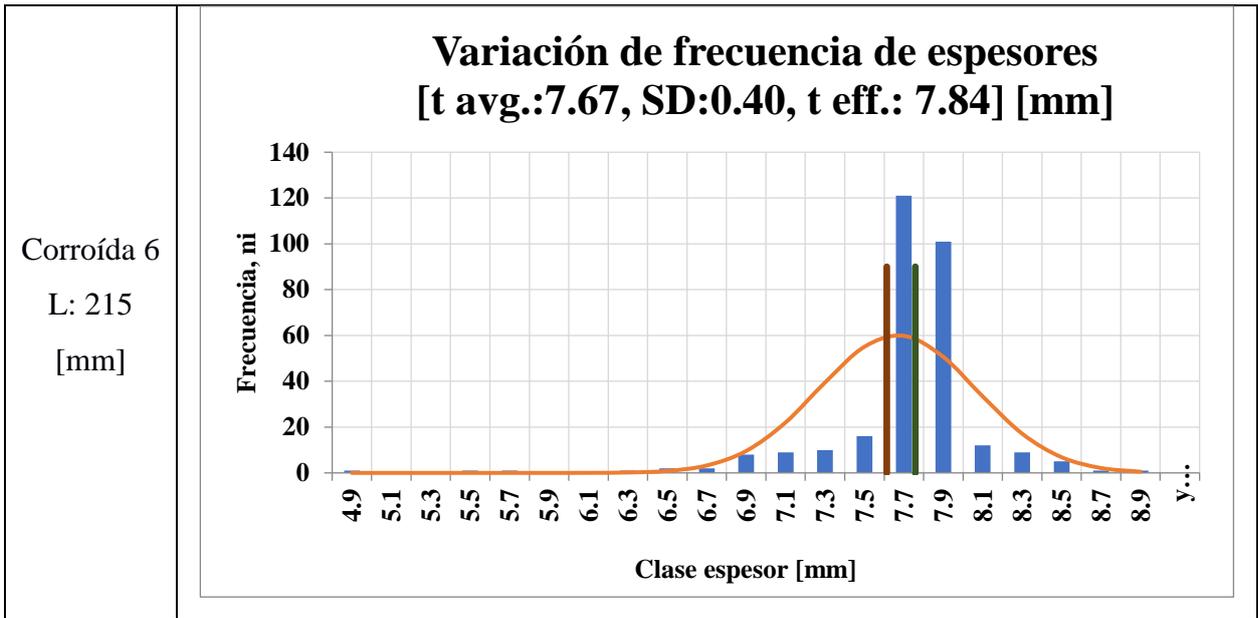
E [N/mm <sup>2</sup> ]		2.06E+05				DNV		teff [mm]
Material	L [mm]	t mean [mm]	L/kzz	Pcr, N	sigcr, [MPa]	σ el [MPa]	σ cr [MPa]	
Corroído	155.00	7.74	69	49544	160	422	202	5.36
	155.00	7.47	72	47050	157	393	200	5.33
	275.00	7.44	128	21992	74	124	124	7.43
	275.00	7.50	127	22248	74	126	125	7.48
	430.00	7.64	195	10252	34	53	53	7.64
	430.00	7.49	199	10928	36	51	51	7.49
	170.00	7.65	77	58650	192	342	195	5.77
No corroído	155.00	9.30	58	82302	221	609	212	5.49
	155.00	9.30	58	77529	208	609	212	5.49
	275.00	9.30	102	53840	145	194	164	8.55
	275.00	9.30	102	47073	127	194	164	8.55
	215.00	9.30	80	62483	168	317	191	7.23
	215.00	9.30	80	68999	185	317	191	7.23
	170.00	9.10	65	72241	209	485	207	5.94

Cuadro de resumen de espesor equivalente

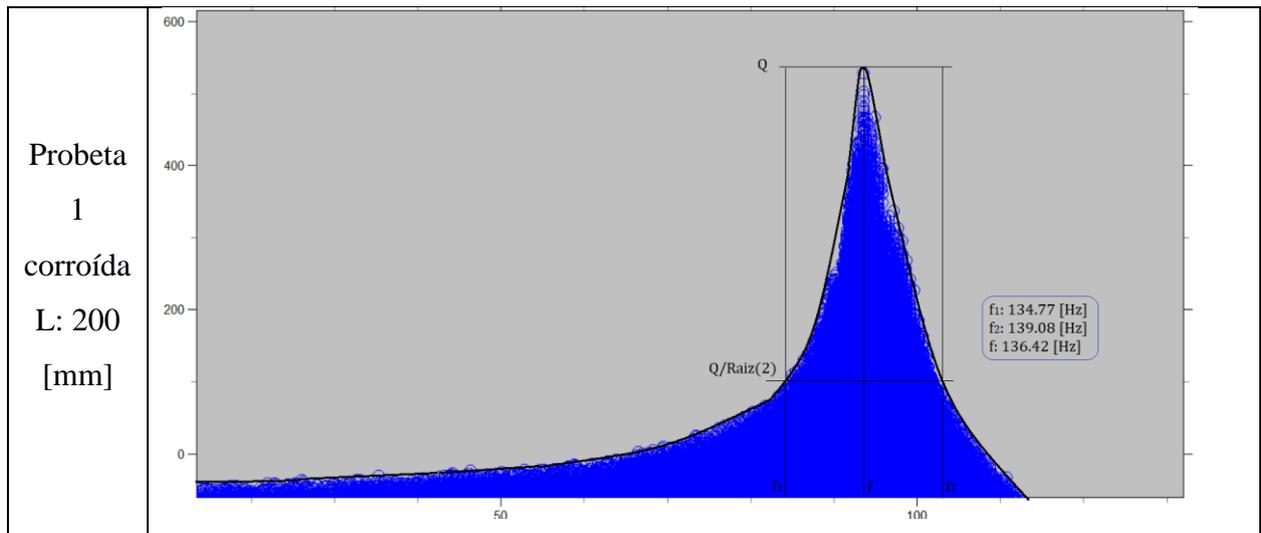
								Exp.	Nakai
Material	t <sub>o</sub> [plg]	t <sub>o</sub> [mm]	L [mm]	L/kzz	t <sub>ave</sub> min	t <sub>al</sub> [mm]	t <sub>el</sub> [mm]	t <sub>e</sub> /t <sub>o</sub>	t <sub>e</sub> /t <sub>o</sub>
Corroído	23/64	9.13	155	100	5.36	3.77	4.71	0.59	0.48
			155	100	5.33	3.80	4.75	0.58	0.48
			170	102	5.77	3.36	4.20	0.63	0.54
			275	128	7.43	1.70	2.12	0.81	0.77
			275	127	7.48	1.65	2.06	0.82	0.77
			430	194	7.64	1.48	1.86	0.84	0.80
430			198	7.49	1.64	2.05	0.82	0.78	
No corroído			155	58	5.49	3.64	4.55	0.60	0.50
			155	58	5.49	3.64	4.55	0.60	0.50
			275	102	8.55	0.58	0.72	0.94	0.92
			275	102	8.55	0.58	0.72	0.94	0.92
			215	80	7.23	1.90	2.37	0.79	0.74
			215	80	7.23	1.90	2.37	0.79	0.74
			170	65	5.94	3.19	3.99	0.65	0.56

**Resultados de la distribución de espesores para probetas de la prueba de vibración resonante y flexión:**

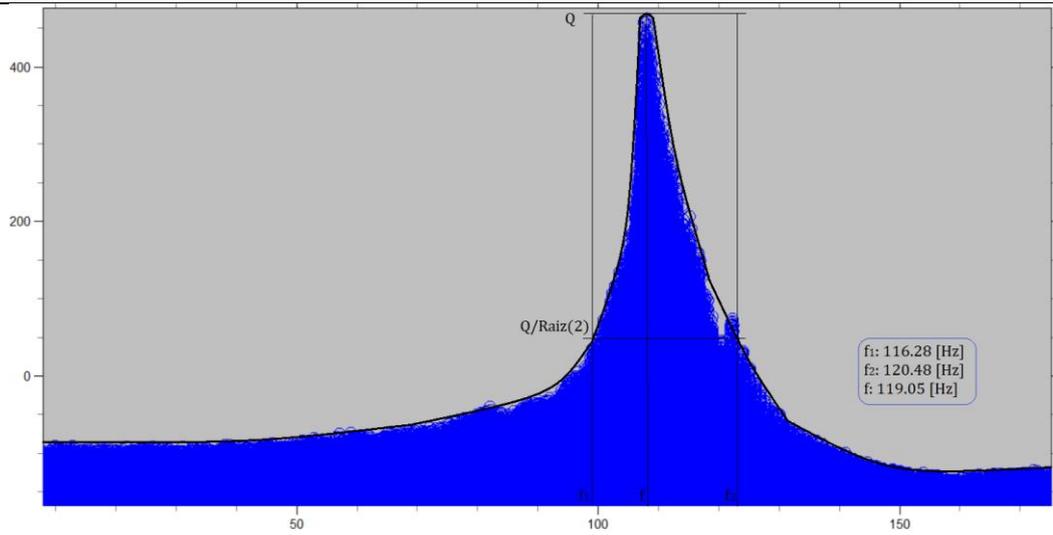




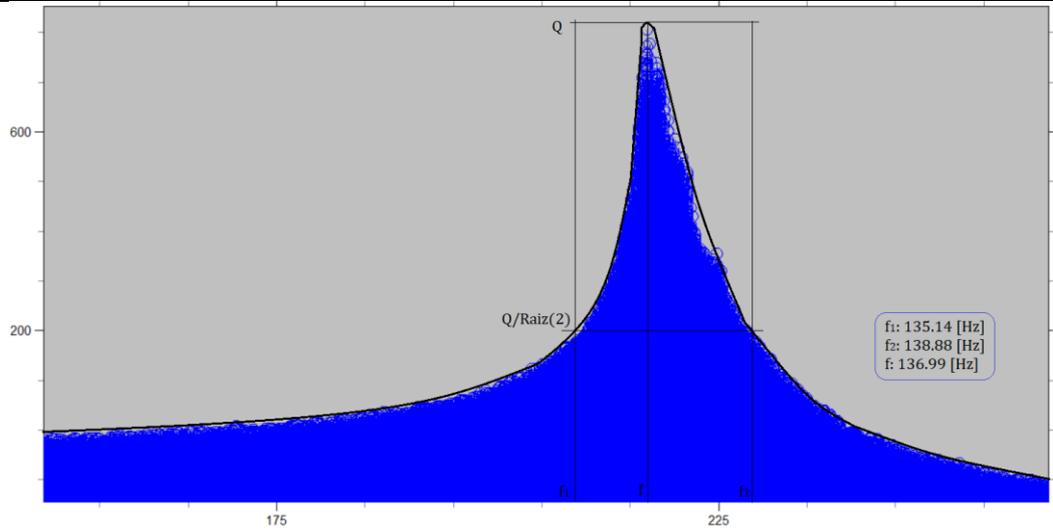
**Amplitudes de respuesta de vibración resonante:**



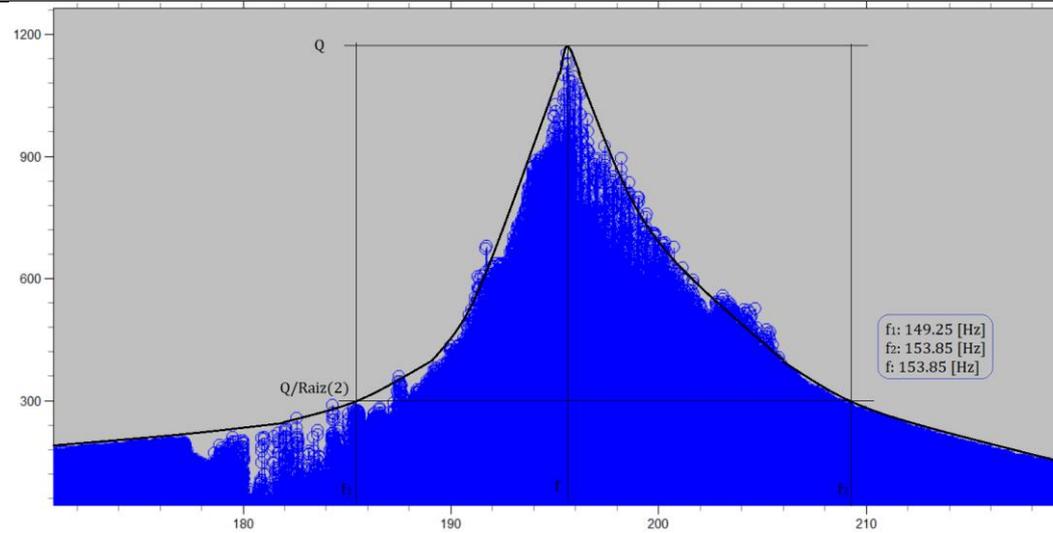
Probeta 6  
corroída  
L: 215  
[mm]

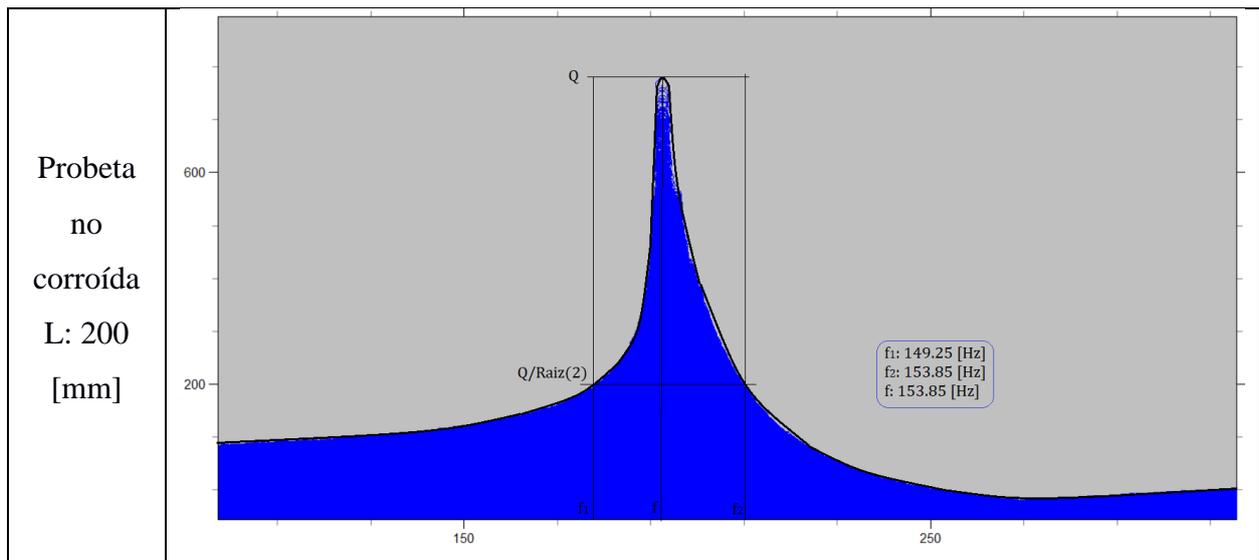


Probeta 6  
corroída  
L: 200  
[mm]



Probeta  
no  
corroída  
L: 215  
[mm]





**Método de Ryan Joiner, para evaluar la muestra:**

$$R_{jc} = \frac{\sum X_i Z_i}{\sqrt{s^2(n-1) \sum Z_i^2}}$$

Donde:

$X_i$ : Espesores

$Z_i$ : Distribución normal estándar

$s^2$ : varianza de la muestra

n: número total de la muestra

Resultados de las muestras totales, es decir acumulación de las muestras por probetas.

*Resultados de la acumulación de muestras*

Desviación estándar	0.64
Varianza de la muestra	0.41
Cuenta	3507.00
$X_i * Z_i$	-96.61
$Z_i^2$	3502.18
s	0.64
<b>Rj</b>	<b>-0.04</b>