



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**PROPAGACIÓN DE DAÑOS EN DUCTOS
POR CORROSIÓN LOCALIZADA MEDIANTE
PROCESOS ESTOCÁSTICOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

PRESENTA:

OSCAR ALBERTO MORALES GÓMEZ

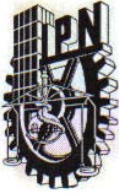
DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE LUIS ALAMILLA LÓPEZ



MÉXICO D.F.

2007



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 18:00 horas del día 01 del mes de Octubre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. - U.Z.

para examinar la tesis de grado titulada:
"PROPAGACIÓN DE DAÑOS EN DUCTOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS".

Presentada por el alumno:

MORALES	GÓMEZ	OSCAR ALBERTO
Apellido paterno	materno	nombre(s)

Con registro:


A	0	5	0	6	6	0
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis


 DR. JORGE LUIS ALAMILLA LÓPEZ


 DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ


 DR. FRANCISCO CASANOVA DEL ANGEL


 DR. ESTEBAN FLORES MÉNDEZ


 DR. ESTEBAN ASTUDILLO DE LA MEGA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


 DR. HÉCTOR A. SÁNCHEZ SÁNCHEZ.



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

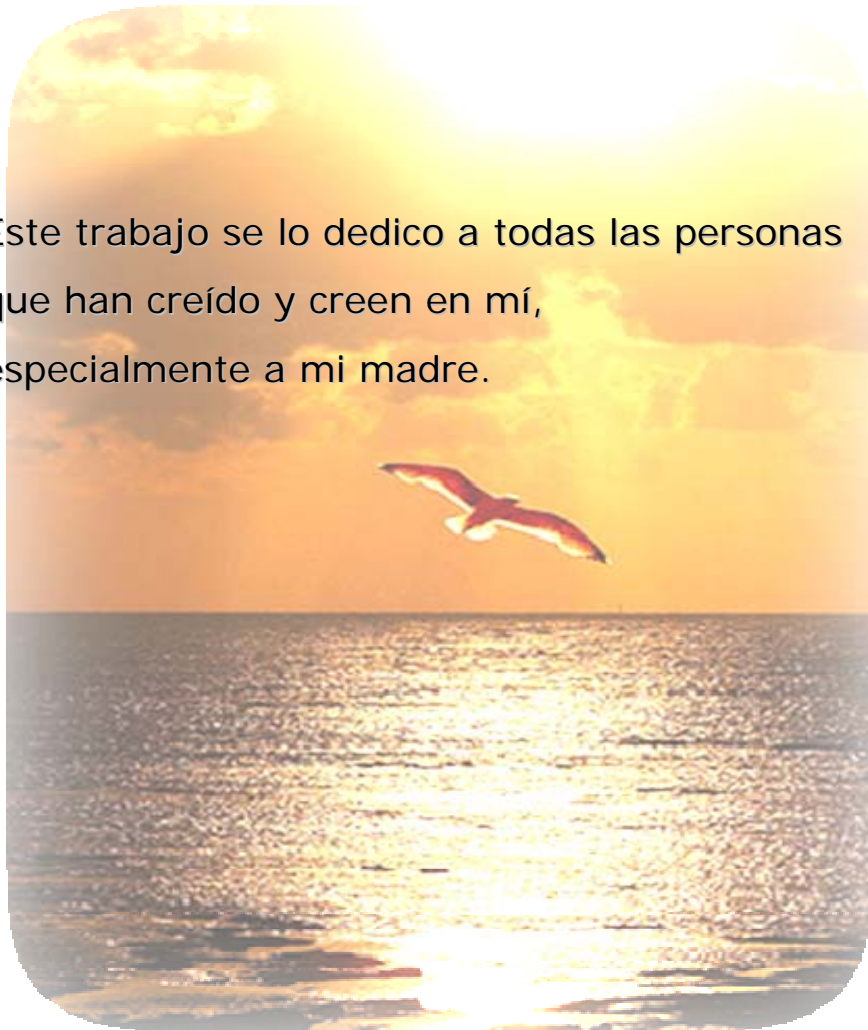
En la Ciudad de México el día 13 del mes de noviembre del año 2007, el que suscribe Oscar Alberto Morales Gómez alumno del Programa de Maestría en Ciencias con Especialidad en Estructuras con número de registro A050660, adscrito a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Jorge Luis Alamilla López y cede los derechos del trabajo intitulado: *"Propagación de Daños en Ductos por Corrosión Localizada Mediante Procesos Estocásticos"*, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección *"oa_mg@yahoo.com.mx"*. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Oscar Alberto Morales Gómez

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que han creído y creen en mí, especialmente a mi madre.



Agradecimientos

Mi agradecimiento sincero y profundo al Instituto Politécnico Nacional, esencialmente a la S.E.P.I. – E.S.I.A. U.ZAC, por ofrecerme la oportunidad de formarme en un nivel de posgrado.

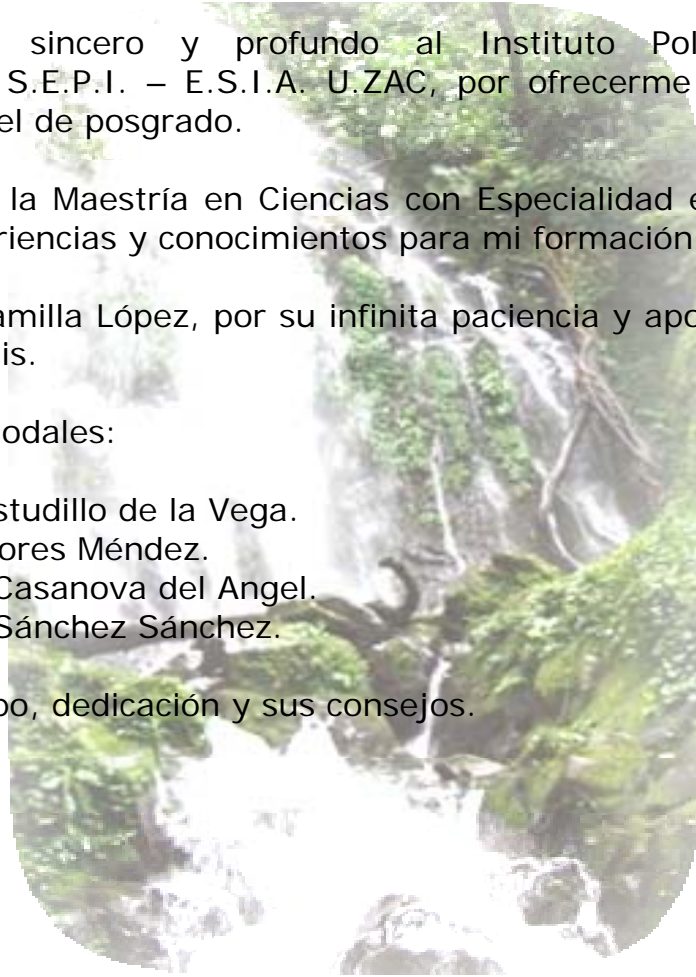
A los profesores de la Maestría en Ciencias con Especialidad en Estructuras, por brindarme sus experiencias y conocimientos para mi formación académica.

Al Dr. Jorge Luis Alamilla López, por su infinita paciencia y apoyo en el desarrollo de mi trabajo de tesis.

A mis profesores sinodales:

- Dr. Esteban Astudillo de la Vega.
- Dr. Esteban Flores Méndez.
- Dr. Francisco Casanova del Angel.
- Dr. Héctor A. Sánchez Sánchez.

Gracias por su tiempo, dedicación y sus consejos.



Resumen

El objetivo de esta investigación fue predecir la evolución del deterioro interno por corrosión localizada, en sistemas de transporte de ductos para la conducción de hidrocarburos, a partir de un reporte de inspección. Para lograr lo anterior, se analizaron y evaluaron diversos modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la evolución del daño interno por corrosión. Se desarrollaron dos modelos de propagación del daño interno por corrosión localizada, para evaluar la evolución en el tiempo de la profundidad del deterioro. Estos modelos se desarrollaron con base en el concepto de velocidad promedio del daño interno por corrosión v^* , definiéndose dos ecuaciones, la primera a partir de una ecuación diferencial de segundo orden y la segunda a partir de una ecuación diferencial de tercer orden, ambas en serie de Taylor. Las soluciones de las ecuaciones diferenciales describen la velocidad del daño interno por corrosión y por consiguiente, la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión. Con base en los modelos de propagación del daño interno por corrosión y a través de un análisis de regresión no lineal, se determinaron los parámetros de los modelos de propagación: la velocidad instantánea del daño interno por corrosión v_p , la velocidad inicial del daño interno por corrosión v_0 , y el incremento de tiempo Δt . Los modelos de propagación se aplicaron a tres sistemas de ductos: diesel, gasolina y petróleo crudo. Asimismo, se calibraron utilizando daños identificados en dos inspecciones de un mismo sistema de transporte de gasolina. Como se esperaba, se observó en las calibraciones de los modelos de propagación, que las profundidades predichas son conservadoras. Esto ocurre ya que, después de la primera inspección el sistema fue protegido internamente con inhibidor de corrosión. La sobrestimación de los modelos de propagación se analiza considerando un factor de corrección, que implica los casos en el que el sistema de ductos se presenta con y sin el efecto de la aplicación de inhibidor de corrosión.

Abstract

The objective of this investigation was to predict the evolution of the internal deterioration for located corrosion, in systems of transport of ducts for the conduction of hydrocarbons, starting from an inspection report. To achieve the above-mentioned, they were analyzed and diverse mathematical models evaluated to predict the behavior of the evolution of the internal damage for corrosion. Two models of propagation of the internal damage were developed by located corrosion, to evaluate the evolution in the time of the depth of the deterioration. These models were developed with base in the concept of speed average of the internal damage for corrosion v^* , being defined two equations, the first one starting from a differential equation of second order and the second starting from a differential equation of third order, both in series of Taylor. The solutions of the differential equations describe the speed of the internal damage for corrosion and consequently, the propagation of the depth of the internal damage for corrosion. With base in the models of propagation of the internal damage for corrosion and through an analysis of non lineal regression, the parameters of the propagation models were determined: the instantaneous speed of the internal damage for corrosion v_p , the initial speed of the internal damage for corrosion v_0 , and the increment of time Δt . The propagation models were applied to three systems of ducts: diesel, gasoline and raw petroleum. Also, they were gauged using damages identified in two inspections of oneself system of transport of gasoline. As it was expected, it was observed in the calibrations of the propagation models that the depths predichas is conservative. This happens since, after the first inspection the system was protected internally with inhibitor of corrosion. The overestimation of the propagation models is analyzed considering a correction factor that implies the cases in which the system of ducts is presented with and without the effect of the application of inhibitor of corrosion.

Résumé

L'objectif de cette enquête était prédire l'évolution de la détérioration interne pour la corrosion localisée, dans systèmes de transport de conduits pour la conduction d'hydrocarbures, commencer d'un rapport de l'inspection. Accomplir le susmentionné, ils ont été analysés et les modèles mathématiques divers ont évalué pour prédire le comportement de l'évolution du dégât interne pour la corrosion. Deux modèles de propagation du dégât interne ont été développés par corrosion localisée, évaluer l'évolution dans le temps de la profondeur de la détérioration. Ces modèles ont été développés avec base dans le concept de moyenne de la vitesse du dégât interne pour la corrosion v^* , être défini deux équations, le premier on qui commence d'une différentielle de deuxième ordre et le deuxième début d'une différentielle de troisième ordre, les deux en série de Taylor. Les solutions des différentielles décrivent la vitesse du dégât interne pour la corrosion et par conséquent, la propagation de la profondeur du dégât interne pour la corrosion. Avec base dans les modèles de propagation du dégât interne pour la corrosion et à travers une analyse de non retour en arrière linéal, les paramètres des modèles de la propagation ont été déterminés: la vitesse instantanée du dégât interne pour v_p de la corrosion, la vitesse initiale du dégât interne pour la corrosion v_0 , et l'augmentation de temps Δt . Les modèles de la propagation ont été appliqués à trois systèmes de conduits: gas-oil, essence et pétrole cru. Aussi, ils ont été mesurés utiliser dégâts identifié dans deux inspections de soi système de transport d'essence. Comme il a été attendu, il a été observé dans les calibrages des modèles de la propagation que le predichas des profondeurs est conservateur. Cela se passe depuis, après la première inspection le système a été protégé avec inhibiteur de corrosion intérieurement. La surestimation des modèles de la propagation est analysée étant donné un facteur de la correction qui implique les cas dans que le système de conduits est présenté avec et sans l'effet de la candidature d'inhibiteur de corrosion.

PROPAGACIÓN DE DAÑOS EN DUCTOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS

CONTENIDO GENERAL

	Pág.
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Résumé	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Simbología	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. JUSTIFICACIÓN	2
I.2. ANTECEDENTES	4
I.2.1. Modelo general de propagación del daño interno por corrosión localizada utilizado en trabajos previos	7
I.3. OBJETIVOS	9
I.4. METAS	9
I.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	10
II. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	11
II.1. ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES DEL DAÑO POR CORROSIÓN A PARTIR DE DATOS DE UNA INSPECCIÓN	12
II.2. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	13
II.2.1. Modelo uno	13
II.2.2. Modelo dos	15
II.3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO ESTOCÁSTICO	17
II.3.1. Función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada	18
II.3.2. Distribución temporal de los daños internos por corrosión localizada	19
II.3.3. Metodología para caracterizar el proceso estocástico	21
III. APLICACIONES DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	23
III.1. SISTEMA DE TRANSPORTE DE DIESEL	24
III.2. SISTEMA DE TRANSPORTE DE GASOLINA	25
III.3. SISTEMA DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO	27
III.4. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	29
III.4.1. Cálculo del error del modelo uno de propagación	29
III.4.2. Cálculo del error del modelo dos de propagación	32
III.5. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN	35

III.5.1. Cálculo del factor de corrección del modelo uno de propagación	36
III.5.2. Cálculo del factor de corrección del modelo dos de propagación	36
III.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	40
BIBLIOGRAFÍA	41
SITIOS WEB	42
APÉNDICE A. MODELO UNO DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	43
APÉNDICE B. MODELO DOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA	46
APÉNDICE C. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN PROCESO ESTOCÁSTICO DE POISSON	50
ANEXO UNO. PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA TRANSPORTE DE DIESEL	53
ANEXO DOS. PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA TRANSPORTE DE GASOLINA	62
ANEXO TRES. PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO	71

Lista de figuras

Capítulo uno

Núm.	NOMBRE	Pág.
I.1	Lanzamiento de equipo instrumentado para la inspección de un sistema de ductos.	3
I.2	Corrosión localizada y generalizada, parte superior e inferior en la figura respectivamente.	4
I.3	Evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada para varios valores de β_0 .	8
I.4	Velocidad del daño interno por corrosión localizada como función del tiempo para varios valores de β_0 .	8

Capítulo dos

Núm.	NOMBRE	Pág.
II.1	Velocidad del daño por corrosión promedio v^* definida con un solo valor de profundidad del daño por corrosión.	14
II.2	Número anual de daños por corrosión en función del tiempo de inspección, normalizado por año y longitud del sistema, para dos sistemas que transportan diesel y gasolina.	20
II.3	Profundidades máximas d_{max} de los daños por corrosión registrados en un tiempo de inspección, con sus respectivos tiempos de nucleación x_k .	21
II.4	Propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada.	22

Capítulo tres

Núm.	NOMBRE	Pág.
III.1	Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, en un sistema de transporte de diesel.	25
III.2	Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, en un sistema de transporte de gasolina.	27
III.3	Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada en un sistema de transporte de petróleo crudo.	28

III.4	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al primer daño seleccionado.	30
III.5	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al segundo daño seleccionado.	31
III.6	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al tercer daño seleccionado.	31
III.7	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al cuarto daño seleccionado.	32
III.8	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al primer daño seleccionado.	33
III.9	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al segundo daño seleccionado.	33
III.10	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al tercer daño seleccionado.	34
III.11	Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al cuarto daño seleccionado.	34

Anexo uno

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN1.1	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de diesel.	56
AN1.2	Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{D_{\max}}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de diesel.	56
AN1.3	Función de densidad de probabilidad $f_{d_{\max}}(d t_i)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.	57
AN1.4	Función de probabilidad $F(d_{\max})$ de la profundidad máxima del daño por interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.	57
AN1.5	Funciones de densidad de probabilidad $f_{d_{\max}}(d t_i)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.	58

Anexo dos

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN2.1	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de gasolina.	65

AN2.2	Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{d_{max}}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de gasolina.	65
AN2.3	Función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d t_i)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.	66
AN2.4	Función de probabilidad $F(d_{max})$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.	66
AN2.5	Funciones de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d t_i)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.	67

Anexo tres

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN3.1	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de petróleo crudo.	75
AN3.2	Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{d_{max}}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de petróleo crudo.	75
AN3.3	Función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d t_i)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.	76
AN3.4	Función de probabilidad $F(d_{max})$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.	76
AN3.5	Funciones de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d t_i)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.	77

Lista de tablas

Capítulo tres

Núm.	NOMBRE	Pág.
III.1	Características generales de un sistema para transporte de diesel.	24
III.2	Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de diesel.	25
III.3	Características generales de un sistema para transporte de gasolina.	26
III.4	Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de gasolina.	26
III.5	Características generales de un sistema para transporte de petróleo crudo.	27
III.6	Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de petróleo crudo.	28
III.7	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada correspondientes al segundo registro de inspección de un sistema de transporte de gasolina.	29
III.8	Parte inicial del cálculo del error del modelo uno de propagación.	30
III.9	Parte final del cálculo del error del modelo uno de propagación.	30
III.10	Parte inicial del cálculo del error del modelo dos de propagación.	32
III.11	Parte final del cálculo del error del modelo dos de propagación.	32
III.12	Cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo uno de propagación.	36
III.13	Cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo dos de propagación.	37
III.14	Profundidades de los daños no afectados por la aplicación de inhibidor de corrosión y profundidades estimadas al segundo tiempo de inspección t_I .	38

Anexo uno

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN1.1(a)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 0 a 47,771.11 metros.	54

AN1.1(b)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 45,771.11 a 54,000 metros.	55
AN1.1(c)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 54,000 a 102,349.5 metros.	55
AN1.2	Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de diesel.	58

Anexo dos

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN2.1(a)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de gasolina de 48,000 a 51,335.53 metros.	63
AN2.1(b)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de gasolina de 51,427.31 a 53,172.00 metros.	64
AN2.2	Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de gasolina.	67

Anexo tres

Núm.	NOMBRE	Pág.
AN3.1(a)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 1,086.59 a 40,586.05 metros.	72
AN3.1(b)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 43,057.40 a 51,818.50 metros.	73
AN3.1(c)	Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 51,828.46 a 117,187.35 metros.	74
AN3.2	Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de petróleo crudo.	77

Simbología

α_0	Factor de escala
β_0	factor que determina la forma de $d(t)$
CO_2	Bióxido de carbono
$d(\cdot)/dt$	Operador derivada
$d(t)$	Profundidad del daño por corrosión en función del tiempo
$d_{\max}(t)$	Profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo t
$d_{\max}(t_0)$	Profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo t_0
$d_{\max}(t_0 + \Delta t)$	Profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo $t_0 + \Delta t$
$d'_{\max}(t_0)$	Primera derivada de la profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo t_0
$d''_{\max}(t_0)$	Segunda derivada de la profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo t_0
$d'''_{\max}(t_0)$	Tercera derivada de la profundidad máxima del daño por corrosión en un tiempo t_0
d_1	Profundidad estimada al segundo tiempo de inspección
d_0	Profundidad medida en el primer tiempo de inspección
d_2	Profundidad medida en el segundo tiempo de inspección
d_{\max}	Profundidad real del daño interno por corrosión
Δt	Parámetro incremento de tiempo del daño interno por corrosión localizada
ε	Error de la medición de la profundidad máxima del daño por corrosión
$e^{\frac{-2t}{\Delta t}}$	Base e elevada a $\frac{-2t}{\Delta t}$
$E[N(t)]$	Número medio de sucesos hasta el instante t
$f_{d_{\max}}(d t_i)$	Función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño por corrosión del sistema
$F(d_{\max})$	Función de probabilidad de las profundidades máximas de corrosión del sistema
F_c	Factor de corrección de los modelos de propagación
F_{cp}	Factor de corrección promedio de los modelos de propagación
$\Phi_{\varepsilon}(\varepsilon_0)$	Probabilidad de que $\varepsilon \leq \varepsilon_0$.

k_0	Factor que satisface que $\int_0^{W_0} \varphi_{D_{\max}}(z) dz = 1$
λt	Parámetro de una distribución de Poisson
$n!$	Factorial de un número
N	Número de tiempos de nucleación o de generación
R^+	Conjunto de los números reales positivos
SO_2	Bióxido de azufre
$\varphi_{d_{\max}}(d)$	Función de densidad de probabilidad de profundidad medida de daño por corrosión
t_0	Primer tiempo de inspección
t_1	Segundo tiempo de inspección o tiempo de inspección
v_0	Parámetro velocidad inicial del daño interno por corrosión localizada
v_p	Parámetro velocidad instantánea del daño interno por corrosión localizada
v^*	Velocidad promedio del daño interno por corrosión
$v_p(t)$	Velocidad promedio del daño interno por corrosión para el intervalo de tiempo $[t_0, t)$
$v_{corr}(t)$	Velocidad instantánea del daño interno por corrosión
$v'_{corr}(t)$	Primera derivada de la velocidad instantánea del daño interno por corrosión localizada
$v''_{corr}(t)$	Segunda derivada de la velocidad instantánea del daño interno por corrosión localizada
V_s	Velocidad del daño interno por corrosión localizada sin inhibidor de corrosión
V_c	Velocidad del daño interno por corrosión localizada con inhibidor de corrosión
W_0	Espesor de pared del ducto
$\int_0^{W_0} \varphi_{D_{\max}}(z) dz$	Integral que representa el área bajo la curva de cada función de densidad de probabilidad $\varphi_{D_{\max}}(d)$
X_k	Variable aleatoria
$X(t)$	Variable aleatoria
$\{X(t)\}$	Colección de variables aleatorias
Z^+	Conjunto de los números enteros positivos

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



Resumen

El presente capítulo es la introducción a la tesis. Se expone el planteamiento del problema y se justifica la realización de la presente investigación, se mencionan los antecedentes, los objetivos y las metas, por último la organización del trabajo.

CAPÍTULO I

La aportación de este trabajo se encuentra en el estudio de la propagación de la profundidad de los daños internos por corrosión localizada, que se presentan en el interior de ductos utilizados para el transporte de hidrocarburos. El daño interno se mide en términos de la profundidad de la pérdida de metal causada por el fenómeno de corrosión en sitios activos o localizados. Se entiende por sitio activo, aquella zona en donde se está llevando a cabo un proceso de corrosión. La corrosión localizada es la que se genera de manera *puntual*, de forma que el área de afectación del metal, es pequeña en comparación con el área total del ducto.

I.1. JUSTIFICACIÓN

El medio de transporte masivo de hidrocarburos más utilizado en el mundo son los ductos. Los accidentes en tuberías de conducción de hidrocarburos se distribuyen aproximadamente de la siguiente manera: corrosión 41%, falla del material 25%, golpes de maquinaria 13%, toma clandestina 4.5%, fisura en soldaduras 3%, otras causas 13.5% (www.imp.mx). A lo largo del territorio nacional, la industria petrolera mantiene en operación un sistema de ductos terrestres de alrededor de 54 mil kilómetros por donde transporta petróleo crudo, gas natural, gas amargo, gas dulce, gasolinas, diesel y otros productos refinados. La manera en que se trata la problemática de los daños internos por corrosión, que afecta a los sistemas de ductos que se utilizan para el transporte de hidrocarburos, implica el uso de inhibidores de corrosión; mientras que para corrosión externa se emplea sistemas de protección catódica, así como barreras de protección mecánica (recubrimientos). El estudio de la propagación de daños por corrosión es importante ya que la infraestructura de ductos contribuye al desarrollo económico del país. Esta infraestructura permite transportar en forma masiva petróleo y sus derivados. La propagación de los daños por corrosión, está relacionada con la velocidad de deterioro del material.

Para conocer el estado de deterioro de los sistemas de ductos, estos se inspeccionan en intervalos de varios años; dichas inspecciones se realizan mediante dispositivos electromecánicos (figura I.1) que viajan con el flujo. En estas inspecciones, se cuantifica y se miden las profundidades y longitudes de los daños. A pesar de que dichos dispositivos no cuantifican totalmente el número de daños, ni miden de manera precisa el tamaño de los daños, proporcionan información útil para determinar de manera general la integridad mecánica del sistema. En muchos de los casos, los sistemas de ductos cuentan con un solo reporte de inspección a lo largo de todo su historial de funcionamiento, lo que origina que se tenga poca o nula información sobre la evolución de la profundidad de los daños por corrosión.



Figura I.1. Lanzamiento de equipo instrumentado para la inspección de un sistema de ductos.

I.2. ANTECEDENTES

Se entiende por proceso de corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas anódicas y catódicas. Una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a regiones catódicas. En la región anódica se produce la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal. Los enlaces metálicos tienden a convertirse en enlaces iónicos, favoreciendo que el material en cierto momento transfiera y reciba electrones, creando zonas catódicas y zonas anódicas en su estructura (www.monografias.com/trabajos3/corrosion).

Desde el punto de vista del área de afectación sobre la superficie del metal, existen la corrosión localizada y generalizada. En la figura I.2, se muestran estos dos tipos de corrosión. Los daños por el fenómeno químico de la corrosión se deben a reacciones químicas entre el material de transporte y el material constituyente de la pared del ducto en combinación con otras variables como la temperatura y la presión de transporte del fluido (www.ingenierias.uanl.mx).

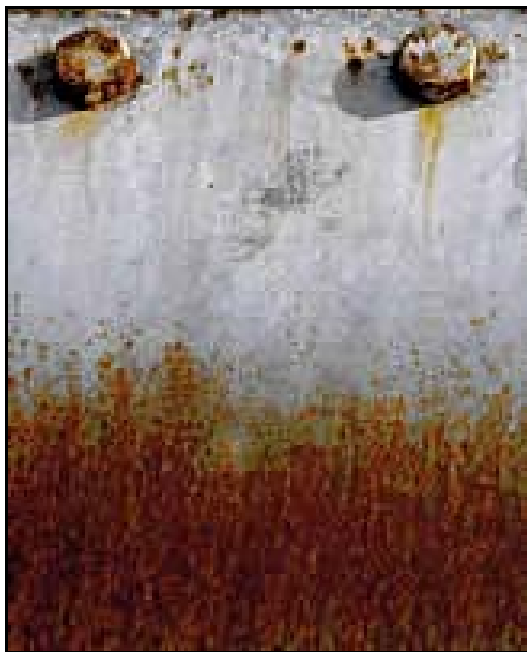


Figura I.2. Corrosión localizada y generalizada, parte superior e inferior en la figura respectivamente.

A continuación se describen brevemente trabajos de investigación realizados con relación al fenómeno de corrosión, los cuales han aportado información importante para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

En un trabajo publicado en (www.fulp.ulpgc.es/articulos/vectorplus25), se estudió la velocidad de la corrosión atmosférica del acero al carbono mediante técnicas electroquímicas, determinando el efecto relativo de los contaminantes en la velocidad del daño por corrosión y caracterizando los productos de corrosión formados. En ese trabajo se concluye que el SO₂ ejerce un efecto más evidente que los iones cloruros en la velocidad de corrosión.

En un estudio publicado en (www.elmundodelpetroleo.com), se utilizó el método de la espectroscopia de impedancia electroquímica, para conocer y evaluar las diferentes etapas que ocurren de manera simultánea durante el proceso de corrosión del acero. El acero tratado se sometió a ambientes corrosivos de *aguas amargas* producidas por el transporte y el procesamiento del petróleo. En ese trabajo se definió la composición química promedio de las *aguas amargas* formadas en plantas de refinería y se estableció una salmuera representativa del ambiente químico al que están sometidos los equipos, evaluando con métodos electroquímicos la velocidad del daño por corrosión.

En un trabajo publicado por Shibata (1996), se asocia el potencial electroquímico y el número de picaduras generadas por el fenómeno de la corrosión en unidad de tiempo, a un modelo estocástico de tipo Poisson. En ese trabajo se muestra que el proceso de corrosión presenta variabilidad aún en condiciones de laboratorio.

Entre los trabajos referentes al estudio de la pérdida de material como consecuencia de los daños por corrosión, se encuentra el realizado por Hong (1998), que estudió la corrosión por picadura considerándola como la combinación de dos procesos físicos: el proceso de generación de picadura y el proceso del crecimiento de la profundidad de la picadura. El modelo desarrollado en ese trabajo considera la generación de la picadura como un proceso de tipo Poisson no homogéneo y el proceso de crecimiento de la picadura como un proceso de Markov no homogéneo, surgiendo la dificultad de resolver de manera analítica el sistema combinado. El análisis se simplifica considerando la generación

y la evolución de la profundidad como procesos homogéneos. El efecto no homogéneo es tratado usando el método de transformación-condensación.

Un trabajo referente al estudio del comportamiento de la propagación del daño por corrosión en metales, es el realizado por Hou y Liang (2002) con base en los efectos atmosféricos que producen corrosión en aceros. En ese trabajo se muestra que el desarrollo de la corrosión atmosférica en aceros sigue ampliamente una función de potencia.

En un trabajo realizado por Melchers (2004b), se menciona que las medidas para combatir el deterioro estructural por corrosión, como la aplicación de capas de pintura, galvanizado o protección catódica, pueden ser ineficaces y considera la corrosión como un problema de confiabilidad estructural. El análisis de confiabilidad utiliza modelos para la descripción y predicción de pérdida de material por corrosión y para determinar la profundidad máxima de picadura; toma en cuenta efectos de velocidad y contaminación del agua que se comparan con datos de campo.

El trabajo de Engelhard y Macdonald (2004a), aporta una teoría de análisis de función de daño, presentando una analogía entre el crecimiento de una picadura y el movimiento de una partícula, muestra una formulación que lleva a expresiones que describen las funciones de daño en una parte activa y pasiva de las picaduras, presentando la generalización de nucleación de la picadura para condiciones externas que dependen en el tiempo.

En un trabajo publicado por Melchers (2005), se presenta un modelo de propagación de profundidades máximas de picadura basado en pruebas de campo. En ese trabajo se considera que la profundidad del orificio de la picadura cambia con el tiempo de exposición, lo cual es un aspecto importante para el estudio de la confiabilidad estructural. El modelo usa la distribución de Gumbel. Sin embargo, se menciona que los datos de profundidades de picadura en aceros de capacidad mecánica baja no son consistentes, lo que representa importantes implicaciones prácticas en placas de acero o para exposiciones a largo plazo.

En el trabajo de Straub y Havbro (2005), se menciona que los parámetros que influyen en la corrosión son variantes del tiempo y que

por lo tanto, el proceso de corrosión está sujeto a variabilidad temporal. En ese trabajo se estudia el efecto de la variabilidad temporal y se ilustra en un ejemplo que considera corrosión por CO₂ (bióxido de carbono) en tuberías y muestra cómo el proceso de corrosión en el tiempo puede ser representado por parámetros constantes.

I.2.1. MODELO GENERAL DE PROPAGACIÓN DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA UTILIZADO EN TRABAJOS PREVIOS

En forma general, los trabajos mencionados arriba consideran que la evolución en el tiempo de la profundidad $d(t)$ del daño por corrosión está dada por la ecuación (I.1), donde α_0 es un factor de escala y $\beta_0 < 1$ es un factor que determina la forma de $d(t)$.

$$d(t) = \alpha_0 t^{\beta_0} \quad (I.1)$$

Estos parámetros resultan de un ajuste a datos que provienen de observaciones de laboratorio o campo y t es el tiempo transcurrido desde la nucleación del defecto. En la figura I.3 se muestra la evolución en el tiempo de la profundidad de corrosión para varios valores de β_0 . En general, se observa que la función expresada en la ecuación (I.1), indica que la evolución de la profundidad de corrosión en el tiempo tiene un comportamiento no lineal. Se observan dos etapas a las que puede asociarse un comportamiento lineal. La primera etapa corresponde a una edad temprana, aproximadamente para tiempos menores a un año; mientras que la segunda etapa corresponde a tiempos mayores. De acuerdo con esta ecuación, la velocidad del daño por corrosión instantánea esta dada por:

$$v(t) = \frac{d}{dt} z(t) = \alpha_0 \beta_0 t^{\beta_0-1} \quad (I.2)$$

Es demostrado que $\beta_0 = v(t)/v^*$, donde $v^* = z(t)/t$ es la velocidad del daño por corrosión promedio asociada al intervalo $[0, t]$. En la figura I.4 se muestra la velocidad de corrosión como función del tiempo para varios valores de β_0 .

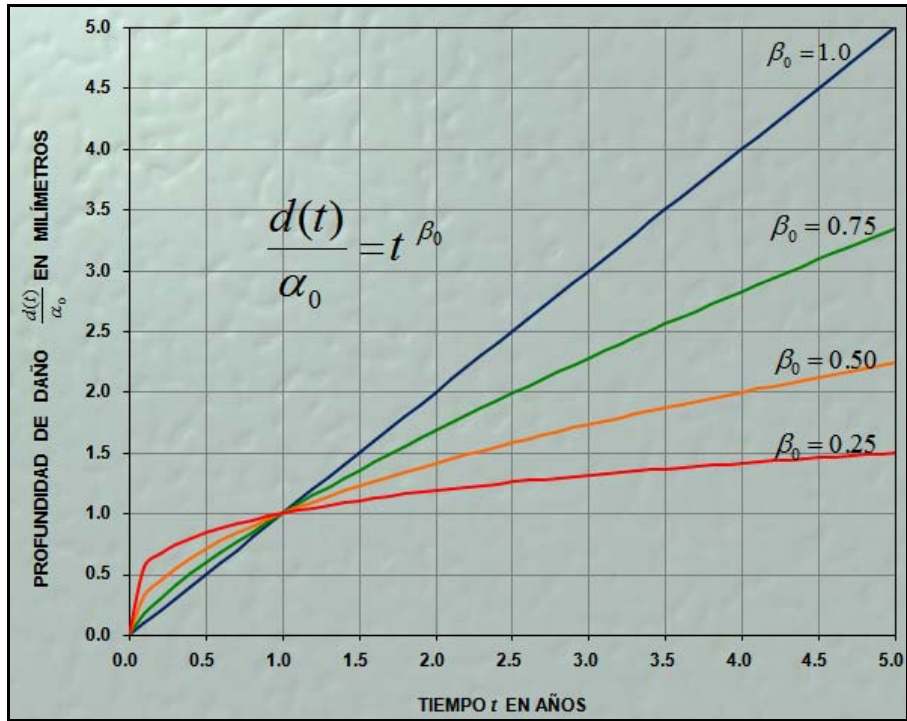


Figura I.3. Evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada para varios valores de β_0 .

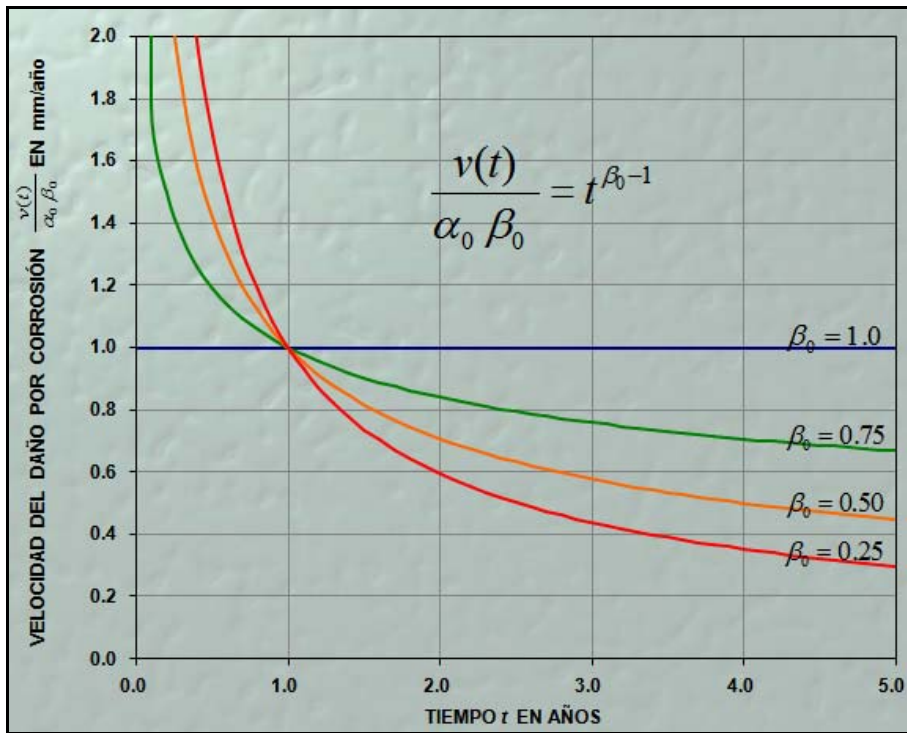


Figura I.4. Velocidad del daño interno por corrosión localizada como función del tiempo para varios valores de β_0

Se observa que cuando $t \rightarrow 0$, la función expresada en la ecuación 1.2, predice velocidades del daño por corrosión muy elevadas. También indica que para tiempos mayores la velocidad del daño por corrosión se aproxima a un valor constante. Este comportamiento de la velocidad del daño por corrosión se debe a que en una etapa temprana la zona de metal atacada está totalmente expuesta a las especies corrosivas con altas concentraciones, mientras que a tiempos mayores se forma una capa de óxido con propiedades pasivas entre el metal y el medio ambiente corrosivo, que sirve como barrera de protección contra la corrosión (Frenkel, 1998). De manera general la ecuación (1.2) indica que aproximadamente para tiempos menores a un año la velocidad del daño por corrosión es mayor que para periodos de tiempo largos. Uno de los inconvenientes de esta ecuación consiste en que para tiempos cercanos a cero, predice velocidades del daño por corrosión excesivamente altas, lo cual físicamente es imposible (Engelhardt y Macdonald, 2004b).

I.3. OBJETIVO

Predecir la evolución del deterioro interno por corrosión localizada en sistemas de transporte de ductos, que cuentan con un solo reporte de inspección. El deterioro se cuantifica en términos de la profundidad del daño por corrosión.

I.4. METAS

Las metas del trabajo son las siguientes:

1. Analizar y evaluar diversos modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la evolución del daño por corrosión, que se utilizan en condiciones de la práctica profesional.
2. Desarrollar modelos matemáticos para evaluar la evolución en el tiempo de la profundidad de los daños internos por corrosión localizada en ductos.
3. Aplicar y calibrar los modelos a procesos de corrosión en el tiempo a partir de reportes de inspección.

I.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El contenido esencial de esta tesis está formado por tres capítulos. El capítulo uno contiene una introducción a la problemática planteada; se menciona la justificación de la realización de esta investigación y los trabajos previos que han tratado el tema sobre la corrosión en ductos que son primordiales para la elaboración del presente trabajo de tesis. El objetivo y las metas están comprendidos en esta parte del trabajo.

El capítulo dos incluye el desarrollo de los modelos uno y dos de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión. Se menciona la estimación de la velocidad del daño por corrosión a partir de datos de una inspección. Se definen las ecuaciones diferenciales de primer y segundo orden para la velocidad del daño por corrosión instantánea y sus respectivas soluciones. Se define la función de densidad de probabilidad de cada profundidad máxima de los daños por corrosión, la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño por corrosión del sistema y la distribución temporal de los daños internos por corrosión. Por último, en este capítulo, se describe la metodología para el desarrollo del modelo estocástico.

En el capítulo tres se hace referencia a los casos de estudio. Con base en las profundidades de los daños internos registrados por inspecciones en tres sistemas de transporte: diesel, gasolina y petróleo crudo, se aplica la metodología para el desarrollo del modelo estocástico y se determinan los parámetros de los modelos de propagación del daño interno por corrosión localizada. Los modelos de propagación del daño por corrosión, se calibran utilizando daños identificados en dos inspecciones de un mismo sistema de transporte de gasolina. Se determina el porcentaje de error de las estimaciones de las profundidades de los daños, al segundo tiempo de inspección y el factor de corrección que indica la tasa con que disminuye la velocidad del daño cuando el sistema de ductos está afectado por la aplicación de inhibidor de corrosión.

CAPÍTULO II

MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA



Resumen

En este capítulo, se desarrollan dos modelos de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, se describe la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima de corrosión y la distribución temporal de los daños internos por corrosión. Por último, se describe la metodología del proceso estocástico, donde se relaciona la propagación de la profundidad del deterioro interno con los parámetros de los modelos de propagación del daño.

CAPÍTULO II

II.1. ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES DEL DAÑO POR CORROSIÓN A PARTIR DE DATOS DE UNA INSPECCIÓN

En sistemas de ductos, el estado de daño es obtenido de mediciones efectuadas por medio de dispositivos electromecánicos, mientras que la velocidad del daño por corrosión comúnmente es obtenida a partir de cupones de acero expuestos al ambiente agresivo; sin embargo, estas velocidades de los daños por corrosión no corresponden al deterioro medido en la pared del ducto (Melchers, 2004a). Un proceso de corrosión es caracterizado completamente si se conoce el nivel de daño en un instante de tiempo dado y la velocidad con que ocurre dicho daño. Una posible forma de medir dicho daño es a través de la profundidad máxima de corrosión d_{\max} en la zona que contiene un defecto dado. Si la profundidad del daño por corrosión se conoce en cada instante de tiempo, la velocidad del daño por corrosión se obtiene directamente como $v_{\text{corr}}(t) = d(d_{\max}(t))/dt$, donde $d(\cdot)/dt$ es el operador derivada y la profundidad máxima de corrosión d_{\max} en función del tiempo está expresada como $d_{\max}(t)$. En condiciones de la práctica profesional, en la mayoría de las ocasiones solo se cuenta con mediciones puntuales de d_{\max} en instantes de tiempos t y t_0 discretos. Por lo tanto, sólo es posible estimar la velocidad promedio del daño interno por corrosión v_p para el intervalo de tiempo $[t_0, t]$ por medio de la ecuación (II.1):

$$v_p(t) = \frac{d_{\max}(t) - d_{\max}(t_0)}{t - t_0} \quad (\text{II.1})$$

De acuerdo con la definición de derivada, cuando $(t - t_0) \rightarrow 0$, $v_p \rightarrow v_{\text{corr}}$; v_{corr} es la velocidad del daño por corrosión instantánea. Debido a que el proceso de corrosión es irreversible, rigurosamente $d_{\max}(t) \geq d_{\max}(t_0)$, $t \geq t_0$, por tanto $v_p \geq 0$ y $v_{\text{corr}} \geq 0$.

II.2. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

II.2.1. MODELO UNO

Si $d_{\max}(t)$ es una función continua que describe la evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, donde Δt es un incremento de tiempo, $d'_{\max}(t_0)$ es la primera derivada de la profundidad con respecto a un tiempo t_0 , $d''_{\max}(t_0)$ es la segunda derivada de la profundidad con respecto a un tiempo t_0 ; entonces mediante una aproximación de segundo orden en serie de Taylor, dicha función se puede representar como:

$$d_{\max}(t_0 + \Delta t) = d_{\max}(t_0) + d'_{\max}(t_0)\Delta t + d''_{\max}(t_0)\frac{\Delta t^2}{2} \quad (II.2)$$

Al dividir la ecuación (II.2) por Δt y despejando el segundo y tercer término del miembro de la derecha, se obtiene la ecuación:

$$d'_{\max}(t_0) + d''_{\max}(t_0)\frac{\Delta t}{2} = \frac{d_{\max}(t_0 + \Delta t) - d_{\max}(t_0)}{\Delta t} \quad (II.3)$$

Se observa que el miembro de la derecha de la ecuación (II.3), define el valor de la velocidad del daño por corrosión promedio v_p para el intervalo de tiempo $[t_0, t_0 + \Delta t)$. Si $\Delta t \rightarrow 0$ entonces v_p tiende a la velocidad del daño por corrosión instantánea $v_{\text{corr}}(t)$ y el término $d''_{\max}(t_0)\frac{\Delta t}{2} \rightarrow 0$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene la ecuación:

$$d'_{\max}(t_0) + d''_{\max}(t_0)\frac{\Delta t}{2} = v_p \quad (II.4)$$

La ecuación (II.4) es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden no homogénea. Si se conocieran las profundidades de los daños por corrosión en los instantes t_0 y $t_0 + \Delta t$, entonces v_p estaría definida en dicho intervalo. En la mayoría de las situaciones, se cuenta con un solo

valor de profundidad del daño interno por corrosión, como se muestra en la figura II.1:

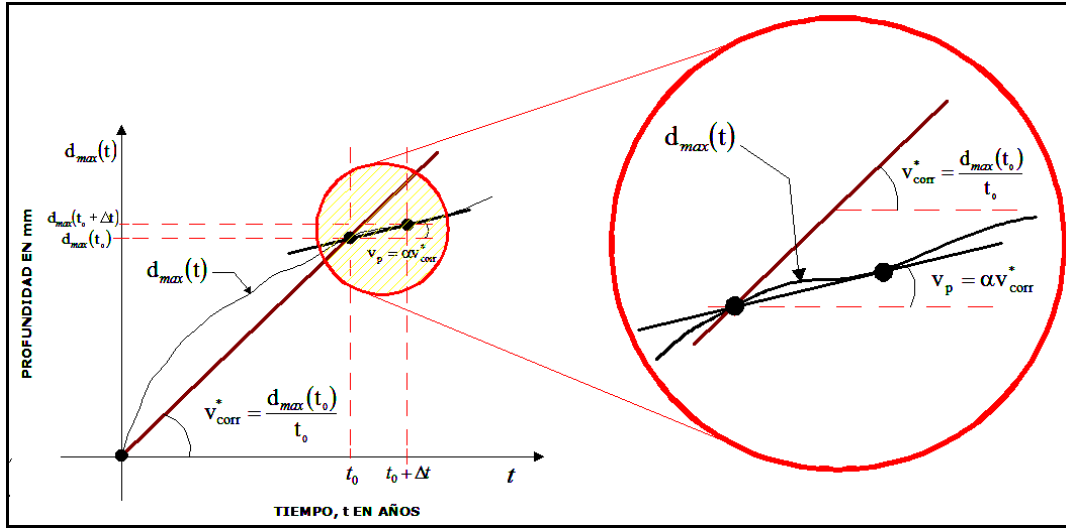


Figura II.1. Velocidad del daño por corrosión promedio v^* definida con un solo valor de profundidad del daño por corrosión.

Debido a que el daño por corrosión es irreversible, la profundidad del daño es monótonamente creciente. Lo anterior significa, que la velocidad del daño por corrosión promedio $v^* = d(t_0)/t_0$, siempre será mayor o igual que la velocidad del daño por corrosión instantánea v_p , es decir, $v^* = (d(t_0)/t_0) \geq d'(t_0)$ o que v_p . Si $v_p = \alpha v^*$, donde α es un parámetro constante en el intervalo $[t, t + \Delta t)$, que toma valores en el intervalo $(0, 1]$, entonces la ecuación (II.4) se puede escribir como:

$$d'_{\max}(t_0) + d''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t}{2} = \alpha v_{\text{corr}}^* \quad (II.5)$$

Sabiendo que la velocidad del daño por corrosión instantánea en un tiempo t está dada por $v_{\text{corr}}(t) = d(d_{\max}(t))/dt$ y aplicando esta definición en la ecuación (II.5), se obtiene la ecuación:

$$v_{\text{corr}}(t) + v'_{\text{corr}}(t) \frac{\Delta t}{2} = \alpha v_{\text{corr}}^* \quad (II.6)$$

La ecuación (II.6) es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden no homogénea. La solución de la ecuación (II.6) está dada por la ecuación:

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) e^{\frac{-2t}{\Delta t}} \quad (II.7)$$

El proceso de solución de la ecuación (II.6) para obtener la ecuación (II.7), se presenta en el apéndice A de este trabajo. Finalmente, la evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, se obtiene integrando la ecuación (II.7), y está dada por:

$$d_{max}(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) \frac{\Delta t}{2} \left(1 - e^{\frac{-2t}{\Delta t}} \right) \quad (II.8)$$

Sabiendo que $v_p = \alpha v^*$, entonces la ecuación (II.8) se puede escribir como:

$$d_{max}(t) = v_p t + (v_0 - v_p) \frac{\Delta t}{2} \left(1 - e^{\frac{-2t}{\Delta t}} \right) \quad (II.9)$$

II.2.2. MODELO DOS

Si $d_{max}(t)$ es una función continua que describe la evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, donde Δt es un incremento de tiempo, $d'_{max}(t_0)$ es la primera derivada de la profundidad con respecto a un tiempo t_0 , $d''_{max}(t_0)$ es la segunda derivada de la profundidad con respecto a un tiempo t_0 ; entonces mediante una aproximación de tercer orden en serie de Taylor, dicha función se puede representar como:

$$d_{max}(t_0 + \Delta t) = d_{max}(t_0) + d'_{max}(t_0)\Delta t + d''_{max}(t_0)\frac{\Delta t^2}{2} + d'''_{max}(t_0)\frac{\Delta t^3}{6} \quad (II.9)$$

Al dividir la ecuación (II.9) por Δt y despejando el segundo y tercer término del miembro de la derecha, obtenemos la ecuación:

$$d'_{max}(t_0) + d''_{max}(t_0)\frac{\Delta t}{2} + d'''_{max}(t_0)\frac{\Delta t^2}{6} = \frac{d_{max}(t_0 + \Delta t) - d_{max}(t_0)}{\Delta t} \quad (II.10)$$

Se observa que el miembro de la derecha de la ecuación (II.10), define el valor de la velocidad del daño por corrosión promedio v_p para el intervalo de tiempo $[t_0, t_0 + \Delta t)$. Si $\Delta t \rightarrow 0$ entonces v_p tiende a la velocidad del daño por corrosión instantánea $v_{corr}(t)$ y el término $d''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t}{2} \rightarrow 0$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene la ecuación:

$$d'_{\max}(t_0) + d''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t}{2} + d'''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t^2}{6} = v_p \quad (II.11)$$

La ecuación (II.11) es una ecuación diferencial ordinaria de tercer orden no homogénea. Si se conocieran las profundidades del daño por corrosión en los instantes t_0 y $t_0 + \Delta t$, entonces v_p estaría definida en dicho intervalo.

Al igual que en la sección II.2.1, se considera que el daño por corrosión es irreversible y la profundidad del daño por corrosión es monótonamente creciente. Por lo tanto, la velocidad del daño por corrosión promedio $v^* = d(t_0)/t_0$, siempre será mayor o igual que la velocidad del daño por corrosión instantánea v_p , es decir, $v^* = (d(t_0)/t_0) \geq d'(t_0)$ o que v_p .

Si $v_p = \alpha v^*$, donde α es un parámetro constante en el intervalo $[t, t + \Delta t)$, que toma valores en el intervalo $(0, 1]$, entonces la ecuación (II.11) se puede escribir como:

$$d'_{\max}(t_0) + d''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t}{2} + d'''_{\max}(t_0) \frac{\Delta t^2}{6} = \alpha v_{corr}^* \quad (II.11)$$

Sabiendo que la velocidad del daño por corrosión instantánea en un tiempo t está dada por $v_{corr}(t) = d(d_{\max}(t))/dt$ y aplicando esta definición en la ecuación (II.11), se obtiene la ecuación:

$$v_{corr}(t) + v'_{corr}(t) \frac{\Delta t}{2} + v''_{corr}(t) \frac{\Delta t^2}{6} = \alpha v_{corr}^* \quad (II.12)$$

La ecuación (II.12) es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden no homogénea. La solución de la ecuación (II.12) está dada por:

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) e^{\frac{-3t}{2\Delta t}} \cos \frac{3\sqrt{5/12}}{\Delta t} t \quad (II.13)$$

El proceso de solución de la ecuación (II.12) para obtener la ecuación (II.13) se presenta en el apéndice B de este trabajo. Finalmente, la evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, se obtiene integrando la ecuación (II.13), y está dada por:

$$d_{max}(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) \frac{\Delta t}{4} \left[1 - e^{\frac{-3t}{2\Delta t}} \left(\cos \frac{3\sqrt{5/12}}{\Delta t} t - 2\sqrt{5/12} \operatorname{sen} \frac{3\sqrt{5/12}}{\Delta t} t \right) \right] \quad (II.14)$$

Sabiendo que $v_p = \alpha v^*$, entonces la ecuación (II.14) se puede escribir como:

$$d_{max}(t) = v_p t + (v_0 - v_p) \frac{\Delta t}{4} \left[1 - e^{\frac{-3t}{2\Delta t}} \left(\cos \frac{3\sqrt{5/12}}{\Delta t} t - 2\sqrt{5/12} \operatorname{sen} \frac{3\sqrt{5/12}}{\Delta t} t \right) \right] \quad (II.15)$$

Los parámetros a determinar en las ecuaciones (II.9) y (II.15) son la velocidad del daño por corrosión instantánea v_p , la velocidad del daño por corrosión inicial v_0 y el incremento de tiempo Δt . Para determinar el valor de estos parámetros, se utiliza un análisis de regresión no lineal.

II.3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO ESTOCÁSTICO

En esta sección del trabajo se desarrolla la metodología para caracterizar el proceso estocástico. Cuya finalidad, es describir gráficamente la evolución del daño interno por corrosión localizada que se presenta en los ductos. Para desarrollar la metodología, es necesario relacionar la propagación en el tiempo del deterioro interno por corrosión con los modelos uno y dos de propagación, a través de la determinación de sus parámetros. La propagación en el tiempo del deterioro interno por corrosión se constituye de manera gráfica, asociando las profundidades máximas que a través del tiempo presenta el deterioro, con los tiempos correspondientes a cada estado de daño. De acuerdo con lo anterior, es necesario determinar las profundidades máximas y los tiempos de nucleación asociados a cada estado del daño. En este trabajo, se utiliza el método Monte Carlo para simular las profundidades máximas que en el tiempo presenta el daño interno por

corrosión y los tiempos de nucleación o de generación correspondientes a cada etapa de evolución del daño. Cabe mencionar, que para utilizar el método Monte Carlo, necesariamente se define la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima $f_{dmax}(\cdot)$ del daño interno por corrosión localizada del sistema de ductos, así como la distribución temporal de los daños internos.

II.3.1. FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

En un trabajo publicado por Westwood y Hopkins (2004), se menciona que las profundidades de los daños internos por corrosión localizada reportadas están sesgadas. En ese trabajo, se explica que el sesgo de las profundidades de los daños, se debe a que el proceso de medición del dispositivo electromecánico no es perfecto. Asimismo, se menciona que el error en la medición que se define como la diferencia ε de la profundidad máxima real y la medida, es la variable aleatoria ε , cuya función de densidad de probabilidad $\varphi(\cdot)$ es normal con media cero y desviación estándar $\sigma_\varepsilon = 0.156 W_0$, que es función del espesor de pared W_0 del ducto y proviene de dispositivos de inspección de baja resolución. Igualmente se señala, que la desviación estándar para dispositivos de alta resolución, es un medio de la desviación estándar de los dispositivos de baja resolución. De acuerdo con lo anterior, la profundidad máxima de un daño por corrosión asociada al instante de la inspección es una variable aleatoria que se define como $d_{max} = d_m \pm \varepsilon$, con función de densidad de probabilidad representada en la ecuación (II.15) y definida en el intervalo $0 \leq d \leq W_0$, donde $k_0 = 1/(\Phi_\varepsilon(W_0 - d_m) - \Phi_\varepsilon(-d_m))$ es un factor que satisface la integral $\int_0^{W_0} \varphi_{dmax}(z) dz = 1$; $\Phi_\varepsilon(\varepsilon_0)$ es la probabilidad de que $\varepsilon \leq \varepsilon_0$.

$$\varphi_{dmax}(d) = k_0 \varphi_\varepsilon(d - d_m) \quad (II.15)$$

Por otra parte, si se cuenta con al menos dos valores de profundidad $d_0 = d_m(t_0)$ y $d_1 = d_m(t_1)$ que provienen de mediciones de un mismo daño, efectuadas respectivamente en los instantes de tiempo t_0 y t_1 , $t_1 > t_0$, entonces es posible estimar la velocidad del daño por corrosión

promedio por medio de la ecuación (II.1). Considerando que las mediciones de las profundidades de los daños a lo largo del sistema son independientes, la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño interno por corrosión del sistema o segmento en cuestión está dada por:

$$f_{d_{max}}(d|t_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \varphi_{\varepsilon_i}(d - d_m(t_1)) \quad (II.16)$$

II.3.2. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Generalmente los sistemas de ductos para el transporte de hidrocarburos solo cuentan con mediciones para un instante dado, se desconoce el estado de deterioro anterior y el tiempo asociado a dicho estado. Aún cuando se asuma que el sistema tenía deterioro nulo cuando fue construido o reparado por última vez y conociéramos este tiempo, surge el inconveniente de que los daños por corrosión reportados no se generaron al mismo tiempo, sino que se fueron generando esporádicamente en el tiempo. Aquí se asume que el sistema en cuestión tiene daño nulo por corrosión al tiempo que es puesto en operación o que fue reparado por última vez.

De acuerdo con Shibata (1996), la generación de daños internos por corrosión localizada en el tiempo puede representarse adecuadamente por medio de un proceso de Poisson, no obstante esta afirmación fue hecha a partir de los tiempos de nucleación de daños por corrosión en condiciones de laboratorio. Sin embargo, de los reportes de inspecciones, sólo se tiene información del número de daños al tiempo de la inspección, no se dispone de los tiempos de nucleación. Se ha analizado que el proceso estocástico de generación de daños se puede atribuir a uno del tipo Poisson, satisfaciendo las condiciones de homogeneidad del proceso. Esto significa que la tasa de ocurrencia de generación de daños del sistema, es igual a la tasa de ocurrencia en diferentes segmentos del sistema, es decir, se considera que el número de defectos asociado a cada segmento es una realización de un mismo proceso de Poisson (Alamilla, 2006). En la figura II.2, se muestra el número anual de daños por corrosión por longitud de cuatro sistemas de transporte de hidrocarburos. Los símbolos saturados de color negro

corresponden a la tasa total media de los daños, que es obtenida al dividir el número total de daños por el tiempo de inspección y por la longitud total del sistema de ductos. Los símbolos vacíos corresponden a la tasa media de los daños por segmento, que es obtenida al dividir el número de daños por el tiempo de inspección y por la longitud del segmento en cuestión. Cada sistema fue dividido en tres segmentos, de aproximadamente la misma longitud. Asimismo, se observa en la figura II.2 que la tasa media anual, asociada a cada segmento, es similar a la tasa total del sistema. Lo anterior significa, que el proceso de generación de los daños por corrosión es homogéneo en todo el sistema de ductos. Los datos que se utilizan en éste trabajo y que corresponden a los sistemas de transporte de diesel y gasolina, se registraron en un tiempo de inspección de 12 años.

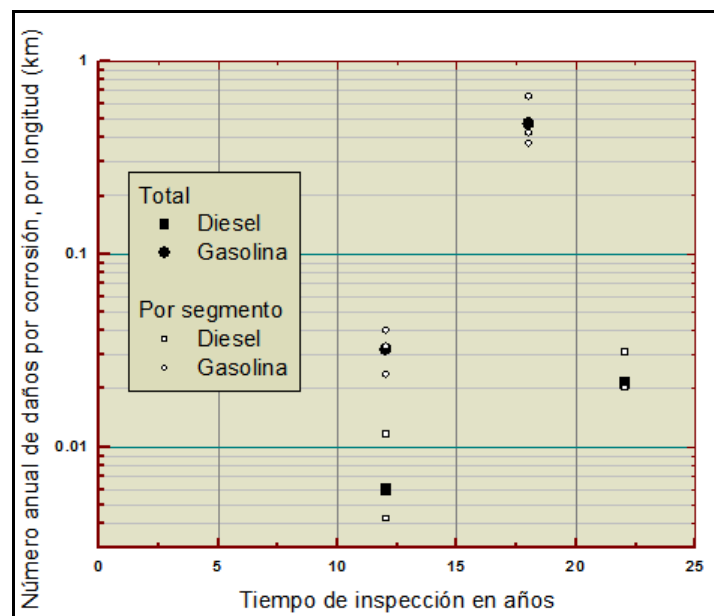


Figura II.2. Número anual de daños por corrosión en función del tiempo de inspección, normalizado por año y longitud del sistema, para dos sistemas que transportan diesel y gasolina.

Con base en lo anterior y de manera práctica, en este trabajo se asume que la generación de daños internos por corrosión obedece a un proceso estocástico de Poisson y que el tiempo de inicio de vida del sistema de ductos es conocido. Entonces la función de distribución de los tiempos de generación definidos como: $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_k \dots \geq x_n$, proviene de una distribución de probabilidad uniforme definida en el intervalo $(0, t_1]$. Donde $k=1,2,\dots,n$ está condicionada a $N(t_1)=n$ y corresponde al periodo de tiempo más corto, n es el número de tiempos de nucleación que es igual

al número de daños internos por corrosión registrados y t_1 es el tiempo que corresponde al momento de realizarse la inspección al sistema de ductos. En la figura II.3 se muestra la correspondencia de las profundidades máximas d_{max} de los daños internos por corrosión localizada registrados en un tiempo de inspección, con sus respectivos tiempos de nucleación x_k . En el apéndice C se describe en forma general un proceso estocástico de Poisson.

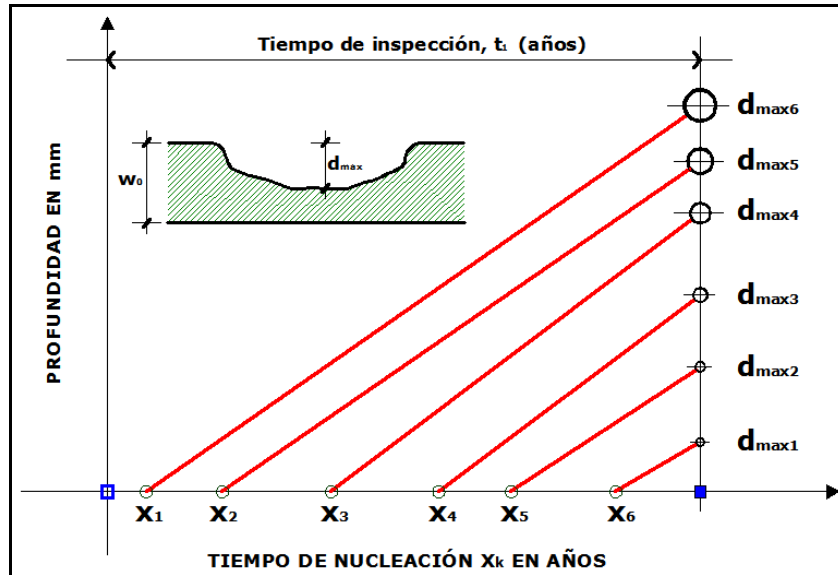


Figura II.3. Profundidades máximas d_{max} de los daños por corrosión registrados en un tiempo de inspección, con sus respectivos tiempos de nucleación X_k .

II.3.3. METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR EL PROCESO ESTOCÁSTICO

Con base en las definiciones de las secciones anteriores de este capítulo, se establece la metodología que conduce a la caracterización del proceso estocástico propuesto en este trabajo. La serie de pasos que conforman la metodología es la siguiente:

1. Obtener las profundidades de los daños internos por corrosión localizada de un sistema de ductos.
2. Con base en las funciones de densidad de probabilidad de las profundidades máximas $\varphi_{d_{max}}(\cdot)$, obtener la función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(\cdot)$ de la profundidad máxima del daño interno por

corrosión localizada del sistema. Posteriormente y con base en la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima $f_{d_{max}}(\cdot)$, obtener la función de probabilidad $F(d_{max}) = \int_0^{d_{max}} f_{d_{max}}(x|t_1) dx$

de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada del sistema y simular profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada.

3. Ordenar de menor a mayor las profundidades máximas simuladas.
4. Definir el tiempo de inspección t_1 y generar n números aleatorios $u_1 \geq u_2 \geq \dots \geq u_k \dots \geq u_n$ con distribución de probabilidad uniforme en el intervalo $(0, t_1)$. Posteriormente, calcular los tiempos de nucleación $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_k \dots \geq x_n$ realizando el producto $x_n = u_n T_1$.
5. Ordenar de menor a mayor los tiempos de nucleación.
6. Corresponder las profundidades máximas simuladas con los tiempos de nucleación simulados, de manera que a la profundidad menor, le corresponda el tiempo de nucleación menor con respecto al tiempo de inicio de vida del ducto.
7. Determinar los parámetros de los modelos uno y dos de propagación, a través del ajuste de estos modelos, a la evolución del daño interno.

En la figura II.4, se muestra la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada de un sistema de ductos, como resultado de utilizar la metodología arriba mencionada.

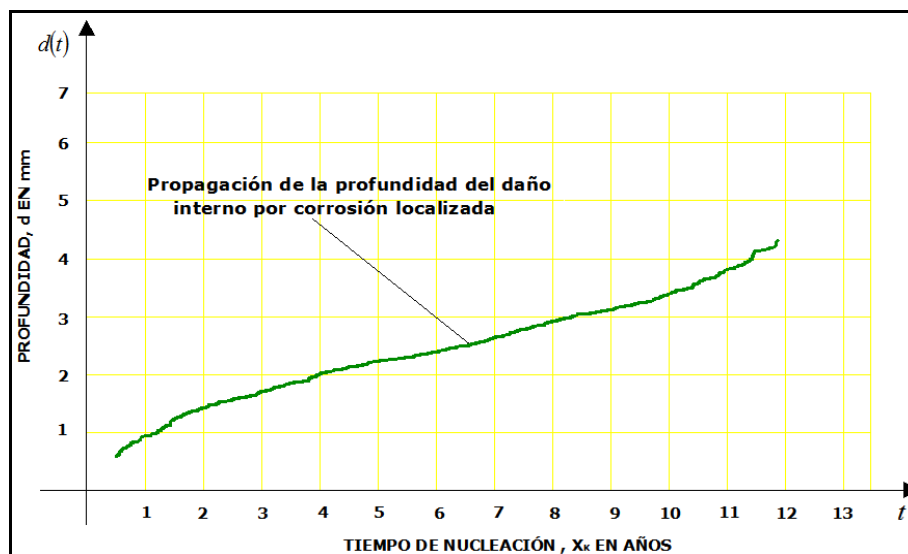


Figura II.4. Propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada.

APLICACIONES DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA



Resumen

En este capítulo, se aplican los modelos de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada a tres sistemas de transporte de hidrocarburos: diesel, gasolina y petróleo crudo. Asimismo, se calibran los modelos de propagación utilizando daños identificados en dos inspecciones de un mismo sistema de transporte de gasolina. Se calcula el factor de corrección de cada modelo de propagación y se discuten los resultados.

CAPÍTULO III

III.1. SISTEMA DE TRANSPORTE DE DIESEL

Las características generales de un sistema de ductos para transporte de diesel, que en este trabajo se muestran para la aplicación de los modelos de propagación de profundidad, se encuentran en la tabla III.1.

Tabla III.1. Características generales de un sistema para transporte de diesel.

LONGITUD DEL SISTEMA:	102,349.5	Metros
DIÁMETRO INTERIOR DEL SISTEMA DE DUCTOS:	10.75	Pulgadas
MATERIAL DE TRANSPORTE:	DIESEL	
AÑO DE INICIO DE ACTIVIDAD DEL SISTEMA:	1982	
AÑO DE LA INSPECCIÓN:	1994	
TIEMPO DE LA INSPECCIÓN:	12	Años
NÚMERO DE DEFECTOS INTERNOS DETECTADOS:	45	

Los datos referentes a los daños internos por corrosión localizada recopilados del registro de inspección de un sistema de ductos para el transporte de diesel, se muestran en el anexo uno de éste trabajo. Con relación a las simulaciones de profundidades de los daños por corrosión interna del sistema de transporte de diesel, en el anexo uno se muestran las gráficas correspondientes al cálculo de las funciones de densidad de probabilidad de cada profundidad máxima del daño por corrosión y de la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño por corrosión del sistema, al igual que sus respectivas funciones de probabilidad.

En la tabla III.2 se muestran los valores de los parámetros de los modelo uno y dos de propagación de la profundidad del daño por corrosión interna, obtenidos con base en un análisis de regresión no lineal. El modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño, se muestran en la figura III.1.

Tabla III.2. Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de diesel.

Modelo 1. Parámetro Vp	Modelo 1. Parámetro Δt	Modelo 1. Parámetro Vo (mm/año)	Modelo 2. Parámetro Vp	Modelo 2. Parámetro Δt	Modelo 2. Parámetro Vo (mm/año)
0.30803011	0.2630408	1.951123734	0.31803011	1.9330408	0.611123734

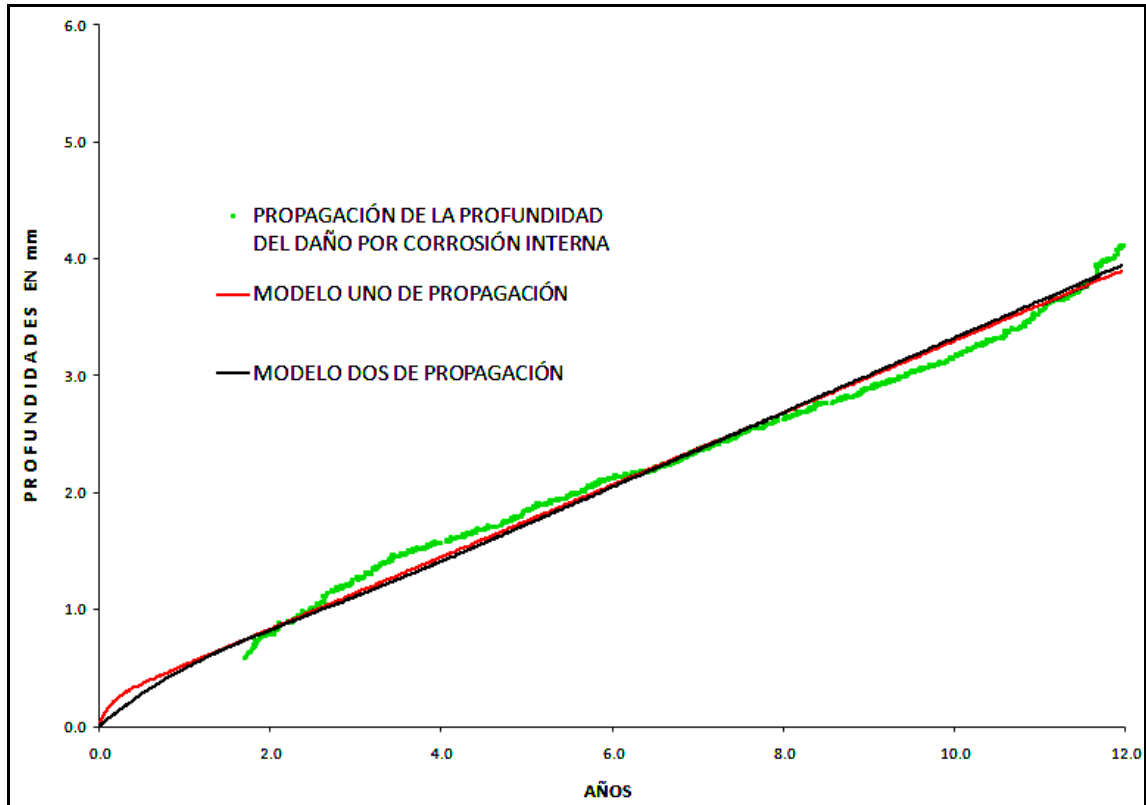


Figura III.1. Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, en un sistema de transporte de diesel.

III.2. SISTEMA DE TRANSPORTE DE GASOLINA

Las características generales de un sistema de ductos para transporte de gasolina, que en este trabajo se muestran para la aplicación de los modelos de propagación de profundidad, se encuentran en la tabla III.3.

Tabla III.3. Características generales de un sistema para transporte de gasolina.

LONGITUD DEL SISTEMA:	53,198.59	Metros
SECCIÓN (SUBSISTEMA):	48,220.85	- 53172.00 Metros
DIÁMETRO INTERIOR DEL SUBSISTEMA DE DUCTOS:	6.30	Pulgadas
MATERIAL DE TRANSPORTE:	GASOLINA	
AÑO DE INICIO DE VIDA DEL SISTEMA:	1982	
AÑO DE LA INSPECCIÓN:	1994	
TIEMPO DE LA INSPECCIÓN:	12	Años
NÚMERO DE DEFECTOS DETECTADOS:	47	

Los datos referentes a los daños internos por corrosión localizada recopilados del registro de inspección de un sistema de ductos para el transporte de gasolina, se muestran en el anexo dos de éste trabajo. Con relación a las simulaciones de profundidades de los daños por corrosión interna del sistema de transporte de gasolina, en el anexo dos se muestran las gráficas correspondientes al cálculo de las funciones de densidad de probabilidad de cada profundidad máxima del daño por corrosión y de la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño por corrosión del sistema, al igual que sus respectivas funciones de probabilidad. En la tabla III.4 se muestran los valores de los parámetros del modelo uno y dos de propagación de la profundidad del daño por corrosión interna, obtenidos con base en un análisis de regresión no lineal. El modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño, se muestran en la figura III.2.

Tabla III.4. Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de gasolina.

Modelo 1. Parámetro V_p	Modelo 1. Parámetro Δt	Modelo 1. Parámetro V_o (mm/año)	Modelo 2. Parámetro V_p	Modelo 2. Parámetro Δt	Modelo 2. Parámetro V_o (mm/año)
0.19903031	0.4930408	0.451123734	0.20303011	0.6730408	0.511123734

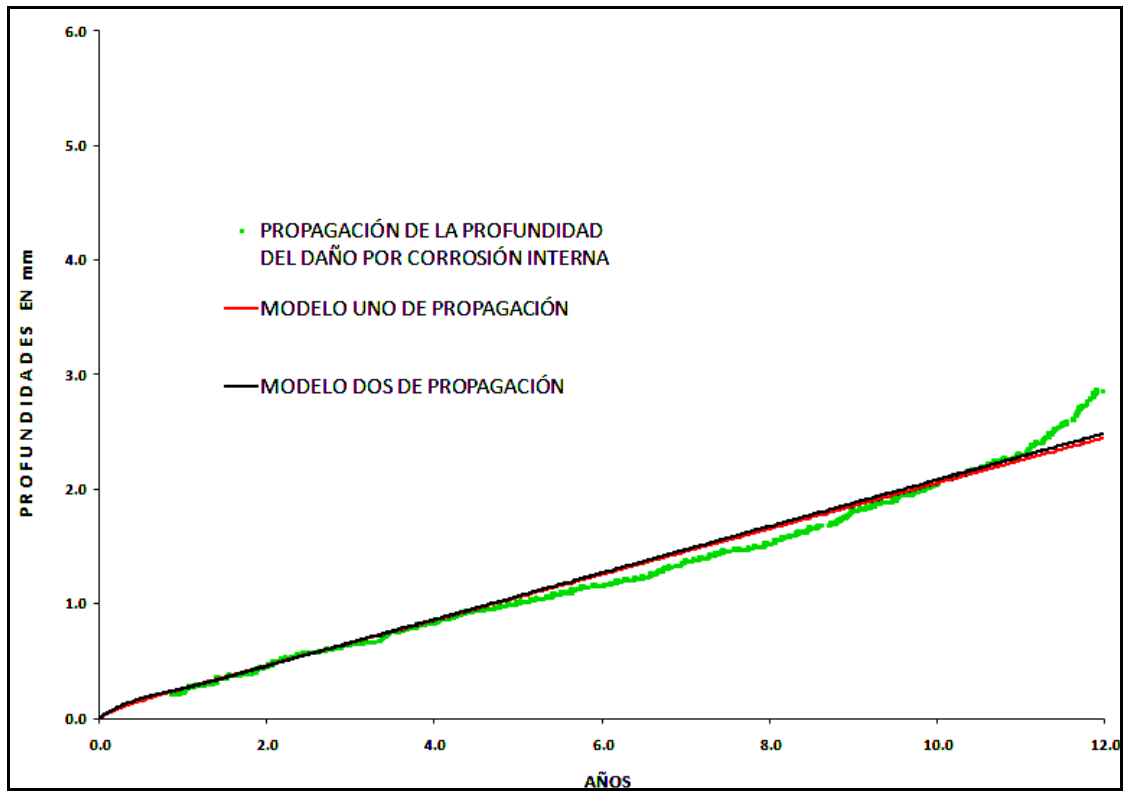


Figura III.2. Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, en un sistema de transporte de gasolina.

III.3. SISTEMA DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO

Las características generales de un sistema de ductos para transporte de petróleo crudo, que en este trabajo se muestran para la aplicación de los modelos de propagación de profundidad, se encuentran en la tabla III.5.

Tabla III.5. Características generales de un sistema para transporte de petróleo crudo.

LONGITUD DEL SISTEMA:	117,187.352	Metros
DIÁMETRO INTERIOR DEL SISTEMA DE DUCTOS:	8.70	Pulgadas
MATERIAL DE TRANSPORTE:	PETRÓLEO CRUDO	
AÑO DE INICIO DE VIDA DEL SISTEMA:	1976	
AÑO DE LA INSPECCIÓN:	1997	
TIEMPO T1 DE LA INSPECCIÓN:	21	Años
NÚMERO DE DEFECTOS DETECTADOS:	100	

Los datos referentes a los daños internos por corrosión localizada recopilados del registro de inspección de un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo, se muestran en el anexo tres de éste trabajo. Con relación a las simulaciones de profundidades de los daños por corrosión interna del sistema de transporte de gasolina, en el anexo tres se muestran las gráficas correspondientes al cálculo de las funciones de densidad de probabilidad de cada profundidad máxima del daño por corrosión y de la función de densidad de probabilidad de la profundidad máxima del daño por corrosión del sistema, al igual que sus respectivas funciones de probabilidad. En la tabla III.6 se muestran los valores de los parámetros del modelo uno y dos de propagación de la profundidad del daño por corrosión interna, obtenidos con base en un análisis de regresión no lineal. El modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño se muestran en la figura III.3.

Tabla III.6. Valores de los parámetros de los modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión de un sistema para transporte de petróleo crudo.

Modelo 1. Parámetro V_p	Modelo 1. Parámetro Δt	Modelo 1. Parámetro V_o (mm/año)	Modelo 2. Parámetro V_p	Modelo 2. Parámetro Δt	Modelo 2. Parámetro V_o (mm/año)
0.17111031	0.5930408	1.011123734	0.17003011	1.9330408	0.611123734

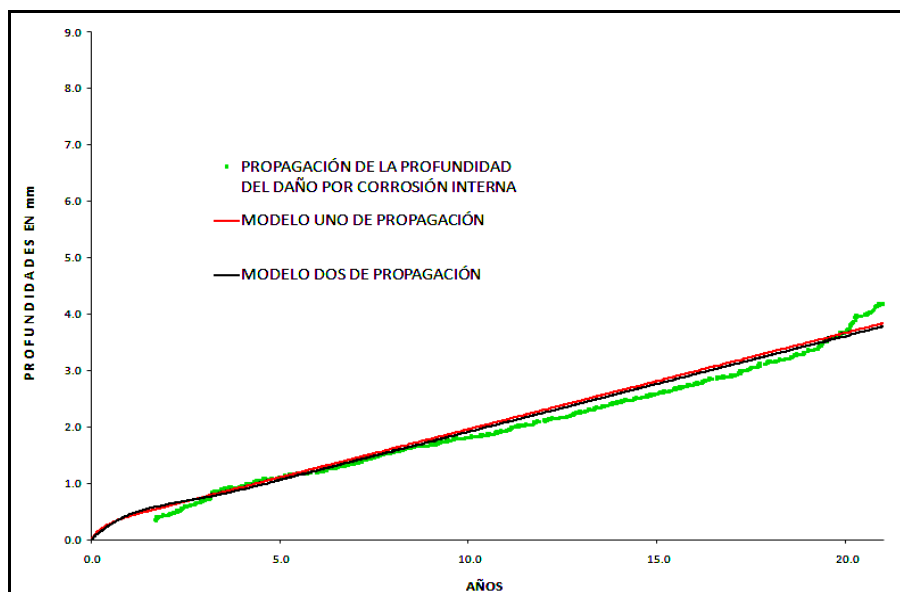


Figura III.3. Modelo uno y dos ajustados a la propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada en un sistema de transporte de petróleo crudo.

III.4. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Para realizar la calibración de los modelos de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada, es necesario contar al menos con dos registros de inspección. Las medidas de las profundidades utilizadas para la calibración de los modelos de propagación, pertenecen a los registros de inspección del sistema de transporte de gasolina con un intervalo de seis años entre las dos inspecciones.

En la tabla III.7 se muestran las medidas de las profundidades de los daños internos por corrosión localizada, correspondientes al segundo registro de inspección del sistema de transporte de gasolina.

Tabla III.7. Profundidades de los daños internos por corrosión localizada correspondientes al segundo registro de inspección de un sistema de transporte de gasolina.

Profundidades medidas (mm)	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos (mm)	Diámetro del sistema de ductos (pulgadas)
2.08	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.70	INTERIOR	6.3	12
1.53	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.70	INTERIOR	6.3	12
1.89	INTERIOR	6.3	12

III.4.1. CÁLCULO DEL ERROR DEL MODELO UNO DE PROPAGACIÓN

Seleccionando profundidades medidas en la primera y en la segunda inspección que pertenecen al mismo daño, se determina el porcentaje del error del modelo uno de propagación a través del cálculo de la desviación estándar. En la tabla III.8 y III.9 se muestra el cálculo del error del modelo uno de propagación.

Tabla III.8. Parte inicial del cálculo del error del modelo uno de propagación.

Profundidades medidas en la segunda inspección (mm)	Profundidades estimadas con el modelo uno (mm)	Diferencias de las profundidades medidas y las estimadas	Cuadrados de las diferencias de las profundidades medidas y las estimadas	Suma de los cuadrados de las diferencias de las profundidades medidas y las estimadas
1.50	2.11	0.61	0.37	1.89
1.33	1.97	0.64	0.40	
1.89	2.60	0.71	0.50	
1.45	2.23	0.78	0.61	

Tabla III.9. Parte final del cálculo del error del modelo uno de propagación.

Varianza σ^2	Desviación estándar σ	Espesor de la pared del ducto W_0 (mm)	Desviación estándar / W_0	% de error
0.47	0.69	6.3	0.1091	10.91

La figura III.4 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo uno de propagación del primer daño seleccionado. La figura III.5 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo uno de propagación del segundo daño seleccionado.

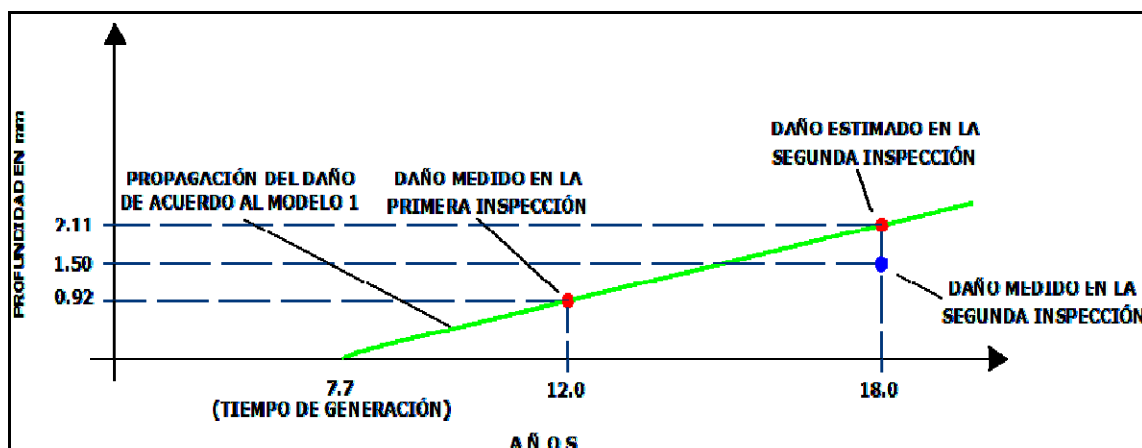


Figura III.4. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al primer daño seleccionado.

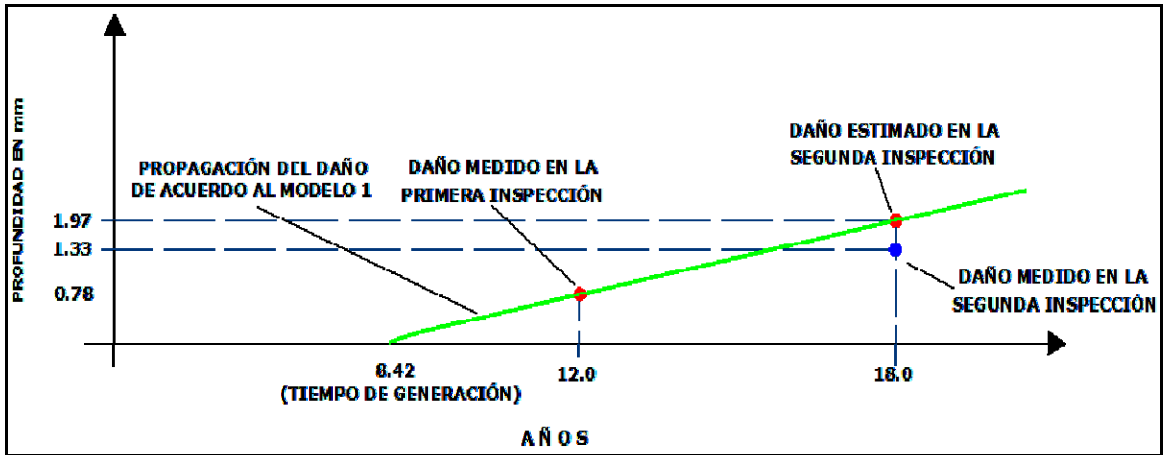


Figura III.5. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno de propagación con respecto al segundo daño seleccionado.

La figura III.6 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo uno de propagación del tercer daño seleccionado. La figura III.7 muestra profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo uno de propagación del cuarto daño seleccionado.

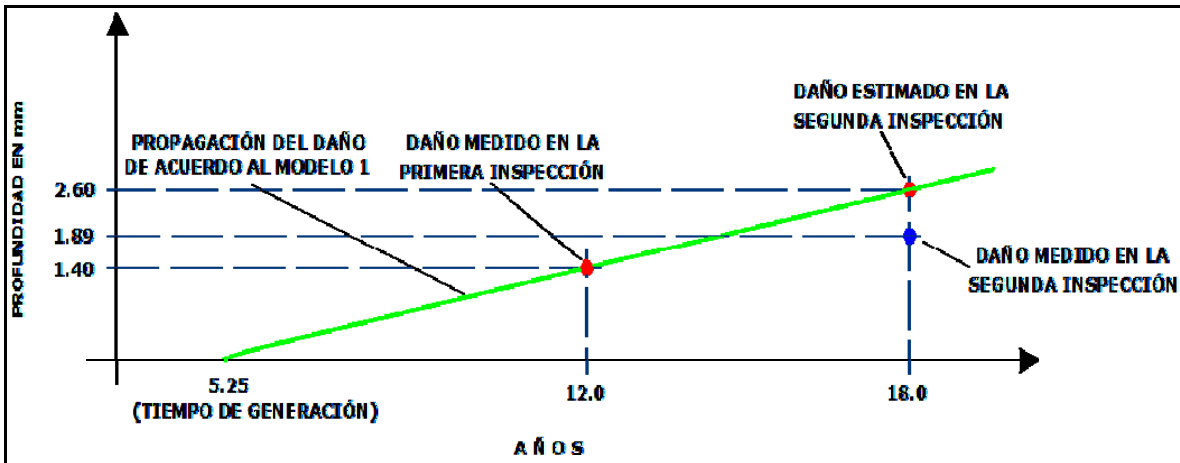


Figura III.6. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno con respecto al tercer daño seleccionado.

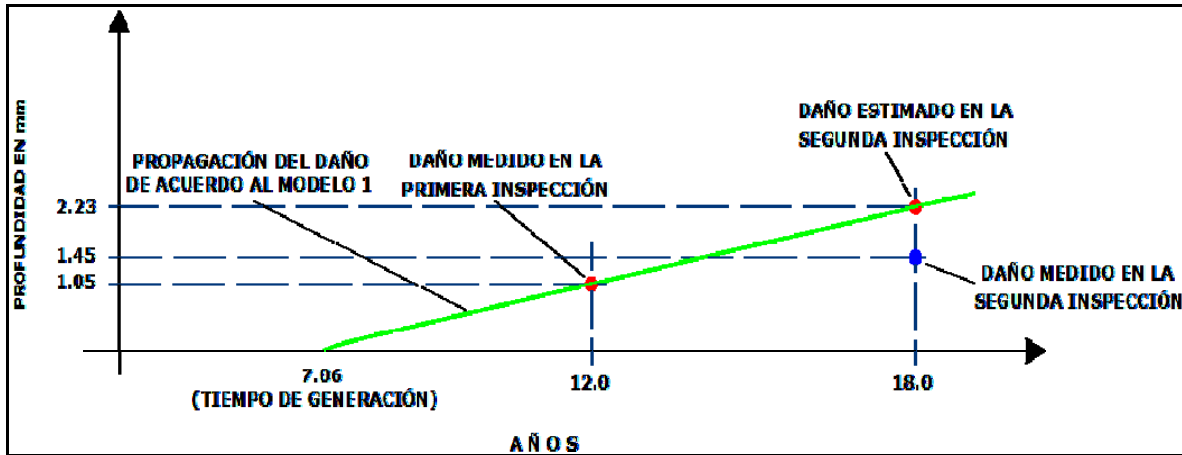


Figura III.7. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo uno con respecto al cuarto daño seleccionado.

III.4.2. CÁLCULO DEL ERROR DEL MODELO DOS DE PROPAGACIÓN

Con base en las medidas de las profundidades seleccionadas de la primera y la segunda inspección que pertenecen al mismo daño, se determina el porcentaje del error del modelo dos de propagación a través del cálculo de la desviación estándar. En la tabla III.10 y III.11 se muestra el cálculo del error del modelo dos de propagación.

Tabla III.10. Parte inicial del cálculo del error del modelo dos de propagación.

Profundidades medidas en la segunda inspección (mm)	Profundidades estimadas con el modelo dos (mm)	Diferencias de las profundidades medidas y las estimadas	Cuadrados de las diferencias de las profundidades medidas y las estimadas	Suma de los cuadrados de las diferencias de las profundidades medidas y las estimadas
1.50	2.14	0.64	0.41	2.00
1.33	1.98	0.65	0.42	
1.89	2.61	0.72	0.52	
1.45	2.26	0.81	0.66	

Tabla III.11. Parte final del cálculo del error del modelo dos de propagación.

Varianza σ^2	Desviación estándar σ	Espesor de la pared del ducto W_o (mm)	Desviación estándar / W_o	% de error
0.50	0.71	6.3	0.1123	11.23

La figura III.8 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo dos de propagación del primer daño seleccionado.

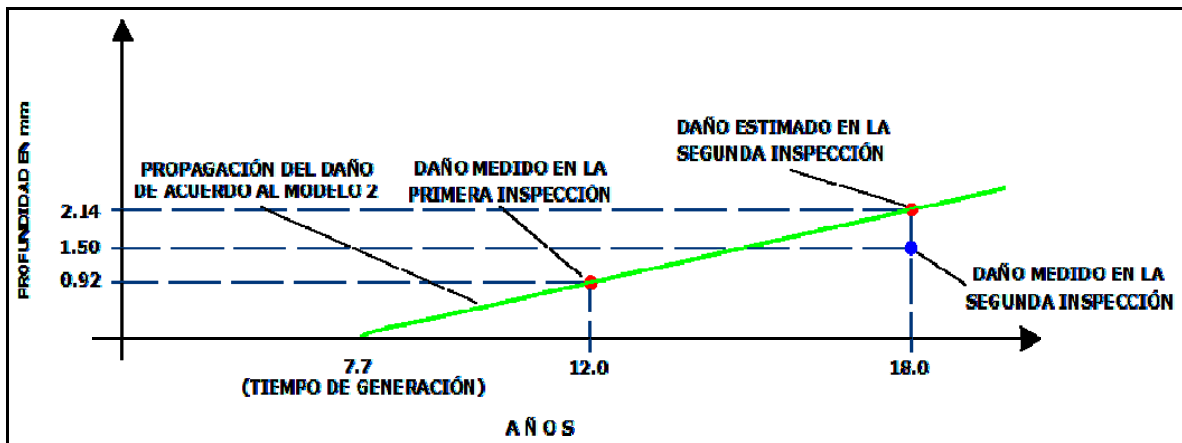


Figura III.8. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al primer daño seleccionado.

La figura III.9 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo dos de propagación del segundo daño seleccionado. La figura III.10 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo dos de propagación del tercer daño seleccionado.

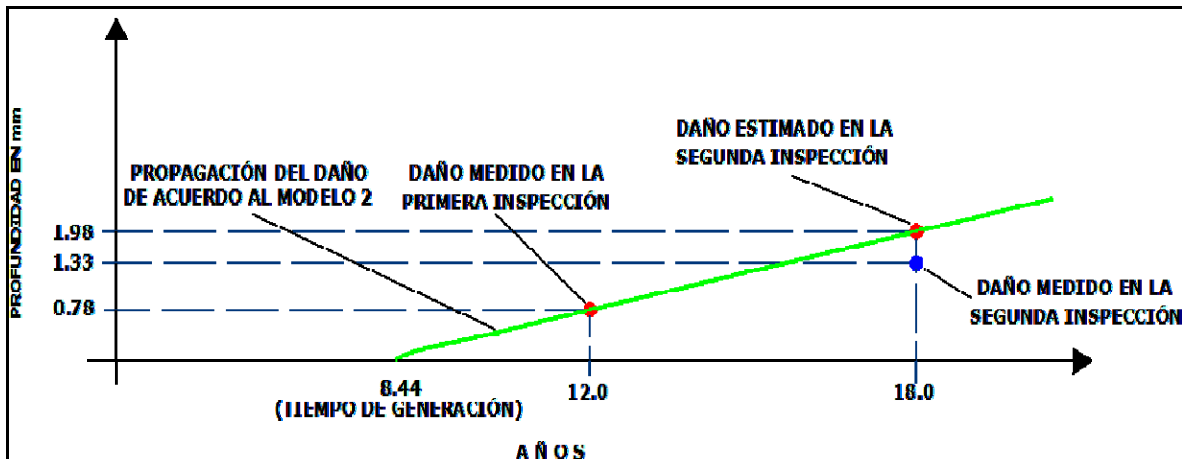


Figura III.9. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al segundo daño seleccionado.

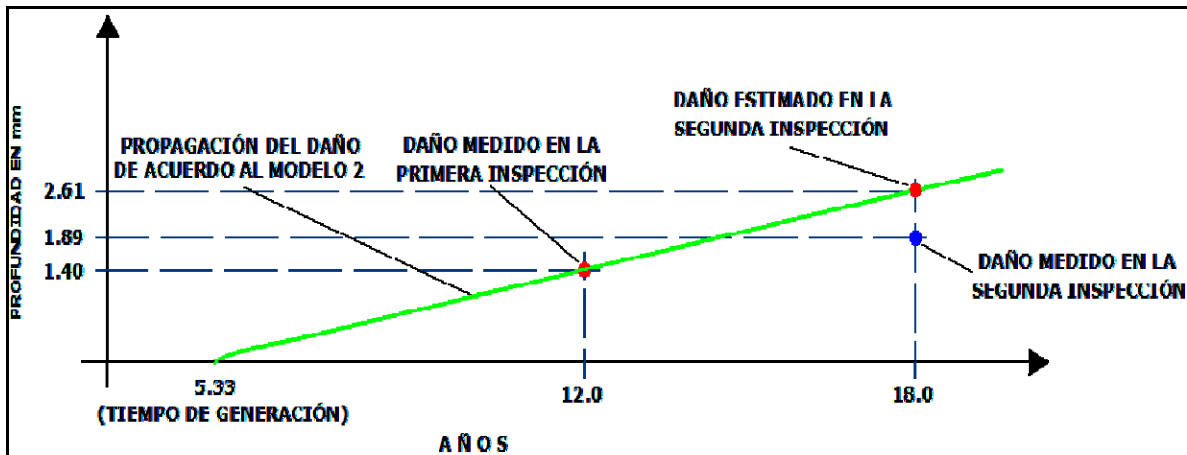


Figura III.10. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al tercer daño seleccionado.

La figura III.11 muestra la profundidad medida por el sistema electromecánico de inspección y la estimada por el modelo dos de propagación del cuarto daño seleccionado.

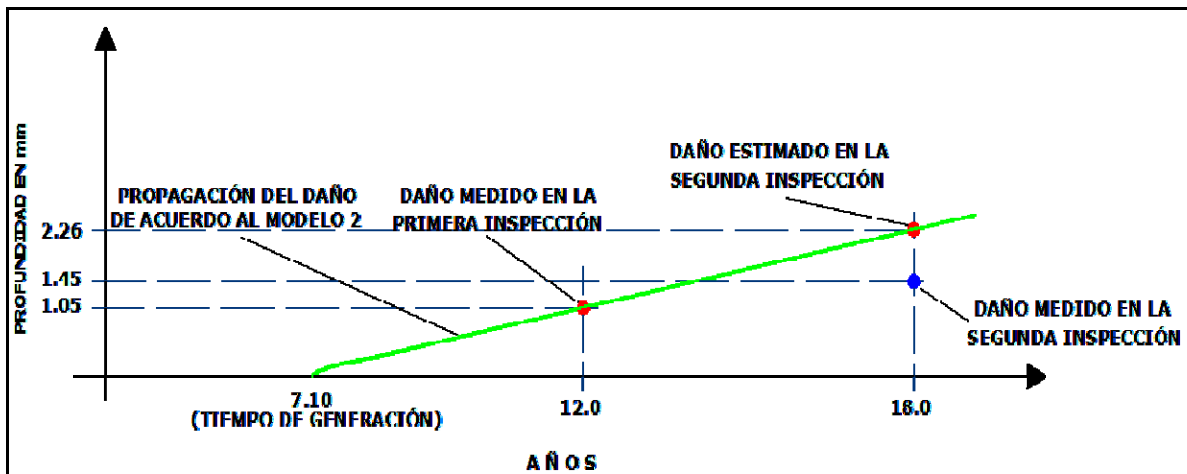


Figura III.11. Profundidad medida y profundidad estimada con el modelo dos de propagación con respecto al cuarto daño seleccionado.

Cabe mencionar, que el porcentaje promedio de error de ambos modelos de propagación es del 11.07% del espesor de la pared del ducto. El porcentaje promedio de error, es calculado con base en los resultados que se muestran en la tablas III.9 y III.11 respectivamente.

III.5. FACTOR DE CORRECCIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

El sistema de transporte utilizado para la calibración de los modelos de propagación, está influenciado por la aplicación de inhibidor de corrosión. Lo anterior se manifiesta en la sobrestimación de las profundidades de los daños en la segunda inspección, al utilizar los modelos de propagación. Es necesario determinar un factor de corrección de los modelos de propagación, que indique la proporción en que disminuye la velocidad del daño que está afectada por el inhibidor de corrosión, con respecto a la velocidad del daño no afectada por el inhibidor de corrosión.

Definiendo el cociente de la diferencia de la profundidad estimada d_1 (al segundo tiempo de inspección t_1) y la profundidad medida d_0 (en el primer tiempo de inspección t_0), entre el incremento de tiempo entre la segunda y primera inspección, la velocidad del daño sin inhibidor de corrosión está dada en la ecuación (III.1).

$$V_s = \frac{d_1 - d_0}{t_1 - t_0} \quad (III.1)$$

De igual manera como se arriba se menciona, definiendo el cociente de la diferencia de la profundidad medida d_2 (en el segundo tiempo de inspección t_1) y la profundidad medida d_0 (en el primer tiempo de inspección t_0), entre el incremento de tiempo entre la segunda y primera inspección, la velocidad del daño con inhibidor de corrosión está dada en la ecuación (III.2).

$$V_c = \frac{d_2 - d_0}{t_1 - t_0} \quad (III.2)$$

Con base en lo arriba mencionado, el factor de corrección de los modelos de propagación se define como el cociente de la velocidad del daño con inhibidor, entre la velocidad del daño sin inhibidor. Este factor de corrección, se representa en la ecuación (III.3).

$$F_c = \frac{V_c}{V_s} \quad (III.3)$$

El factor de corrección F_c y el factor de corrección promedio F_{cp} , se calcula para los cuatros daños seleccionados en las aplicaciones de los modelos uno y dos de propagación. Posteriormente, se determina un factor de corrección promedio de ambos modelos de propagación, con base en los resultados que se muestran en las siguientes secciones.

III.5.1. CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL MODELO UNO DE PROPAGACIÓN

En la tabla III.12, se muestra el resultado del cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo uno de propagación.

Tabla III.12. Cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo uno de propagación.

Parámetros		Daño uno	Daño dos	Daño tres	Daño cuatro
d_0	=	0.92	0.78	1.40	1.05
d_1	=	2.11	1.97	2.60	2.23
d_2	=	1.50	1.33	1.89	1.45
t_0	=	12	12	12	12
t_1	=	18	18	18	18
V_s	=	0.1983	0.1983	0.2000	0.1967
V_c	=	0.0967	0.0917	0.0817	0.0667
F_c	=	0.4874	0.4622	0.4083	0.3390
F_{cp}	=	0.4242			

III.5.2. CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DEL MODELO DOS DE PROPAGACIÓN

En la tabla III.13, se muestra el resultado del cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo dos de propagación.

Tabla III.13. Cálculo del factor de corrección F_c y del factor de corrección promedio F_{cp} del modelo dos de propagación.

Parámetros		Daño uno	Daño dos	Daño tres	Daño cuatro
d_0	=	0.92	0.78	1.40	1.05
d_1	=	2.14	1.98	2.61	2.26
d_2	=	1.50	1.33	1.89	1.45
t_0	=	12	12	12	12
t_1	=	18	18	18	18
V_s	=	0.2033	0.2000	0.2017	0.2017
V_c	=	0.0967	0.0917	0.0817	0.0667
F_c	=	0.4754	0.4583	0.4050	0.3306
F_{cp}	=	0.4173			

Cabe mencionar, que el factor de corrección promedio de los modelos uno y dos de propagación, es del 42.07%. El factor de corrección promedio, es calculado con base en los resultados que se muestran en la tablas III.12 y III.13 respectivamente.

III.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las profundidades estimadas por los modelos uno y dos de propagación, que se encuentran en las tablas III.8. y III.10 respectivamente, indican que las estimaciones de las profundidades de los daños al segundo tiempo de inspección son prácticamente las mismas. De acuerdo a lo anterior, se puede enunciar que es indiferente la utilización de un modelo u otro de propagación.

Como se esperaba, se observó en las calibraciones de los modelos de propagación que las profundidades predichas son conservadoras, es decir, se sobreestima las velocidades de crecimiento de las profundidades de los daños por corrosión. Esto ocurre ya que, después de la primera inspección el sistema fue protegido internamente con inhibidor de corrosión. El error promedio de los modelos de propagación es de 0.69 mm, es decir, el 11.07% del espesor de la pared del ducto.

El factor de corrección promedio de los modelos uno y dos de propagación es del 42.07%, es decir, la velocidad del daño por corrosión

afectada por la aplicación de inhibidor de corrosión, disminuye a una tasa de 0.4207 veces con respecto a la velocidad del daño por corrosión no afectada por la aplicación de inhibidor.

La profundidad del daño d_{Ic} , que no está afectada por la aplicación de inhibidor de corrosión y que es medida en el segundo tiempo de inspección, se determina de acuerdo con la ecuación (III.4). Donde d_0 es la profundidad medida en el primer tiempo de inspección t_0 , V_{sp} es el promedio de las velocidades de los daños sin inhibidor de cada uno de los daños, en los modelos uno y dos de propagación. El término t_1 , es el segundo tiempo de inspección.

$$d_{Ic} = d_0 + V_{sp}(t_1 - t_0) \quad (III.4)$$

En la tabla III.14, se muestran las profundidades de los daños d_{Ic} no afectados por la aplicación de inhibidor de corrosión y las profundidades d_I estimadas por los modelos uno y dos de propagación, al segundo tiempo de inspección t_1 .

Tabla III.14. Profundidades de los daños no afectados por la aplicación de inhibidor de corrosión y profundidades estimadas al segundo tiempo de inspección t_1 .

Daño	Profundidades de los daños en el segundo tiempo de inspección, no afectados por el inhibidor de corrosión (mm)	Profundidades estimadas con el modelo uno de propagación (mm)	Profundidades estimadas con el modelo dos de propagación (mm)
1	2.12	2.11	2.14
2	1.97	1.97	1.98
3	2.60	2.60	2.61
4	2.24	2.23	2.26

Los valores de la tabla II.14, indican que las profundidades estimadas de los daños por los modelos uno y dos de propagación y las profundidades medidas, consideradas como no afectadas por la aplicación del inhibidor de corrosión en el segundo tiempo de inspección, son prácticamente las mismas.

CONCLUSIONES

1. En el sistema de ductos utilizado para la calibración de los modelos uno y dos de propagación, se sobreestiman las profundidades de los daños internos por corrosión al segundo tiempo de inspección con un error promedio de 0.69 mm, es decir, el 11.07% del espesor de la pared del ducto. Lo anterior se debe, a que el sistema de ductos se protegió internamente a través de la aplicación de inhibidor de corrosión, a partir del primer tiempo de inspección.
2. Las medidas de las profundidades de los daños internos del sistema de transporte de gasolina, que se utilizaron para calibrar los modelos de propagación y que se corrigieron al segundo tiempo de inspección como no afectadas por la aplicación de inhibidor de corrosión, son similares con las profundidades estimadas con los modelos uno y dos de propagación.
3. Con base en los resultados que se presentan en la tabla III.14, las diferencias entre los valores de las profundidades de los daños en el segundo tiempo de inspección, que son estimadas con los modelos uno y dos de propagación, son despreciables. Por lo tanto, es suficiente con una aproximación de tercer orden en serie de Taylor para describir el comportamiento de la evolución del daño interno por corrosión localizada.
4. Los modelos planteados en este trabajo, son consistentes con el comportamiento del fenómeno de la corrosión que se presenta en el interior de los ductos que son utilizados para el transporte de hidrocarburos, es decir, los modelos uno y dos de propagación pueden aplicarse a otros casos de estudio, ya que los resultados del análisis del sistema de transporte que se utilizó para calibrar ambos modelos, resultaron conservadores.
5. La metodología para caracterizar el proceso estocástico, puede aplicarse en situaciones en las que se tiene poca información y al utilizar los modelos uno y dos de propagación con base en un solo registro de inspección, se puede conocer el comportamiento de la evolución de la profundidad del daño interno por corrosión localizada.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

1. Ampliar el alcance de los modelos de propagación presentados en este trabajo, con un análisis que implique la propagación de la profundidad y la longitud del daño interno por corrosión.
2. Desarrollar modelos de propagación de la profundidad del daño por corrosión, considerando los daños internos por corrosión no detectados por el equipo electromecánico de inspección.
3. Desarrollar modelos de propagación de la profundidad del daño externo por corrosión localizada.
4. Relacionar los modelos de propagación desarrollados en este trabajo, con las propiedades físico-químicas del material de transporte y con las propiedades físico-químicas del medio; así como con las solicitaciones mecánicas a las que sea expuesto el sistema de ductos.

BIBLIOGRAFÍA

A

Alamilla, J. (2006). Stochastic modeling of corrosion propagation damage in active sites from field inspection data. *Journal Corrosion Science Section*. P. 10-11, 16-17.

E

Engelhardt, G. y Macdonald, D.D. (2004a). Estimation of corrosion cavity growth rate for predicting system service life. *Journal Corrosion Science Section*. P. 1160-1187.

Engelhardt, G. y Macdonald, D.D. (2004b). Unification of the deterministic and statistical approaches for predicting localized corrosion damage. *Journal Corrosion Science Section*. P. 2755-2780.

F

Frenkel, G.S. (1998). Localized corrosion of metals: a review of the rate-controlling factors in initiation and growth. *Journal Electrochem*. P. 2186-2198.

H

Hong, H.P. (1998). Application of the stochastic process to pitting corrosion. *Journal Corrosion Science Section*. P. 10-16.

Hou, W. y Liang, C. (2002). Effects of alloying on atmospheric corrosion of Steels. *Journal Corrosion Science Section*. P. 313-322.

M

Melchers, R.E. (2004a). Mathematical modeling of the effect of water velocity on the marine immersion corrosion of mild steel coupons. *Journal Corrosion Science Section*. P. 471-478.

Melchers, R.E. (2004b). The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures. *Journal Corrosion Science Section*. P. 2392-2410.

Melchers, R.E. (2005). Representation of uncertainty in maximum depth of marine corrosion pits. *Journal Structural Safety*. P. 323-334.

S

Shibata, T. (1996). Statistical and stochastic approaches to localized corrosion. *Journal Corrosion Science Section*. P. 813-830.

Straub, D. y Havbro, M.F. (2005). *Temporal variability in corrosion modeling and reliability updating*. Proceedings of OMAE 2005: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Greece: OMAE2005-67199

W

Westwood, S. y Hopkins, P. (2004). *Smart pig defect tolerances: quantifying the benefits of standard and high resolution pigs*. proceedings of IPC 2004: International Pipeline Conference. Canada: IPC04-0085.

SITIOS WEB

[http:// www.elmundodelpetroleo.com](http://www.elmundodelpetroleo.com)
(Consultada el 24 de junio de 2007).

http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/estadistica.pdf
(Consultada el 14 de agosto de 2007).

<http://www.fulp.ulpgc.es/articulos/vectorplus25.htm>
(Consultada el 10 de junio de 2007).

<http://www.imp.mx/investigación/ductos/ductos.htm>
(Consultada el 7 de diciembre de 2006).

<http://www.ingenierias.uanl.mx>
(Consultada el 3 de febrero de 2007).

<http://www.monografias.com/trabajos3/corrosion.htm>
(Consultada el 13 de enero de 2007).

<http://www.um.es/or/ampliacion.htm>
(Consultada el 8 de marzo de 2007).



MODELO UNO DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Resumen

En esta parte del trabajo, se muestra el proceso de solución de la ecuación diferencial ordinaria de primer orden no homogénea de la velocidad instantánea del deterioro por corrosión y se muestra el modelo uno de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada.

APÉNDICE A

MODELO UNO DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Sea la ecuación diferencial de primer orden no homogénea:

$$v_{corr}(t) + v'_{corr}(t) \frac{\Delta t}{2} = \alpha v_{corr}^* \quad (\text{APA.1})$$

Sabiendo que $v'_{corr}(t) = dv/dt$, la ecuación (APA.1) se expresa como:

$$\frac{\Delta t}{2} \frac{dv}{dt} = -(v_{corr}(t) - \alpha v_{corr}^*) \quad (\text{APA.2})$$

Resolviendo la ecuación (APA.2):

$$\frac{dv}{v_{corr}(t) - \alpha v_{corr}^*} = -\frac{2}{\Delta t} dt \quad (\text{APA.3})$$

$$\ln(v_{corr}(t) - \alpha v_{corr}^*) = -\frac{2}{\Delta t} t + C_0 \quad (\text{APA.4})$$

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + C_0 e^{\frac{-2}{\Delta t} t} \quad (\text{APA.5})$$

La constante C_0 , se obtiene considerando que al instante de tiempo $t=0$, la velocidad de corrosión instantánea $v_{corr}(t)$ es finita con un valor inicial v_0 . Entonces si $v_{corr}(0) = v_0$, se obtiene:

$$v_0 = \alpha v_{corr}^* + C_0 \quad (\text{APA.6})$$

$$C_0 = v_0 - \alpha v_{corr}^* \quad (\text{APA.7})$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación (APA.7) en la ecuación (APA.8), se obtiene la ecuación:

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) e^{\frac{-2t}{\Delta t}} \quad (\text{APA.8})$$

Integrando la ecuación (APA.8):

$$d_{max}(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) \frac{\Delta t}{2} \left(1 - e^{\frac{-2t}{\Delta t}} \right) \quad (\text{APA.9})$$



MODELO DOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Resumen

En esta parte del trabajo, se muestra el proceso de solución de la ecuación diferencial ordinaria de segundo orden no homogénea de la velocidad instantánea del deterioro por corrosión y se muestra el modelo dos de propagación de la profundidad del daño interno por corrosión localizada.

APÉNDICE B

MODELO DOS DE PROPAGACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO INTERNO POR CORROSIÓN LOCALIZADA

Sea la ecuación diferencial de segundo orden no homogénea:

$$v_{corr}(t) + v'_{corr}(t) \frac{\Delta t}{2} + v''_{corr}(t) \frac{\Delta t^2}{6} = \alpha v_{corr}^* \quad (\text{APB.1})$$

Para obtener la solución complementaria se considera que $v_{corr} = e^{\lambda t}$, entonces:

$$v'_{corr}(t) = \lambda e^{\lambda t} \quad (\text{APB.2})$$

$$v''_{corr}(t) = \lambda^2 e^{\lambda t} \quad (\text{APB.3})$$

Sustituyendo y resolviendo la ecuación homogénea:

$$\left(\frac{\Delta t^2}{6} \lambda^2 + \frac{\Delta t}{2} \lambda + 1 \right) e^{\lambda t} = 0 \quad (\text{APB.4})$$

Resolviendo:

$$\frac{\Delta t^2}{6} \lambda^2 + \frac{\Delta t}{2} \lambda + 1 = 0 \quad (\text{APB.5})$$

$$\lambda = \frac{-3}{2\Delta t} \pm \frac{3}{\Delta t} \sqrt{-5/12} \quad (\text{APB.6})$$

Por lo tanto:

$$v_{corr}(t) = C_0 e^{\frac{-3}{2\Delta t} t + i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} + C_1 e^{\frac{-3}{2\Delta t} t - i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} \quad (\text{APB.7})$$

$$v_{corr}(t) = e^{\frac{-3}{2\Delta t} t} \left[C_0 e^{i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} + C_1 e^{-i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} \right] \quad (\text{APB.8})$$

Para obtener la solución particular. Si $v_{p_corr} = A\alpha v_{corr}^*$ es constante, $v'_{p_corr} = v''_{p_corr} = 0$, por lo tanto $A=1$:

$$v_{p_corr} = \alpha v_{corr}^* \quad (\text{APB.9})$$

La solución total:

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + e^{\frac{-3}{2\Delta t} t} \left[C_0 e^{i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} + C_1 e^{-i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} \right] \quad (\text{APB.10})$$

Aplicando las condiciones de frontera $v_{corr}(0) = v_0$ y $d(0) = 0$, se obtiene:

$$v_0 = \alpha v_{corr}^* + C_0 + C_1 \quad (\text{APB.11})$$

$$C_0 = v_0 - \alpha v_{corr}^* - C_1 \quad (\text{APB.12})$$

$$\frac{-2\Delta t}{3} \left[\frac{v_0 - \alpha v_{corr}^* - C_1}{i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12}} - \frac{C_1}{i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12}} \right] = 0 \quad (\text{APB.13})$$

$$v_0 - \alpha v_{corr}^* - 2C_1 = 0 \quad (\text{APB.14})$$

$$C_1 = \frac{v_0 - \alpha v_{corr}^*}{2} \quad (\text{APB.15})$$

Sustituyendo la ecuación (APB.15) en la (APB.12):

$$C_0 = v_0 - \alpha v_{corr}^* - \frac{v_0}{2} + \frac{\alpha v_{corr}^*}{2} \quad (\text{APB.16})$$

$$C_0 = C_1 = \frac{v_0 - \alpha v_{corr}^*}{2} \quad (\text{APD.17})$$

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + \frac{v_0 - \alpha v_{corr}^*}{2} e^{\frac{-3}{2\Delta t} t} \left[e^{i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} + e^{-i \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t} \right] \quad (\text{APB.18})$$

$$v_{corr}(t) = \alpha v_{corr}^* + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) e^{\frac{-3}{2\Delta t} t} \cos \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t \quad (\text{APB.19})$$

Integrando la ecuación (APB.19), se obtiene:

$$d(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) \frac{e^{\frac{-3}{2\Delta t} t}}{\frac{9}{4\Delta_t^2} + \left(\frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12}\right)^2} \left[\frac{-3}{2\Delta t} \cos \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t + \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} \operatorname{sen} \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t \right] \quad (\text{APB.20})$$

O también:

$$d(t) = \alpha v_{corr}^* t + (v_0 - \alpha v_{corr}^*) \frac{\Delta t}{4} \left[1 - e^{\frac{-3}{2\Delta t} t} \left(\cos \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t - 2 \sqrt{5/12} \operatorname{sen} \frac{3}{\Delta t} \sqrt{5/12} t \right) \right] \quad (\text{APB.21})$$



DESCRIPCIÓN GENERAL
DE UN PROCESO ESTOCÁSTICO
DE POISSON

Resumen

En esta parte del trabajo, se describen las características generales de un proceso estocástico de tipo Poisson y se describe este proceso estocástico a través de varios ejemplos.

APÉNDICE C

DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN PROCESO ESTOCÁSTICO DE POISSON

En (www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/estadistica.pdf) se menciona que un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias $\{X(t)\} \forall t \in T$, con $T \subseteq R$. Donde t es el parámetro que se asocia al tiempo y $X(t)$ representa el estado del proceso en el instante t . La distribución de Poisson es una distribución de probabilidad discreta. Expresa la probabilidad que un número de eventos ocurra en un tiempo fijo suponiendo que:

- Los eventos ocurren a una razón (*velocidad*) conocida.
- La ocurrencia de eventos es independiente de cuando ocurrió el último evento.

Esta distribución fue descubierta por Siméon-Denis Poisson (1781-1840) y publicada junto con su teoría de la probabilidad en 1838, en su obra: *Recherchers sur la probabilité de Jugements en matiéres criminelles et matiére civile*. La distribución de Poisson establece el hecho que eventos inusuales y no comunes deben ocurrir frecuentemente. Suponga que se desea contar el número de ocurrencias (algunas veces llamadas *arribos*) que suceden en un intervalo de tiempo de una longitud dada. La probabilidad que hayan exactamente n ocurrencias se representa en la ecuación (APC.0), donde λ es el número promedio de eventos por unidad de tiempo y t es la longitud del intervalo de observación.

$$P[x = n] = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (\text{APC.0})$$

En una distribución de tipo Poisson, el valor esperado de ocurrencias es la varianza de la distribución, es decir, el valor medio (primer momento estadístico) de ocurrencias o eventos es igual a la varianza (segundo momento estadístico).

Ejemplos:

- Si $X(t)$ representa la distancia entre dos puntos que se mueven aleatoriamente sobre una recta, entonces $T = R^+$ y $X(t) \in R^+$.
- Si $X(t)$ representa el piso en el que está un ascensor después de la t -ésima parada, entonces $T = Z^+$ y $X(t) \in Z^+$.

- Si $X(t)$ es el número de llamadas a un número de teléfono hasta el instante de tiempo t , entonces $T = R^+$ y $X(t) \in Z^+$.

Si T es un conjunto numerable, entonces el proceso estocástico se dice que es en *tiempo discreto*. Si T es un intervalo, entonces el proceso estocástico se dice que es en *tiempo continuo*. Un proceso estocástico en tiempo continuo $\{N(t)\}_{t \geq 0}$, se dice *puntual* o *de conteo* si $N(t)$ representa el número de veces que ocurre un suceso hasta el instante de tiempo t .

En particular:

- $N(t) \in N \forall t$.
- $N(s) \leq N(t)$ si $s < t$ (Los incrementos son no negativos).

En consecuencia, un proceso de conteo es de incrementos independientes si el número de sucesos que tienen lugar en intervalos de tiempo que no se ocultan son variables aleatorias independientes (www.um.es/or/ampliacion).

Un proceso se dice de Poisson (homogéneo de tasa $\lambda > 0$) si:

1. $N(0) = 0$.
2. Es de incrementos independientes.
3. $P(N(t+s) - N(s) = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \forall n \in N, \forall s, t > 0$

El proceso es de incrementos estacionarios, y los incrementos siguen una distribución de Poisson de parámetro λt para intervalos de tiempo de amplitud t .

Así, el número medio de sucesos hasta el instante t es:

$$E[N(t)] = E[N(t+0) - N(0)] = \lambda t \quad (\text{APC.1})$$

$$N(t+0) - N(0) \equiv P(\lambda t) \quad (\text{APC.2})$$

Un proceso de conteo, $\{N(t)\}_{t \geq 0}$ es de Poisson homogéneo con tasa $\lambda > 0$ si y sólo si se verifica:

1. $N(0) = 0$
2. Es de incrementos independientes y estacionarios.
3. $P(N(h) = 1) = \lambda h + o(h)$.
4. $P(N(h) \geq 2) = o(h)$.



PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE DIESEL

Resumen

En esta parte del trabajo, se muestran las medidas de las profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en el sistema de transporte de diesel, la gráfica de la función de densidad de probabilidad y la función de probabilidad de la profundidad máxima del daño interno por corrosión del sistema, los valores simulados de las profundidades y de los tiempos de nucleación de los daños internos por corrosión localizada.

ANEXO UNO

PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE DIESEL

Tabla AN1.1 (a). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 0 a 47,771.11 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
1.78	INTERIOR	6.35	10.75
1.91	INTERIOR	6.35	10.75
2.73	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
1.33	INTERIOR	6.35	10.75
1.27	INTERIOR	6.35	10.75
1.71	INTERIOR	6.35	10.75
2.03	INTERIOR	6.35	10.75
1.40	INTERIOR	6.35	10.75
1.33	INTERIOR	6.35	10.75
1.27	INTERIOR	6.35	10.75
1.46	INTERIOR	6.35	10.75
2.16	INTERIOR	6.35	10.75
2.29	INTERIOR	6.35	10.75
1.59	INTERIOR	6.35	10.75
1.84	INTERIOR	6.35	10.75
1.65	INTERIOR	6.35	10.75
2.16	INTERIOR	6.35	10.75
2.86	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
2.73	INTERIOR	6.35	10.75
2.86	INTERIOR	6.35	10.75
2.54	INTERIOR	6.35	10.75
2.98	INTERIOR	6.35	10.75
2.79	INTERIOR	6.35	10.75
3.05	INTERIOR	6.35	10.75

Tabla AN1.1 (b). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 45,771.11 a 54,000 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
2.86	INTERIOR	6.35	10.75
2.79	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
2.73	INTERIOR	6.35	10.75
3.11	INTERIOR	6.35	10.75

Tabla AN1.1 (c). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de diesel de 54,000 a 102,349.5 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
2.92	INTERIOR	6.35	10.75
2.54	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
3.05	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
2.67	INTERIOR	6.35	10.75
2.73	INTERIOR	6.35	10.75
2.98	INTERIOR	6.35	10.75
2.98	INTERIOR	6.35	10.75
2.79	INTERIOR	6.35	10.75
2.60	INTERIOR	6.35	10.75
2.73	INTERIOR	6.35	10.75
1.71	INTERIOR	6.35	10.75

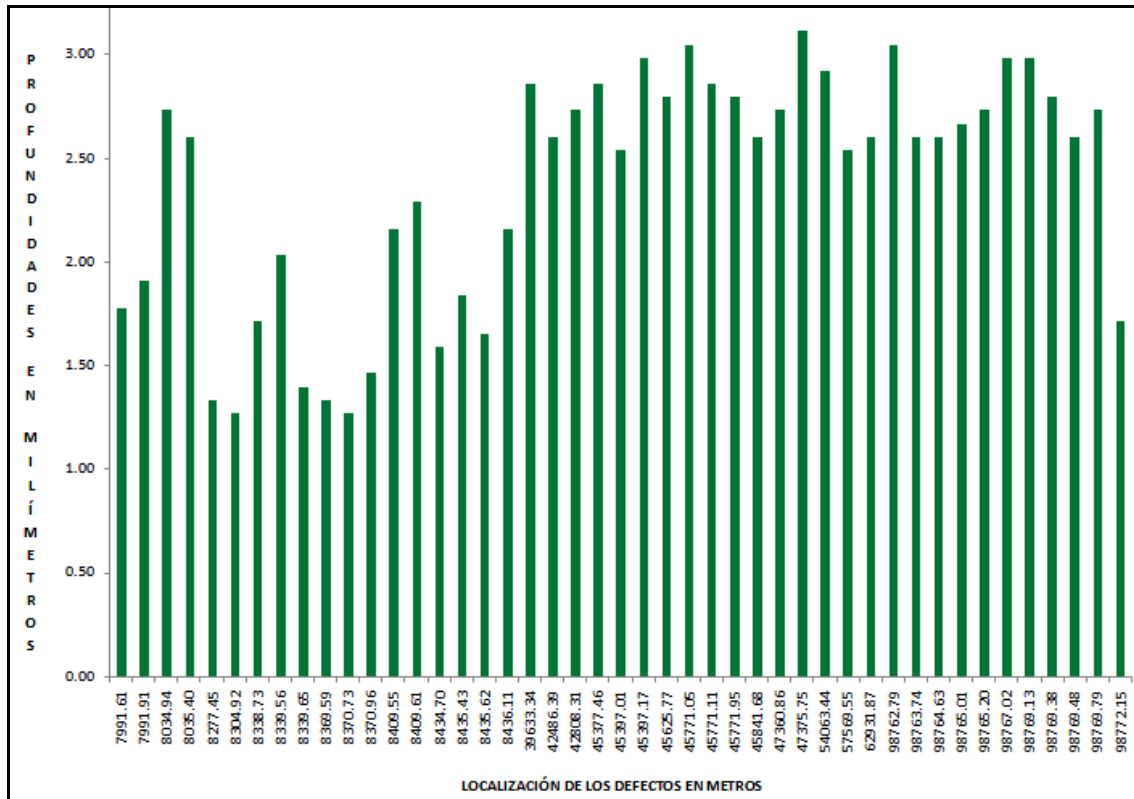


Figura AN1.1. Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de diesel.

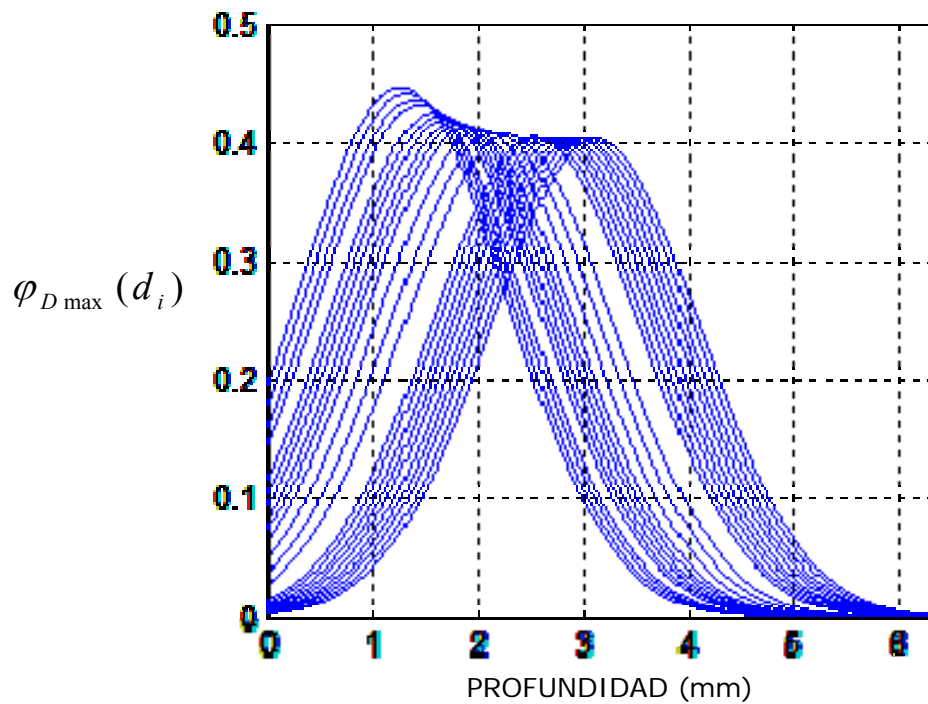


Figura AN1.2. Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{D_{\max}}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de diesel.

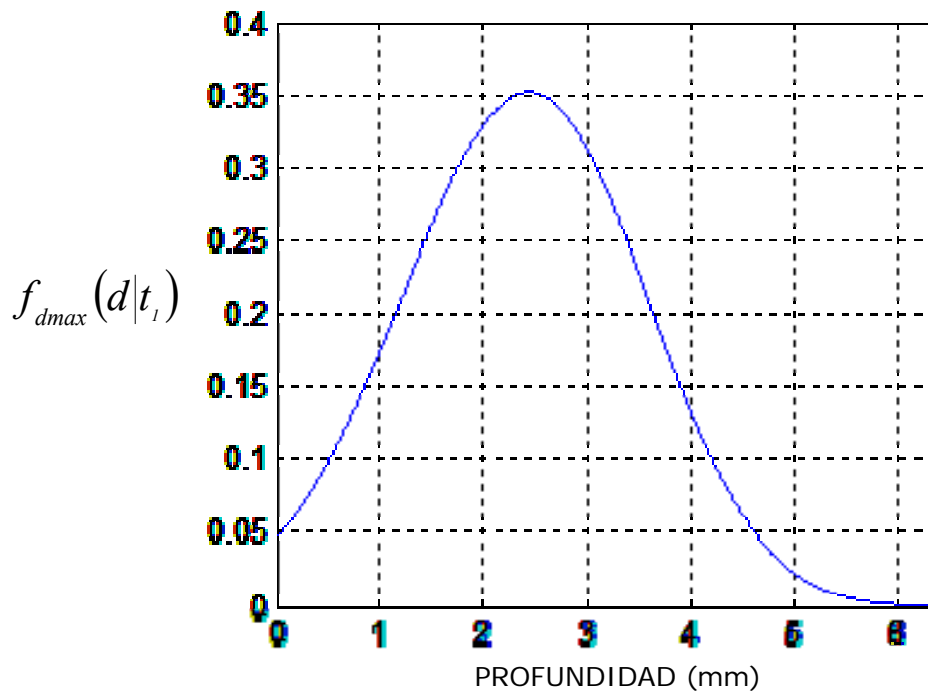


Figura AN1.3. Función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d|t_1)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.

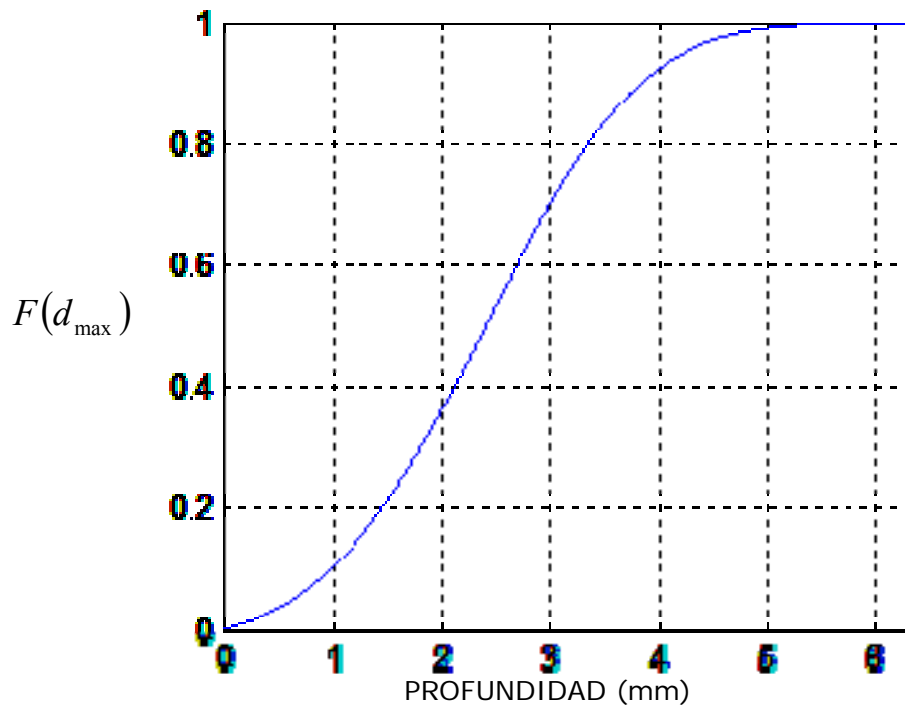


Figura AN1.4. Función de probabilidad $F(d_{max})$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.

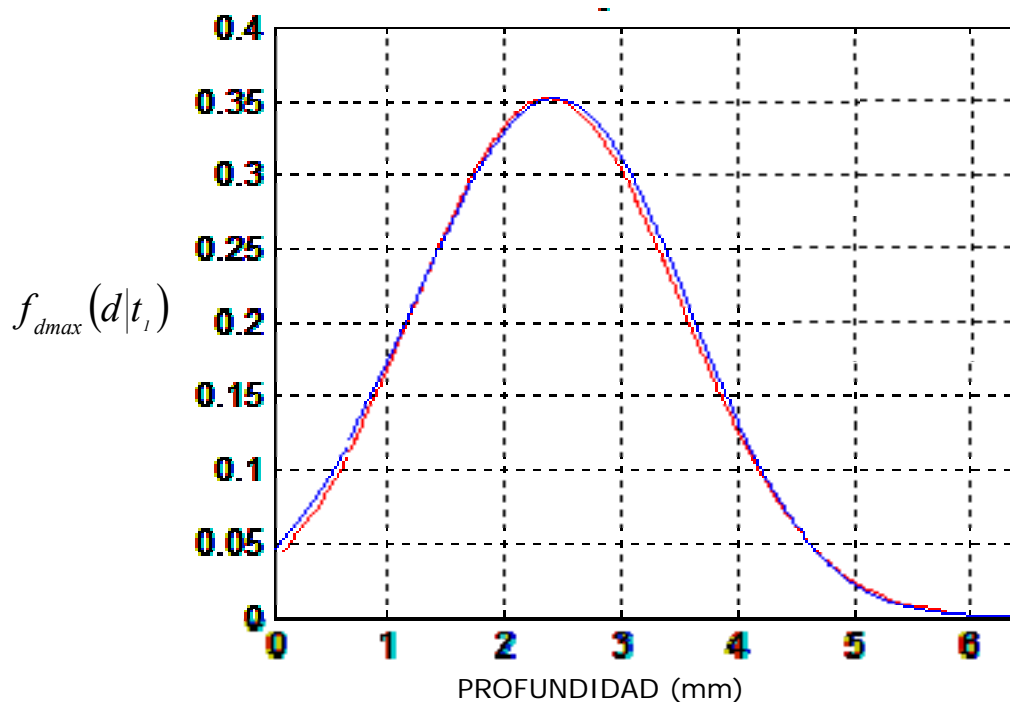


Figura AN1.5. Funciones de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d|t_i)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de diesel.

Tabla AN1.2. Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de diesel.

Tiempos de generación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de generación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de generación simulados en años	Profundidades simuladas en mm
1.796	1.309	2.294	1.463	2.761	1.567
1.807	1.309	2.318	1.470	2.774	1.571
1.815	1.318	2.324	1.471	2.783	1.573
1.823	1.320	2.364	1.479	2.786	1.578
1.842	1.338	2.364	1.483	2.798	1.585
1.865	1.339	2.370	1.487	2.804	1.597
1.880	1.339	2.378	1.489	2.806	1.598
1.886	1.349	2.386	1.491	2.811	1.602
1.912	1.351	2.389	1.492	2.817	1.604
1.919	1.351	2.401	1.493	2.828	1.606
1.936	1.353	2.402	1.499	2.840	1.610
1.944	1.358	2.412	1.500	2.845	1.612
1.968	1.368	2.415	1.502	2.848	1.620
1.971	1.371	2.452	1.504	2.869	1.621
1.978	1.372	2.455	1.506	2.872	1.625
1.984	1.372	2.460	1.508	2.890	1.625
1.989	1.378	2.497	1.510	2.917	1.626
1.990	1.382	2.498	1.516	2.937	1.633
2.000	1.396	2.508	1.516	2.939	1.639

2.000	1.397	2.516	1.520	2.960	1.641
2.011	1.398	2.525	1.521	2.969	1.645
2.025	1.399	2.526	1.522	2.972	1.645
2.034	1.399	2.535	1.522	2.978	1.646
2.037	1.403	2.541	1.522	2.988	1.650
2.074	1.406	2.546	1.531	2.999	1.652
2.076	1.407	2.563	1.532	3.016	1.655
2.113	1.413	2.610	1.532	3.030	1.657
2.117	1.413	2.613	1.536	3.034	1.657
2.125	1.418	2.616	1.540	3.034	1.666
2.138	1.419	2.634	1.542	3.043	1.677
2.147	1.425	2.637	1.542	3.062	1.684
2.151	1.436	2.643	1.549	3.074	1.686
2.160	1.442	2.671	1.549	3.087	1.688
2.167	1.446	2.680	1.553	3.100	1.688
2.168	1.452	2.710	1.555	3.100	1.694
2.183	1.452	2.719	1.559	3.104	1.695
2.204	1.454	2.724	1.559	3.120	1.697
2.241	1.458	2.728	1.560	3.146	1.700
2.253	1.461	2.757	1.560	3.147	1.703
2.291	1.461	2.758	1.564	3.148	1.707
3.154	1.708	3.688	1.858	4.108	1.983
3.183	1.710	3.700	1.860	4.136	1.986
3.215	1.711	3.712	1.864	4.163	1.986
3.221	1.714	3.723	1.865	4.171	1.988
3.225	1.719	3.724	1.865	4.175	1.991
3.244	1.725	3.742	1.866	4.181	1.995
3.244	1.735	3.743	1.868	4.187	1.995
3.268	1.740	3.743	1.871	4.204	2.001
3.272	1.744	3.744	1.874	4.207	2.001
3.276	1.747	3.750	1.882	4.234	2.003
3.305	1.748	3.759	1.887	4.238	2.006
3.325	1.758	3.760	1.889	4.254	2.010
3.351	1.759	3.760	1.893	4.265	2.012
3.356	1.760	3.768	1.893	4.270	2.015
3.363	1.763	3.778	1.893	4.280	2.022
3.378	1.765	3.786	1.898	4.294	2.026
3.382	1.766	3.786	1.899	4.298	2.028
3.391	1.767	3.790	1.901	4.396	2.037
3.391	1.774	3.806	1.902	4.429	2.042
3.397	1.780	3.814	1.910	4.434	2.045
3.422	1.781	3.818	1.911	4.434	2.051
3.434	1.782	3.822	1.911	4.439	2.051
3.476	1.784	3.830	1.914	4.441	2.052
3.525	1.785	3.836	1.932	4.506	2.054
3.547	1.793	3.858	1.932	4.513	2.056
3.555	1.794	3.871	1.934	4.514	2.057
3.576	1.798	3.891	1.935	4.518	2.061
3.586	1.798	3.918	1.937	4.527	2.062
3.600	1.800	3.925	1.941	4.528	2.064
3.612	1.801	3.966	1.946	4.535	2.066
3.633	1.802	3.972	1.948	4.551	2.066
3.635	1.808	3.984	1.951	4.565	2.068
3.635	1.826	3.985	1.952	4.568	2.069

3.672	1.846	4.043	1.971	4.596	2.082
3.675	1.850	4.055	1.976	4.599	2.092
3.677	1.850	4.057	1.981	4.602	2.093
3.687	1.851	4.073	1.982	4.622	2.099
4.642	2.101	5.137	2.169	5.695	2.271
4.645	2.108	5.142	2.171	5.697	2.273
4.700	2.111	5.144	2.171	5.752	2.277
4.702	2.111	5.160	2.172	5.759	2.281
4.738	2.113	5.165	2.174	5.770	2.289
4.742	2.114	5.176	2.174	5.772	2.293
4.743	2.123	5.179	2.178	5.781	2.297
4.749	2.124	5.198	2.178	5.814	2.301
4.755	2.125	5.217	2.181	5.845	2.302
4.760	2.125	5.264	2.182	5.856	2.306
4.792	2.127	5.275	2.184	5.857	2.307
4.805	2.129	5.304	2.190	5.862	2.307
4.817	2.130	5.338	2.193	5.878	2.307
4.823	2.131	5.339	2.196	5.884	2.317
4.857	2.131	5.349	2.196	5.885	2.319
4.860	2.131	5.351	2.196	5.913	2.322
4.861	2.136	5.354	2.202	5.918	2.324
4.869	2.138	5.362	2.207	5.921	2.327
4.871	2.140	5.370	2.212	5.924	2.327
4.886	2.140	5.371	2.218	5.928	2.328
4.888	2.142	5.372	2.224	5.934	2.332
4.896	2.142	5.400	2.225	5.983	2.332
4.908	2.142	5.404	2.227	5.986	2.333
4.919	2.142	5.420	2.227	5.990	2.344
4.921	2.144	5.433	2.228	6.036	2.344
4.952	2.146	5.442	2.229	6.045	2.352
4.957	2.149	5.470	2.233	6.054	2.356
4.969	2.149	5.518	2.241	6.065	2.358
4.975	2.149	5.521	2.241	6.065	2.359
4.976	2.150	5.562	2.241	6.073	2.361
4.981	2.151	5.564	2.243	6.111	2.368
4.999	2.152	5.576	2.247	6.122	2.371
5.031	2.156	5.586	2.248	6.137	2.372
5.033	2.156	5.595	2.249	6.151	2.373
5.036	2.158	5.600	2.256	6.203	2.375
5.072	2.158	5.608	2.257	6.218	2.377
5.073	2.160	5.642	2.262	6.233	2.381
5.077	2.161	5.645	2.265	6.238	2.382
5.104	2.168	5.653	2.267	6.254	2.388
5.124	2.168	5.682	2.270	6.263	2.391
6.266	2.392	6.683	2.514	7.051	2.627
6.278	2.397	6.683	2.516	7.053	2.627
6.300	2.400	6.683	2.519	7.064	2.628
6.316	2.401	6.719	2.519	7.065	2.629
6.318	2.402	6.727	2.519	7.071	2.630
6.330	2.403	6.728	2.520	7.076	2.635
6.333	2.407	6.732	2.520	7.089	2.639
6.335	2.407	6.761	2.521	7.092	2.644
6.336	2.409	6.766	2.522	7.119	2.644
6.349	2.412	6.781	2.522	7.176	2.645
6.395	2.421	6.815	2.545	7.233	2.657
6.398	2.424	6.820	2.546	7.250	2.665

6.410	2.425	6.821	2.548	7.255	2.667
6.426	2.435	6.834	2.548	7.259	2.672
6.427	2.436	6.846	2.549	7.262	2.674
6.438	2.436	6.849	2.549	7.263	2.679
6.451	2.437	6.877	2.557	7.266	2.679
6.465	2.438	6.880	2.558	7.275	2.680
6.472	2.444	6.903	2.558	7.280	2.682
6.486	2.444	6.906	2.558	7.292	2.684
6.488	2.445	6.907	2.560	7.293	2.688
6.508	2.445	6.907	2.566	7.305	2.691
6.509	2.446	6.909	2.567	7.331	2.691
6.517	2.452	6.917	2.572	7.345	2.697
6.526	2.453	6.926	2.578	7.347	2.698
6.531	2.462	6.927	2.589	7.355	2.702
6.543	2.463	6.935	2.590	7.356	2.702
6.552	2.463	6.954	2.592	7.357	2.703
6.568	2.470	6.988	2.592	7.378	2.706
6.580	2.482	6.992	2.593	7.384	2.710
6.585	2.483	6.993	2.600	7.412	2.711
6.599	2.485	6.994	2.602	7.417	2.714
6.635	2.489	7.002	2.603	7.430	2.717
6.652	2.502	7.011	2.605	7.454	2.717
6.658	2.505	7.027	2.607	7.455	2.720
6.659	2.508	7.037	2.610	7.484	2.720
6.666	2.509	7.046	2.618	7.490	2.726
7.494	2.738	7.977	2.863	8.565	2.967
7.500	2.741	7.985	2.867	8.572	2.970
7.510	2.748	7.987	2.874	8.578	2.972
7.513	2.748	8.031	2.884	8.593	2.972
7.534	2.750	8.034	2.892	8.604	2.973
7.535	2.764	8.034	2.893	8.615	2.976
7.542	2.765	8.069	2.895	8.624	2.980
7.544	2.767	8.071	2.896	8.632	2.983
7.552	2.767	8.080	2.897	8.635	2.991
7.564	2.770	8.085	2.898	8.643	2.994
7.591	2.771	8.119	2.898	8.659	2.994
7.607	2.773	8.158	2.900	8.680	3.002
7.614	2.776	8.165	2.900	8.686	3.002
7.641	2.776	8.173	2.900	8.686	3.007
7.644	2.781	8.211	2.904	8.690	3.008
7.657	2.786	8.230	2.907	8.729	3.021
7.686	2.790	8.230	2.907	8.743	3.024
7.699	2.791	8.233	2.913	8.788	3.027
7.702	2.794	8.235	2.923	8.811	3.030
7.702	2.798	8.286	2.923	8.824	3.032
7.703	2.798	8.314	2.923	8.845	3.035
7.744	2.806	8.322	2.925	8.855	3.037
7.748	2.807	8.333	2.930	8.863	3.041
7.772	2.809	8.336	2.933	8.875	3.043
7.782	2.812	8.347	2.933	8.898	3.043
7.794	2.813	8.368	2.935	8.911	3.043
7.798	2.817	8.392	2.936	8.919	3.046



PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE GASOLINA

Resumen

En esta parte del trabajo, se muestran las medidas de las profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en el sistema de transporte de gasolina, la gráfica de la función de densidad de probabilidad y la función de probabilidad de la profundidad máxima del daño interno por corrosión del sistema, los valores simulados de las profundidades y de los tiempos de nucleación de los daños internos por corrosión localizada.

ANEXO DOS

PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE GASOLINA

Tabla AN2.1 (a). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de gasolina de 48,000 a 51,335.53 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
0.76	INTERIOR	6.3	12
0.97	INTERIOR	6.3	12
1.30	INTERIOR	6.3	12
1.33	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12
0.86	INTERIOR	6.3	12
1.43	INTERIOR	6.3	12
1.35	INTERIOR	6.3	12
1.00	INTERIOR	6.3	12
1.66	INTERIOR	6.3	12
1.44	INTERIOR	6.3	12
1.25	INTERIOR	6.3	12
1.12	INTERIOR	6.3	12
1.31	INTERIOR	6.3	12
1.14	INTERIOR	6.3	12
1.21	INTERIOR	6.3	12
1.05	INTERIOR	6.3	12
1.58	INTERIOR	6.3	12
1.06	INTERIOR	6.3	12
1.66	INTERIOR	6.3	12
0.92	INTERIOR	6.3	12
1.22	INTERIOR	6.3	12

Tabla AN2.1 (b). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de gasolina de 51,427.31 a 53,172.00 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
1.44	INTERIOR	6.3	12
0.82	INTERIOR	6.3	12
0.94	INTERIOR	6.3	12
1.01	INTERIOR	6.3	12
0.99	INTERIOR	6.3	12
1.51	INTERIOR	6.3	12
0.82	INTERIOR	6.3	12
1.69	INTERIOR	6.3	12
1.25	INTERIOR	6.3	12
1.71	INTERIOR	6.3	12
0.96	INTERIOR	6.3	12
1.25	INTERIOR	6.3	12
1.43	INTERIOR	6.3	12
0.98	INTERIOR	6.3	12
1.33	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12
1.45	INTERIOR	6.3	12
1.00	INTERIOR	6.3	12
0.79	INTERIOR	6.3	12
0.99	INTERIOR	6.3	12
0.81	INTERIOR	6.3	12
0.83	INTERIOR	6.3	12

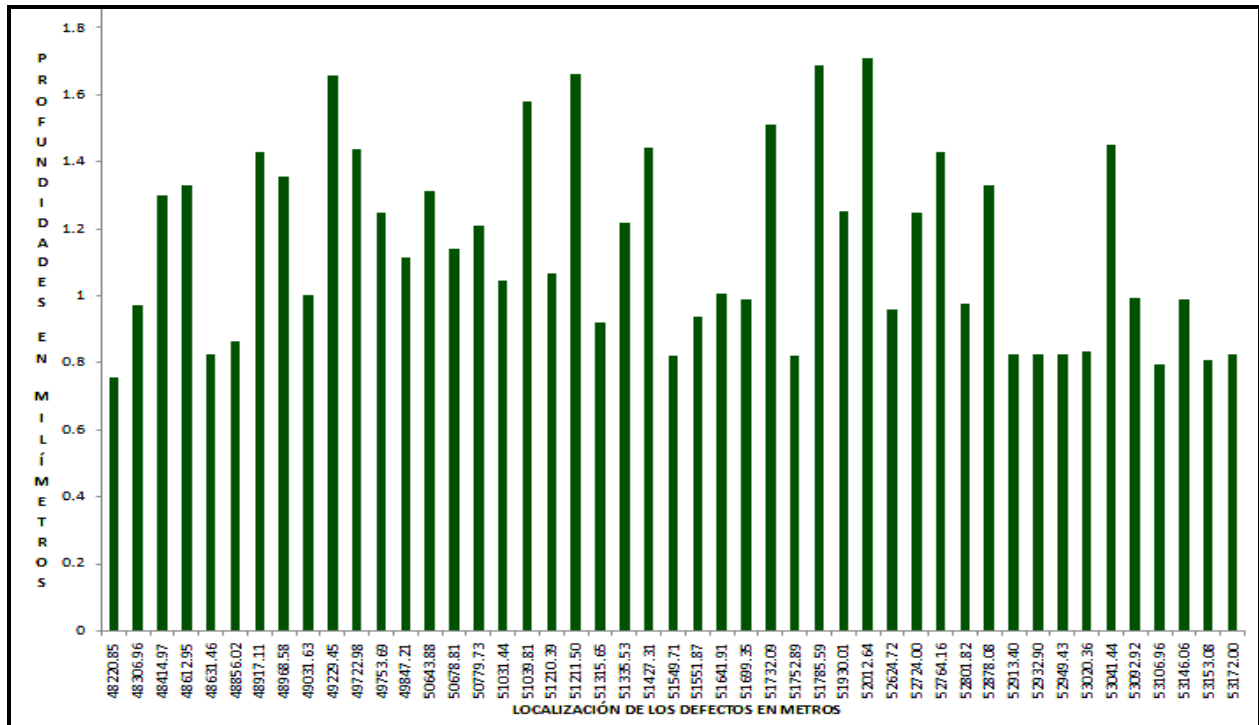


Figura AN2.1. Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de gasolina.

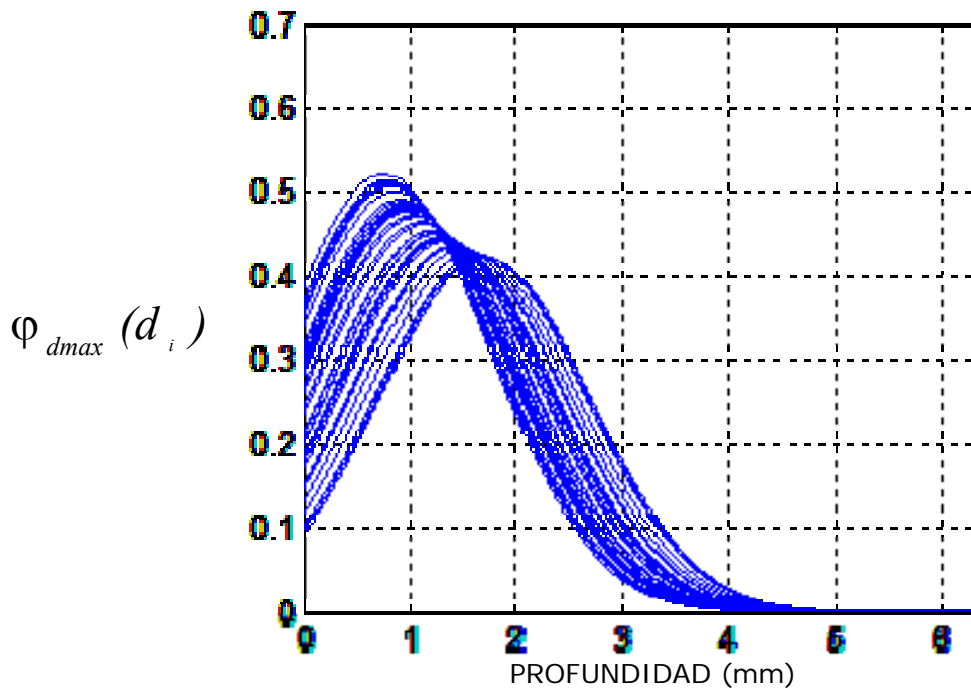


Figura AN2.2. Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{d_{max}}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de gasolina.

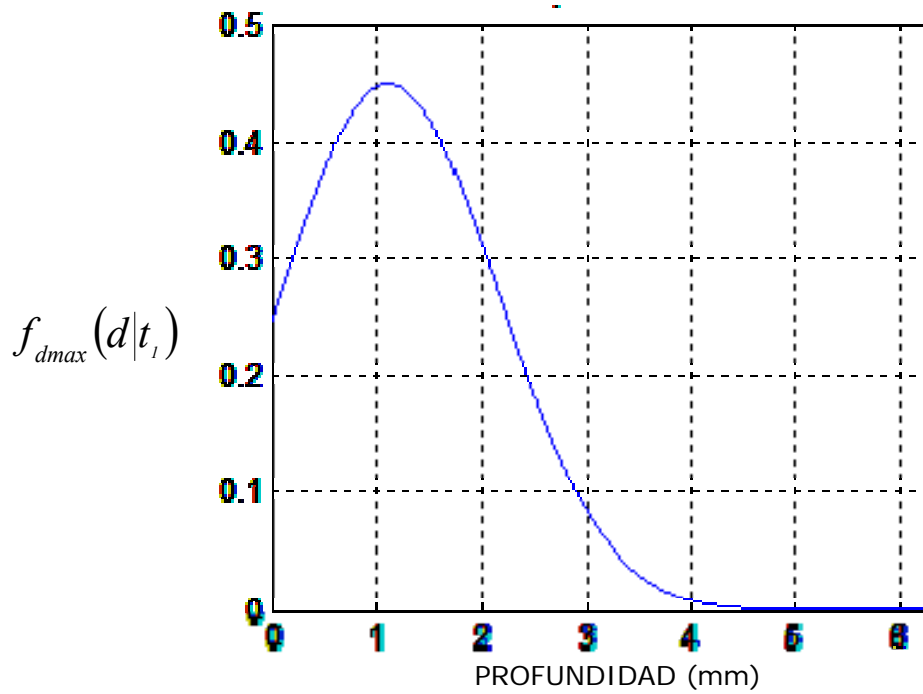


Fig. AN2.3. Función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d|t_1)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.

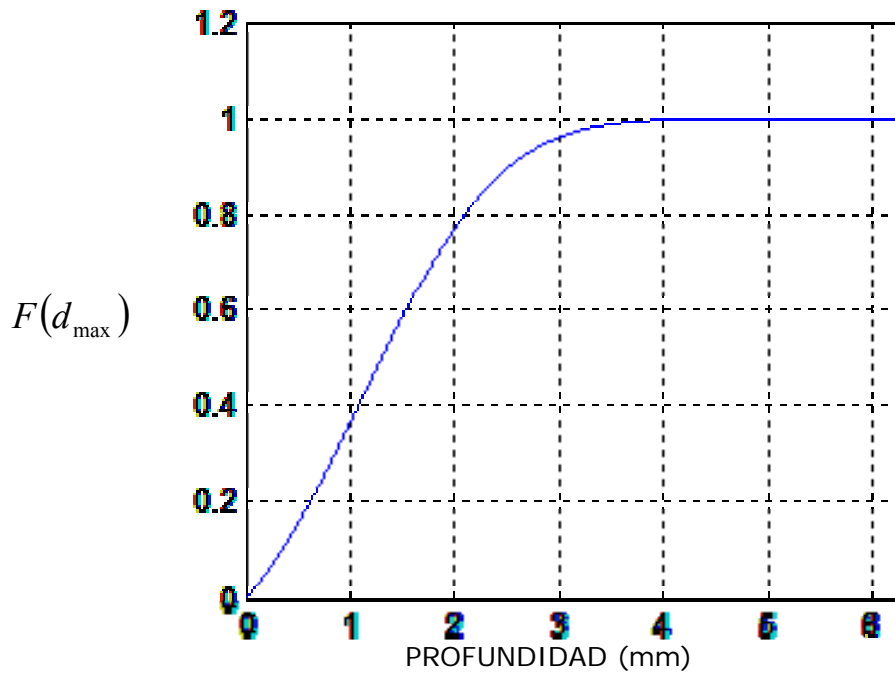


Fig. AN2.4. Función de probabilidad $F(d_{max})$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.

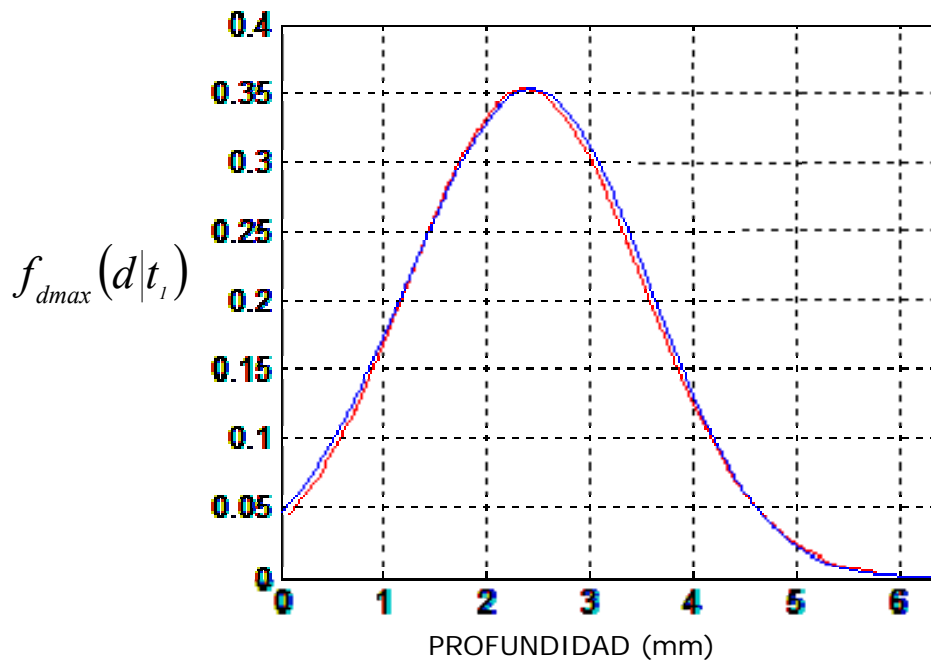


Figura AN2.5. Funciones de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d|t_1)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de gasolina.


Tabla AN2.2. Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de gasolina.

Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm
1.796	0.523	2.294	0.619	2.761	0.686
1.807	0.524	2.318	0.624	2.774	0.689
1.815	0.529	2.324	0.624	2.783	0.691
1.823	0.530	2.364	0.629	2.786	0.694
1.842	0.541	2.364	0.632	2.798	0.699
1.865	0.542	2.370	0.634	2.804	0.707
1.880	0.542	2.378	0.635	2.806	0.707
1.886	0.548	2.386	0.637	2.811	0.709
1.912	0.549	2.389	0.638	2.817	0.711
1.919	0.549	2.401	0.638	2.828	0.712
1.936	0.550	2.402	0.642	2.840	0.715
1.944	0.553	2.412	0.643	2.845	0.716
1.968	0.559	2.415	0.644	2.848	0.722
1.971	0.562	2.452	0.645	2.869	0.722
1.990	0.568	2.498	0.653	2.937	0.731
2.000	0.577	2.508	0.653	2.939	0.735
2.000	0.577	2.516	0.656	2.960	0.736
2.011	0.578	2.525	0.657	2.969	0.738

2.025	0.578	2.526	0.657	2.972	0.739
2.034	0.579	2.535	0.657	2.978	0.739
2.037	0.581	2.541	0.657	2.988	0.742
2.074	0.583	2.546	0.663	2.999	0.743
2.076	0.584	2.563	0.663	3.016	0.745
2.113	0.587	2.610	0.663	3.030	0.747
2.117	0.587	2.613	0.666	3.034	0.747
2.125	0.591	2.616	0.669	3.034	0.753
2.138	0.591	2.634	0.670	3.043	0.760
2.147	0.595	2.637	0.670	3.062	0.765
2.151	0.602	2.643	0.675	3.074	0.767
2.160	0.606	2.671	0.675	3.087	0.768
2.167	0.608	2.680	0.678	3.100	0.768
2.168	0.612	2.710	0.679	3.100	0.772
2.183	0.612	2.719	0.681	3.104	0.772
2.204	0.614	2.724	0.681	3.120	0.774
2.241	0.616	2.728	0.682	3.146	0.776
2.253	0.618	2.757	0.682	3.147	0.778
2.291	0.618	2.758	0.684	3.148	0.781
3.154	0.781	3.688	0.887	4.108	0.978
3.183	0.783	3.700	0.888	4.136	0.980
3.215	0.784	3.712	0.891	4.163	0.980
3.221	0.786	3.723	0.892	4.171	0.981
3.225	0.789	3.724	0.892	4.175	0.983
3.244	0.793	3.742	0.892	4.181	0.986
3.244	0.800	3.743	0.894	4.187	0.987
3.268	0.804	3.743	0.896	4.204	0.991
3.272	0.807	3.744	0.898	4.207	0.991
3.276	0.809	3.750	0.904	4.234	0.992
3.305	0.809	3.759	0.908	4.238	0.994
3.325	0.816	3.760	0.909	4.254	0.997
3.351	0.817	3.760	0.912	4.265	0.999
3.356	0.818	3.768	0.912	4.270	1.001
3.363	0.820	3.778	0.912	4.280	1.006
3.378	0.821	3.786	0.916	4.294	1.009
3.382	0.822	3.786	0.916	4.298	1.011
3.391	0.823	3.790	0.917	4.396	1.017
3.391	0.827	3.806	0.918	4.429	1.021
3.397	0.832	3.814	0.924	4.434	1.024
3.422	0.833	3.818	0.925	4.434	1.028
3.434	0.833	3.822	0.925	4.439	1.028
3.476	0.834	3.830	0.927	4.441	1.029
3.525	0.835	3.836	0.940	4.506	1.030
3.547	0.841	3.858	0.940	4.513	1.032
3.555	0.841	3.871	0.942	4.514	1.032
3.576	0.844	3.891	0.942	4.518	1.035
3.586	0.844	3.918	0.944	4.527	1.036
3.600	0.846	3.925	0.947	4.528	1.037
3.612	0.846	3.966	0.950	4.535	1.039
3.633	0.847	3.972	0.952	4.551	1.039
3.635	0.851	3.984	0.954	4.565	1.040
3.651	0.877	4.036	0.968	4.595	1.050
3.672	0.878	4.043	0.968	4.596	1.051
3.675	0.881	4.055	0.973	4.599	1.059
3.677	0.881	4.057	0.976	4.602	1.059
3.687	0.882	4.073	0.977	4.622	1.063

4.642	1.065	5.137	1.117	5.695	1.195
4.645	1.071	5.142	1.118	5.697	1.196
4.700	1.073	5.144	1.119	5.752	1.200
4.702	1.073	5.160	1.119	5.759	1.203
4.738	1.075	5.165	1.120	5.770	1.209
4.742	1.075	5.176	1.120	5.772	1.213
4.743	1.082	5.179	1.123	5.781	1.215
4.749	1.083	5.198	1.123	5.814	1.219
4.755	1.083	5.217	1.126	5.845	1.219
4.760	1.083	5.264	1.127	5.856	1.222
4.792	1.085	5.275	1.128	5.857	1.223
4.805	1.086	5.304	1.133	5.862	1.223
4.817	1.087	5.338	1.135	5.878	1.223
4.823	1.088	5.339	1.137	5.884	1.231
4.857	1.088	5.349	1.137	5.885	1.233
4.860	1.088	5.351	1.137	5.913	1.235
4.861	1.091	5.354	1.142	5.918	1.237
4.869	1.093	5.362	1.146	5.921	1.239
4.871	1.094	5.370	1.150	5.924	1.239
4.886	1.095	5.371	1.154	5.928	1.240
4.888	1.096	5.372	1.159	5.934	1.243
4.896	1.096	5.400	1.160	5.983	1.243
4.908	1.097	5.404	1.161	5.986	1.244
4.919	1.097	5.420	1.161	5.990	1.252
4.921	1.098	5.433	1.162	6.036	1.252
4.952	1.100	5.442	1.163	6.045	1.259
4.957	1.101	5.470	1.166	6.054	1.262
4.969	1.102	5.518	1.172	6.065	1.263
4.975	1.102	5.521	1.172	6.065	1.264
4.976	1.102	5.562	1.172	6.073	1.266
4.981	1.103	5.564	1.174	6.111	1.271
4.999	1.104	5.576	1.177	6.122	1.274
5.031	1.107	5.586	1.178	6.137	1.274
5.033	1.107	5.595	1.178	6.151	1.275
5.036	1.108	5.600	1.184	6.203	1.276
5.072	1.108	5.608	1.184	6.218	1.278
5.073	1.110	5.642	1.188	6.233	1.281
5.077	1.111	5.645	1.191	6.238	1.282
5.104	1.116	5.653	1.192	6.254	1.287
5.124	1.116	5.682	1.194	6.263	1.289
6.266	1.290	6.683	1.388	7.051	1.479
6.278	1.294	6.683	1.389	7.053	1.479
6.300	1.296	6.683	1.391	7.064	1.480
6.316	1.297	6.719	1.391	7.065	1.481
6.318	1.298	6.727	1.392	7.071	1.482
6.330	1.299	6.728	1.392	7.076	1.485
6.333	1.302	6.732	1.392	7.089	1.489
6.335	1.302	6.761	1.393	7.092	1.493
6.336	1.303	6.766	1.393	7.119	1.493
6.349	1.306	6.781	1.394	7.176	1.494
6.358	1.309	6.782	1.397	7.194	1.498
6.370	1.309	6.799	1.398	7.198	1.502
6.385	1.310	6.815	1.412	7.207	1.503
6.395	1.313	6.815	1.412	7.233	1.504
6.398	1.316	6.820	1.413	7.250	1.510
6.410	1.316	6.821	1.414	7.255	1.511

6.426	1.324	6.834	1.415	7.259	1.516
6.427	1.325	6.846	1.416	7.262	1.518
6.438	1.325	6.849	1.416	7.263	1.521
6.451	1.325	6.877	1.422	7.266	1.522
6.465	1.326	6.880	1.423	7.275	1.522
6.472	1.331	6.903	1.423	7.280	1.524
6.486	1.331	6.906	1.423	7.292	1.526
6.488	1.332	6.907	1.424	7.293	1.529
6.508	1.332	6.907	1.429	7.305	1.531
6.509	1.333	6.909	1.430	7.331	1.532
6.517	1.338	6.917	1.434	7.345	1.536
6.526	1.339	6.926	1.439	7.347	1.537
6.531	1.346	6.927	1.448	7.355	1.541
6.543	1.346	6.935	1.449	7.356	1.541
6.552	1.346	6.954	1.451	7.357	1.541
6.568	1.352	6.988	1.451	7.378	1.543
6.580	1.362	6.992	1.451	7.384	1.547
6.585	1.362	6.993	1.457	7.412	1.548
6.599	1.364	6.994	1.459	7.417	1.550
6.635	1.368	7.002	1.459	7.430	1.553
6.652	1.378	7.011	1.461	7.454	1.553
6.658	1.380	7.027	1.462	7.455	1.555
6.659	1.383	7.037	1.465	7.484	1.556
6.666	1.383	7.046	1.471	7.490	1.560
7.494	1.570	7.977	1.675	8.565	1.762
7.500	1.573	7.985	1.678	8.572	1.765
7.510	1.578	7.987	1.684	8.578	1.767
7.513	1.579	8.031	1.693	8.593	1.767
7.534	1.580	8.034	1.699	8.604	1.767
7.535	1.592	8.034	1.700	8.615	1.770
7.542	1.593	8.069	1.702	8.624	1.773
7.544	1.594	8.071	1.703	8.632	1.776
7.552	1.594	8.080	1.703	8.635	1.783
7.564	1.597	8.085	1.704	8.643	1.786
7.591	1.598	8.119	1.705	8.659	1.786
7.607	1.599	8.158	1.706	8.680	1.793
7.614	1.602	8.165	1.706	8.686	1.793
7.641	1.602	8.173	1.706	8.686	1.796
7.644	1.606	8.211	1.709	8.690	1.798
7.657	1.610	8.230	1.711	8.729	1.808
7.686	1.613	8.230	1.712	8.743	1.812
7.699	1.614	8.233	1.717	8.788	1.813
7.702	1.617	8.235	1.725	8.811	1.816
7.702	1.620	8.286	1.725	8.824	1.818
7.703	1.621	8.314	1.725	8.845	1.821
7.744	1.627	8.322	1.727	8.855	1.822
7.748	1.628	8.333	1.731	8.863	1.826
7.772	1.629	8.336	1.733	8.875	1.827
7.782	1.632	8.347	1.734	8.898	1.828
7.794	1.633	8.368	1.736	8.911	1.828
7.798	1.636	8.392	1.737	8.919	1.830



PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO

Resumen

En esta parte del trabajo, se muestran las medidas de las profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en el sistema de transporte de petróleo crudo, la gráfica de la función de densidad de probabilidad y la función de probabilidad de la profundidad máxima del daño interno por corrosión del sistema, los valores simulados de las profundidades y de los tiempos de nucleación de los daños internos por corrosión localizada.

ANEXO TRES

PROFUNDIDADES DE LOS DAÑOS INTERNOS POR CORROSIÓN LOCALIZADA REGISTRADAS EN UN SISTEMA DE DUCTOS PARA EL TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO

Tabla AN3.1 (a). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 1,086.59 a 40,586.05 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.44	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30

Tabla AN3.1 (b). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 43,057.40 a 51,818.50 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
2.26	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.26	INTERIOR	8.7	30
2.18	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30

Tabla AN3.1 (c). Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de ductos para el transporte de petróleo crudo de 51,828.46 a 117,187.35 metros.

Profundidades registradas en mm	Tipo de daño registrado	Espesor de la pared del sistema de ductos en mm	Diámetro del sistema de ductos en pulgadas
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
1.91	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.00	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
1.74	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
2.09	INTERIOR	8.7	30
2.35	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
1.83	INTERIOR	8.7	30
2.26	INTERIOR	8.7	30

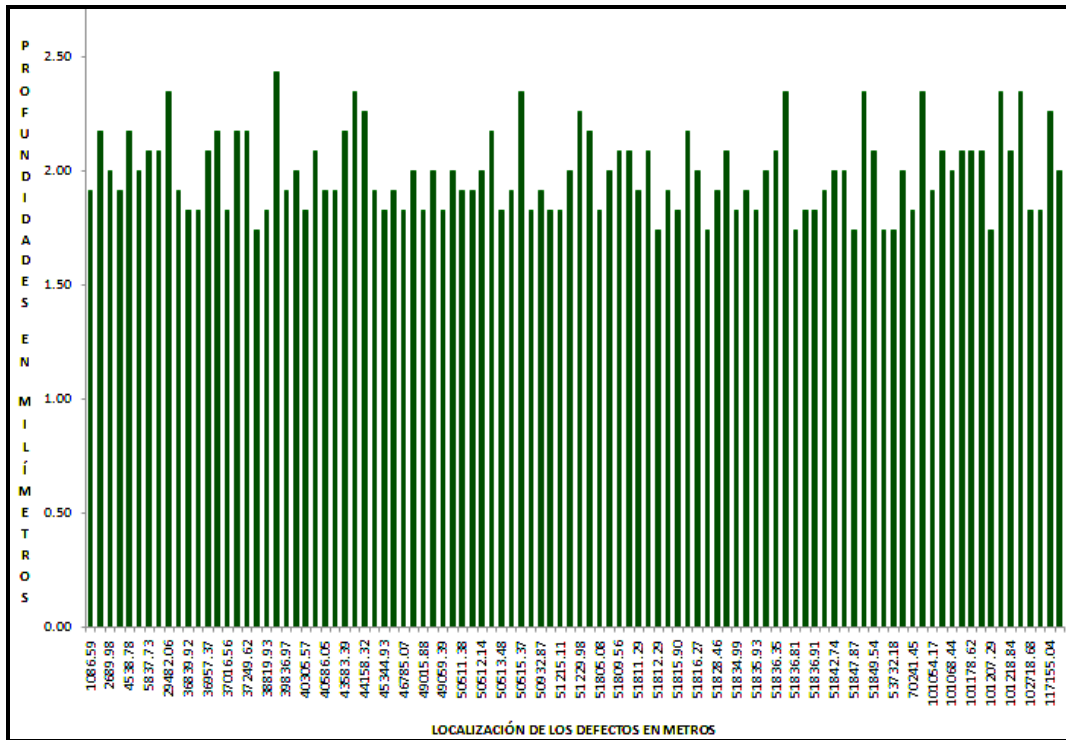


Figura AN3.1. Profundidades de los daños internos por corrosión localizada registradas en un sistema de transporte de petróleo crudo.

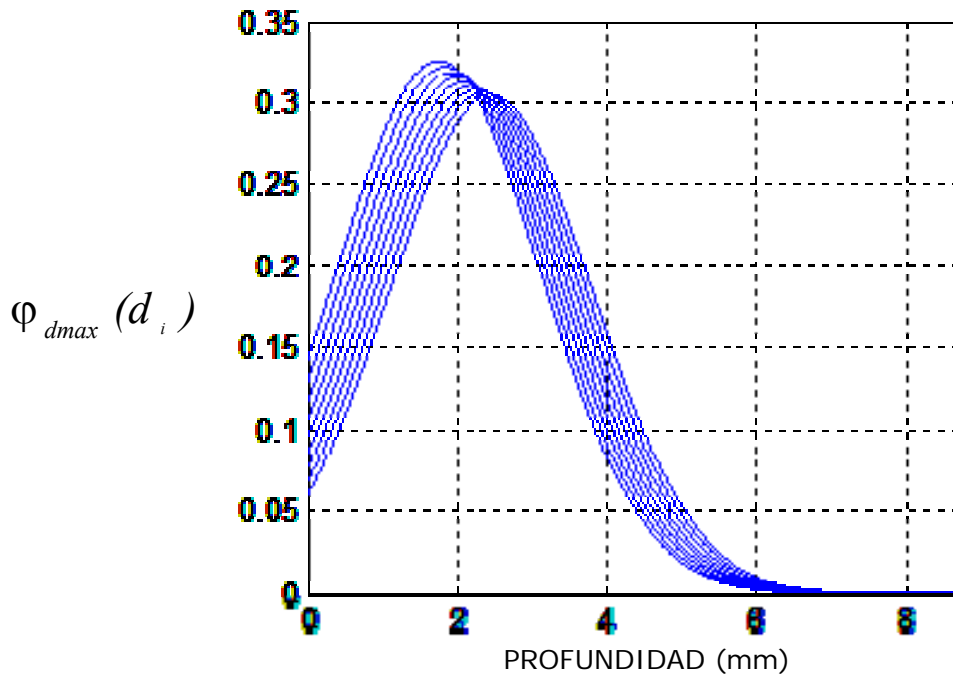


Figura AN3.2. Funciones de densidad de probabilidad $\varphi_{dmax}(d_i)$ de cada profundidad máxima de los daños internos por corrosión localizada registrados de un sistema de transporte de petróleo crudo.

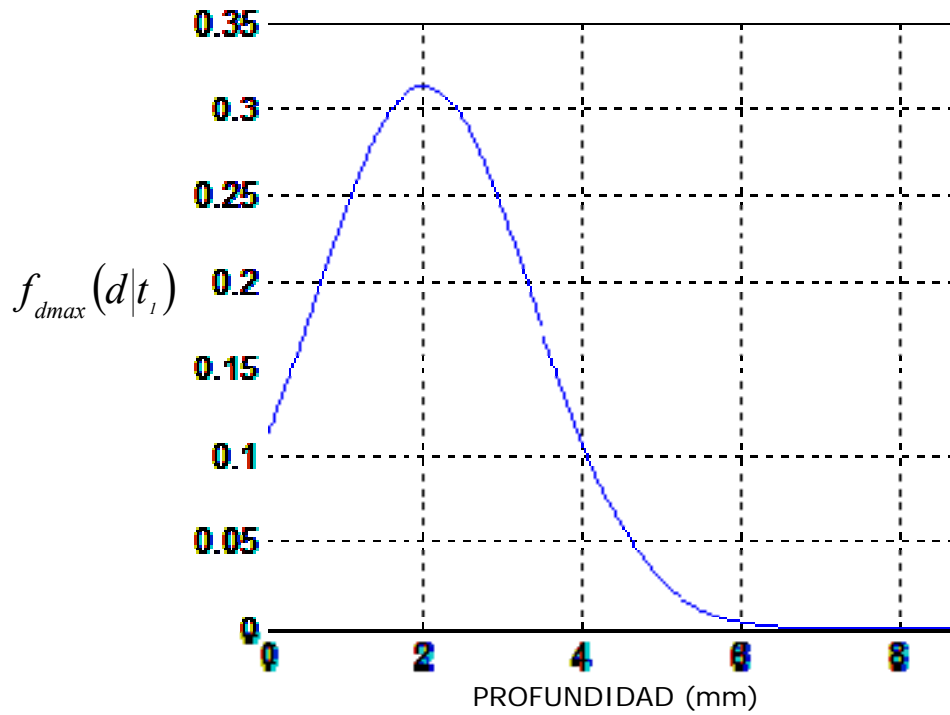


Fig. AN3.3. Función de densidad de probabilidad $f_{d_{max}}(d|t_1)$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.

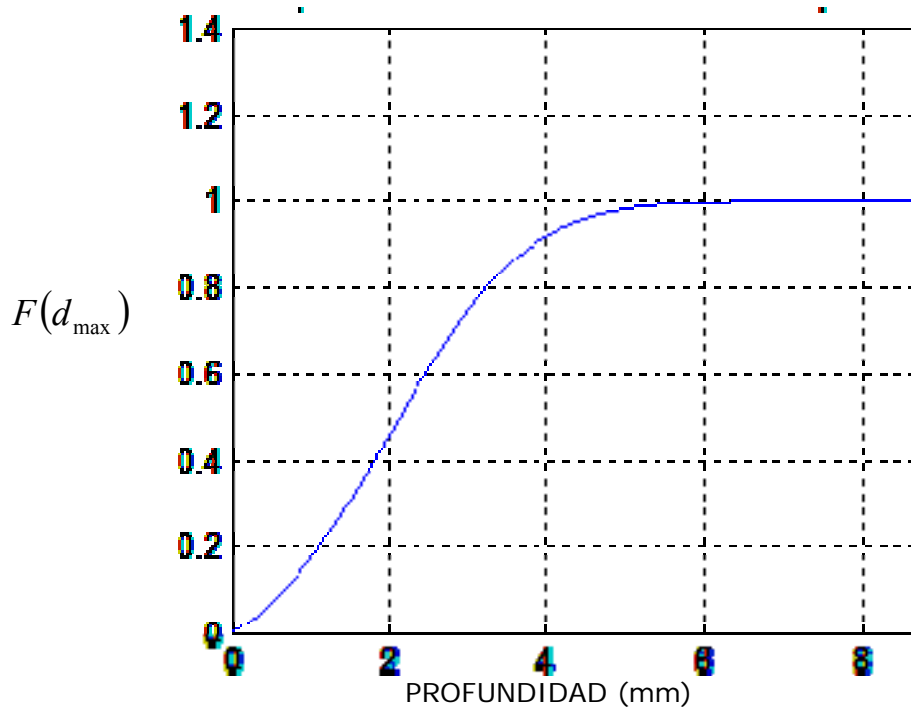


Fig. AN3.4. Función de probabilidad $F(d_{max})$ de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.

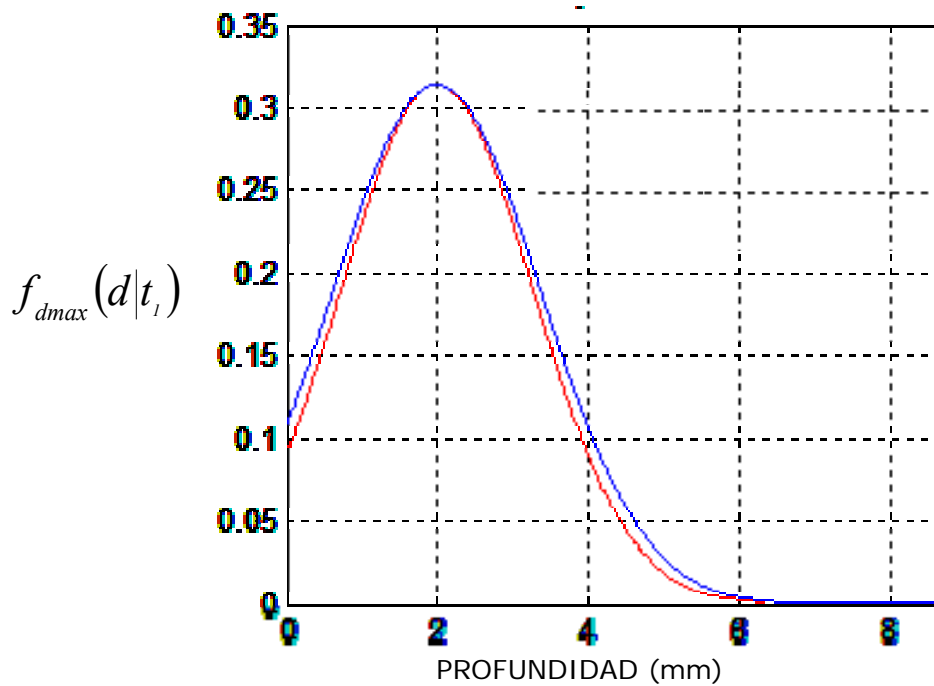


Figura AN3.5. Funciones de densidad de probabilidad $f_{dmax}(d|t_i)$ original (línea azul) y simulada (línea roja) de la profundidad máxima del daño interno por corrosión localizada de un sistema de transporte de petróleo crudo.

Tabla AN3.2. Profundidades máximas de los daños internos por corrosión localizada y tiempos de nucleación simulados de un sistema de transporte de petróleo crudo.

Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm	Tiempos de nucleación simulados en años	Profundidades simuladas en mm
2.913	0.924	3.757	1.076	4.610	1.193
2.916	0.927	3.764	1.087	4.614	1.194
2.920	0.934	3.780	1.093	4.626	1.201
2.925	0.936	3.793	1.097	4.674	1.201
2.978	0.939	3.794	1.104	4.689	1.205
3.030	0.953	3.820	1.104	4.742	1.207
3.044	0.954	3.857	1.106	4.758	1.211
3.083	0.956	3.922	1.109	4.767	1.211
3.100	0.960	3.943	1.112	4.773	1.212
3.142	0.963	4.009	1.113	4.825	1.212
3.161	0.964	4.014	1.114	4.827	1.216
3.176	0.972	4.057	1.122	4.833	1.219
3.190	0.974	4.068	1.122	4.855	1.223
3.224	0.992	4.137	1.130	4.871	1.226
3.264	0.992	4.137	1.135	4.876	1.230
3.290	0.992	4.147	1.138	4.896	1.238
3.300	1.002	4.162	1.140	4.907	1.250
3.347	1.004	4.176	1.142	4.911	1.251
3.358	1.004	4.181	1.144	4.919	1.254

3.387	1.006	4.202	1.145	4.930	1.257
3.402	1.011	4.203	1.151	4.949	1.258
3.445	1.020	4.220	1.151	4.969	1.263
3.449	1.024	4.227	1.153	4.978	1.265
3.461	1.024	4.291	1.155	4.983	1.273
3.472	1.024	4.297	1.158	5.021	1.274
3.480	1.030	4.305	1.159	5.025	1.278
3.483	1.034	4.369	1.162	5.058	1.279
3.500	1.048	4.372	1.167	5.104	1.279
3.500	1.049	4.389	1.167	5.140	1.287
3.519	1.050	4.402	1.172	5.144	1.293
3.543	1.051	4.419	1.173	5.180	1.295
3.560	1.051	4.421	1.173	5.195	1.298
3.565	1.055	4.436	1.173	5.201	1.299
3.630	1.058	4.447	1.173	5.211	1.300
3.632	1.059	4.455	1.183	5.229	1.304
3.697	1.064	4.485	1.183	5.249	1.306
3.705	1.065	4.567	1.183	5.277	1.309
3.718	1.070	4.573	1.188	5.302	1.311
3.742	1.071	4.577	1.192	5.309	1.311
5.309	1.320	6.276	1.458	6.810	1.603
5.325	1.332	6.300	1.460	6.856	1.605
5.359	1.339	6.321	1.461	6.870	1.610
5.379	1.342	6.357	1.462	6.940	1.615
5.403	1.343	6.361	1.468	6.952	1.617
5.425	1.343	6.362	1.487	6.972	1.621
5.426	1.350	6.370	1.493	6.974	1.622
5.432	1.350	6.383	1.499	6.996	1.623
5.461	1.353	6.389	1.507	7.009	1.624
5.506	1.356	6.427	1.508	7.064	1.641
5.507	1.359	6.431	1.513	7.076	1.642
5.508	1.363	6.436	1.513	7.097	1.648
5.519	1.364	6.452	1.514	7.100	1.652
5.571	1.365	6.454	1.521	7.128	1.654
5.627	1.367	6.474	1.524	7.188	1.655
5.636	1.370	6.496	1.528	7.238	1.658
5.644	1.375	6.516	1.528	7.286	1.658
5.676	1.381	6.516	1.529	7.299	1.660
5.677	1.392	6.548	1.529	7.306	1.663
5.718	1.397	6.550	1.532	7.317	1.668
5.726	1.401	6.551	1.535	7.328	1.668
5.733	1.405	6.552	1.538	7.357	1.675
5.783	1.405	6.562	1.547	7.363	1.675
5.820	1.416	6.579	1.553	7.409	1.676
5.864	1.417	6.580	1.554	7.417	1.679
5.873	1.418	6.581	1.558	7.444	1.684
5.886	1.422	6.594	1.559	7.463	1.686
5.911	1.423	6.611	1.559	7.473	1.690
5.919	1.425	6.625	1.564	7.491	1.697
5.935	1.426	6.626	1.565	7.515	1.702
5.935	1.433	6.633	1.567	7.522	1.704
5.944	1.440	6.661	1.568	7.694	1.713
5.988	1.440	6.674	1.577	7.750	1.719
6.010	1.441	6.682	1.577	7.759	1.722
6.083	1.443	6.689	1.578	7.760	1.728
6.169	1.444	6.703	1.581	7.768	1.729

6.208	1.453	6.713	1.600	7.771	1.730
6.220	1.454	6.752	1.601	7.886	1.732
6.258	1.458	6.774	1.602	7.897	1.734
7.899	1.735	8.612	1.830	9.485	1.922
7.907	1.740	8.666	1.833	9.508	1.922
7.921	1.740	8.675	1.835	9.524	1.924
7.925	1.743	8.696	1.836	9.573	1.928
7.936	1.745	8.707	1.836	9.656	1.937
7.965	1.745	8.708	1.836	9.662	1.937
7.988	1.747	8.717	1.838	9.733	1.937
7.994	1.748	8.748	1.839	9.737	1.939
8.011	1.749	8.804	1.843	9.758	1.944
8.022	1.754	8.808	1.843	9.776	1.945
8.042	1.761	8.813	1.845	9.791	1.946
8.043	1.762	8.876	1.845	9.800	1.954
8.049	1.773	8.878	1.847	9.813	1.955
8.054	1.774	8.884	1.849	9.873	1.960
8.089	1.780	8.933	1.857	9.879	1.964
8.124	1.783	8.966	1.857	9.893	1.966
8.129	1.791	8.990	1.857	9.943	1.969
8.224	1.794	8.998	1.860	9.965	1.970
8.228	1.794	9.001	1.860	9.969	1.972
8.291	1.797	9.029	1.861	10.066	1.977
8.298	1.797	9.039	1.862	10.078	1.981
8.300	1.807	9.058	1.862	10.098	1.990
8.311	1.809	9.064	1.867	10.101	1.995
8.321	1.809	9.097	1.867	10.117	1.999
8.329	1.809	9.130	1.871	10.174	2.004
8.387	1.812	9.212	1.872	10.229	2.005
8.408	1.813	9.231	1.874	10.249	2.009
8.430	1.814	9.283	1.880	10.249	2.010
8.439	1.816	9.341	1.884	10.258	2.010
8.500	1.816	9.343	1.887	10.287	2.011
8.506	1.816	9.361	1.887	10.297	2.021
8.506	1.821	9.363	1.887	10.299	2.024
8.521	1.823	9.370	1.893	10.347	2.027
8.524	1.825	9.384	1.899	10.357	2.029
8.551	1.825	9.398	1.905	10.361	2.032
8.554	1.828	9.400	1.912	10.367	2.033
8.568	1.828	9.400	1.918	10.373	2.034
8.588	1.828	9.449	1.919	10.385	2.038
8.609	1.828	9.458	1.922	10.470	2.039
10.475	2.039	11.325	2.163	12.039	2.293
10.482	2.051	11.351	2.164	12.079	2.293
10.563	2.052	11.354	2.165	12.085	2.294
10.579	2.061	11.389	2.166	12.087	2.295
10.594	2.065	11.390	2.166	12.087	2.302
10.613	2.068	11.404	2.173	12.091	2.303
10.615	2.068	11.421	2.174	12.105	2.309
10.627	2.071	11.429	2.184	12.120	2.316
10.694	2.078	11.451	2.185	12.122	2.328
10.713	2.082	11.466	2.185	12.136	2.329
10.740	2.083	11.494	2.194	12.169	2.332
10.764	2.084	11.515	2.207	12.229	2.333
10.855	2.086	11.523	2.208	12.236	2.333
10.882	2.089	11.548	2.210	12.238	2.342

10.907	2.093	11.610	2.215	12.240	2.344
10.916	2.094	11.641	2.230	12.253	2.345
10.945	2.101	11.652	2.233	12.270	2.346
10.960	2.104	11.654	2.237	12.296	2.349
10.966	2.106	11.665	2.237	12.315	2.352
10.987	2.111	11.694	2.243	12.330	2.361
11.025	2.114	11.695	2.246	12.340	2.372
11.054	2.115	11.696	2.249	12.343	2.372
11.057	2.116	11.758	2.249	12.361	2.374
11.077	2.118	11.771	2.249	12.363	2.375
11.082	2.122	11.773	2.250	12.374	2.376
11.085	2.122	11.781	2.250	12.382	2.381
11.087	2.124	11.832	2.251	12.405	2.387
11.111	2.128	11.841	2.252	12.412	2.392
11.127	2.132	11.866	2.252	12.459	2.392
11.147	2.133	11.868	2.257	12.557	2.393
11.173	2.134	11.899	2.258	12.590	2.399
11.191	2.138	11.926	2.278	12.596	2.405
11.196	2.142	11.926	2.278	12.613	2.406
11.217	2.143	11.934	2.280	12.658	2.407
11.245	2.154	11.936	2.281	12.687	2.416
11.248	2.155	11.960	2.282	12.697	2.418
11.266	2.155	11.980	2.283	12.703	2.424
11.289	2.156	11.986	2.283	12.709	2.427
11.313	2.157	12.035	2.293	12.710	2.432
12.716	2.432	13.478	2.566	14.408	2.704
12.731	2.433	13.478	2.570	14.411	2.715
12.740	2.435	13.480	2.570	14.500	2.715
12.761	2.438	13.551	2.579	14.549	2.716
12.763	2.442	13.558	2.581	14.564	2.718
12.783	2.446	13.601	2.582	14.582	2.723
12.829	2.446	13.619	2.586	14.587	2.727
12.853	2.453	13.639	2.587	14.608	2.728
12.858	2.454	13.646	2.592	14.644	2.730
12.870	2.459	13.656	2.594	14.686	2.731
12.873	2.459	13.670	2.607	14.694	2.734
12.875	2.459	13.679	2.607	14.697	2.738
12.912	2.463	13.718	2.609	14.751	2.741
12.922	2.468	13.822	2.610	14.764	2.741
12.970	2.469	13.823	2.611	14.810	2.746
12.980	2.472	13.827	2.612	14.833	2.751
13.003	2.475	13.832	2.616	14.837	2.752
13.045	2.476	13.844	2.617	14.864	2.754
13.046	2.479	13.853	2.626	14.883	2.754
13.096	2.480	13.895	2.626	14.915	2.760
13.107	2.486	13.918	2.643	14.980	2.760
13.115	2.500	13.933	2.645	14.980	2.761
13.125	2.503	13.959	2.645	14.982	2.765
13.143	2.511	13.974	2.650	14.988	2.767
13.148	2.512	13.978	2.658	15.001	2.771
13.185	2.514	14.055	2.670	15.011	2.773
13.185	2.530	14.060	2.679	15.037	2.773
13.198	2.532	14.060	2.681	15.057	2.774
13.202	2.533	14.121	2.683	15.076	2.777
13.215	2.533	14.124	2.685	15.091	2.782
13.237	2.538	14.140	2.685	15.106	2.787

13.283	2.539	14.149	2.687	15.111	2.796
13.312	2.540	14.208	2.687	15.125	2.799
13.324	2.544	14.277	2.688	15.154	2.800
13.371	2.544	14.288	2.689	15.189	2.809
13.376	2.550	14.303	2.689	15.200	2.809
13.399	2.556	14.370	2.693	15.200	2.814
13.450	2.560	14.402	2.696	15.207	2.816
13.473	2.561	14.402	2.697	15.276	2.831
15.299	2.835	16.241	2.972	17.187	3.178
15.380	2.838	16.251	2.977	17.212	3.188
15.419	2.841	16.278	2.981	17.217	3.188
15.442	2.844	16.310	2.983	17.239	3.195
15.478	2.848	16.367	2.997	17.246	3.196
15.496	2.850	16.380	3.000	17.311	3.196
15.510	2.855	16.411	3.003	17.319	3.208
15.531	2.857	16.415	3.014	17.321	3.211
15.571	2.857	16.428	3.019	17.327	3.213
15.594	2.858	16.429	3.027	17.331	3.219
15.609	2.861	16.464	3.030	17.346	3.220
15.625	2.862	16.491	3.041	17.351	3.226
15.645	2.863	16.531	3.052	17.365	3.244
15.656	2.868	16.541	3.053	17.365	3.247
15.684	2.880	16.578	3.056	17.365	3.249
15.686	2.880	16.616	3.061	17.368	3.255
15.715	2.888	16.634	3.065	17.370	3.262
15.740	2.890	16.644	3.069	17.380	3.268
15.748	2.892	16.649	3.075	17.381	3.271
15.762	2.894	16.671	3.081	17.446	3.274
15.773	2.894	16.717	3.100	17.453	3.279
15.792	2.896	16.746	3.105	17.465	3.280
15.803	2.902	16.748	3.106	17.475	3.282
15.912	2.909	16.803	3.109	17.478	3.282
15.932	2.910	16.818	3.111	17.484	3.286
15.942	2.910	16.833	3.117	17.490	3.289
15.998	2.918	16.844	3.123	17.524	3.295
16.019	2.919	16.846	3.123	17.536	3.303
16.033	2.921	16.870	3.133	17.541	3.305
16.043	2.927	16.871	3.142	17.545	3.322
16.060	2.927	16.875	3.144	17.551	3.337
16.078	2.929	16.887	3.152	17.598	3.338
16.116	2.932	16.924	3.154	17.634	3.339
16.130	2.933	16.947	3.154	17.649	3.352
16.146	2.937	17.054	3.156	17.680	3.354
16.172	2.938	17.073	3.156	17.681	3.359
16.212	2.947	17.077	3.165	17.693	3.360
16.220	2.947	17.138	3.172	17.694	3.372