



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS
ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36)
SOMETIDOS AL AMBIENTE CORROSIVO
PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS
ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN**

Autores:
José Alvarado
Oscar Quevedo

Urb. Yuma II, calle N°3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
LOS ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36) SOMETIDOS AL
AMBIENTE CORROSIVO PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS
ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN**

Proyecto de Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:
José Alvarado
C.I 25.672.869
Oscar Quevedo
C.I 22.428.092

Tutor: Ing. Donato Romanello.

San Diego, junio 2020



FI-M -013-2020-2CE(TG)

Valencia, 11 de junio de 2020

Ciudadano:

Alvarado M, José G.

25.672.869

Quevedo O, Oscar A.

22.428.092

Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° **01-2020** de fecha **08-06-2020** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36) SOMETIDOS AL AMBIENTE CORROSIVO PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello C.I: 4.131.877 como Tutor Académico que los asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



Prof. Luís Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

Ll/a.a.



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello portador de la cédula de identidad N° V- 4.131.877, en nuestro carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por los ciudadanos Alvarado Mendoza José Gregorio, portador de la Cédula de Identidad N° V-25.672.869, y Quevedo Ortega Oscar Abisai, portador de la Cédula de Identidad N° V-28.356.230 titulado **ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36) SOMETIDOS AL AMBIENTE CORROSIVO PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 29 días del mes de junio del año dos mil veinte.

Ing. Donato Romanello.
V- 4.131.877



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE MECÁNICA**

San Diego, mayo de 2020

ACTA DE REVISIÓN METODOLÓGICA DEL TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36) SOMETIDOS AL AMBIENTE CORROSIVO PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN**. Ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

**Ing. Donato Romanello.
Tutor Académico**

Firma

07-05-20

Fecha

**Ing. Alicia de Pizzella
Tutor Metodológico**

Firma

15-5-20

Fecha

AGRADECIMIENTOS

José Alvarado

Primeramente, quiero agradecer a Dios, siendo aquel que me dio las fuerzas para culminar esta meta que tanto anhelaba; también a la dedicación de mi madre por siempre motivarme y guiarme con amor y paciencia, quien cada día se preocupaba por el desarrollo y avance de este trabajo, enviándome toda la energía para seguir adelante y no desmayar, el trabajo de una madre es único e inigualable y se refleja en el éxito de su hijo. A mis familiares, en especial a la familia Martínez, por siempre apoyarme, con palabras de guía y corrección, también por amarme incondicionalmente sabiendo que estoy lejos de mi madre y mi casa, ustedes también contribuyeron a que esto fuera posible. Quiero agradecer a mi tutor académico, Ing. Donato Romanello, por el apoyo y sabiduría con que nos guio durante toda la construcción de este proyecto. Quiero agradecer a Yuritza Mendoza y hacerle mención especial, por ser la persona que durante toda mi carrera y estudios ha sido quien me ha apoyado y ha estado en pie de lucha a mi lado, de quien he visto el sacrificio y la lucha, llena de noches sin descanso y días de estrés, demostrándome que lo hacía con el fin de que estas líneas hoy fueran posibles, manifestando el orgullo y el amor que siente por mí; aun cuando no es mi madre, se ha portado igual que una y no creo en la posibilidad de un mundo alterno en donde este trabajo fuera posible sin la presencia de ella en mi vida, Gracias, Te Amo. Quiero agradecer a Rakan El Atrache, Ricardo Perrotta, Celso Vázquez, Katherine López, Vito Martinelli y Rubén Rivas por motivarme y por creer en mí, porque cuando sentía que no podía más ustedes me apoyaron, ustedes me empujaron e hicieron lo imposible para que siguiera adelante, en la vida se consiguen pocos amigos como ustedes, lo quiero muchachones. A Olga Peña, por siempre tenerme presente y motivarme con palabras de amor, demostrando una incomparable confianza en mi habilidades y capacidades, algunas veces más que yo. Y para finalizar, no quiero dejar por fuera a mi amigo, compañero y futuro colega Oscar Quevedo, quien estuvo a mi lado en todo tiempo, en cada línea escrita y cada cálculo hecho, horas sin dormir, días

sin descanso, pero con un ánimo indescriptible quien, con esfuerzo, en el momento en que pensé rendirme, organizo todo para traerme de nuevo al juego, y hoy se lo reconozco. Gracias a ti hermano hoy pudimos terminar este trabajo, gracias por todo tu esfuerzo, es un honor poder trabajar contigo, y que tu nombre y el mío hoy estén juntos en este trabajo. Sin nada más que decir.

Oscar Quevedo

Quiero agradecer a Dios en primer lugar por permitirme alcanzar esta meta, a mis padres por su confianza y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, por darme fuerzas y enseñarme a nunca rendirme, a mis hermanos por ser ese motor impulsor, a la familia Izarra Marquina por su apoyo incondicional en el transcurso de mi estudio, a mis amigos Rubén Izarra , Gabriel Hernández, Frank Tapia , Freddy Maggiorani , Gabriel Parada , Julio Ramos , Ramon Fletes, Regulo Flete ,José Tovar ,Andrés García y Manuel Dávila, por su apoyo incondicional y su amistad a pesar de la distancia a lo largo de todo estos años. Agradecer a nuestro tutor académico Ing. Donato Romanello por todo el apoyo, sabiduría y por siempre impulsarnos a alcanzar la excelencia y exigirnos para demostrarnos de lo capaces que somos, a mis colegas Celso Vázquez y Rakan El Atrache, por su ayuda incondicional y brindarnos todo su apoyo en momentos críticos, para finalizar no puedo dejar de agradecer a mi compañero José Alvarado por su compromiso, ética de trabajo y nunca rendirse antes de alcanzar la culminación de este proyecto sin el nada de esto hubiese sido posible, para mí fue un honor y privilegio tener un compañero, colega y amigo como el, sin nada más que decir.

Gracias a todos.

3.6 Fases Metodológicas.....	36
------------------------------	----

IV RESULTADOS

4.1 Establecer el comportamiento de la atmosfera corrosiva da las costas de Carabobo y Falcón por medio de la recopilación de información previa, recabando los datos necesarios para realizar la simulación de computadora y a su vez, establecer los parámetros de control de la capacidad carga del elemento.....	39
4.1.1 Recopilación de datos atmosféricos.....	42
4.1.2 Modelado de probeta y análisis de control.....	44
4.1.3 Capacidad de tracción.....	45
4.1.4 Datos de control.....	47
4.2 Realizar el modelado matemático de los procesos corrosivos, determinando la velocidad de corrosión y la deposición de óxidos en el ambiente especificado, empleando modelos de cálculos existentes.....	49
4.2.1 Cálculo de parámetros dependientes de la humedad relativa.....	49
4.2.1.1. Cálculo de espesor de película de electrolito.....	49
4.2.1.2 Cálculo de corriente limete de intercambio de O_2 en ele electrolito.....	51
4.2.1.3 Cálculo de la densidad de corriente de corrosión.....	54
4.2.2 Cálculo de velocidad de corrosión.....	58
4.2.2.1 Comparar resultados obtenidos con otros modelos matemáticos.....	62
4.3 Establecer el efecto de la corrosión en la capacidad de carga de la pieza relacionada al decremento del diámetro de la sección transversal por efecto de la corrosión ambiental.....	66
4.3.1 Método de obtención de datos.....	67
4.3.2 Cálculo de variación de la capacidad de tracción en función del efecto de la corrosón.....	72
4.4 Establecer en gráficas en el tiempo el comportamiento mecánico del elemento con proyecciones en años en el futuro, y analizar resultados.....	74
4.4.1 Proyección de datos a 10 años en el futuro.....	76
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	pp.
1 Esquema de máquina universal a tracción.....	12
2 Curva general de tracción de los materiales.....	13
3 Variaciones de la ductilidad y límites de esfuerzos bajo efectos de diferentes porcentajes de corrosión.....	18
4 Ductilidad de barras no sometidas a corrosión.....	19
5 Dispersión de los valores obtenidos para la ductilidad y la relación de esfuerzos en barras desnudas de acero ante los efectos de la corrosión.....	20
6 Triangulo de corrosión bajo tensión.....	25
7 Rotura por corrosión bajo tensión en acero inoxidable austenítico.....	26
8 Proceso de deformacion por <i>shot pennig</i> y volumen de esfuerzos residuales.....	26
9 Placa de metal bajo esfuerzo en contacto con un electrolito.....	31
10 Influencia de espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión.....	40
11 Relación de la corrosión del acero con la humedad y la contaminación atmosférica.....	41
12 Vista en isometría de probeta de área transversa circular.....	45
13 Dimensiones de la probeta de sección circular.....	45
14 Evaluación de control para la probeta de sección circular.....	48
15 Factor de seguridad obtenido para carga 19450 N y diámetro 5 mm.....	71
16 Factor de seguridad obtenido para carga original y diámetro 5 mm.....	72
17 Valor del factor de exposición ambiental.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	pp.
1 Datos recopilados para la ciudad de Coro.....	42
2 Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.....	43
3 Datos recopilados para la ciudad de Punto Fijo.....	43
4 Datos del material de la pieza.....	47
5 Recopilación de datos de ensayo de control.....	48
6 Espesor del electrolito, Coro.....	50
7 Espesor de electrolito, Punto Fijo.....	50
8 Espesor de electrolito, Puerto Cabello.....	51
9 Cálculo de parámetros para corriente limite, Coro.....	52
10 Cálculo de parámetros para corriente limite, Punto Fijo.....	53
11 Cálculo de parámetros para corriente limite, Puerto Cabello.....	53
12 Parámetros constantes para el cálculo de corriente de intercambio.....	54
13 Cálculo de densidad de corriente de corrosión, Coro.....	56
14 Cálculo de densidad de corriente de corrosión, Punto Fijo.....	56
15 Cálculo de densidad de corriente de corrosión, Puerto Cabello.....	57
16 Espesor reducido por efecto de la corrosión, Coro. Cálculo por densidad de corriente de Tafel.....	59
17 Espesor reducido por efecto de la corrosión, Punto Fijo. Cálculo por densidad de corriente de Tafel.....	60
18 Espesor reducido por efecto de la corrosión, Puerto Cabello. Cálculo por densidad de corriente de Tafel.....	61
19 Modelo ISO-CORRAG aplicado a Coro.....	63
20 Modelo ISO-CORRAG aplicado a Punto Fijo.....	63
21 Modelo ISO-CORRAG aplicado a Puerto Cabello.....	64
22 Carga aplicada a la probeta de demostración.....	70
23 Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6.25 \text{ mm}$ para Coro.....	73
24 Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6.25 \text{ mm}$ para Punto Fijo.....	73
25 Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6.25 \text{ mm}$ para Puerto Cabello.....	74

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO	pp.
1 Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Coro.....	60
2 Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Punto Fijo.....	61
3 Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Puerto Cabello.....	62
4 Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Coro.....	65
5 Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Punto Fijo.....	65
6 Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Puerto Cabello.....	66
7 Capacidad a tracción (año 1), Coro.....	75
8 Capacidad a tracción (año1), Punto Fijo.....	75
9 Capacidad a tracción (año 1), Puerto Cabello.....	76
10 Proyección de la capacidad a tracción, Coro.....	78
11 Proyección de la capacidad a tracción, Punto Fijo.....	78
12 Proyección de la capacidad a tracción, Puerto Cabello.....	79



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA

**ESTUDIO DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
LOS ACEROS ESTRUCTURALES (ASTM-A36) SOMETIDOS AL
AMBIENTE CORROSIVO PERTENECIENTE A LAS COSTAS DE LOS
ESTADOS CARABOBO Y FALCÓN.**

Autores: José Alvarado & Oscar Quevedo.

Tutor: Ing. Donato Romanello

Fecha: mayo 2020

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico, en el tiempo, de los aceros estructurales ASTM-A36 cuando estos se ven sometidos a una atmósfera corrosiva, en este caso de estudio, a aquella perteneciente a las costas de los estados Carabobo y Falcón de la República Bolivariana de Venezuela. El proceso de estudio se realizará por medio de simulación con softwares computacionales Inventor Professional 2018 para la simulación de ensayo universal de tracción, y Microsoft Excel 2019 para el cálculo numérico de efectos corrosivos ambientales. El procedimiento de evaluación de las capacidades mecánicas de los aceros, se estudió de acuerdo a las normas estándares de estudio de los materiales, valiéndose del diseño de probetas con las dimensiones especificadas en la norma E8 de la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Estas evaluaciones se realizaron con probetas sometidas a los efectos de la corrosión atmosférica en los estados mencionados, generando gráficas de comportamiento de las capacidades mecánicas del diseño en función del tiempo, con la finalidad de resaltar la importancia del efecto de la corrosión sobre las capacidades de las estructuras metálicas conforme avanza el tiempo, promoviendo la consideración de este parámetro dentro del cálculo estructural como un parámetro crítico de diseño, y no solamente como efecto al cual se le considera muy vagamente..

Descriptor: Corrosión, Atmósfera, Predicción, Análisis, Propiedades, Capacidad.

INTRODUCCIÓN

El análisis de los efectos de los fenómenos electroquímicos de la corrosión en los materiales de construcción, especialmente los metálicos, promete a futuro una mejora en los diseños que se ofrecen para una determinada tarea. Los metales de construcción, si bien son altamente resistentes y eficientes para las tareas para las que son seleccionados, poseen una debilidad y es la corrosión; la presencia de una atmosfera rica en oxígeno es una desventaja para estos metales cuyo estado natural es un óxido, debido a que no se encuentran en su forma estable y siempre se favorece la vuelta del mismo a su estado original.

El fenómeno antes mencionado no es deseable por el diseñador de cualquier estructura, debido que, al ser un fenómeno de deterioro, se desplaza masa del metal, y al encontrarse en presencia de fenómenos de electroquímica, se producen efectos de cambios en la estructura del mismo, por lo que su integridad se ve afectada, poniendo en riesgo la estabilidad de la estructura y su resistencia al pasar del tiempo.

En este sentido, la presente investigación, presenta un análisis mecánico general de los elementos construidos en materiales metálicos, específicamente los aceros estructurales, que se encuentran en un ambiente altamente corrosivos, como es el marítimo, específicamente referidos a las costas venezolanas de los estados Carabobo y Falcón.

Para realizar este estudio, se contó con el empleo de herramientas y software computacionales de diseño asistido (CAD) y softwares de simulación, con el fin de proveer una alternativa, eficiente, eficaz y más económica para realizar el estudio.

El cálculo y la forma de determinar la variación de estas propiedades para la mejora del diseño, se basará en 5 pasos fundamentales:

1. Determinar el comportamiento de los parámetros atmosféricos más influyentes en el proceso de corrosión, por medio de la documentación existente, sabiendo aun que el proceso de corrosión se ve afectado por gran cantidad de factores,

pero se estudia en base a los más importantes y a su vez establecer los parámetros de control para la simulación del ensayo mecánico.

2. Determinar la velocidad de corrosión promedio mensual, con el empleo de modelos matemáticos, con el fin de establecer la pérdida de masa de las piezas de acuerdo a las condiciones ambientales de cada mes.
3. Calcular por medio del empleo de modelos matemáticos, los efectos de la corrosión en el material, comparando los resultados con los obtenidos en investigaciones previas y modelos existentes, y posteriormente, determinar las variaciones de las capacidades de carga del material en función del tiempo y la corrosión.
4. Por último, crear gráficas en función del tiempo de las propiedades analizadas en los aceros estructurales, para ofrecer información de la forma del cambio de las mismas.

Esta investigación está conformada por cuatro (4) capítulos, los cuales tratan lo siguiente:

Capítulo I, en este capítulo se habla de la problemática de la situación y de los objetivos de esta investigación, así como el alcance y las limitaciones de la misma.

En el capítulo II, se presentan la fundamentación teórica de este proyecto de investigación y los antecedentes de la misma, con el fin de proveer las bases necesarias en donde se construirá este proyecto.

Seguidamente en el capítulo III, se establece la metodología que será empleada para lograr los objetivos establecidos previamente en el capítulo I.

Y, por último, en el capítulo IV se muestran los resultados obtenidos en la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En el diseño mecánico la selección de los materiales juega un papel importante; de estos depende el buen desempeño de los componentes y estructuras, por lo que es de gran interés determinar las cargas a las que estará sometido el elemento, para así, determinar que material es el más adecuado para cumplir dicha tarea. Debido a esta necesidad, la ciencia de materiales provee de los métodos experimentales capaces de determinar el comportamiento de estos ante diversas cargas, y es lo que hoy conocemos como propiedades mecánicas.

La caracterización de los materiales y el estudio de estos se refleja en la historia a no hace más de 200 años, por lo que podríamos decir que es una ciencia bastante nueva, pero que con su aparición ha permitido el desarrollo de las aplicaciones de los materiales que conocemos, mediante la modificación y adaptación de sus características. Al mismo tiempo, entender las propiedades mecánicas de los materiales establece las condiciones de trabajo y de esfuerzo a las que puede ser sometido un elemento estructural sin que se produzca una falla, ofreciendo mayor seguridad en la construcción y diseño de estructuras y componentes mecánicos. Entonces, conocer y comprender de manera sólida las propiedades mecánicas de estos aceros es una necesidad que existe cuando se es diseñador; en la actualidad, se han creado métodos experimentales normalizados, por medio de los cuales se pueden obtener determinadas características; un ejemplo de esto, es el ensayo universal a tracción

La mayoría de las estructuras y componentes mecánicos están fabricados en acero, gracias a su alta resistencia, y una durabilidad considerable. Estas propiedades ofrecen al acero un gran atractivo para su empleo en la construcción. Sin embargo, existen grandes factores que amenazan con la integridad de una estructura realizada en estos materiales, y uno de ellos es la corrosión, fenómeno electroquímico que degrada

a los metales ferrosos y no ferrosos, provocando un desplazamiento de la masa de la estructura y pérdida de ductilidad, lo que produce una fragilización en la misma, exponiéndola a una falla catastrófica. Los ambientes marinos, por su contenido en cloruros y humedad, son altamente corrosivos, por lo que las estructuras metálicas ubicadas en la costa son muy susceptibles a sufrir una alta tasa de corrosión, haciendo que la vida útil de las estructuras, sino se toma en consideración este fenómeno, sea realmente afectada. Los métodos más comunes para minimizar estos efectos corrosivos suelen ser métodos de protección catódica y anódica, empleando ánodos de sacrificio o recubrimientos, a los cuales se les hace un mantenimiento periódico con la finalidad de garantizar la protección y, por consiguiente, la integridad de la estructura, además se considera los efectos de manera generalizada en el empleo del conocido factor de seguridad del diseño.

En Venezuela, las costas de los estados Carabobo y Falcón representan una zona bastante sensible, debido a que existen un número considerable de poblados y ciudades apostadas allí, así como zonas turísticas de importancia para los estados, además de industrias de gran envergadura para la economía venezolana como Pequiven y La refinería “El Palito” de PDVSA, cuyas estructuras se ven bastante afectadas por el ambiente corrosivo predominante en el área, efecto de la contaminación de las industrias y el ambiente de la costa.

Ahora bien, los aceros estructurales, son la gama más empleadas en las estructuras de construcción y más específicamente en la zona, gracias a su alta resistencia, maleabilidad, un alto grado de soldabilidad, la incombustión y su elevada resistencia a la corrosión en comparación con sus hermanos en condiciones normales; esto gracias a elementos aleantes como el fósforo, el silicio y el azufre.

Por otro lado, pese a la cantidad de estudios realizados en el área de ciencia de los materiales y la gran cantidad de información que podemos encontrar acerca de las propiedades mecánicas de estos, la predicción del desenvolvimiento mecánico, en el tiempo, de una estructura relacionado con sus propiedades mecánicas a tracción y la

afectación que estas sufren por los efectos de la corrosión en el material, es bastante vaga.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo mejorar el desempeño mecánico a tracción en el tiempo de los aceros estructurales (ASTM-A36) sometidos a un ambiente corrosivo?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Predecir el comportamiento de las propiedades mecánicas a tracción de los aceros estructurales y el efecto que estas tienen en los procesos de control de corrosión con el fin de mejorar la selección y el diseño empleando las herramientas computacionales de diseño asistido y simulación.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Establecer el comportamiento de la atmosfera corrosiva de las costas de Falcón y Carabobo, por medio de la recopilación de información previa, recabando los datos necesarios para realizar la simulación por computadora, y a su vez, establecer los parámetros de control de las capacidades de carga del elemento.
2. Realizar el modelado matemático de los procesos corrosivos, determinando las velocidades de corrosión y la deposición de óxidos en el ambiente especificado, empleando modelos de cálculo existentes.
3. Establecer el efecto de la corrosión en la capacidad de carga de la pieza relacionada al decremento de las dimensiones de la sección transversal por efecto de la corrosión ambiental.
4. Establecer gráficas en el tiempo del comportamiento mecánico del elemento, con proyecciones en años en el futuro, y analizar los resultados

1.4 Justificación de la investigación

Bien se conocen las propiedades mecánicas de un material y se utilizan para el diseño de elementos mecánicos y estructuras; si bien es sabido su estado inicial y su comportamiento en ese momento, no se es capaz de decir, con exactitud, cómo será el desenvolvimiento de las capacidades de este y sus cambios en presencia de ataques corrosivos. Obtener información acerca de este comportamiento, en un área específica,

de acuerdo al desenvolvimiento particular de los procesos corrosivos en el tiempo, permitiría una mejora en el diseño, otorgando al diseñador la posibilidad de conocer el presunto estado de las condiciones físicas y mecánicas de su diseño en el tiempo, provocando la disminución de los costos de la corrosión y mantenimiento, y un aumento en la vida útil y la seguridad del diseño.

Ahora, si bien existen métodos de ensayo físicos, diseñados para estudiar las propiedades de los materiales, en la actualidad existen diversos métodos computacionales capaces de realizar estudios de diferentes naturalezas, desde mecánica estructural, pasando por acústica, fatiga, electroquímica hasta la mecánica de fluidos. Estos softwares son capaces de proveer información confiable en cada una de las ramas de estudios, y el empleo de ellos en la actualidad aumenta a diario, gracias a la facilidad de empleo, la comodidad para quien realiza el estudio y lo económico que puede llegar a ser, pudiendo ahorrar, en algunos casos, algunos miles de dólares. Por esa razón, en esta investigación, se decide emplear los softwares de diseño asistido por computadora (CAD) y de simulación, por su versatilidad y confiabilidad.

Además de esto, debido a que el fenómeno de corrosión es un fenómeno dependiente del tiempo, y se requiere del análisis de las propiedades mecánicas en el tiempo cuando el material es sometido a este fenómeno, el empleo de la simulación por computadora permite que el estudio se realice para un sinnúmero de iteraciones, por lo que se pueden generar predicciones con mayor alcance en el tiempo.

1.5 Alcance

Este proyecto de investigación estudia y predice el comportamiento mecánico de las estructuras fabricadas en acero estructural (ASTM-A36), ubicadas en la zona costera de los estados Carabobo y Falcón de la República Bolivariana de Venezuela, por medio de un estudio computacional y matemático de un modelo normalizado, con el fin de poder ofrecer una alternativa en el diseño de las mismas, esto para aumentar el tiempo de vida útil de las estructuras con respecto a los esfuerzos mecánicos a las que se encuentran sometidas y, a su vez, frente a los procesos corrosivos presentes en estas.

1.6 Limitaciones

Las limitaciones se basan en el empleo de softwares CAD para la construcción y simulación de los ensayos mecánicos, para esto se empleó el software Autodesk Inventor, en conjunto con Microsoft Excel, para el cálculo numérico de los niveles de corrosión ambiental y los efectos la disminución del área de la pieza metálica, y no un análisis físico experimental. Por otro lado, el estudio de los aceros estructurales de la gama ASTM-A36, serán el objetivo, por lo que se descarta cualquier otro tipo de acero en esta investigación, esto debido a la gran existencia de materiales ferrosos existentes, lo cual haría casi imposible el estudio del efecto por separado en cada acero. En este sentido, la simulación del ensayo mecánico y del estudio de la corrosión y las propiedades mecánicas del material en estudio, serán generadas por softwares computacionales y los datos a analizar serán tomados de los mismos.

Por otro lado, las condiciones medioambientales a las que fue sometido el material, son directamente aquellas referidas a las costas venezolanas de los estados Carabobo y Falcón, tomando como referencia a tres ciudades ubicadas en esta zona, Coro, Punto Fijo y Puerto Cabello; los datos ambientales de las mismas que fueron requeridos, se tomaron en cuenta para el cálculo numérico del fenómeno de corrosión, por lo que el estudio realizados se limita a esta zona geográfica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Una vez establecidos los objetivos de esta investigación que definen el campo y los fines a los cuales esta alcanza, es necesario establecer un conjunto de aspectos de carácter teórico que permitieron la cimentación de las bases de la misma. En este sentido, y tomando en cuenta las variables que intervienen en el trabajo de investigación, se procedió a establecer los antecedentes de la investigación y una serie de conceptos relacionados con las propiedades de los materiales y los efectos corrosivos sobre los metales en la pérdida de masa y en la disminución de sus propiedades.

D'Santiago, B (2019) presentó ante la Universidad José Antonio Páez ubicada en el estado Carabobo, Venezuela, un trabajo titulado “**Modelo de predicción de corrosividad en estructuras ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón implementando las herramientas de redes neuronales artificiales**”, para optar por el título de Ingeniero Mecánico. En este trabajo se estudia y caracteriza el comportamiento de los efectos corrosivos del ambiente marítimo ubicado a lo largo de la costa de los estados Carabobo y Falcón de la República Bolivariana de Venezuela, usando una herramienta computacional llamada Redes Neuronales, con el fin de proveer una herramienta de predicción de la atmosfera presente y los efectos corrosivos sobre las estructuras metálicas en esta área. Este se basó en la recolección de data suministrada en bases de datos climatológicos, los cuales se usaron para la formación, entrenamiento y comprobación del funcionamiento de las redes neuronales, categorizando a su vez a la costa carabobeña y del estado Falcón como una zona de alto nivel de corrosión ambiental.

El trabajo mencionado permite a la presente investigación usar como base los datos de corrosividad del ambiente en cuestión, con el fin de emplearlo en el modelado predictivo del comportamiento mecánico de las estructuras en dicha zona, valiéndose

de la evolución en el tiempo de la atmosfera corrosiva y sus efectos, ofreciendo la oportunidad de caracterizar, no tan solo el desenvolvimiento corrosivo de la zona sino también, el comportamiento de las estructuras ante este fenómeno. Así mismo, el trabajo antes mencionado, sirve de apoyo en la metodología de la investigación y en las características de la misma.

Otro de los trabajos a considerar como antecedente de este estudio es el presentado ante la Universidad Nacional del Litoral, ubicada en Santa Fe, Argentina, por parte de Toro, S; Sánchez, P y Huespe, A (2015) titulado “**Análisis numérico de un problema de deterioro estructural causado por la corrosión en las armaduras del hormigón armado**” en el cual se estudia el comportamiento mecánico de elementos estructurales de hormigón armado sometidos al deterioro debido a la corrosión de la armadura, analizando en consecuencia la expansión volumétrica de las armaduras debido a la acumulación de los productos de corrosión, la cual genera un esfuerzo traccionante en el concreto que recubre la barra, además de la pérdida de material de la barra, que disminuye la sección neta de la misma. A través del estudio de estos fenómenos se propone un estudio numérico a nivel mesoscópico utilizando un procedimiento específico de elementos finitos, analizando los resultados de cargas últimas determinados para dos tipos de vigas, y deterioradas por distintos niveles de corrosión generalizada de la armadura longitudinal y comparándolos con ensayos experimentales.

El aporte de esta investigación a la actual, se basa en el modelado matemático y numérico del deterioro de las estructuras metálicas mediante el uso de data procesada y análisis de elementos finitos, lo cual sirve de apoyo al requerimiento previamente establecido en la investigación actual de poder predecir el comportamiento de las propiedades mecánicas en las estructuras metálicas de acero A36, mediante el uso de la herramienta computacional antes mencionada.

De esta misma manera, se toma en consideración un estudio presentado ante la Universidad técnica de Ambato, ubicada en la ciudad de Ambato, Ecuador, por parte de Guzhñay, F (2012) titulado “**Estudio del comportamiento del acero A36**

mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante la norma ASTM E-8N”, trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, el cual tiene como objetivo analizar el comportamiento de dicho acero y estudiando las fallas cuando este es sometido a tracción bajo la norma ASTM E-8, todo esto valiéndose de la investigación del ensayo de tracción de los materiales, analizado la norma que regula el procedimiento, además de la comparación teórica-experimental de los ensayos, así como la comparación de la microestructura del material mencionado y la estipulada en los textos, para de esta manera proponer una solución a las fallas que pueden presentar este tipos de acero.

Anudado a esto, el trabajo mencionado aportara la caracterización de los aceros estructurales, específicamente el A36 y el comportamiento de este material a tracción, de una manera teórica y experimental, sirviendo como guía a los posteriores estudios a realizarse en el desarrollo del trabajo de investigación presente.

Para culminar este compilado de antecedentes, se cita a Velilla, E; Villada, F y Echeverria, F (2009), quienes presentaron un trabajo ante la Universidad de Antioquia ubicada en Medellín, Colombia, el cual lleva por título “**Modelos de pérdida de masa de acero por corrosión atmosférica en Colombia usando inteligencia computacional**”, el cual es un proyecto que tiene como fin caracterizar las diferentes atmosferas colombianas, para lo cual expusieron placas de acero al carbono en 21 estaciones que se encontraban distribuidas a lo largo del sistema de energía eléctrica de mencionado país, y durante 12 meses se midieron diferentes factores que afectarían la corrosión de las probetas colocadas en las distintas regiones, clasificando posteriormente las 21 regiones en 4 grandes grupos, de acuerdo a los factores que intervenían en el proceso corrosivo, entre ellos, humectación, altura de la zona con respecto al nivel del mar, contenido de sulfatos y cloruros en el ambiente, entre otros. Para la caracterización de la pérdida de masa de las probetas, por grupos se aplicó un método computacional conocido como Redes Neuronales que, al introducirle la serie de parámetros y factores incidentes en cada una de las zonas, así como los datos

recabados, arrojo un único valor de pérdida de masa, permitiendo entonces determinar el comportamiento físico de las placas ante la corrosión en cada área.

El aporte más importante de esta investigación, es el método de caracterización de la pérdida de masa en el acero de acuerdo a los factores ambientales que intervienen en el proceso, lo cual permitió bosquejar una idea del comportamiento de pérdida de masa y por consiguiente pérdida de área transversal en las estructuras metálicas, siendo uno de los factores más amenazantes en cuanto a deterioro de las propiedades mecánicas se trata.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Importancia del cálculo del esfuerzo a tracción

El análisis con mayor importancia y más comúnmente realizados para ensayar piezas y componentes metálicos es la prueba de tracción, lo que permite a los diseñadores e ingenieros conocer el valor de la resistencia a la tracción de un material y la relación que este posee con sus propiedades físicas. El cálculo de estas propiedades es de vital importancia para determinar la idoneidad de algún material para realizar algún trabajo o ser aplicado en alguna área en el momento de la selección de materiales.

Uno de los desarrollos más importantes en la historia de la mecánica de materiales fue la comprensión de que la resistencia a la tracción de una muestra cargada axialmente estaba relacionada con el tamaño y la forma de su área de sección transversal. Este concepto es razonable, considerando que la resistencia a la tracción es originada a partir del número de enlaces intermoleculares presentes en el material.

En este sentido, una prueba a tracción es un análisis físico y experimental de un material; este implica aplicar cargas en los extremos opuestos de la muestra y tirar hacia afuera hasta que el metal se rompa para determinar la deformación, la tensión, la deformación del rendimiento y otras propiedades exclusivas de la muestra. La carga se aplica a las placas, o también conocidas como probetas, mediante el empleo de una máquina conocida como máquina universal de ensayo a tracción (ver figura 1).

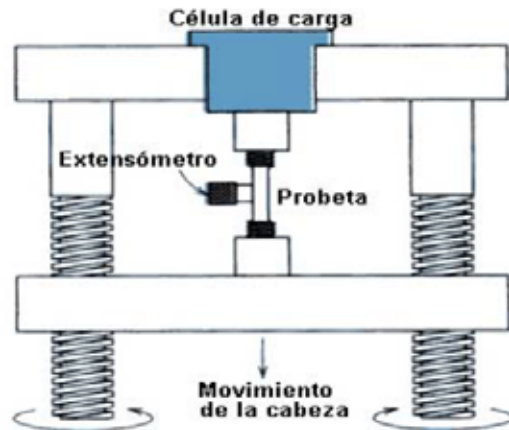


Figura 1: Esquema de la máquina universal a tracción.

Fuente: Balvatín, A (2016). *Ensayo y propiedades de los materiales*.

Para poder determinar la relación entre las características y su comportamiento en la evolución o incremento de las cargas, se mide y registra las fuerzas aplicadas y se plasman en un gráfico (ver figura 2). Esta curva de deformación-esfuerzo ayuda a los ingenieros a determinar tres tipos esenciales de resistencias a la tracción.

1. Límite de fluencia: este es el esfuerzo máximo que puede soportar un material en deformación elástica, o sin deformaciones permanentes, por esta razón también se le conoce como límite elástico.
2. Máxima resistencia a la tracción: es el valor que indica el mayor esfuerzo que puede soportar el material antes de fallar.
3. Resistencia última: indica el valor del esfuerzo en el que el material falla o fractura, a este se le conoce también como resistencia a la ruptura.

Cuando se determina la relación de carga y deformación, el cálculo de los esfuerzos se determina tomando en consideración que estos se definen como la sumatoria de las fuerzas internas dentro del material por unidad de área del objeto. Este valor se denomina esfuerzo de tracción y se determina de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Figura 2: Curva general de tracción de los materiales.

Fuente: Balvatín, A (2016). *Ensayo y propiedades de los materiales*.

Donde:

o elemento radica en la relación que existe entre el esfuerzo aplicado a este y su resistencia a la tracción

En este sentido la importancia del cálculo del esfuerzo de tracción es poder determinar la fiabilidad de la estructura diseñada, determinando donde las estructuras cumplen con las expectativas y donde se pueden mejorar otras. Este parámetro en algunos casos, puede significar una diferencia entre la vida y la muerte.

2.2.2 Modelado matemático de corrosión y el fenómeno de transporte

De acuerdo a lo establecido por Fontes, E y Nistad, B (2019) en su publicación, el fenómeno de corrosión es bastante impredecible en el tiempo y puede variar mucho de acuerdo al espacio o ambiente que influye en el proceso y el tiempo de exposición de algún material al mismo, esto producido por las variaciones presentes en el electrolito. Un modelado fiel de la corrosión y de los métodos de protección de corrosión debe ser capaz de poder definir o establecer como está compuesto un electrolito y la distribución de los potenciales en toda la superficie del metal y el electrolito en sí. Estos modelos matemáticos introducen conceptos bastante importantes como el flujo de iones cargados en el fluido electrolítico, la caracterización del comportamiento de todas las especies de los materiales en presencia de dicho electrolito y la condición idealizada de la electroneutralidad del electrolito.

Ahora bien, se establecen ecuaciones para describir el comportamiento de los iones cargados durante el transporte en el electrolito, estas son las llamadas ecuaciones de *Nernst-Planck*. En estas ecuaciones el flujo de iones N_i , se basan en el intercambio por difusión, migración y advección. En los balances materiales, las variaciones en los cambios de dirección del flujo permanecen equilibradas por las acumulaciones, la cual es un término dependiente del tiempo en las ecuaciones que serán descritas. En estas ecuaciones las concentraciones antes mencionadas se denotan como C_i , y establecen la concentración de especies de i o, en el caso de reacciones homogéneas en el electrolito, como R_i para realizar los balances materiales.

Las ecuaciones de modelado de las características del electrolito son las siguientes:

a-. Balances materiales para las especies de 1 a n-1:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + N_i + R_i = 0 \quad (2)$$

El flujo en este caso se determina a través del empleo de la ecuación de Nernst-Planck

$$N_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla \phi_i + c_i \mathbf{u} \quad (3)$$

en donde D_i describe el coeficiente de difusión de las especies i , z_i la carga de un ion i , $u_{m,i}$ representa la movilidad y \mathbf{u} el vector que define la velocidad de flujo del electrolito.

b-. El balance de corriente en el electrolito \mathbf{i}_i , se define como:

$$\mathbf{i}_i = 0 \quad (4)$$

Es importante establecer que la densidad de corriente en el electrolito se define como la suma del flujo de las cargas presentes en el electrolito, lo cual, proviene del flujo de iones y en combinación con la ley de Faraday, queda como

$$\mathbf{i}_i = \sum_{i=1}^n z_i F N_i \quad (5)$$

c-. Ecuación de Poisson

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi_i) = F \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (6)$$

Definiéndose ε como la constante de permitividad. Para la mayoría de los electrolitos, exceptuando aquellos muy disueltos, esta ecuación se puede aproximar a la condición de electroneutralidad:

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \quad (7)$$

Para caracterizar al electrolito el balance es notable, ya que existen el mismo número de ecuaciones que incógnitas, siendo estas el número de concentraciones de especies (n) y el potencial electroquímico del electrolito ϕ_i , siendo un total de $n + 1$ ecuaciones. Los balances proveen de un total de $n-1$ ecuaciones, convirtiendo a la ecuación de densidad de corriente la n -ésima ecuación, la cual es una combinación lineal del balance de masa de todas las especies cargadas y por último la condición de electroneutralidad provee de la última ecuación necesaria para poder caracterizar el medio electrolítico.

Por otro lado, el potencial electrónico en el metal, puede ser estudiado con la ecuación de la conservación de la corriente en unión a la ley de Ohm.

d-. La ecuación de densidad de la corriente en el metal es:

$$i_s = 0 \quad (8)$$

Donde

$$i_s = k_s \phi_s \quad (9)$$

Siendo k_s la constante de conductividad eléctrica del metal.

Esta ecuación mencionada anteriormente se conoce como la ecuación de Butler-Volmer y es usada para establecer las condiciones de borde en las ecuaciones de dominio a ambos lados de la interfaz metal-electrolito.

Si se considera el sobrepotencial de carga del ánodo y el cátodo, la ecuación de Butler-Volmer cambia, y se conoce como la ecuación de Tafel, en donde la suma

aritmética de las corrientes parciales del electrolito y el electrodo, produce la corriente total de la reacción ánodo-cátodo. Esta ecuación puede ser empleada en el cálculo de corriente por reacciones en celdas galvánicas, y de electrólisis. De acuerdo a Genescá (s/a), esta ecuación tiene la forma:

$$j = j_o \exp\left(\frac{n_a \alpha n F}{RT}\right) - j_o \exp\left(\frac{n_c (1-\alpha) n F}{RT}\right) \quad (10)$$

Donde:

j es la corriente total de corrosión.

j_o es la corriente de intercambio de la reacción

n_i es la pendiente de Tafel correspondiente al ánodo y al cátodo, respectivamente

F la constante de Faraday

R la constante del gas que interviene en la reacción.

T la temperatura.

α , es la caída de potencial en la capa de electrolito, que es condiciones generales suele ser igual a 0,5.

2.2.3 Efecto de la corrosión sobre la resistencia a tracción

Los materiales de construcción modernos tienden a tener una serie de propiedades que se encuentran bien definidas, que pueden decir mucho sobre sus características y el comportamiento que estas tendrán en su empleo en la construcción. Esto es cierto hasta cierto punto, debido a que existe un constante desarrollo de nuevos materiales y se descubren nuevas formas de daños en las estructuras a medida que se van descubriendo nuevas aplicaciones más avanzadas con nuevos entornos y modos de operaciones.

Ahora bien, diversos estudios han establecido la relación entre los efectos de la corrosión y la disminución de las propiedades mecánicas de los aceros y sus aleaciones. En su mayoría, los estudios en esta rama evaluaron el comportamiento de barras de aceros, sometidas a diferentes niveles de corrosión y posteriormente ensayadas a tracción para determinar la variación de los parámetros que informan la resistencia del material y la ductilidad del material, todas en función del nivel de corrosión al que

fueron sometidos. Parámetros como el límite elástico, resistencia a la tracción, deformación tras la rotura y deformación bajo la carga máxima son esenciales para caracterizar el comportamiento de los materiales bajo efectos de este fenómeno.

En estos estudios los resultados son representados en diagramas empíricos de esfuerzo-deformación, y son comparadas en diferentes densidades de corrosión Q_{corr} . Es especial resaltar la relación existente entre la tensión media referidas a los límites elásticos $\sigma_{y,corr,med}$, y la resistencia ultima a la tracción $\sigma_{u,corr,med}$, con aquellas correspondientes a las barras no sometidas a corrosión. En gran parte se puede observar cómo cada uno de estos valores se ve reducido conforme las barras son sometidas a un nivel más alto de corrosión (ver figura 3). En trabajos como el de Du, Clark y Chan (2005) se establece que un aumento del Q_{corr} en un 25% provoca un decremento en $\sigma_{y,corr,med}$ y $\sigma_{u,corr,med}$ de un aproximado de 12%. En otros casos como el de García (1995), se estudia el hecho de que la corrosión por picadura genera reducciones aún mayores de los esfuerzos característicos del material.

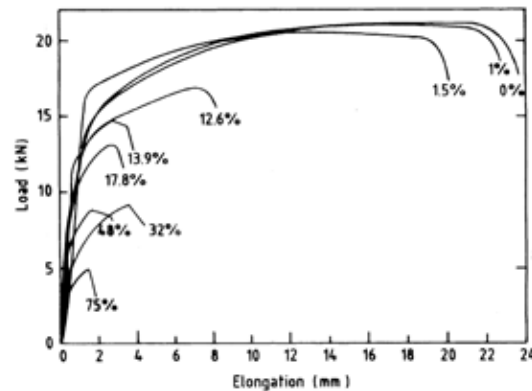


Figura 3: Variaciones de la ductilidad y límites de esfuerzos bajo efectos de diferentes porcentajes de corrosión.

Fuente: Almusallam (2001). *Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars.*

En la figura 3 se observa como al incrementar los valores de la corrosión, tanto el esfuerzo ultimo como el límite elástico van disminuyendo por efectos de la pérdida de masa, y a su vez la extensión de la curva de deformación es menor, dando a entender que la ductilidad va disminuyendo por efecto del fenómeno de corrosión. Por

consiguiente, se entiende la fragilización del material y la vulneración de sus propiedades al encontrarse expuesto a atmosferas corrosivas.

Du *et al* en sus estudios comparan los valores obtenidos para los límites de tensiones característicos y la ductilidad con los valores en condiciones de corrosión para varias aleaciones ferrosas. A continuación, en la figura 4 se muestran los valores de referencia para las barras a estudiar.

Reinforcement Type		Plain Bars		Ribbed Bars		
		R08	R16	T08	T16	T32
Reinforcement Number						
Unit weight	W_k (g/mm)	0.332	1.589	0.386	1.563	6.162
Actual diameter	d_0 (mm)	7.34	16.05	7.91	15.92	31.61
Yield strength	f_{y0} (N/mm ²)	284	273	526	529	498
Ultimate strength	f_{u0} (N/mm ²)	413	362	619	627	604
Ratio of strength	f_{u0}/f_{y0}	1.45	1.33	1.18	1.19	1.21
Elasticity	E_{s0} (kN/mm ²)	196	199	203	201	211
Yield strain	$\epsilon_{y0} = f_{y0}/E_{s0}$	0.0014	0.0014	0.0026	0.0026	0.0025
Hardening strain	ϵ_{sh0}	NA	0.025	0.022	0.019	0.017
Ultimate strain	ϵ_{u0}	0.182	0.203	0.082	0.116	0.123
Bar elongation	λ_0 (%)	23	23	14	16	20
Hardening strain ratio	$\epsilon_{sh0}/\epsilon_{y0}$	NA	18	8	7	7
Ultimate strain ratio	$\epsilon_{u0}/\epsilon_{y0}$	128	149	31	44	49
Rupture strain ratio	ϵ_r/ϵ_{y0}	162	168	53	60	80
Application in test specimen		SBB	SBB	SBB	SBB	SBB
		—	CEB	—	CEB	—

Figura 4: Ductilidad de barras no sometidas a corrosión.

Fuente: Du, Clark, y Chan (2005). *Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars.*

En la figura 4 se registran, en este sentido, los valores de las diferentes propiedades que definen a los materiales estudiados, se muestra la nomenclatura para barras de acero usadas en el reforzamiento de concreto.

En la figura 5 se muestra la variación de los criterios determinantes de la ductilidad, para el caso de 5a, se representa la relación entre el esfuerzo último y límite de fluencia de las barras expuesta sin ningún tipo de protección a la corrosión; cómo podemos observar estos tienen una tendencia a mantenerse, ya que el límite último y el límite elástico varían de igual forma en el tiempo y a diferentes concentraciones de corrosión, por otro lado, el segundo criterio tiene una tendencia bajista, por lo que se concluye nuevamente que la corrosión tiene un efecto degradante en la ductilidad de los materiales.

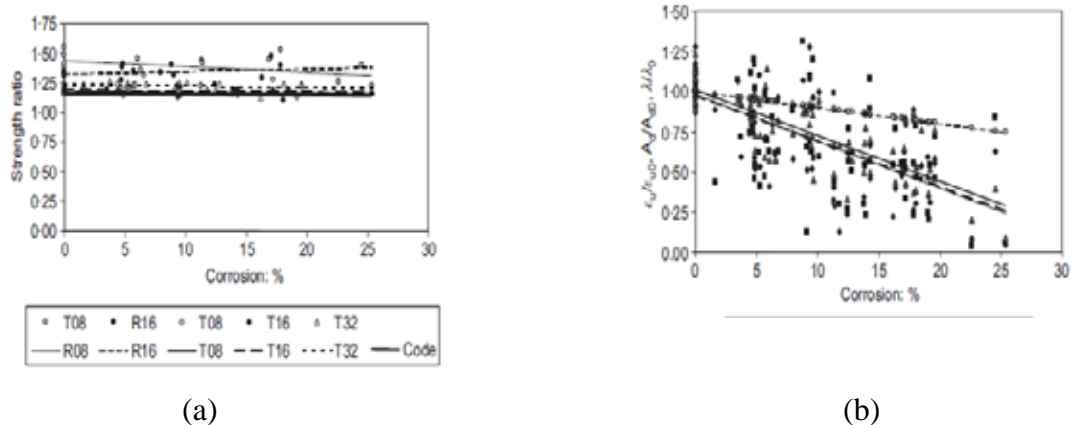


Figura 5: Dispersión de los valores obtenidos para la ductilidad y la relación de esfuerzos en barras desnudas de acero ante los efectos de la corrosión.

Fuente: Du *et al* (2005). *Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars*.

En su mayoría, las propiedades de los materiales tienen una explicación a nivel microscópico, pero se pueden comprender gracias a que su naturaleza nivel macroscópico, por medio de diferentes pruebas y por la experiencia. Los ensayos se realizan utilizando diferentes muestras de los materiales a estudiar y empleados equipos estandarizados que permiten definir estimaciones precisas de varias características que definimos, como la resistencia del material, la ductilidad y la tenacidad. Estas propiedades son mutuamente dependientes, y tienen utilidad para ayudarnos a establecer las cualidades de un material en específico. No se puede decir, como ya se había mencionado que estas son propiedades mecánicas separadas e independientes.

En este sentido, la propiedad más antigua que hemos definido es la resistencia del material, la cual podemos definir de acuerdo a dos capacidades, las cuales son la resistencia a la compresión y a la tracción. Como se había mencionado la resistencia a la tracción, es una de las propiedades mecánicas más importantes al momento del diseño de alguna estructura de construcción, ya que define el punto de rotura de un material bajo tensión, siendo este efecto más vulnerable que las fuerzas de compresión. Sin un conocimiento claro de este límite no es posible diseñar una estructura que se

encuentre dentro de los márgenes preestablecidos de seguridad con la fiabilidad adecuada.

Es necesario, al momento de estudiar los efectos de la corrosión sobre las propiedades de un material, que se estudien dos partes del problema, la naturaleza de las propiedades mecánicas de los metales y la influencia de la corrosión en dichas propiedades.

2.2.3.1 La naturaleza de las propiedades mecánicas de los materiales

Gran parte de las propiedades que se han abordado en esta investigación son características de los aceros, aleaciones de aluminios y metales de construcción, empleados en el diseño ingenieril. Para explicar estos mecanismos y su interacción, se valdrá de un ejemplo como el acero para construcción.

Para tratar de explicar estas características, se dividirá en dos niveles, la red cristalina de un metal que se encuentra dispuestas en diversos patrones, generalmente en cubo, no siendo el único patrón existente, y a nivel de grano como estructura cristalina compuesta de un gran número de redes individuales. Estos granos pueden tener diferentes tamaños, a menudo a un nivel microscópico.

Es suficiente con decir que estas redes no son perfectas, ya que en algunas ocasiones pueden faltar átomos, o se sustituyen con otros átomos (defecto de sustitución), o hay átomos atrapados dentro de la red (defecto intersticial), teniendo efectos diferentes pero significativos en las propiedades del metal. De hecho, son estas imperfecciones las que permiten la modificación de las características de un metal mediante la aleación y el procesamiento mecánico y térmico, pero estos defectos son individualmente menos visibles que a nivel de grano.

La microestructura de un material está lejos de ser homogénea, incluso a nivel microscópico. Los defectos cristalinos pueden permitir flujo de material o atraparlo y convertirse en un obstáculo para prolongación y formación de grietas, además pueden ser responsables de tensiones residuales o internas en el material. Además de proveer la composición química de un material, estas estructuras reticulares y no homogéneas

son las responsables de la gran variedad de propiedades que conocemos de los materiales.

Sería prácticamente imposible estudiar cada celosía de un metal e intentar establecer sus propiedades en relación a esta, por esta razón es más factible estudiar la microestructura a nivel granular. Estos granos son multifacéticos con diferentes formas posibles, estructura interna y tamaño, influyendo todo esto en las propiedades mecánicas del material de cierta manera. En términos generales, mientras más pequeño es el grano mejor son las propiedades mecánicas: esta es la razón por la cual, generalmente, los aceros de alta resistencia tienen una microestructura muy fina.

La resistencia a la tracción por definición es “la resistencia del material a romperse bajo tensión”. En términos de mecánica, esto significa que la resistencia a la tracción es la capacidad que posee un material de soportar una carga antes de alcanzar su punto de ruptura. Existen diferentes modos de rotura del material; dependiendo de la forma de la ruptura el material puede clasificarse en dúctil o frágil. Si existe una deformación plástica antes de la falla, entonces se dice que el material es dúctil, mientras que, si no existe deformación previa, es una fractura de material frágil.

A nivel atómico, podemos definir a la resistencia a la tracción como las fuerzas de atracción entre los átomos y las redes que se oponen a las fuerzas externas que afectan al material en dirección del ataque de dichas fuerzas.

2.2.3.2 Influencia de la corrosión en las estructuras de los materiales

Como ya se había establecido, la corrosión es una degradación electroquímica de un material por efecto de las acciones del medio ambiente sobre este. En el caso de los aceros, esto se debe a la presencia de oxígeno o un electrolito, como el agua o agua salada, que son inevitables en ambientes marinos o tuberías de agua. En teoría, los recubrimientos, los ánodos de sacrificio o la pasivación deberían disminuir o mitigar por completo el efecto de este fenómeno, sin embargo, factores como la temperatura, cargas variables, vibración y la actividad microbiana, reducen en gran medida la efectividad de estos métodos de protección. Los efectos de corrosión en la propagación de la grieta son muy significativos.

Las propiedades mecánicas de los aceros se ven afectadas por la corrosión por dos mecanismos, los cuales son bastante comunes y se observan a diario, como son la corrosión uniforme y por picadura, lo cual provoca una pérdida en la masa de la pieza de forma uniforme o en regiones específicas, y por consiguiente disminuyendo el área transversal de la misma. Este fenómeno produce que las cargas que puede soportar la pieza de manera segura disminuyan, aumentando el riesgo de accidentes. La corrosión uniforme, como su nombre lo indica es un tipo de degradación que se extiende por toda la superficie del material de manera uniforme, mientras que la corrosión por picadura se debe a los efectos de celdas galvánicas presentes en la microestructura del material generalmente ubicadas en los límites de grano, lo cual produce una rotura de la capa de pasivación y una corrosión altamente localizada y agresiva.

En el caso de la corrosión uniforme evaluar su influencia en la resistencia estructural, se debe establecer la disminución de la sección transversal y la pérdida de peso de la placa o viga en estudio, y calcular la tensión para una nueva carga dada y nueva sección transversal reducida del miembro de acero. Para el caso de la corrosión por picadura, se vuelve más complejo este estudio, donde los campos de tensión localizados tienen mayor influencia en los efectos, afectando directamente la resistencia a la tracción del material en sí.

Si bien, el efecto de la corrosión sobre la resistencia a la tracción final de un material es bastante marginal, existe una fuerte correlación entre la corrosión y una reducción de la ductilidad y aumento de la fragilidad del material, que a su vez puede cambiar el modo de falla de un dúctil a un material frágil con falla más peligrosa. Además de esto, la reducción progresiva de la sección transversal y del efecto concentrador de tensión causada por la corrosión puede influir en gran medida en la capacidad de carga del miembro en particular y la estructura en conjunto.

Existen diversos estudios experimentales en los que se han realizado ensayos de tracción a barras después de haber sido expuestas a diversos procesos de corrosión. Sin embargo, en la mayoría de estos estudios, las propiedades mecánicas obtenidas se

relacionan únicamente con el llamado grado de corrosión, que indica la pérdida de material de las barras. A la vista de la sensibilidad de los parámetros mecánicos de las armaduras frente a los efectos de la corrosión localizada, este enfoque se considera insuficiente y debería completarse por un análisis explícito de la corrosión localizada y de sus consecuencias sobre las prestaciones mecánicas.

Para comprender mejor el problema es indispensable llevar a cabo un estudio numérico. Concretamente, se debe analizar la influencia de las características geométricas de una picadura por corrosión en las propiedades mecánicas de una barra de acero de armar. La reducción porcentual de la deformación bajo carga máxima en barras corroídas, gracias a varios estudios se determinó como muy considerable.

Existe consenso en que menor es la ductilidad de alguna barra cuanto más localizado es el ataque por corrosión, lo que generalmente, se relaciona con la concentración de las deformaciones plásticas en las zonas con mayores profundidades de ataque. Sin embargo, en los mencionados trabajos no se realiza ninguna caracterización del grado o del tipo de corrosión localizada que permitiría explicar los fenómenos que gobiernan la pérdida de la ductilidad de las barras.

Los diferentes tipos de corrosión pueden tener un efecto muy significativo en un elemento estructural, lo que significa que estos efectos se pueden estudiar caso por caso, haciendo más lenta la comprensión de los problemas generados por este fenómeno. Existe gran peligro al no poseer un control sobre los efectos de la corrosión, incluso aquella considerada benigna, por lo que esto se debe tener en cuenta al diseñar, construir y realizar mantenimiento a estructuras que sean propensas a la corrosión.

2.2.4 Corrosión bajo tensión (CBT)

La corrosión bajo tensión o *stress corrosion cracking* es un fenómeno producido cuando un elemento se encuentra sometido a cargas que lo esfuerzan y además se encuentra en presencia de un medio corrosivo. Las fracturas producidas en este tipo de corrosión son efecto de las cargas estáticas de tracción a la que está sometido un material, este efecto de fractura se mencionara con más detalle posteriormente.

En la 8va edición de la revista de metalurgia titulada *Shot Pening Aplicaciones* (2001; p.29), la empresa *Metal Improvement Company, inc* establece 3 factores para que se pueda producir la CBT (ver figura 6), entre ellos esta: la tensión de tracción, la sensibilidad de los materiales y el ambiente corrosivo.

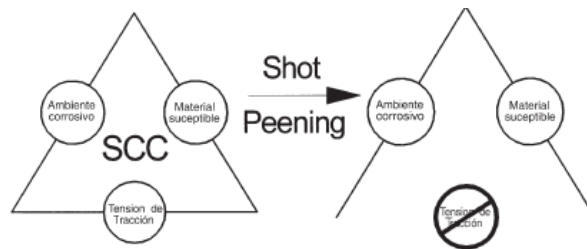


Figura 6: Triángulo de corrosión bajo tensión.

Fuente: *Shot penning aplicaciones*. 8va ed. (2001)

En este proceso de corrosión bajo tensión deben estar presente todos los lados del triángulo, ya que, si se elimina uno de ellos, el fenómeno desaparece. Por esta razón, no todos los materiales son susceptibles a la corrosión bajo tensión, y en los casos en donde existiese *shot penning* la tensión a tracción se elimina por lo que el triángulo queda incompleto como se muestra en la figura 6.

Esta revista nos muestra una lista parcial de las aleaciones más susceptibles a rotura por corrosión con esfuerzos. Estos se muestran a continuación:

Aceros inoxidable austeníticos (ver figura 7).

Ciertas aleaciones de la serie 2000 y 7000

Ciertas aleaciones de base níquel

Ciertos aceros de alta resistencia

Ciertas aleaciones de cobre.

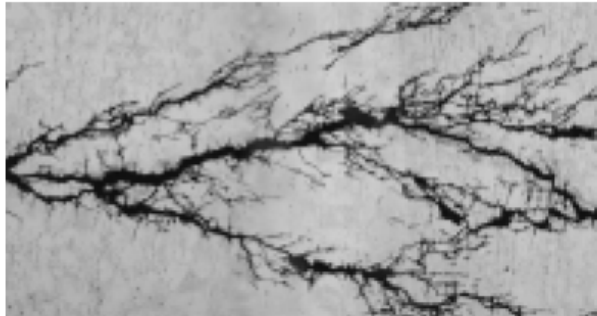


Figura 7: Rotura por corrosión bajo tensión en acero inoxidable austenítico.

Fuente: *Shot penning aplicaciones*. 8va ed. (2001).

2.2.4.1 Shot Pennig

Como apartado especial es importante mencionar este proceso de deformación como método para minimizar la aparición de grietas en la superficie de un material y la eliminación de los riegos de corrosión bajo tensión. Este proceso consiste en la deformación superficial de un material con el empleo de pequeñas bolas que aplican un esfuerzo y dejan una marca tipo “cráter” en la superficie, esto genera que el material cree esfuerzos residuales de compresión alrededor de la misma (ver figura 8), y como es bien sabido las grietas no se “inician ni se propagan en volúmenes de compresión” (MIC, 2001), por lo que se disminuyen los riegos de fractura por fatiga y la corrosión por esfuerzos tensionantes.



Figura 8: Proceso de deformación por *shot pennig* y volumen de esfuerzos residuales.

Fuente: *Shot penning aplicaciones* 8va ed (2001)

2.2.5 Efecto de la concentración de esfuerzos en la corrosión de estructuras metálicas

Antes de hablar de los efectos que tienen los concentradores de esfuerzos en la corrosión, es primordial que se entienda que es un concentrador de esfuerzos.

Mongonon (2001) define al concentrador de esfuerzos como “una relación entre el esfuerzo máximo que puede soportar un material y el esfuerzo al que se encuentra trabajando el área transversal de referencia de la pieza” (p. 151). Este valor se suele representar como K_t . En este sentido, se puede mencionar que este factor es una cantidad física, que expresa las fuerzas internas entre las partículas presentes en cualquier material continuo bajo el efecto de un esfuerzo presente en la sección de dicho material. Cuando la distribución de estas fuerzas es uniforme en toda el área de la sección transversal el material estas fuerzas internas suelen superar al esfuerzo aplicado, puesto que existe un *flujo uniforme de tensión*.

De acuerdo con esto, se puede intuir que al haber cambios repentinos de sección transversal o de forma del material se producirá una alteración en el flujo de tensión en el material de manera abrupta en esa sección de la pieza. Entonces, las esquinas, curvas, surcos orificios, cavidades e incluso defectos como grietas (superficiales o transversales) redirigen abruptamente el flujo de estrés y producen una concentración de estrés altamente localizada en mencionada discontinuidad. Esta además mencionar, que los esfuerzos nominales presentes en estos concentradores son mucho mayores que en cualquier otra sección de distribución uniforme.

Este factor de concentración indicará que tan concentrado es el estrés en estas áreas con relación a las secciones uniformes del material. Las discontinuidades siempre arrojarán valores de esfuerzo naturalmente mayor a los de referencia por los que el valor de K_t será mayor a 1, y mientras sea mayor entonces la intensidad de concentración de esfuerzos será mayor.

Ahora bien, como se había mencionado anteriormente la corrosión formada en cualquier material tiene el potencial de afectar las propiedades mecánicas de este, entre ellas la resistencia a la tracción, el límite de fatiga, la elasticidad, la tenacidad, entre otros. El daño resultante conduce a la disminución de la ductilidad del material, produciendo como consecuencia una fragilización del mismo. De esta manera, al conocer como se ve afectada una propiedad en específica, es posible la predicción del

comportamiento del material bajo los efectos de las cargas de operación y los fenómenos de corrosión, evaluando su rendimiento.

Entonces, si los concentradores aumentan el valor de esfuerzo nominal en la sección, y tomando en cuenta que la corrosión afecta el valor de carga máxima que puede soportar una pieza en una sección en específica, especialmente el fenómeno de corrosión por picadura, podemos concluir que la combinación de ambos puede ser dañina para la estructura, ya que un aumento en la carga nominal, sumado al efecto de disminución de la carga máxima del material por efecto de la corrosión podría producir de manera acelerada una falla en la estructura. Además de esto, la corrosión por picadura produce una gran concentración de esfuerzos en las áreas circundantes de la zona afectada, es decir, no tan solo afecta a las zonas concentradoras de esfuerzos de diseño, sino que también ella misma se convierte en un concentrador de intensidad de estrés.

2.2.5.1 Concentración de esfuerzos y propagación de la grieta.

Es necesario, que se aborde el tema de propagación de grietas por efectos de la corrosión. Muchos estudios de materiales han llegado a una conclusión y es que una de las propiedades que se ve afectada, y que ya se había mencionado anteriormente, es la tenacidad a la fractura. Mongonon (2001) en su texto define a esta como “la propiedad de los materiales que se oponen a la propagación de estas grietas” (p.151). Por otro lado, es fundamental que se entienda que todo material tiene defectos o grietas, y estos deben ser considerados al momento del diseño.

La tenacidad a la fractura es una propiedad mecánica análoga al límite de fluencia. Cuando un material es ensayado por tensión soporta una intensidad de esfuerzo presenta una deformación elástica y no es hasta el momento que el esfuerzo aplicado sobrepasa su límite de cedencia que este comienza a deformarse permanentemente. Así mismo, el esfuerzo de fluencia puede considerarse como un criterio de falla indeseado en aplicaciones de construcción. Cuando el material presenta una grieta, las cargas de trabajo producen un esfuerzo global, el cual a ser aplicado en forma opuesta a la grieta entonces este se intensifica en el extremo de la grieta

produciendo que esta tienda a alargarse o aumentar de tamaño. Es de esta manera que funciona la mecánica de la fractura, y se modela matemáticamente para el análisis de la siguiente manera:

Si consideramos una grieta cuya longitud es igual a $2a$, la cual se encuentra en una placa de área transversal infinita, los esfuerzos locales presentan la siguiente forma

$$\sigma_{\text{local}} = \frac{\sigma_{\text{apl}} \sqrt{a}}{r} \times f(\theta) \quad (11)$$

donde σ_{apl} es el esfuerzo global aplicado, r es la distancia radial desde el extremo de la grieta y θ es el ángulo respecto al plano de la grieta. Es importante recordar que el esfuerzo local se ubica en el extremo de la grieta. El numerador de la ecuación 11, es lo que conocemos como *factor de concentración de esfuerzos*, y se le aplica un factor geométrico para considerar cualquier estructura o forma de la placa en estudio.

Según Budynas y Nisbet (2008) el factor de concentración de esfuerzo es útil para el cálculo de carga promedio que se requiere para el inicio de la deformación plástica, sin embargo, se encuentra limitados a estructuras para las que se conocen todas sus dimensiones con precisión. Como se puede observar, mientras más pequeña sea el radio de la fractura o grieta, la concentración de esfuerzos tiende a infinito, lo que hace casi inútil la aproximación del factor de concentración de esfuerzos en casos en donde o se conoce las dimensiones son desconocidas en una parte.

Mientras el material sea dúctil, el análisis de la fractura se realiza de esta manera, ya que estos moderan las grietas agudas, de manera que las grietas ocurren en un esfuerzo promedio del orden de la resistencia a la fluencia, por lo que el diseñador se encuentra preparado por esto.

Es precisamente en este punto donde se encuentra el estado crítico del material al enfrentarse a la corrosión. Como se había mencionado anteriormente, el fenómeno corrosivo afecta directamente la ductilidad de los materiales, fragilizando la zona dañada; además, las grietas al ser concentradores de esfuerzo son particularmente sensibles a la corrosión. Al iniciarse el fenómeno de corrosión en los alrededores de la

discontinuidad y en la grieta misma, la fragilización como efecto de la corrosión, produce un efecto favorable para el crecimiento de la grieta, produciendo que al incrementarse los esfuerzos nominales en el extremo de la discontinuidad este alcance el límite de fluencia por efectos de daño por corrosión y esta se propague generando fallas en el elemento estructural.

En este mismo sentido, podemos mencionar que las grietas se nuclean fácilmente de los hoyos formados debido a la corrosión por picaduras. Esto produce, igualmente, una concentración de estrés excesivas alrededor de estas áreas dañadas, produciendo un incremento del K_t , superando el valor de e1. Esto nos indica una clara sobrecarga en la ubicación especificada, por lo que se debe considerar las tensiones máximas de trabajo en la estructura y el tratamiento del daño ocasionado por la corrosión.

2.2.5.2 Agrietamiento por corrosión ante carga estática

Los elementos sometidos a cargas constantes y continuas en ciertos entornos que tienen cualidades altamente corrosivas suelen desarrollar grietas de gran importancia con el tiempo, a este fenómeno se le llama agrietamiento por corrosión con esfuerzos. Entre los ejemplos de tales elementos se encuentran los resortes de puertas, resortes de relojes, arandelas de seguridad, cables marinos y de puentes y otras partes con alta intensidad de estrés, que se encuentran expuestas a ambientes o elementos muy corrosivos. El esfuerzo, el entorno, el tiempo y la estructura de aleación son factores de influencia en el agrietamiento, y cada factor acelera la influencia de los otros.

Fontes y Nistad (2013) establecen que el agrietamiento por corrosión bajo tensión es similar a la corrosión por picaduras, la cual se menciona anteriormente como un tipo de corrosión altamente concentrada y selectiva a zonas vulnerables donde la capa de pasivación ha sido destruida. De cualquier manera, el agrietamiento por corrosión siempre inicia por factores mecánicos y la formación de pequeñas grietas, las cuales tienden a repasivarse creando una capa de óxido protector muy rápidamente.

En los casos en donde la repasivación no ocurre, es donde comienza el proceso de corrosión similar a la corrosión por picaduras, en donde la apertura de la grieta actúa de forma catódica y el extremo de esta de forma anódica, promoviendo el aumento de tamaño de la misma. Es necesario destacar que, por ser bajo esfuerzo, las grietas producidas en este proceso son perpendiculares a la dirección de la aplicación del esfuerzo.

En la figura 9 se puede observar un análisis de una placa sometidas a esfuerzo y en contacto con un electrolito, y se puede observar que la zona más oscura, la cual posee el mayor esfuerzo se comporta anódicamente, favoreciendo de esta forma a la corrosión en esta zona conforme aumenta el esfuerzo en la misma.

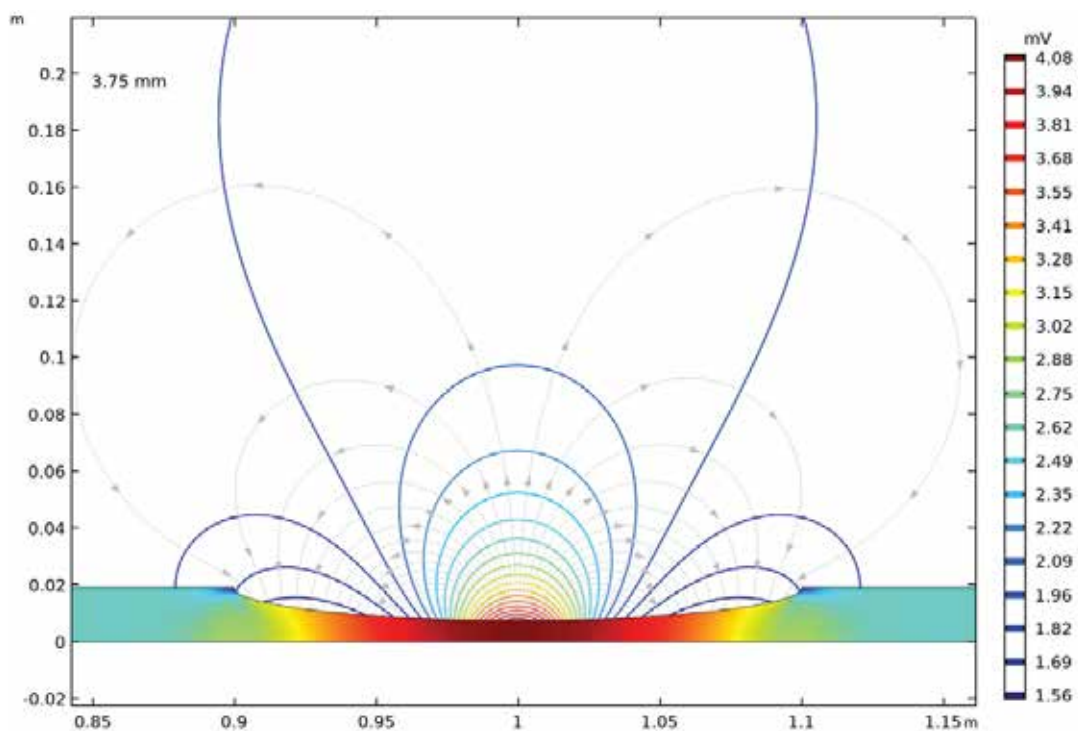


Figura 9: Placa de metal bajo esfuerzo en contacto con un electrolito.

Fuente: Fontes y Nistad (2013). *Modeling corrosion and corrosion protection*.

Existen ensayos de esfuerzo-tiempo en probetas en entornos corrosivos, con el propósito de determinar el valor de la tenacidad de la fractura. La primera descripción científica data de 1865-1870, este estudio fue realizado en calderas de vapor de acero

dulce en contacto con medios alcalinos, y por medio de este primer estudio se fueron dando ciertas características para este tipo de corrosión, estableciendo que es un efecto en conjunto mecánico y electroquímico. Si se elimina uno de estos el problema desaparece.

Además de esto, las aleaciones son más susceptible que los metales, con excepción del cobre, y el agrietamiento se produce en ciertas condiciones del medio, si existe una concentración muy alta no ha de ser considerada. Como se había mencionado, aunque el material sea dúctil, la fractura siempre será frágil debido al efecto de la fragilización por efecto de la corrosión presente en la fractura; sin embargo, existe un umbral de tensión por debajo del cual el fenómeno no se produce, pero rangos de potencial electroquímico pueden favorecer el fenómeno.

Como se había mencionado el fenómeno es tipo conjunto electroquímico-mecánico, y la forma de propagación de la grieta se produce por la tendencia hacia uno de estos dos mecanismos. En el caso del mecanismo electroquímico, se produce por una rotura de la película pasivante como consecuencia de las altas densidades de corrientes efecto de la deformación; las velocidades de propagación en este caso podrían alcanzar hasta 1 mm/h. Por otro lado, el mecanismo mecánico es favorecido por factores electroquímicos se produce por la acumulación de tensión en el vértice de la cavidad; aunque la tensión no logra alcanzar la tensión de rotura, está presente el efecto de la fragilización por efecto de la corrosión, que ejerce una influencia en el crecimiento de la discontinuidad.

2.3 Definición de términos básicos

Celosía: Enrejado tupido hecho con listones de madera, hierro u otro material que se pone en las ventanas u otras aberturas, especialmente para poder ver a través de él sin ser visto.

Deformación unitaria: la deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos externos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o a la ocurrencia de dilatación térmica.

Difusión: La difusión es un proceso físico irreversible, consiste en el flujo neto de átomos, iones u otra especie dentro de un material, las partículas se mueven de una región de alta concentración a un área de baja concentración hasta obtener una distribución uniforme.

Electrolito: es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.

Electroneutralidad: es el estado de tener exactamente el mismo número de cargas eléctricas positivas y negativas (iónico y electrónico), es decir, de ser eléctricamente neutro.

Límite elástico: es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

Límite último: Es el valor máximo del esfuerzo de ingeniería que se puede aplicar sobre el material.

Tensión residual: son esfuerzos que quedan en un material sólido después de que la causa original de los esfuerzos ha sido removida.

Ductilidad: es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

La modalidad de la presente investigación es de tipo proyecto factible, Pallella y Martins (2010) definen a este tipo de investigación como aquella que “consiste en elaborar una propuesta viable destinada a atender necesidades específicas, determinadas a partir de una base diagnóstica” (p.91), en este sentido, al ofrecer una propuesta en la mejora del diseño de las estructuras, por medio del diagnóstico del comportamiento en el tiempo de las estructuras metálicas que se someten a corrosión, se pretende atender la necesidad de incrementar la vida útil y la seguridad de las estructuras a través de una correcta toma de decisiones en cuanto al diseño y protección de las mismas, basadas en información coherente y fiel, por los que las características se adaptan a este tipo de investigación.

3.2 Diseño de la Investigación

El presente trabajo se basó en una investigación documental, de la cual Arias (2012) establece que:

Es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos. (p. 27).

Dicha investigación se realizó la recolección de datos con respecto al fenómeno a estudiar y su efecto en las estructuras, efectuando las observaciones y análisis de datos arrojado por las propiedades mecánicas mediante el uso del software computacional Autodesk Inventor 2018, para llegar a un modelo de predicción de corrosión en las estructuras de estudio.

3.3 Nivel de la investigación

El siguiente trabajo de investigación tuvo como objetivo predecir los efectos de la corrosión en la capacidad de carga de las estructuras de acero ubicadas en la costa de los estados Carabobo y Falcón. Se establece que:

La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere. (Arias, 2012, p.23)

Debido a esto, es que la metodología empleada en esta investigación se llevó a cabo bajo un esquema descriptivo, ya que el estudio permitió estudiar la variación del comportamiento mecánico en las estructuras de acero por efectos de la corrosión mediante la aplicación de un análisis computacional y así generar a su vez resultados comparables con las correlaciones de otras fuentes de trabajo.

3.4 Población y muestra

Según Balestrini (2006), define que la población “un conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos, que presentan características comunes” (p.137). Así mismo Balestrini (2006) señala que “una muestra es una parte representativa de una población, cuyas características deben producirse en ella, lo más exactamente posible” (p. 141). Por lo que para este trabajo de investigación tanto la población y la muestra constaron de lo mismo, las estructuras de acero estructural A36 ubicadas a lo largo de las costas de los estados Carabobo y Falcón.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Según Tamayo y Tamayo, M (1997): “La recolección de datos depende en gran parte del tipo de investigación y del problema planteado para la misma” (p.121). Así mismo Tamayo y Tamayo (1997) define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p. 69).

Las fuentes secundarias son aquellas investigaciones realizadas con anterioridad y que han sido recolectadas y analizadas con el propósito de sustentar las bases teóricas

y la, ejecución de la investigación. Según Sabino (2004): los datos secundarios “Son registros escritos que proceden también de un contacto con la práctica, pero que ya han sido recogidos y muchas veces procesados por otros investigadores” (p. 115). En el presente trabajo de investigación se utilizó la técnica de revisión bibliográfica, recursos electrónicos, para la recolección de datos. Dentro de este análisis bibliográfico, se utilizaron técnicas como lo es la observación documental, presentación resumida, resumen analítico y análisis crítico. Mientras que el instrumento que se empleó fue la computadora para la obtención, registro y almacenamiento de la data.

3.6 Fases de la investigación

Fase I: Establecer el comportamiento de la atmosfera corrosiva de las costas de Falcón y Carabobo, por medio de la recopilación de información previa, recabando los datos necesarios para realizar la simulación por computadora, y a su vez, establecer los parámetros de control de las capacidades de carga del elemento.

Con la recopilación y documentación de información, existente en investigaciones y estudios previos, se pretende establecer el comportamiento de la atmosfera de la zona costera de los estados Carabobo y Falcón a lo largo del año, estableciendo los parámetros ambientales necesarios para calcular la corrosión en función del tiempo. Para esto, se extraerán datos relevantes y necesarios, tales como humedad relativa, tiempo de humectación, temperatura media, cloruros y sulfatos disueltos, entre otros., como datos para ser empleados en fases posteriores.

Se procedió al empleo del software computacional de diseño y simulación Autodesk Inventor 2018, con el fin de modelar la probeta normalizada, en el material a estudiar, y se simuló el ensayo mecánico a tracción universal, estableciendo de esta manera los parámetros de carga iniciales, para servir de comparación con los obtenidos en fases posteriores. Para realizar esto, se tomó como guía la Norma ASTM E8/E8M, que establece las dimensiones de la pieza y la forma del ensayo destructivo.

Fase II: Realizar el modelado matemático de los procesos corrosivos, determinando las velocidades de corrosión y la deposición de óxidos en el ambiente especificado, empleando modelos de cálculo existentes.

Con los datos recolectados en la fase anterior, se realizó la caracterización y el modelado matemático de la corrosión en la zona con el fin de determinar la velocidad de corrosión debido a los efectos ambientales, las corrientes generadas en el material y la pérdida de masa de la pieza, con la aplicación de ecuaciones y cálculos numéricos generalizados y aplicados a cada zona en específico. Estos datos en conjunto permitieron realizar el estudio y análisis del desenvolvimiento de las propiedades mecánicas de los aceros estructurales a través del tiempo.

Para este cálculo se empleó un modelo matemático ambiental normalizado, que toma en consideración el efecto de las poluciones y contaminantes del ambiente en estudio, anudado a esto, se aplicaron estudios electroquímicos de corriente directa, con la aplicación de la ecuación de Tafel para el cálculo de la corrosión por efecto de la capa de electrolito formada en la superficie, efecto de la humedad del ambiente, y la corriente generada por la difusión de oxígeno en mencionada película electrolítica.

Para esta fase, se empleó el software numérico Microsoft Excel que permitió el cálculo de la velocidad de corrosión y la correspondencia de esta con la variación de las capacidades mecánicas de la pieza.

Fase III: Establecer el efecto de la corrosión en la capacidad de carga de la pieza, relacionada al decremento del diámetro transversal y desplazamiento de masa por efecto de la corrosión ambiental, suponiendo este fenómeno uniforme sobre la superficie de la misma.

Una vez establecida la velocidad de corrosión mensual y anual de cada zona, se procedió a aplicar las variaciones de diámetro, según la pérdida producida por la corrosión en el momento del estudio. Al realizar dichas variaciones, se sometió nuevamente la probeta al estudio mecánico de tracción en simulación y se comparó con los parámetros iniciales de control, realizando iteraciones para el valor de corrosión acumulado en el tiempo, con el fin de observar el cambio producido por el fenómeno

electroquímico en la capacidad de carga a tracción de la pieza. Este estudio se realizó para efectos de 1 año y de 10 años, con el fin de observar los efectos a corto y largo plazo. Estos datos serán recolectados en tablas para su posterior uso.

Fase IV: Establecer gráficas en el tiempo del comportamiento mecánico del elemento, con proyecciones en años en el futuro, y analizar los resultados.

Para observar, realmente, la distribución de los datos será plasmado en gráficos en función del tiempo para apreciar las variaciones en comparación a los datos de control. El gráfico de los datos obtenidos se realizó con la ayuda del software computacional Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Establecer el comportamiento de la atmosfera corrosiva de las costas de Falcón y Carabobo, por medio de la recopilación de información previa, recabando los datos necesarios para realizar la simulación por computadora, y a su vez, establecer los parámetros de control de las capacidades de carga del elemento.

Como fase inicial, se estableció como se desenvuelve la atmosfera corrosiva a lo largo de un año en la zona especificada, con el fin de poder obtener los parámetros necesarios del fenómeno de corrosión, esto para que fuera posible la simulación con la mayor fidelidad posible las condiciones del ambiente en estudio, y poder proveer una información acertada y fiel a la realidad.

La zona en estudio se caracteriza por ser una zona marítima, altamente corrosiva, y con presencia de cloruros, los cuales facilitan el desplazamiento de los electrones en el medio y en material, favoreciendo la producción de óxidos en la estructura. Existen diferentes factores que pueden promover o aumentar la velocidad de corrosión en el material y, en consecuencia, la pérdida de masa en el mismo en un tiempo menor, afectando directamente la integridad de la estructura y la seguridad de la misma.

Como se había mencionado anteriormente, la zona en estudio es de tipo marítima, por lo que existe la presencia de agentes disueltos en la atmosfera como el NaCl, el cual ingresa en el aire desde el mar. Además de esto, en algunas zonas, existe la presencia de industrias, por lo que existe un porcentaje de contaminación atmosférica, lo que da como resultado la incidencia del dióxido de azufre (SO_2), que proviene de la quema de combustibles sólidos y líquidos.

Aunado a esto, bien sabemos, que la corrosión atmosférica se da por la capa electrolítica que se forma en la superficie del metal, por lo cual es importante que se conozca el nivel de humedad en la zona, además del tiempo en el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica, esto se conoce como Tiempo de Humectación (TDH), esto se debe a que para que la corrosión se produzca es vital que exista la presencia de agua como medio conductor y mientras más humectados estén los poros entonces la resistividad se reduce y la velocidad de corrosión aumenta. Además, el espesor de la película electrolítica es un factor que también afecta a la velocidad de corrosión, en la figura 10 se muestra cómo varía la tasa de corrosión en función del espesor de la capa de electrolito.

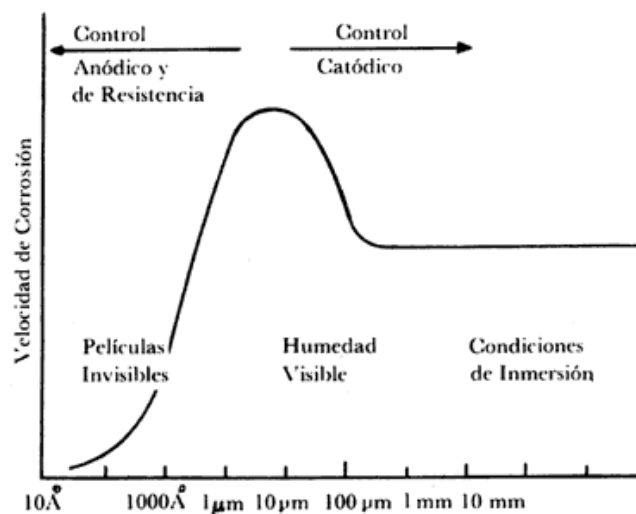


Figura 10: Influencia del espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión

Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm

En esta imagen, podemos observar como a espesores pequeños, la corrosión no se favorece, debido a que la resistencia óhmica de la capa del electrolito es muy alta y la disolución del metal es muy difícil. A medida a que se incrementa el espesor, se observa una disminución en la resistividad y en la polarización catódica, hasta llegar a su punto máximo, y luego de allí comienza un decremento en la velocidad de corrosión

hasta que esta comienza a estabilizarse, llegando a ser constante en condiciones de inmersión.

Además de esto, como se menciona anteriormente, la humedad presente en la atmosfera, el tiempo de exposición, y los contaminantes disueltos en el ambiente diariamente, entre ellos el SO_2 por su gran incidencia en los valores de corrosión, producen un efecto favorecedor en la velocidad de corrosión, en la figura 11, se muestra esta relación. Donde se puede observar que mientras mayor sea la concentración de agentes contaminantes y el tiempo de exposición a la humedad se incrementa, entonces los valores de corrosión llegan a su máximo.

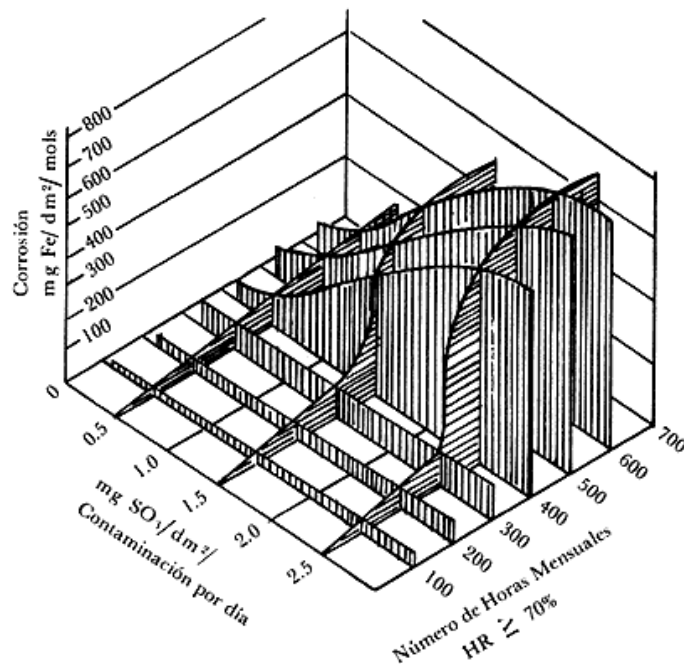


Figura 11: Relación de la corrosión del acero con la humedad y la contaminación atmosférica.

Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm

Es necesario establecer que, para la recopilación de los datos atmosféricos y la caracterización de la corrosión atmosférica se utilizó la información existente en páginas webs de meteorología e investigaciones previas. Los datos de corrosión

atmosférica calculados en investigaciones previas se incluyeron con el fin de que puedan servir de comparación en los resultados obtenidos por la simulación.

4.1.1 Recopilación de datos atmosféricos

Sabiendo esto, a continuación, se presentan los datos atmosféricos, temperatura media, TDH, Humedad Relativa, cantidad de dióxido de sulfato disuelto y cantidad de cloruros disueltos, a lo largo de un año, concernientes a tres (3) de los poblados más importantes de la zona costera de los estados Carabobo y Falcón (tablas 1, 2, 3). Estos datos presentados fueron tomados de la investigación realizada por D'Santiago (2019) quien, a su vez, recopiló la información de diferentes páginas dedicadas a la meteorología y posteriormente los datos fueron promediados.

Coro:

Tabla 1: Datos recopilados para la ciudad de Coro

Mes	Temp(°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ($\frac{mg}{m^2 d}$)	CL ($\frac{mg}{m^2 d}$)
Enero	27,45	69	0,04965753	0	45
Febrero	27,75	68,5	0,01426941	1,432	28
Marzo	28,25	67	0,00753425	1,432	28
Abril	28,75	69	0,01038813	1,432	28
Mayo	29,55	68,5	0,02773973	0,502	11
Junio	29,75	68	0,04794521	0,502	11
Julio	29,5	67,5	0,05479452	0,502	11
Agosto	29,95	67	0,05753425	1,281	17
Septiembre	30,1	67	0,05445205	1,281	17
Octubre	29,4	70,5	0,06324201	4,928	32
Noviembre	28,6	72	0,05981735	0,235	51
Diciembre	27,65	71	0,0533105	0,458	52

Fuente: D'Santiago (2019)

Puerto Cabello:

Tabla 2: Datos recopilados para la ciudad de Puerto Cabello.

Mes	Temp(°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ($\frac{mg}{m^2 d}$)	CL ($\frac{mg}{m^2 d}$)
Enero	26	81	0,04965753	0	42
Febrero	25,5	82	0,01426940	2,136	22
Marzo	26,5	83,5	0,00753424	2,136	22
Abril	26,5	84	0,01038812	2,136	22
Mayo	27	84,5	0,02773972	0,417	8
Junio	27	83,7	0,04794520	0,417	8
Julio	27,5	83	0,05479452	0,417	8
Agosto	27	82,5	0,05753424	0,67	14
Septiembre	28	82	0,05445205	0,67	14
Octubre	28	82,2	0,06324200	2,681	24
Noviembre	27	82,4	0,05981735	1,721	46
Diciembre	26,5	82,2	0,05331050	0,191	47

Fuente: D'Santiago (2019)

Punto Fijo

Tabla 3: Datos recopilados para la ciudad de Punto Fijo.

Mes	Temp (°C)	HR (%)	TDH (h/a)	S02 ($\frac{mg}{m^2 d}$)	CL ($\frac{mg}{m^2 d}$)
Enero	29	75	0,04965753	0	42
Febrero	31	72	0,01426940	1,432	22
Marzo	33	71	0,00753424	1,432	22
Abril	26	76	0,01038812	1,432	22

Mayo	30	77	0,02773972	0,502	8
Junio	34	76	0,04794520	0,502	8
Julio	32	74	0,05479452	0,502	8
Agosto	32	76	0,05753424	1,281	14
Septiembre	31	77	0,05445205	1,281	14
Octubre	33	78	0,06324200	4,928	24
Noviembre	30	78	0,05981735	0,235	46
Diciembre	30	77,5	0,05331050	0,458	47

Fuente: D'Santiago (2019)

4.1.2 Modelado de probeta y análisis de control

Para cumplir el siguiente paso en el estudio se establecieron las condiciones iniciales de las probetas, como dimensiones y carga máxima; posteriormente la probeta fue sometida a la simulación del ensayo de tracción, para tomar los datos iniciales de control. Las dimensiones de la probeta fueron establecidas en concordancia con las normas de ensayos de materiales de Sociedad Americana para Ensayo y Materiales, o ASTM, por sus siglas en inglés; en el apartado E8/E8M-13a, establecen las medidas normalizadas para las probetas que se destinan para realizar el ensayo universal de tracción, con el fin de que los datos arrojados por el ensayo puedan mantener un comportamiento estándar. El modelo computacional de la probeta utilizada en este estudio fue construido en el software computacional CAD/CAE, *Inventor Professional 2018*.

En la norma empleada para el estudio se establecen diferentes tipos de probetas de sección rectangular y circular, con diferentes dimensionamientos y diferentes formas de sujeción a la máquina de tracción universal. Para la selección del modelo a emplearse en este estudio, se determinó el modelo más comúnmente empleado con la mayor uniformidad en su superficie; este factor permitió escoger una probeta de sección circular, de agarre a presión, con superficie lisa y no roscada, esto debido a que en el entorno computacional no se contó con un agarre de tornillo, y estas

deformaciones superficiales podrían generar alteraciones en los resultados de la simulación, además de esto se seleccionó aquella de mayores dimensiones, proveyendo al estudio una mayor robustez en los datos y tiempo de estudio.

En la figura 12 se presentan la probeta normalizada de sección transversal circular en vista ortogonal y, posteriormente, en la figura 13 se observa el dimensionamiento de la misma de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M-13a (2013, p.08), con el fin de mantener los resultados lo más fiel posible a la realidad de los ensayos experimentales físicos.



Figura 12: Vista en isometría de probeta de área transversal circular

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

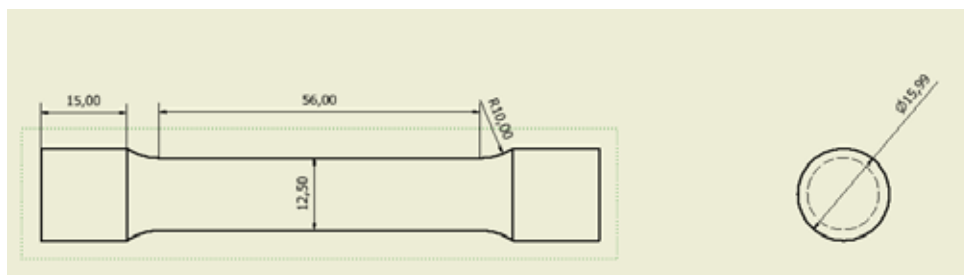


Figura 13 Dimensiones de la probeta de sección circular

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.1.3 Capacidad a tracción

Para poder evaluar el comportamiento mecánico de la probeta, se definió un parámetro de evaluación que permitirá observar el comportamiento en el tiempo en

función de la cantidad de material corroído. Este parámetro permitió evaluar la capacidad de carga de un material con respecto a la carga máxima de diseño de la pieza. Si bien, se conoce por la mecánica de materiales, propiedades como el límite de elasticidad, esfuerzo último y módulo de elasticidad, estas propiedades están definidas para cada material y son propias; las propiedades antes mencionadas no dependen de la forma o el tamaño de la pieza, son constantes y no tienden a cambiar con los efectos ambientales o con los cambios de forma en la pieza. La capacidad a tracción se definió como la capacidad máxima de un elemento para sostener una carga antes de fallar. Esta capacidad está relacionada al límite de elasticidad del material de la pieza y al área transversal de la misma. Es decir, mientras mayor sea el área transversal de un elemento mayor será su capacidad de sostener una carga en relación a su límite de elasticidad, como bien ya se sabe por el análisis de resistencia de materiales. Las variaciones de este parámetro en una pieza se presentan en números menores a la unidad, lo que representa que la capacidad de carga de la pieza ha disminuido hasta una cierta fracción de la carga original

Ahora bien, en un elemento cualquiera cuyas dimensiones varían por algún factor externo, producirá que su capacidad a tracción disminuya en proporción a su área transversal Disminuyendo la resistencia de la estructura.

La corrosión, como ya se sabe, es un fenómeno electroquímico que disminuye la cantidad de masa de un elemento por deposición de óxidos, y en consecuencia disminuye su área transversal. Una pieza metálica sometida a corrosión con el tiempo sufrirá una disminución de sus capacidades para sostener una carga. Estudiar este fenómeno no es tarea fácil, debido a que la corrosión se ve influenciada por muchos factores ambientales y de poluciones, por el viento, la concentración de sal en el ambiente, la exposición al sol, a la humedad, entre otros. Sin embargo, establecer un valor aproximado es posible, tomando en cuenta los factores más importantes que intervienen en la velocidad de la corrosión y el tamaño de la pieza.

En este estudio, para calcular la variación de este parámetro se tomó en cuenta la velocidad de corrosión producida en la película de electrolito sobre la superficie del

metal; esta velocidad de pende directamente del área superficial expuesta a la corrosión, y mientras más grande sea esta área, menor será penetración en el material, sin embargo, aumentara el nivel de deposición de óxidos.

4.1.4 Datos de control

Con el fin de estudiar el desenvolvimiento de la capacidad de tracción de la probeta que fue sometida al estudio, se realizó un ensayo de control, sometiendo a esta a una carga de control, con el fin de confirmar que los datos obtenidos analíticamente coincidieran con los arrojados por el programa de simulación. Para la selección de la carga de control, se tomó la carga máxima que puede soportar cada probeta de acuerdo al material y su área transversal, esto de acuerdo a la definición hecha previamente de la capacidad de tracción, la cual es nuestro objeto de estudio; en simulaciones posteriores la carga denominada como carga de control permaneció constante y es la empleada para simulaciones posteriores al sometimiento de la probeta al fenómeno corrosivo.

El factor de seguridad minino será el valor de control para determinar las variaciones de la capacidad de tracción de la pieza, la cual tomará valores de 0 a 1. Las comparaciones posteriores se realizaron con respecto a los valores de control. A continuación, se presentan los datos iniciales del material (tabla 4).

Tabla 4: Datos del material a aplicar al espécimen en simulación

Nombre	Acero, alta resistencia, aleación baja
General	Densidad de masa
	Límite de elasticidad
	Resistencia máxima a tracción
Tensión	Módulo de Young
	Coefficiente de Poisson
	Módulo cortante

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

En la figura 14, se muestran los resultados gráficos del estudio de control de tensión a tracción de la probeta de sección circular.

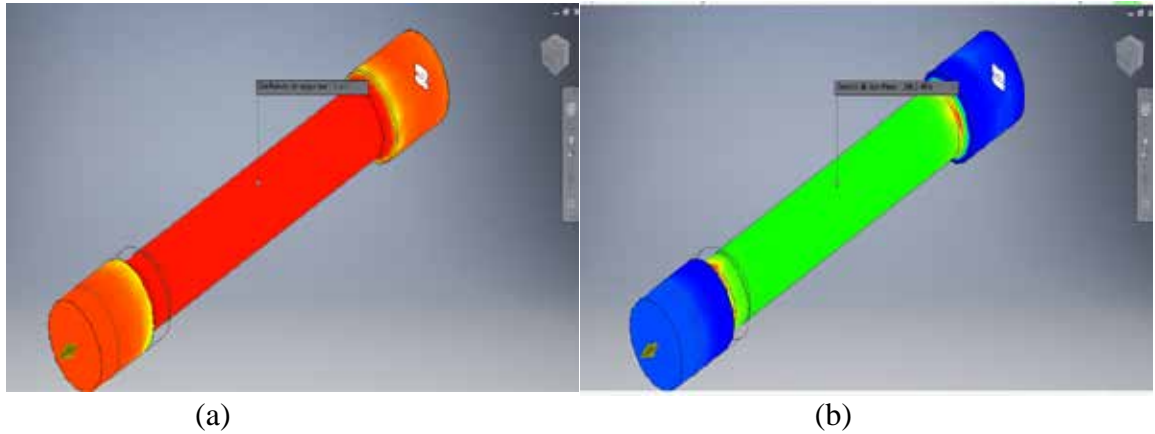


Figura 14: Evaluación de control para la probeta de sección circular.

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

En el estudio inicial de la probeta se obtuvo que la capacidad de tracción inicial de la misma alcanza a soportar un máximo de 33748 N en el punto del área reducida, en la figura 14a se observa que alcanza el límite de fluencia del material, por lo que el factor de seguridad tiende a ser 1 en el punto más crítico de la probeta, como se aprecia en figura 14b. Estos resultados establecieron los valores de control (tabla 5), dando a entender que la probeta posee una capacidad de tracción que alcanza los 33748 N de fuerza de tracción. Estos datos han de ser comparados con los que fueron obtenidos con los ensayos de la probeta sometida a corrosión.

Tabla 5: Recopilación de datos de ensayo de control

Nombre	Mínimo
Volumen	14547,6 mm ³
Masa	0,112688 kg
Tensión de Von Mises en área reducida	248 MPa
Coefficiente de seguridad en área reducida	1 su
Capacidad de carga (F)	30450 N

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.2 Realizar el modelado matemático de los procesos corrosivos, determinando las velocidades de corrosión y la deposición de óxidos en el ambiente especificado, empleando modelos de cálculo existentes

Para saber la velocidad de corrosión total sobre el metal, es necesario el cálculo de algunos factores que afectan a la misma, en función de los parámetros ambientales existentes en la zona. El cálculo de el espesor de la película de electrolito producto de la humedad es un factor importante debido a que, como habíamos observado en la figura 10, el espesor de la misma aumenta o disminuye la velocidad de corrosión. Además de esto, la humedad del ambiente interviene en factores como la disolución de oxígeno, la concentración de sal y en la corriente límite de intercambio de la reacción.

En este estudio, la velocidad de corrosión depende de la corriente producida por la película sobre la superficie del metal, y la producida por efecto de la concentración de las poluciones de contaminantes presentes en cada zona de estudio.

4.2.1. Cálculo de parámetros dependientes de la humedad relativa.

Chen, Cui y Kelly (2008), establecen de acuerdo a la bibliografía, los modelos matemáticos para el cálculo de parámetros como el espesor de la película de electrolito, la solubilidad del oxígeno, densidad de sal en la solución y concentración de sal en la solución del electrolito, entre otros parámetros indirectamente dependientes.

4.2.1.1 Cálculo del espesor de la película del electrolito.

Chen *et al* (2008), establecen la relación del espesor del electrolito con la densidad de carga de sal en sobre la superficie del electrodo, esta depende de la velocidad del viento y la dirección del mismo, sin embargo, en ambientes marítimos con humedades superiores al 60% se puede tomar igual a $0,0005 \text{ kg/m}^2$.

En este sentido, y tomando en cuenta que la humedad relativa de la zona en estudio, supera el 70%, se puede suponer una densidad de carga igual $0,0005 \text{ Kg}$ por cada metro cuadrado de superficie. Sabiendo esto, la ecuación del espesor de la película de electrolito toma la forma:

$$Wl = \frac{DD(24,9 + 14,8 \quad 22,58RH^2)}{5811,94 + 23909,82RH \quad 3291,21RH^2 \quad 57990,86RH^3 + 31576,8RH^4} \quad (12)$$

Donde Wl [m] es el espesor del electrolito, DD es la densidad de carga de sal [kg/m^2] y RH es la humedad relativa del ambiente. Teniendo en cuenta, en la tabla 6, 7 y 8 se presentan los valores mensuales del espesor del electrolito para cada ciudad del estudio.

La consideración de la carga de sal dentro del cálculo del espesor del electrolito se debe a que, a mayores valores de este parámetro, la superficie del metal se humedece con menores rangos de humedad en el ambiente, como lo mencionan Similion, Terryn, Dolgikh, y Deconicnk (2014) en su trabajo sobre el modelado de corrosión atmosférica.

Tabla 6: Espesor de electrolito, coro.

Meses	Espesor de Electrólito [μm]
Enero	1,38
Febrero	1,36
Marzo	1,33
Abril	1,38
Mayo	1,36
Junio	1,35
Julio	1,34
Agosto	1,33
Septiembre	1,33
Octubre	1,42
Noviembre	1,46
Diciembre	1,43

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 7: Espesor de electrolito, Punto Fijo.

Meses	Espesor de Electrólito [μm]
Enero	1,57
Febrero	1,46
Marzo	1,43
Abril	1,61
Mayo	1,66

Junio	1,61
Julio	1,53
Agosto	1,61
Septiembre	1,66
Octubre	1,71
Noviembre	1,71
Diciembre	1,69

Fuentes: Alvarado y Quevedo (2020).

Tabla 8: Espesor de electrolito, Puerto Cabello

Meses	Espesor de Electrolito [μm]
Enero	1,91
Febrero	1,98
Marzo	2,12
Abril	2,17
Mayo	2,23
Junio	2,14
Julio	2,07
Agosto	2,03
Septiembre	1,98
Octubre	2,00
Noviembre	2,02
Diciembre	2,00

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.2.1.2 Cálculo de corriente límite de intercambio de O_2 en el electrolito.

La velocidad de corrosión está controlada por el proceso de transferencia de carga en la interfaz electrodo/electrolito, esto según Genesca (s/a). En el caso del electrodo la densidad de corriente parcial se basa en su coeficiente de sobrepotencial, relacionado con el potencial de equilibrio del material, y la pendiente de Tafel del mismo, los cuales son datos experimentales tabulados, mientras que, en el caso la densidad de corriente en el electrolito en conjunto a esto, se ve limitada a la difusión y solubilidad del agente reductor, que en el caso de la corrosión ambiental es el oxígeno.

Por esa razón, el cálculo de este parámetro resulta de gran importancia, para determinar la velocidad de corrosión total que propicia la reacción de corrosión en la interfaz del metal y la película del electrolito. De acuerdo con Chen *et al* (2008), la

ecuación para el cálculo de densidad de corriente de intercambio limite tiene la siguiente forma:

$$I_{lim} = \frac{4FCd_{O_2}Sol_{O_2}}{Wl} \quad (13)$$

En donde F es la constante de Faraday, Wl es el espesor del electrolito, Cd_{O_2} es el coeficiente de difusión del oxígeno, y es dependiente de la concentración de cloruro de sodio, y tiene la forma:

$$Cd_{O_2} = ((0,0001464 C_{NaCl}) + 2,0511) \cdot 10^{-9} \quad (14)$$

$$C_{NaCl} = (25,12 RH + 25,253) \cdot (1823,2 + 814,38 RH) \quad (15)$$

Donde C_{NaCl} es la concentra de cloruro de sodio en mol/m^3 y cada factor de multiplicador en su ecuación corresponde a la densidad de sal en la solución y a la concentración de la solución correspondiente.

Y, por otro lado, en la ecuación 16, Sol_{O_2} representa la solubilidad del oxígeno en el electrolito, y tiene la forma:

$$Sol_{O_2} = 0,0003e^{6,59RH} \quad (16)$$

En las tablas 9, 10 y 11, se presenta el cálculo de estos parámetros, para cada mes, y para cada ciudad en estudio.

Tabla 9: Cálculo de parámetros para corriente limite, Coro.

Meses	Cd_{O_2} [m^2/s]	Sol_{O_2} [mol/m^3]	C_{NaCl} [mol/m^3]	I_{lim} [A/m^2]
Enero	5,89E-10	0,0283	9989,5724	4,6727
Febrero	5,61E-10	0,0274	10180,7506	4,3448
Marzo	4,76E-10	0,0248	10760,4223	3,4250
Abril	5,89E-10	0,0283	9989,5724	4,6727
Mayo	5,61E-10	0,0274	10180,7506	4,3448
Junio	5,32E-10	0,0265	10372,9517	4,0276
Julio	5,04E-10	0,0256	10566,1756	3,7211

Agosto	4,76E-10	0,0248	10760,4223	3,4250
Septiembre	4,76E-10	0,0248	10760,4223	3,4250
Octubre	6,72E-10	0,0312	9422,1750	5,7209
Noviembre	7,53E-10	0,0345	8863,9834	6,8656
Diciembre	6,99E-10	0,0323	9235,0883	6,0918

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 10: Cálculo de parámetros para corriente limite, Punto Fijo.

Meses	Cd_{O_2} [m^2/s]	Sol_{O_2} [mol/m^3]	C_{NaCl} [mol/m^3]	I_{lim} [A/m^2]
Enero	9,13E-10	0,0420	7775,2174	4,6727
Febrero	7,53E-10	0,0345	8863,9834	4,3448
Marzo	6,99E-10	0,0323	9235,0883	3,4250
Abril	9,65E-10	0,0449	7420,4783	4,6727
Mayo	1,02E-09	0,0480	7069,8306	4,3448
Junio	9,65E-10	0,0449	7420,4783	4,0276
Julio	8,60E-10	0,0394	8134,0480	3,7211
Agosto	9,65E-10	0,0449	7420,4783	3,4250
Septiembre	1,02E-09	0,0480	7069,8306	3,4250
Octubre	1,07E-09	0,0512	6723,2744	5,7209
Noviembre	1,07E-09	0,0512	6723,2744	6,8656
Diciembre	1,04E-09	0,0496	6896,0411	6,0918

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 11: Cálculo de parámetros para corriente limite, Puerto Cabello

Meses	Cd_{O_2} [m^2/s]	Sol_{O_2} [mol/m^3]	C_{NaCl} [mol/m^3]	I_{lim} [A/m^2]
Enero	1,22E-09	0,0624	5708,1544	15,3723
Febrero	1,26E-09	0,0667	5377,9639	16,3920
Marzo	1,34E-09	0,0736	4890,3497	17,8793
Abril	1,36E-09	0,0761	4729,8574	18,3559
Mayo	1,38E-09	0,0786	4570,3879	18,8191
Junio	1,34E-09	0,0746	4826,0301	18,0714
Julio	1,31E-09	0,0712	5051,8649	17,3917
Agosto	1,29E-09	0,0689	5214,4030	16,8953
Septiembre	1,26E-09	0,0667	5377,9639	16,3920
Octubre	1,27E-09	0,0676	5312,4168	16,5940
Noviembre	1,28E-09	0,0685	5247,0334	16,7951

Diciembre	1,27E-09	0,0676	5312,4168	16,5940
------------------	----------	--------	-----------	---------

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.2.1.3 Cálculo de densidad de corriente de corrosión

Conociendo la corriente de intercambio limite en el electrolito, es necesario establecer los valores de las densidades de corriente de intercambio tanto en el electrolito como en el electrodo, siendo este ultimo la superficie de ataque de la probeta. Para esto, se empleó el uso de datos tabulados conocidos de los elementos que intervienen en la reacción.

En la tabla 12 se muestran los datos recopilados para el estudio.

Tabla 12: Parámetros constantes para el cálculo de corrientes de intercambio.

Parámetro	Valor
Potencial de Equilibrio del Hierro (E_{OFe}) [V]	-0,535
Corriente de intercambio del Fe (I_{OFe}) [A/m ²]	0,056
Pendiente de Tafel, Fe (A_{cFe}) [mV]	-0,0258
Potencial de Equilibrio del O2 (E_{Oo}) [V]	1
Corriente de intercambio del O2 (I_{Oo}) [A/m ²]	1,00E-04
Pendiente de Tafel, O2 (A_{cO}) [mV]	-100

Fuente: Hillie (2001). *Ionic channels in excitable membranes. Current problems and biophysical approaches.*

En el cálculo de las densidades de corrientes de corrosión parciales se empleó la ecuación de Tafel, como se menciona anteriormente, que en caso del electrodo (probeta de metal) se mantienen constante, ya que los parámetros que la definen no cambian en el tiempo. De acuerdo a Genesca (s/a) esta ecuación de cálculo de la corriente de corrosión parcial en el electrodo tiene la forma:

$$I_{Fe} = I_{OFe} \left(\frac{\eta_a}{A_{cFe}} \right) \quad (16)$$

Donde η_a es el coeficiente de sobrepotencial del ánodo, y se calcula como:

$$\eta_a = \varphi_c - \varphi_a - E_{OFe} \quad (17)$$

Donde φ representa al potencial electroquímico de referencia de los elementos que intervienen en la reacción, siendo para el Fe = 0,771 [V] y para el O_2 = 1.229[V].

Entonces el cálculo de la densidad de corriente parcial sobre el electrodo se muestra a continuación:

$$I_{Fe} = 0,056^{(993/-0,258)} = 0 \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (18)$$

Con este cálculo se puede observar que la densidad de corriente que va por el interior del electrodo es tan pequeña que puede ser considerar igual a cero (0), y no ejerce gran influencia en el cálculo de la velocidad de corrosión. Por otro lado, para la densidad de corriente del electrolito, el cálculo es un tanto diferente, por lo que se había mencionado anteriormente, esta se ve limitada por las condiciones medio ambientales, las capacidades de difusión del oxígeno y el espesor del electrolito, por lo que la densidad de corriente varia en electrolito conforme varía los parámetros de los cuales depende la corriente límite del oxígeno. Para el cálculo de la corriente de corrosión de electrolito, se realizaron una serie de cálculos, estos se muestran a continuación:

Cálculo de la corriente impresa por el oxígeno, el cual se realiza de manera similar al presentado en la ecuación 19, esta representa la densidad de corriente que se ejercería en un medio continuo del elemento reaccionante sin considerar los efectos medioambientales, lo que se podría considerar como una reacción ideal del electrolito.

$$I_{impO} = I_{0o}^{(\eta_c/A_{co})} \quad (19)$$

En este caso el coeficiente de sobrepotencial del oxígeno es igual a -0,542 [V], este coeficiente en conjunto con el factor de Tafel, la ecuación 19, convierten al exponente en un exponente positivo, como se observa a continuación, por lo que se observa una reacción catódica en la celda. La densidad de corriente impresa es igual a

$$I_{impO} = 0,0001^{(-542/-100)} = 0,26 \text{ A/m}^2$$

Una vez calculado este parámetro, el siguiente paso consistió en relacionar este valor con el límite de corriente presente en el ambiente debido a las condiciones del mismo, para esto se establece una relación entre la densidad de corriente ideal y la máxima que permiten las condiciones ambientales, como se muestra a continuación:

$$I_{O_2} = \frac{I_{impO}}{1 + \left(\frac{I_{impO}}{I_{lim}}\right)} \quad (20)$$

Este valor obtenido gracias a esta ecuación permite obtener el valor real de corriente impresa en el metal con las limitaciones de las condiciones meteorológica y electroquímicas.

Por último, se realiza el cálculo de la corriente de corrosión, que resulta de la suma de las corrientes parciales en la interfaz electrodo/electrolito.

$$I_{total} = I_{Fe} + I_{O_2} \quad (21)$$

Como se puede observar, la corriente total es igual a la densidad de corriente ejercida por el O_2 , que engloba el efecto de la capa de electrolito sobre la superficie de la probeta. En la tabla 13, 14 y 15 se pueden observar las variaciones de las densidades de corriente para Coro, Punto Fijo y Puerto Cabello, respectivamente, en función a las condiciones ambientales mostradas en tablas previas, en referencia a cada mes.

Tabla 13: Cálculo de densidad de corriente de corrosión, Coro

Meses	Densidad de corriente Total [A/m^2]
Enero	0,249
Febrero	0,248
Marzo	0,244
Abril	0,249
Mayo	0,248
Junio	0,247
Julio	0,246
Agosto	0,244

Septiembre	0,244
Octubre	0,251
Noviembre	0,253
Diciembre	0,252

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 14: Calculo de densidad de corriente de corrosión, Punto Fijo

Meses	Densidad de corriente Total [A/m^2]
Enero	0,256
Febrero	0,253
Marzo	0,252
Abril	0,257
Mayo	0,257
Junio	0,257
Julio	0,255
Agosto	0,257
Septiembre	0,257
Octubre	0,258
Noviembre	0,258
Diciembre	0,257

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 15: Cálculo de la densidad de corriente de corrosión, Puerto Cabello

Meses	Densidad de corriente total [A/m^2]
Enero	0,2586
Febrero	0,2588
Marzo	0,2592
Abril	0,2593
Mayo	0,2594
Junio	0,2592
Julio	0,0560
Agosto	0,2589
Septiembre	0,2588
Octubre	0,2589
Noviembre	0,2589
Diciembre	0,2589

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.2.2 Cálculo de velocidad de corrosión

Alfaro y Alfaro (2018) establecen la Ley de Faraday como un método matemático de cálculo de la velocidad de corrosión, apegándose al modelo recomendado por la IUPAC, este cálculo depende de la densidad de corriente de corriente (I_{total}), el área superficial de la pieza expuesta a la corrosión (A), el peso molecular del Fe (M), el número de electrones transferidos (n) y la constante de Faraday ($F=96500 \text{ A s/mol}$).

La ecuación para determinar la velocidad de corrosión tiene la forma:

$$V_{corr} = \frac{I_{total} \ A \ M}{n \ F} \quad (22)$$

En donde V_{corr} es la velocidad de corrosión, expresada en g/s ; I_{total} , esta expresada en A/m^2 ; A esta expresa en m^2 ; M en g/mol y F en $A s/mol$. Para poder realizar el estudio y comparar con modelos matemáticos existentes, este valor de corrosión se transformó en datos de pérdida de espesor., por lo cual se empleó la fórmula de densidad, para llevar el valor de corrosión a pérdida de volumen, y posteriormente, conociendo el área expuesta a la corrosión, se determinó el espesor corroído, suponiendo una corrosión uniforme en toda la superficie expuesta.

El cálculo para la pérdida de espesor siguió la forma:

Conociendo que el valor de corrosión se encuentra en g/s multiplicarlo por el factor de tiempo del mes, por lo que se multiplicó por un factor que permitió obtener la masa corroída en cada mes respectivo. Este cálculo tuvo la forma:

$$V_{corr/mes} = V_{corr} \ 86400 \ N^{\circ} \ dias/mes \quad (23)$$

Donde, $V_{corr/mes}$ es la cantidad de masa desplazada en cada mes en gramos, y v

Conociendo la densidad del acero estructural, se procedió al cálculo de pérdida de volumen equivalente a la pérdida de masa en el mes. Este cálculo tuvo la forma:

$$V_{corr_{vol}} = \frac{V_{corr/mes}}{\rho_{A36}} \quad (24)$$

Donde ρ_{A36} es la densidad del acero ASTM A36 en g/mm^3 y $V_{corr/mes}$ es la velocidad de corrosión por mes previamente calculado en gramos, y $V_{corr_{vol}}$ es el volumen equivalente desplazado mensual por efectos de la corrosión en mm^3 .

Posterior al cálculo de volumen desplazado, y conociendo el área afectada por la corrosión, se procede a calcular el espesor corroído. Esta ecuación es aplicable debido a que el cálculo de la velocidad de corrosión depende del área y el cálculo de pérdida de masa es perteneciente al área incluida en el cálculo. Este procedimiento tiene la forma:

$$e = \frac{V_{corr_{vol}}}{A_{exp}} \quad (25)$$

Donde e es el espesor en mm, $V_{corr_{vol}}$ es el volumen desplazado calculado previamente en mm^3 y A_{exp} es el área superficial expuesta a la corrosión en mm^2 . En la tabla 16, 17 y 18, se presentan los valores correspondientes a cada mes para cada los valores de reducción de espesor, correspondiente a cada ciudad.

Tabla 16: Espesor reducido por efecto de corrosión, Coro. Cálculo por densidad de corriente de Tafel

Meses	Cálculo de corrosión [μm]	Acumulado de corrosión
Enero	28,86364953	28,86364953
Febrero	22,27434096	51,13799049
Marzo	23,39560137	74,53359186
Abril	23,21344953	97,74704139
Mayo	17,59836321	115,3454046
Junio	17,09606749	132,4414721
Julio	17,46825116	149,9097232
Agosto	19,57795137	169,4876746
Septiembre	19,14179648	188,6294711
Octubre	25,6983759	214,327847

Noviembre	31,19987084	245,5277178
Diciembre	31,96522817	277,492946

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

En el gráfico 1 se muestra la disposición grafica de los datos contenido en la tabla 14.

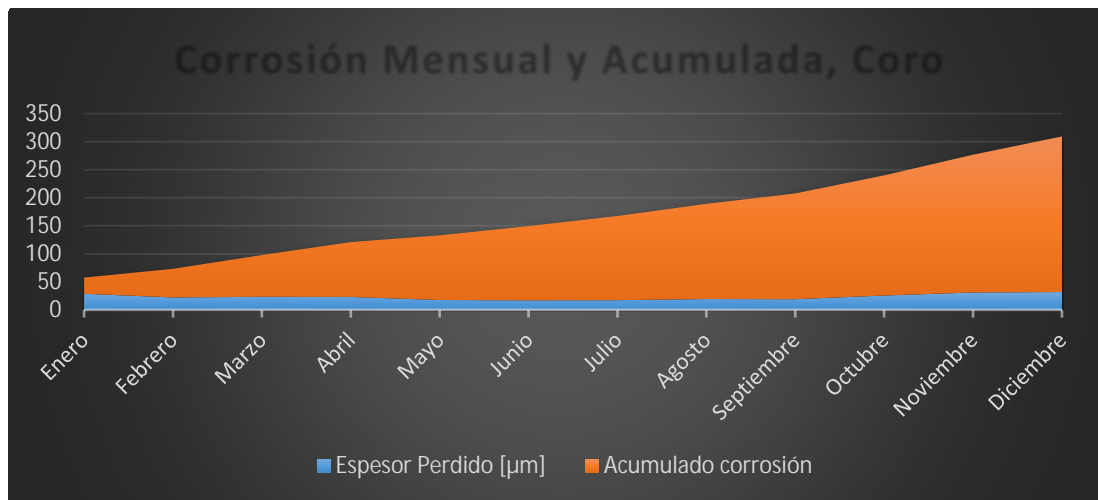


Gráfico 1: Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Coro.

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 17: Espesor reducido por efecto de corrosión, Punto Fijo. Cálculo por densidad de corriente de Tafel

Meses	Cálculo de corrosión [μm]	Acumulado Corrosión
Enero	28,65415752	28,65415752
Febrero	20,46977945	49,12393696
Marzo	21,76132817	70,88526513
Abril	21,54551328	92,43077841
Mayo	17,06395631	109,4947347
Junio	16,57601328	126,070748
Julio	16,95930237	143,0300504
Agosto	19,22088706	162,2509374
Septiembre	18,79181739	181,0427548
Octubre	23,27383953	204,3165944
Noviembre	29,70006245	234,0166568
Diciembre	30,52580079	264,5424576

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

A continuación, se muestra los datos contenidos en la tabla 15 de forma gráfica (gráfico 2)

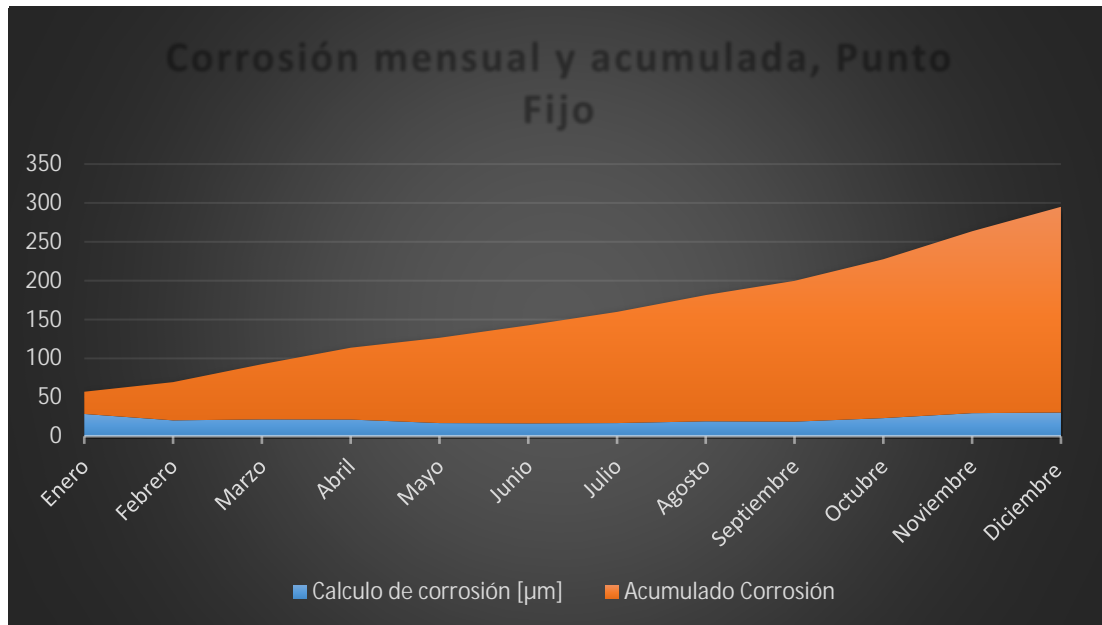


Gráfico 2: Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Punto Fijo.

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 18: Espesor reducido por efecto de corrosión, Puerto Cabello. Cálculo por densidad de corriente de Tafel.

Meses	Cálculo de corrosión [µm]	Acumulado Corrosión
Enero	28,80420995	28,80420996
Febrero	20,85290825	49,65711821
Marzo	22,25845446	71,91557267
Abril	21,80084262	93,71641528
Mayo	17,18100014	110,8974154
Junio	16,70990404	127,6073195
Julio	17,16477486	144,7720943
Agosto	19,26644927	164,0385436
Septiembre	18,79747312	182,8360167
Octubre	23,01411076	205,8501275
Noviembre	30,00038104	235,8505085
Diciembre	30,57561076	266,4261193

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

En el gráfico 3 se muestra la distribución gráfica del comportamiento de los datos contados en la tabla 16

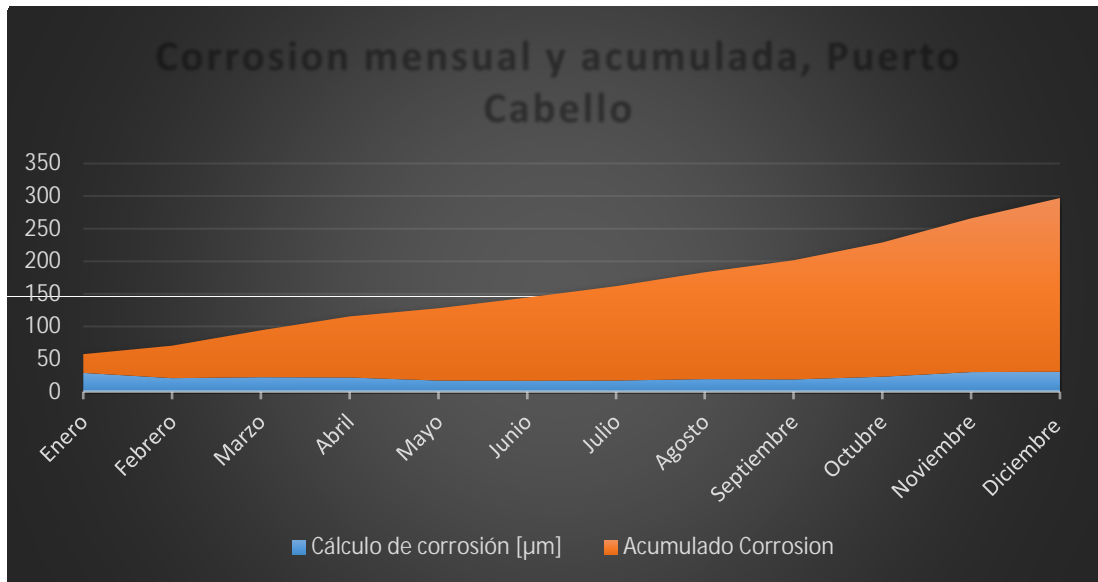


Gráfico 3: Corrosión mensual y acumulada calculada por la ecuación de Tafel, Puerto Cabello.

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.2.2.1 Comparar resultados de corrosión obtenidos con otros modelos matemáticos.

Para este paso fue necesario del empleo de modelos matemáticos de cálculo de corrosión atmosférica empleados para el estudio de este fenómeno. En el caso de este estudio, se decidió emplear el modelo ISO-CORRAG, el cual es un modelo normalizado por la Organización de Estándares Internacional (ISO, por sus siglas en internet), avalado y empleado por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM). Chico, Fuente, Díaz, Simancas y Morcillo (2017) hablan que este fue diseñado por el comité técnico de aceros y aleaciones en 1986 y se encuentra establecido en las normas ISO 9223-9226, ayudando a establecer las líneas guía para el diseño y construcción de estructuras en exposición a la atmosfera.

El análisis consiste en el la recolección de los datos atmosféricos como tiempo de humectación (TDH) efecto de la humedad del ambiente, y de las poluciones en el

ambiente, que producen depósitos de cloruros y sulfatos en la superficie generando reacciones de corrosión en el metal, degradando al material con el tiempo.

D`Santiago (2019), recopila en su trabajo, la forma de cálculo de la velocidad de corrosión por este método. Esta ecuación matemática tiene la siguiente forma:

$$C = 0,57Cl + 0,31SO_2 + 0,31TDH \quad (26)$$

En donde Cl es la cantidad de cloruros depositados, SO_2 es la cantidad de sulfatos en la superficie y TDH es el tiempo de humectación de la pieza.

Es importante destacar que el modelo matemático posee cierto error de cálculo en comparación con los datos experimentales, por lo que tienen un factor de regresión a referencia a estos, R^2 la cual es la varianza de los datos con respecto a los experimentales, en este caso, para los estados en estudio D`Santiago lo define como 0,587. En la tabla 17,18 y 19, se muestran los valores de corrosión mensual calculados por este modelo matemático en referencia a los datos presentados en la tabla 1,2 y 3.

Tabla 19: Modelo ISO-CORRAG aplicado a Coro

Mes	Corrosión(μm)	Suma(μm)
Enero	25,66539383	25,66539383
Febrero	16,40834352	42,07373735
Marzo	16,40625562	58,47999297
Abril	16,40714032	74,88713329
Mayo	6,434219316	81,32135261
Junio	6,440483015	87,76183562
Julio	6,442606301	94,20444192
Agosto	10,10494562	104,3093875
Septiembre	10,10399014	114,4133777
Octubre	19,78728502	134,2006627
Noviembre	29,16139338	163,3620561
Diciembre	29,79850626	193,1605623

Fuente: D`Santiago (2019)

Tabla 20: Modelo ISO-CORRAG aplicado a Punto Fijo

Mes	Corrosión(μm)	Suma(μm)
Enero	23,95539384	23,95539384
Febrero	12,98834352	36,94373735
Marzo	12,98625562	49,92999297
Abril	12,98714032	62,91713329
Mayo	4,724219315	67,6413526
Junio	4,730483014	72,37183562
Julio	4,732606301	77,10444192
Agosto	8,394945616	85,49938753
Septiembre	8,393990137	93,89337767
Octubre	15,22728502	109,1206627
Noviembre	26,31139338	135,4320561
Diciembre	26,94850626	162,3805623

Fuente: D`Santiago (2019)

Tabla 21: Modelo ISO-CORRAG aplicado a Puerto Cabello

Mes	Corrosión(μm)	Suma(μm)
Enero	23,95539384	23,95539384
Febrero	13,20658352	37,16197735
Marzo	13,20449562	50,36647297
Abril	13,20538032	63,57185329
Mayo	4,697869315	68,2697226
Junio	4,704133014	72,97385562
Julio	4,706256301	77,68011192
Agosto	8,205535616	85,88564753
Septiembre	8,204580137	94,09022767
Octubre	14,53071502	108,6209427

Noviembre	26,77205338	135,3929961
Diciembre	26,86573626	162,2587323

Fuente: D`Santiago (2019)

Estos valores se comparan con los obtenidos por el cálculo de Tafel mostrados en las tablas 14, 15 y 16, y se muestran en los gráficos 4, 5 y 6

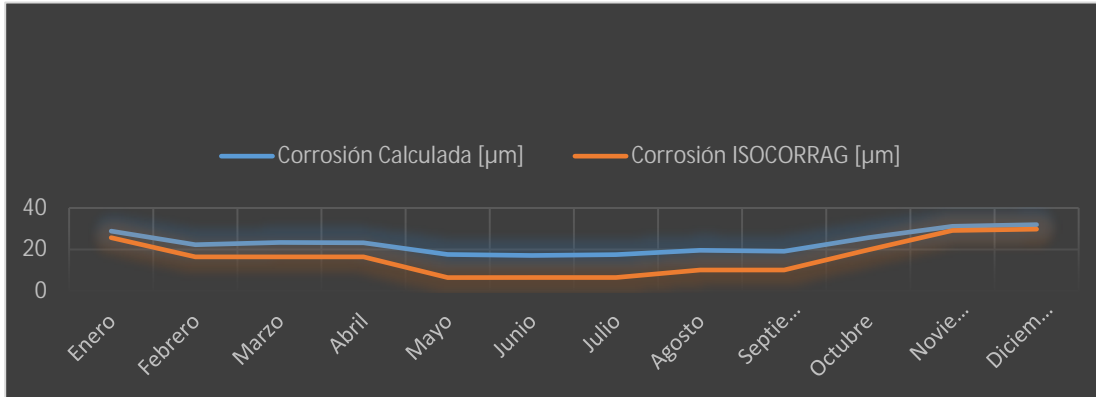


Gráfico 4: Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Coro

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

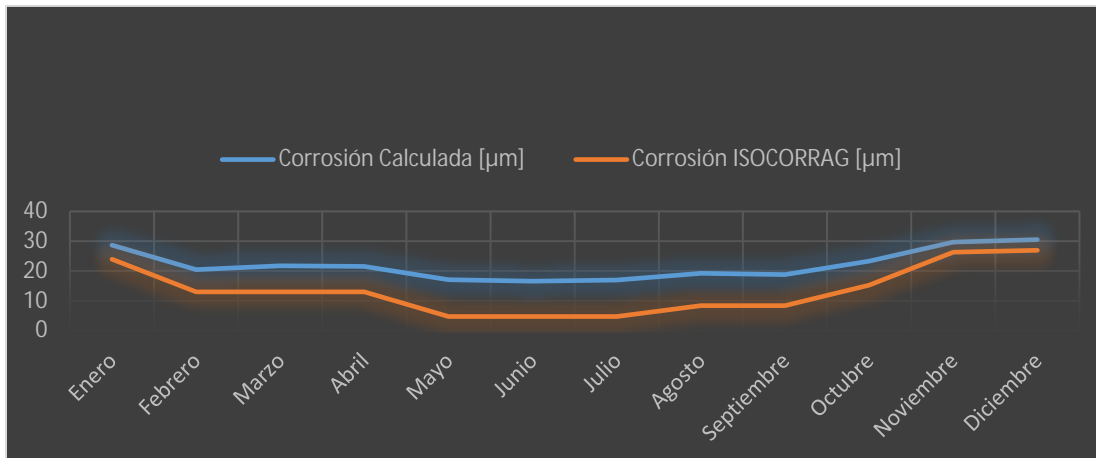


Gráfico 5: Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Punto Fijo.

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

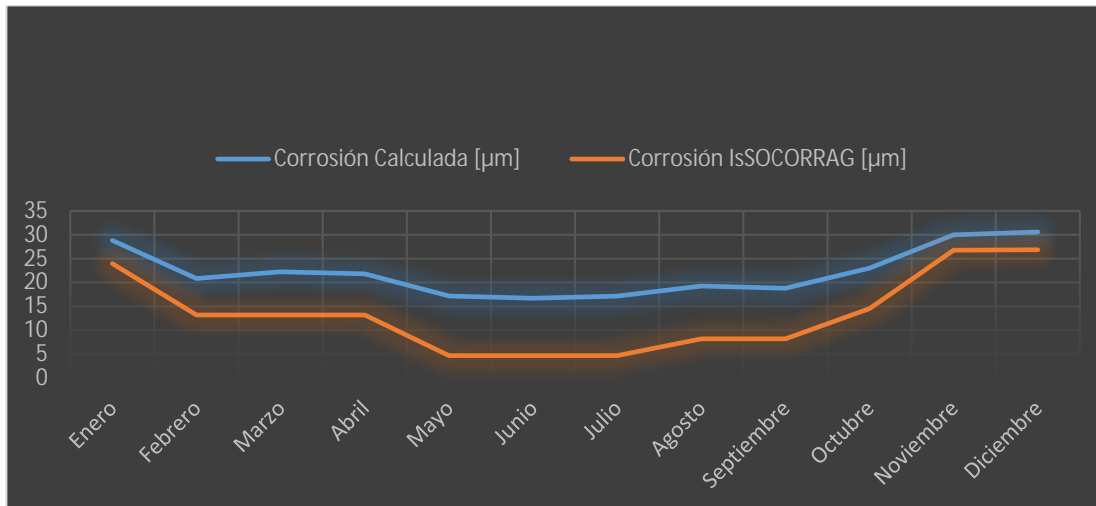


Gráfico 6: Comparación de método de cálculo empleado vs ISO-CORRAG para Puerto Cabello

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

En los gráficos mostrados, donde se compara el modelo de cálculo empleado en este estudio y el modelo normalizado de la ISO, podemos observar cierta variación entre los datos, sin embargo, se puede observar un comportamiento similar en cuanto a la forma de la variación de la corrosión en el año, sufriendo una depresión en la velocidad de corrosión en hacia los años más secos, en donde la humedad relativa disminuye y el tiempo de humectación es menor, parámetros que se usan en el cálculo de corrosión para cada modelo, respectivamente.

4.3 Establecer el efecto de la corrosión en la capacidad de carga de la pieza relacionada al decremento del diámetro de la sección transversal por efecto de la corrosión ambiental

Como se había mencionado anteriormente, el efecto de la corrosión atmosférica para efecto de este estudio se supuso uniforme sobre la superficie de la probeta, esto admite que el espesor perdido por efecto de la corrosión, calculado previamente, se sustrajo del área transversal de la zona de ataque, área de menor diámetro en la probeta. Este proceso se realizó sustrayendo al radio de la probeta en la zona mencionada la cantidad de espesor perdido que se muestra en las tablas 14, 15 y 16, y evaluando su

capacidad de carga en cada mes. Ya que el efecto de pérdida de espesor es acumulativo en el tiempo, para este cálculo se utilizó la corrosión acumulada la probeta y progresivamente esta se fue aplicando a la pieza, registrando los datos obtenidos, para su posterior procesamiento.

4.3.1 Método de obtención de los datos

El proceso de simulación y la obtención de los datos en esta fase pudo obtenerse de dos formas, las cuales se debían a las limitaciones de simulación del software empleado en el estudio. La primera consistía en un proceso de iteración para la obtención de las cargas máximas que soportaría la pieza conforme variaba su área transversal.

Opción 1:

Esta primera opción se realizaba de la siguiente forma:

Establecer la variación del diámetro de la probeta.

Por medio de la iteración identificar la carga que producía que el factor de seguridad de la probeta, luego de ser modificada por las condiciones de corrosión, fuese igual a 1, dando a entender que esta se encontraba trabajando en el límite elástico, es decir, con la fuerza máxima de carga sin fallar.

Luego de esto, obtener la relación entre la carga aplicada luego de la corrosión con respecto a la carga máxima original (Capacidad a tracción).

Registrar el dato, y repetir nuevamente el proceso para cada mes.

Justificación

De acuerdo a la definición de Capacidad a tracción dada previamente, el cálculo de este factor consiste en calcular el porcentaje de carga soportada en un tiempo determinado con respecto a una condición original, por lo que el cálculo tendría la forma:

$$C_{traccion} = \frac{F'}{F_0} \quad (27)$$

En donde F' es la carga máxima soportada por la pieza luego del efecto reductor de área transversal y F_0 es la carga máxima soportada por la pieza en las condiciones originales de su diseño. Este método cumple por completo con las definiciones dadas acerca del parámetro a evaluar

Las desventajas de este proceso, es el paso largo y lento de iteración, que permite la obtención de la carga máxima de trabajo de la pieza con respecto a su área. Por lo cual surgió el siguiente método.

Opción 2

La segunda opción consistió en un proceso de comparación de los factores de seguridad de la pieza en diversos momentos, y consta de los siguientes pasos:

Una vez establecida la carga máxima para la que el diseño original arrojaba un factor de seguridad igual a 1, se procedió a la reducción del área previamente calculada, efecto por la reducción de espesor por corrosión.

Seguidamente se aplicó la misma carga que al diseño original; debido a la reducción de área transversal que se aplicó previamente, y la conservación de la carga original, el factor de seguridad se vio reducido, específicamente a un valor menor a la unidad. Como el valor original de este factor es la unidad, la varion producida se podría decir que es la variación de la capacidad de la capacidad de tracción que este elemento poseía respecto a las condiciones originales.

Se registró el dato obtenido, y se procedió a la evaluación de las condiciones del mes siguiente.

Justificación

De acuerdo a la definición inicial dada a la capacidad de tracción, comparando la carga máxima que puede soportar el material antes de ser sometido a corrosión y luego de la perdida de espesor permite saber el porcentaje de carga que puede soportar un elemento con respecto a la carga inicial de diseño. Sin embargo, en la simulación del análisis de tracción en este estudio factor de seguridad de la pieza es un parámetro

de fácil obtención, arrojado de manera directa, por lo que se encontró una forma para determinar la capacidad de carga del elemento con respecto al estado inicial de la pieza usando este parámetro. Para demostrar el uso de este factor, la matemática de cálculo estructural puede sustentar este análisis

Sabemos que el factor de seguridad se define de la siguiente manera:

$$N = \frac{\sigma_{trab}}{S_y} \quad (28)$$

Ahora supongamos dos estados de una misma pieza de un mismo material sometidos a un esfuerzo axial de tracción, en donde su área transversal es constante pero su factor de seguridad varia, tenemos que:

$$N_1 = \frac{\sigma^1_{trab}}{S_y} \quad (29)$$

Y

$$N_2 = \frac{\sigma^2_{trab}}{S_y} \quad (30)$$

Establezcamos una relación entre ambos por lo que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\frac{\sigma^1_{trab}}{S_y}}{\frac{\sigma^2_{trab}}{S_y}} \quad (31)$$

Como el material es el mismo, entonces,

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\sigma^1_{trab}}{\sigma^2_{trab}} = \frac{\frac{F_1}{A}}{\frac{F_2}{A}} \quad (32)$$

Como el área es constante, entonces obtenemos que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (33)$$

Por lo que podemos concluir que la relación entre las cargas aplicadas en un material es igual a la relación existente entre los factores de seguridad de una pieza bajo en las mismas condiciones, y establecemos de esta manera que, analizar la variación del coeficiente de seguridad con respecto a una condición de control de una pieza, en este caso, es equivalente a analizar la relación entre la variación de una carga máxima con respecto a esta misma referencia, ya que poseen la misma relación.

La opción 2 fue la escogida para realizar el estudio, esto debido a la facilidad que esta otorgaba en el cálculo del parámetro de estudio.

Con la finalidad que el lector posea certeza acerca de los datos mostrados en viñetas posteriores, se procede a comparar ambos métodos experimentalmente con un ejemplo, para demostrar que no existe ninguna diferencia entre ambos métodos más que la cantidad de tiempo empleada en la obtención de los datos requeridos.

Tomemos en cuenta nuestra probeta de estudio, la cual, por diseño normalizado, posee un radio de 6,25 mm, la carga máxima que puede soportar esta es de por análisis en simulación es igual 30450 N. Ahora se procede a calcular para una disminución del radio a 5 mm, la fuerza que puede soportar una probeta con el radio a estudiar. El cálculo se hace por iteración. Consideramos que el material es el mismo, para que se pueda realizar la comparación. En la figura 15 se muestran y en la tabla 19 los valores de la fuerza arrojados.

Tabla 22: Carga aplicada a la probeta de demostración

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	19450,000 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-19450,000 N
Vector Z	0,000 N

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

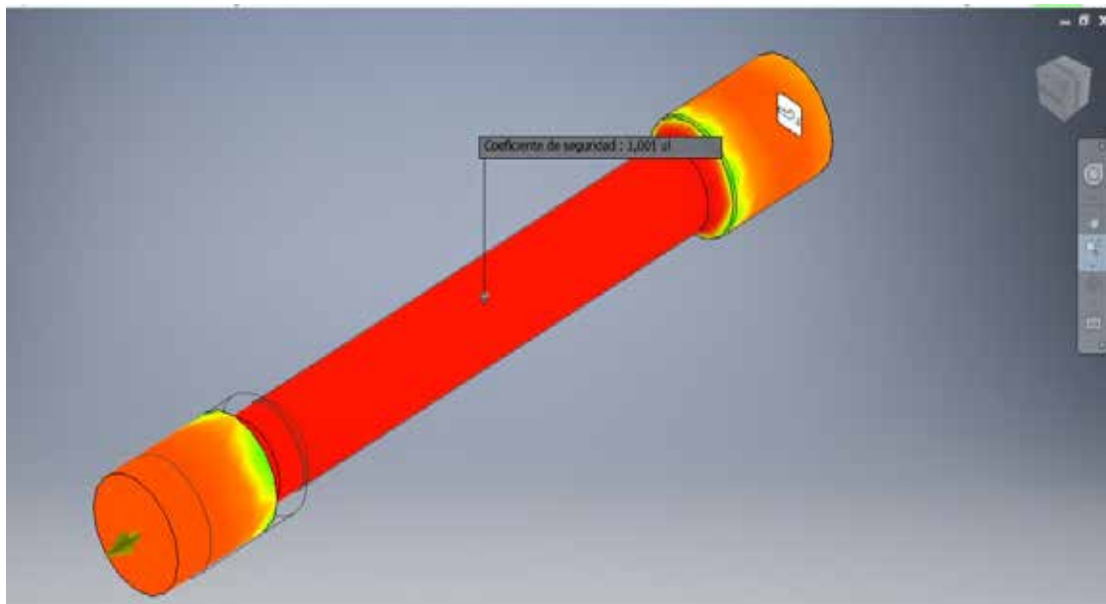


Figura 15: Factor de seguridad obtenido para carga 19450 N y diámetro 5 mm

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

La figura 15 demuestra que la carga máxima que puede soportar la probeta con un diámetro para demostración de 5 mm, es igual a 19450 N, ahora procedemos al cálculo de la fracción de capacidad de fracción que puede soportar la probeta en este estado, con respecto a su original.

$$C_{traccion} = \frac{F'}{F_0} = \frac{19450}{30450} = 0,638$$

Esto quiere decir que el elemento soporta un 64% de la carga máxima de diseño. Ahora se procede a comparar con la evaluación del factor de seguridad manteniendo la carga constante e igual a la carga original del diseño, es decir, $F' = F_0 = 30450 N$. En la figura 16 se muestra el factor de seguridad para estas condiciones.

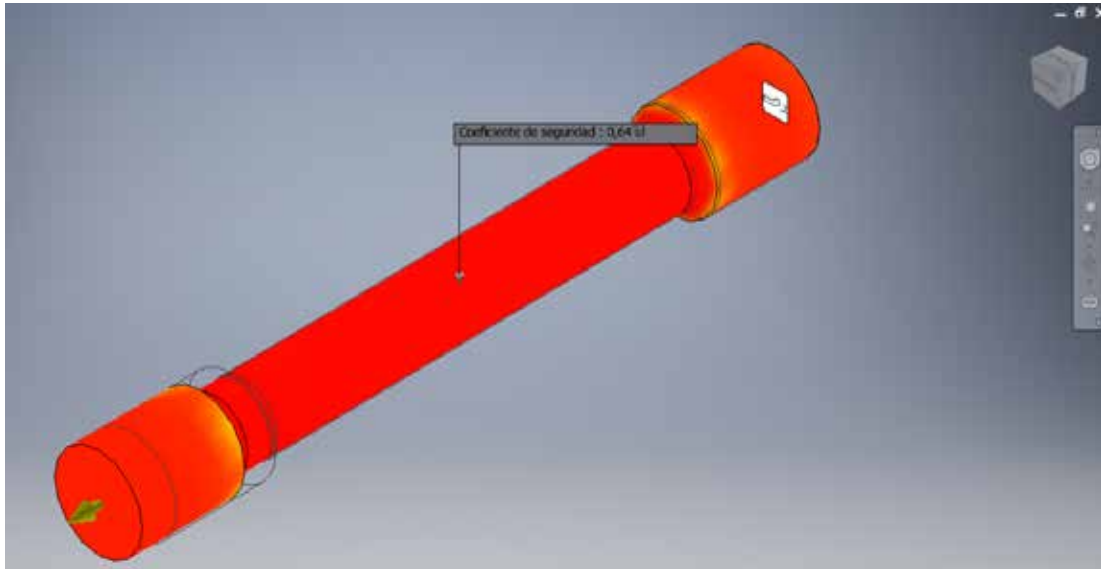


Figura 16: Factor de seguridad obtenido para carga original y diámetro 5 mm

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

El valor obtenido por este segundo método es igual a 0,64, igual al valor obtenido por el método anterior, por lo que se puede decir que el calculo trae como resultado el mismo valor.

4.3.2 Cálculo de variación de la capacidad de tracción en función al efecto de la corrosión

Como se mencionó, el modelo empleado para la variación de este parámetro fue la opción 2, en el cual se determinó para cada ciudad, el diámetro de la probeta en el mes en estudio, el cual consistió en sustracción del espesor corroído al radio de la probeta, lo que tiene la forma:

$$r_{mes} = r_0 - C_i \quad (34)$$

Donde r_{mes} es el radio de la probeta en el mes en estudio, r_0 es el radio original de la probeta al momento de su diseño y C_i es la corrosión acumulada en el mes i , para valores de $i=1$ hasta 12. Cada variación fue registrada en una tabla en función del mes al que pertenecía, para cada ciudad en estudio.

Posterior a este paso se procedió a calcular el factor de seguridad de la probeta para cada diámetro calculado por medio de simulación asistida por computadora, registrando cada uno de estos valores obtenidos en una tabla (ver tablas 20, 21, 22).

Tabla 23: Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6,25 \text{ mm}$ para Coro

Meses	Cálculo de radio (mm)	Capacidad de Tracción (%de carga max.diseño)
Enero	6,22113635	0,99
Febrero	6,19886201	0,984
Marzo	6,175466408	0,98
Abril	6,152252959	0,96
Mayo	6,134654595	0,955
Junio	6,117558528	0,949
Julio	6,100090277	0,94
Agosto	6,080512325	0,93
Septiembre	6,061370529	0,92
Octubre	6,035672153	0,914
Noviembre	6,004472282	0,905
Diciembre	5,972507054	0,89

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 24: Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6,25 \text{ mm}$ para Punto Fijo

Enero	Cálculo de radio (mm)	Capacidad de Tracción (%de carga max. diseño)
Febrero	6,200876063	0,99
Marzo	6,179114735	0,985
Abril	6,157569222	0,97
Mayo	6,140505265	0,965
Junio	6,123929252	0,95
Julio	6,10696995	0,936
Agosto	6,087749063	0,931
Septiembre	6,068957245	0,93
Octubre	6,045683406	0,92
Noviembre	6,015983343	0,91
Diciembre	5,985457542	0,901

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Tabla 25: Cálculo de la capacidad a tracción de la probeta con $r_0 = 6,25 \text{ mm}$ para Puerto Cabello

Meses	Cálculo de radio (mm)	Capacidad de Tracción (%de carga max. diseño)
Enero	6,22119579	0,994
Febrero	6,200342882	0,987
Marzo	6,178084427	0,97
Abril	6,156283585	0,964
Mayo	6,139102585	0,956
Junio	6,122392681	0,937
Julio	6,105227906	0,937
Agosto	6,085961456	0,936
Septiembre	6,067163983	0,93
Octubre	6,044149873	0,917
Noviembre	6,014149491	0,908
Diciembre	5,983573881	0,899

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

4.4 Establecer gráficas en el tiempo del comportamiento mecánico del elemento, con proyecciones en años en el futuro, y analizar los resultados

Una vez obtenidos los datos de la fase anterior, es posible establecer grafica que permiten observar el comportamiento de la capacidad a tracción del material una vez que este es afectado por la corrosión. Construir estos gráficos no supone gran reto una vez que se poseen los que se deseen graficar, pero esta fase de la investigación también se propuso a la proyección de estos datos en el tiempo, con el fin de saber el estado en un futuro de las capacidades de la probeta en estudio. Los resultados del comportamiento de la capacidad de tracción de la probeta en el primer año de estudio se muestran a continuación, en los gráficos 7, 8 y 9.

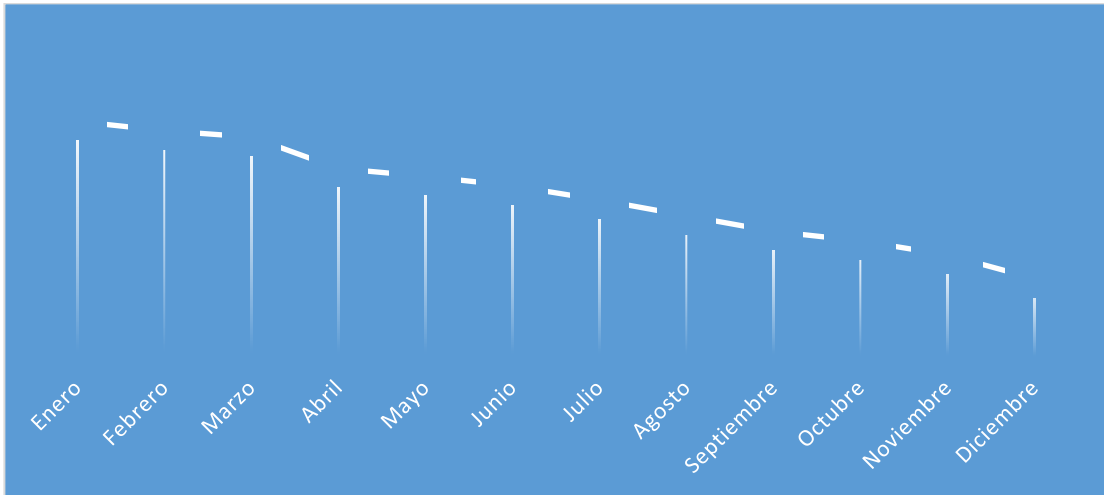


Gráfico 7: Capacidad a tracción (año 1), Coro

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

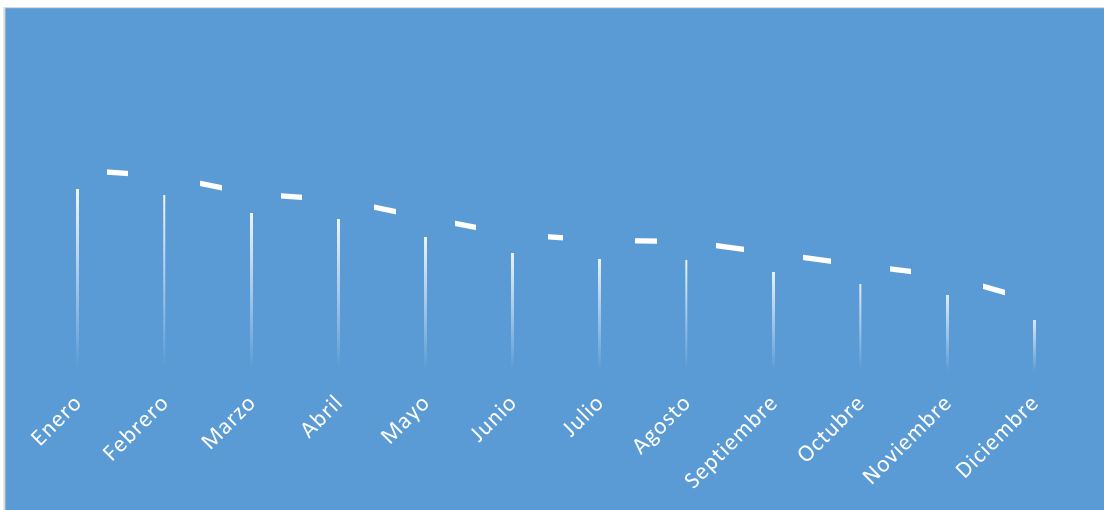


Gráfico 8: Capacidad a tracción (año 1), Punto Fijo

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

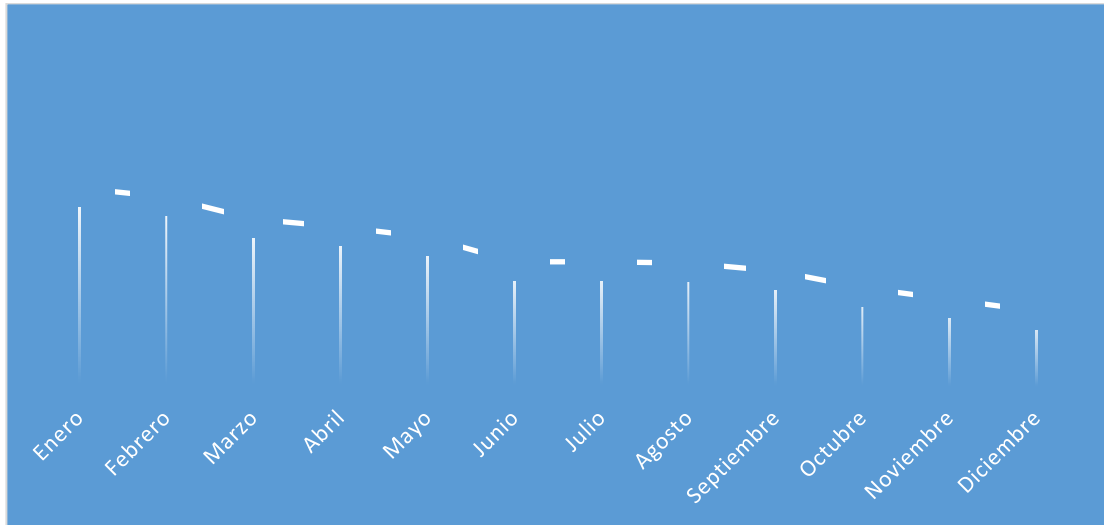


Gráfico 9: Capacidad a tracción (año 1), Pto. Cabello

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Se observa que, para las 3 ciudades estudiadas, la variación de la capacidad de carga disminuye relativamente poco, y se puede decir que, a una escala grande, la pendiente de cambio se mantiene constante.

Si estudiamos la relación de un mes con su predecesor y verificamos la relación entre todos ellos, se puede observar un salto más grande entre los meses que tienden a ser más húmedos en el año, octubre-marzo, esto debido a que el tiempo de humectación de las estructuras y la humedad relativa del ambiente en estos meses mucho más alta que en el restante de los mese más seco, conocida como la temporada de verano en Venezuela.

Con estos datos se puede afirmar que los meses en donde la pieza se vería más afectada serian en este rango de meses, y por consiguiente perdería más espesor, por lo que son los más críticos del año.

4.4.1 Proyección de datos a 10 años en el futuro

Para poder proyectar el parámetro mecánico en el tiempo, fue necesario establecer el comportamiento estimado de este a largo plazo. Para lograr estas proyecciones fue necesario realizar un nuevo cálculo, Similion *et al* (2014) sugieren

un método de cálculo de las proyecciones de la corrosión de hasta un máximo de 20 años en el futuro, de acuerdo a avances experimentales y de laboratorio. Este modelo numérico tiene la forma:

$$C = C_1 t^n \quad (35)$$

En donde C es la corrosión acumulada en el tiempo que se quiere calcular, C_1 es el valor de la corrosión al final del año uno (1), t es el tiempo en el que se quiere estudiar la corrosión, y el exponente n en función de las condiciones de exposición ambiental.

Si se observa la figura 17 y se consideran las condiciones de las ciudades en estudio, se puede decir que, para las ciudades de Punto Fijo y Puerto Cabello, por su cercanía al mar, el factor de exposición es 0,78 para un ambiente marino severo, mientras que para Coro es igual a 0,70, considerándolo un ambiente marino no tan severo.

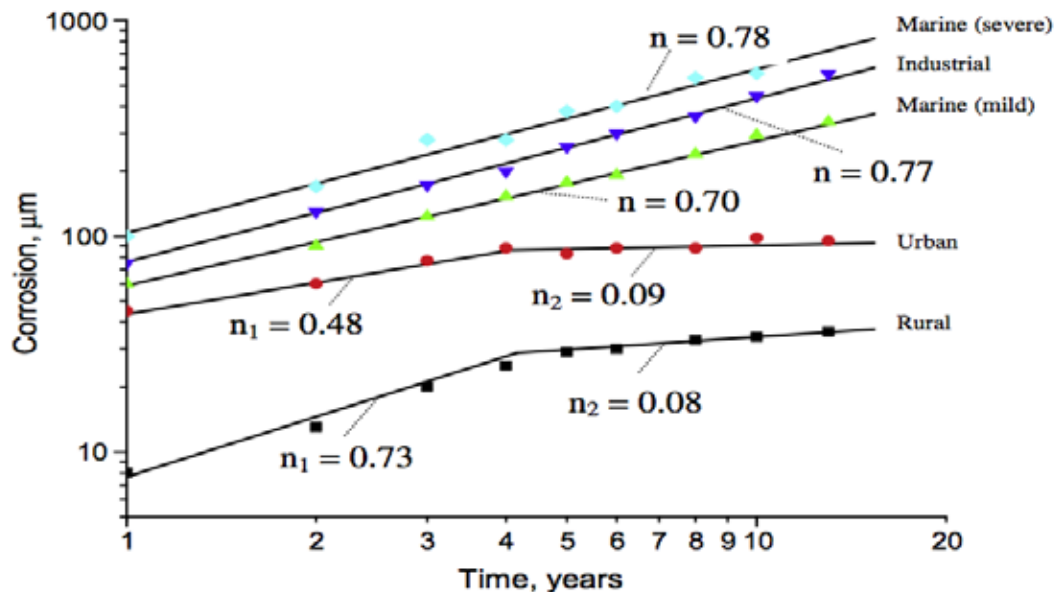


Figura 17: Valores del factor de exposición ambiental “n”.

Fuente: Similion *et al* (2014). *Atmospheric corrosion modeling*

A continuación, se presentan el comportamiento gráfico en proyección de la corrosión acumulada y la disminución de la capacidad a tracción en función de una pérdida de masa continua. En la gráfica 10 se muestran los datos de la variación de capacidad a tracción obtenidas para Coro, en relación a la corrosión proyectada para la zona.

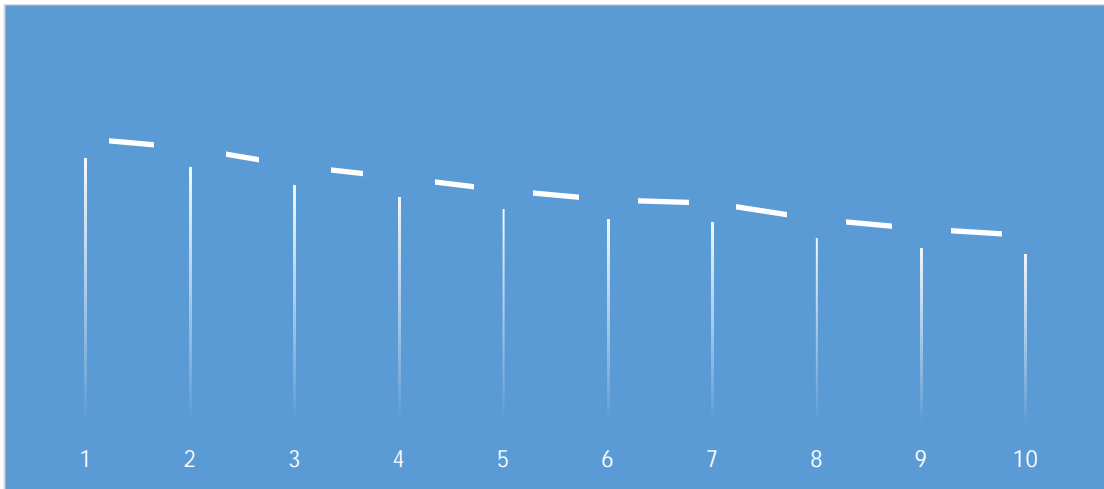


Gráfico 10: Proyección de la capacidad a tracción, Coro

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

Los gráficos 11 y 12, presentan los datos obtenidos para las ciudades de Puerto Cabello y Punto Fijo.

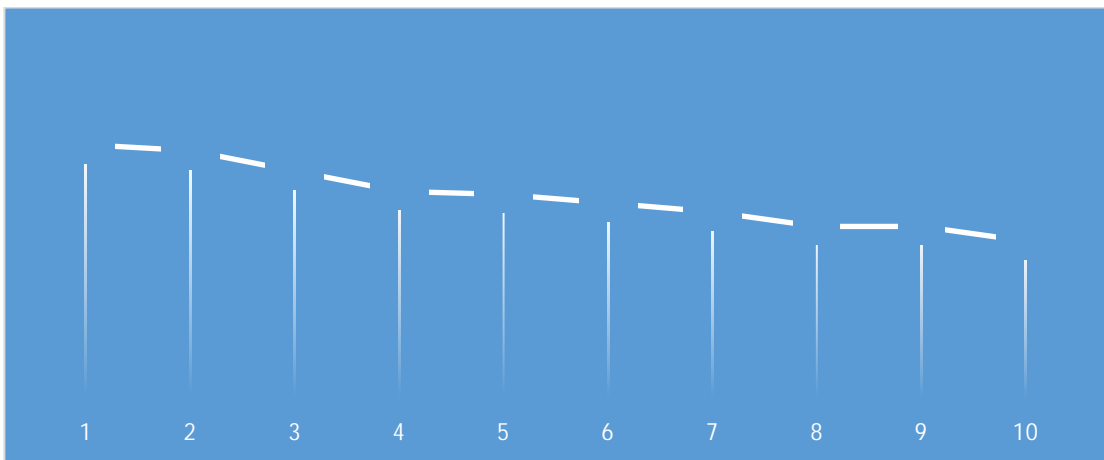


Gráfico 11: Proyección de la capacidad a tracción, Punto Fijo

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

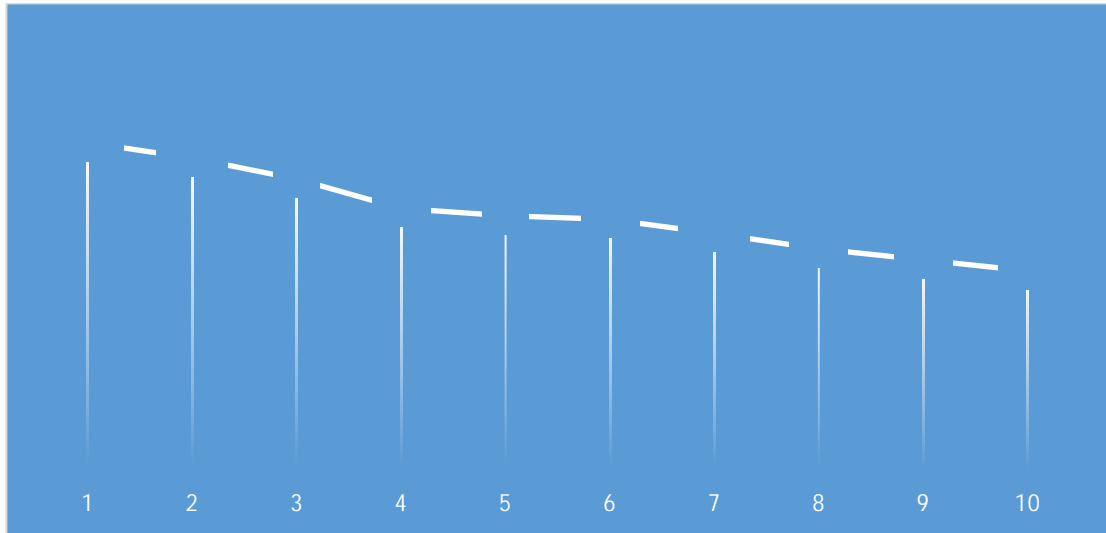


Gráfico 12: Proyección de la capacidad a tracción, Puerto Cabello

Fuente: Alvarado y Quevedo (2020)

El efecto de disminución de espesor sigue aumentando con el tiempo como podemos observar en las gráficas de proyección aplicadas a la probeta en estudio, sin embargo, en un elemento totalmente expuesto al ambiente sin ningún tipo de protección tenderá a disminuir su tasa de corrosión anual por un efecto que se conoce como estabilización, en donde el fenómeno de corrosión se ve disminuido por la capa de óxidos depuesta que se forma sobre la superficie de metal. Esta capa de óxido que se forma no es conductora por lo que minimiza la transferencia de electrones en la reacción de corrosión disminuyendo su velocidad.

Este efecto de estabilización se puede observar levemente en las curvas de cambio de la capacidad de tracción, en donde esta tiene variaciones mas grandes hacia los primeros años y van disminuyendo conforme van pasando los años. Para los aceros al carbono, como es el caso de nuestro estudio, la estabilización suele ocurrir entre los 4 y 6 años de exposición, en donde podemos observar que se comienzan a producir las variaciones más pequeñas y un aplanamiento de la curva, y este efecto se puede observar en las variaciones de las capacidades mecánicas de la pieza.

Por otro lado, la probeta de estudio sometida a corrosión en la atmosfera con las características delimitadas en este estudio, sin ningún tipo de protección, al final de 10 años, poseerá tan solo un 57% de su capacidad de carga original, por efecto de la corrosión medioambiental.

El lector quizás haya podido notar que las variaciones producirán diferentes efectos en diferentes geometrías, y tamaños proporcionalmente grandes los efectos serán menores, debido a que la disminución de espesor es casi constante sin consideración del área transversal de la pieza. Esta característica casi invariable se debe al que la velocidad de corrosión está directamente relacionada con el área superficial, por lo que no importa que tan grande sea el área expuesta del metal, la velocidad de corrosión crecerá proporcional a la misma, por lo que el espesor corroído se mantendrá casi constante a este tipo de cambios.

Por otro lado, es importante considerar el área transversal, ya que las capacidades de carga, a diámetros considerablemente grandes, cambian en su nivel de variación, por lo que en una barra de mayor tamaño es posible que sus valores de capacidad de carga a los 10 sean un poco más elevados con respecto a los de la probeta en estudio.

CONCLUSIONES

1. La interacción del medio ambiente y las estructuras produce cambios en las propiedades mecánicas de los armazones, que con el tiempo pueden producir catástrofes o accidentes si se llegan a superar los niveles críticos de estas variables afectadas, las cuales en muchas ocasiones no son consideradas en el estudio de diseño de la estructura. Por lo que es necesario estudiar y conocer el ambiente externo al que estará sometido una estructura de manera que se pueda realizar un estudio en donde se consideren los efectos de estos agentes sobre el diseño, ya que pueden producir cambio en sus capacidades mecánica, afectando el desenvolvimiento del mismo.
2. El cálculo de corrosión por le ecuación de pendiente de Tafel y ley de Faraday, no supone mayores retos si se conocen los parámetros que intervienen en estas, y los resultados obtenidos por las mismas no se encuentran muy alejado de los obtenidos por métodos estandarizados. Con esto podemos concluir que es un método bastante acertado y aceptable para el cálculo de corrosión atmosférica.
3. El comportamiento del modelo matemático empleado para el cálculo tiene puntos de coincidencia en los valores de las entradas con respecto al modelo estándar de la ISO, y posee un comportamiento semejante en a lo largo del año, teniendo una depresión en los meses de menor humedad y mayores niveles en los meses húmedos.
4. Al final del primer año, toda estructura sometida a corrosión en la zona estudiada, poseerá un valor de capacidad de carga no menor al 90% del de su diseño original. Este factor puede afectar a estructuras con coeficientes de seguridad no muy mayores a la unidad, provocando posibles fallas o inicio de fluencia.
5. Basados en los valores obtenidos en el estudio, la probeta analizada al cabo de 10 años podría tener una capacidad de carga de casi la mitad de su capacidad original, por lo que, en ambientes muy agresivos, estructuras sin el debido

mantenimiento, se podrían ver afectadas por la corrosión llegando a ser afectada a tales niveles.

6. La simulación es un método confiable y económico que permite predecir el comportamiento de los elementos mecánicos cuando estos se encuentran sometidos a todo tipo de esfuerzos y energías. De acuerdo al estudio realizado, es posible emplear las simulaciones por computadora como herramienta para predecir el comportamiento de los elementos estructurales en presencia de diversos fenómenos.
7. Existe una relación entre los efectos de la corrosión y el estado de las capacidades mecánicas de un elemento estructural y, además, es posible establecer una relación entre uno y otro por medio del empleo de modelos matemáticos.
8. Es importante que el diseñador considere los parámetros atmosféricos que intervienen en la corrosión de las estructuras que son diseñadas por él. En la actualidad, la etapa de diseño no considera a profundidad este fenómeno y no se ha estudiado a fondo los efectos que este posee en la mecánica estructural de los diseños, y como se ha demostrado en este estudio, los efectos de la corrosión pueden provocar una pérdida considerable de la estabilidad de una estructura, resultado de la disminución de las capacidades de esta para soportar una carga, efecto de la reducción progresiva del área transversal.
9. El empleo de factores de corrosión, y métodos de cálculo de la corrosión y variación de las capacidades de carga de un elemento, en cada zona por efectos de la atmosfera, cambia la perspectiva del diseñador, al considerar directamente este factor, el cual se puede decir que, se consideraba de manera vaga en el empleo de un factor de seguridad estructural, sin embargo, una vez demostrado los efectos de estos sobre los elementos mecánicos sabiendo que es un fenómeno presente en toda región por nuestra atmosfera rica en oxígeno, se concluye que es importante que este sea un factor integral dentro del cálculo estructural, como factor degradante.

RECOMENDACIONES

1. Estudiar el efecto de la disminución de espesor en la capacidad de carga para geometrías más grandes, estableciendo un factor de relación para una familia de curvas referidas a diferentes diámetros.
2. Construir un sistema de recolección de data atmosférica actualizada que permita realizar un estudio más exacto de los niveles de corrosión atmosférica y disminución de la capacidad de tracción en la zona de estudio.
3. Construir un estudio experimental que permita confirmar los valores obtenidos en para las capacidades de carga, calculadas por análisis computacional.
4. Estudiar la posible relación de la geometría con el efecto de disminución de carga, analizando probetas estandarizadas de diferentes tamaños y formas.
5. Realizar estudios que permitan la construcción de ecuaciones de cálculo estructural que dependan del este coeficiente de capacidad de tracción en el tiempo.

REFERENCIAS

- Alfaro y Alfaro (2018). **Uso de la función solver de Excel para el cálculo de la velocidad de corrosión de acero al carbono en una solución de NaCl al 3,5% saturada de oxígeno, O₂: un tutorial practico.** *Educación Química*. 29(2) [Guía práctica]. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2018000200017&lng=es&nrm=iso
- Anonimo (s/a). **Corrosión atmosférica.** [Artículo online]. Recuperado de: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm
- Almusallam, A. A. (2001). **Ffect of degree of corrosion on the propierties of reinforcing Steel bars.** *Construction an Building Materials*, 15(2001), 361-368.
- Arias, F (2012). **El proyecto de investigación.** Introducción a la metodología científica. (6ª. Ed.). Caracas, Venezuela. Editorial Episteme.
- ASTM (2013). Norma N° E8/E8M-13a. **Standard test methods for tensión testing of metallic materials.** *American Association State Highway and Transportation Officiials Standars*. N° T68, del 09 de mayo de 2013, Estados Unidos.
- Balestrini, M (2006). **Como se elabora el proyecto de investigación.** (7ª. Ed.) Caracas, Venezuela.
- Balvatin, A (2016). **Ensayos y propiedades mecánicas de los materiales.** [diapositivas de PowerPoint] Recuperado de: <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/balvatin/documentos/Ciencia%20de%20Materiales%20para%20Ingenieria%20Mecanica/Unidad%20I%20-%20201.%20Ensayos%20y%20Propiedades%20de%20Materiales.pdf>.

- Budynas, R & Nisbeth, K (2008). **Diseño en ingeniería mecánica de Shigley** (8ª. Ed.). México DF, México. Editorial McGraw-Hill.
- Chen, Z; Cui, F & Kelly, G (2008). **Calculations of the cathodic current delivery capacity and stability of crevice corrosion under atmospheric environments.** *Journal of the Electrochemical Society.* 157 (2008), 360-368
- D'Santiago, B (2019). **Modelo de predicción de corrosividad en estructuras ubicadas en las costas en los estados Carabobo y Falcón implementando las herramientas de redes neuronales artificiales.** Trabajo de Grado. Publicado: Universidad José Antonio Páez (UJAP). Valencia, Carabobo.
- Du, Y. G.; Clark, L. A. & Chan, H. C. (2005). **Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars.** *Magazine of Concrete Research,* 57(7), 407-419.
- Fontes, E & Nistad, B (2013). **Modeling corrosion and corrosion protection.** *Comsol White Paper.*
- Garcia, M (1995). **Aportaciones al comportamiento resistente de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión de sus armaduras.** Tesis doctoral. Publicado por: Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Genescá, J (s/a). **Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión.** *Técnica de extrapolación de Tafel.* [Documento para formación] Universidad Nacional Autónoma de México. México DF, México. Recuperado de: <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Tafel2.pdf>
- Guzhñay, F (2012). **Estudio del comportamiento del acero A36 mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante la norma ASTM-8N.** Trabajo de Grado. Publicado: Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.

- Hillie, B (1978). **Ionic channels in excitable membranes. Current problems and biophysical approaches.** *Biophys Journal.* 22(1978), 283-294.
- Mongonon, P (2001). **Ciencia de Materiales.** México DF, México. Primera Edición. Editorial: Pearson Education.
- Pallela, S & Martins, F. (2010). **Metodología de la investigación cuantitativa.** (2ª. Ed.). Caracas, Venezuela.
- Similion, H; Dolgikh, O; Terry, H & Deconinck, J (2014). **Atmospheric corrosion modeling.** *Corrosion Reviews.* [Manuscript]
- Tamayo & Tamayo, M (1997). **El Proceso de la Investigación científica.** México. Editorial Limusa S.A.
- Toro, S; Sanchez, P & Huespe, A (2015). **Análisis numérico de un problema de deterioro estructural causado por la corrosión en las armaduras del hormigón armado.** Trabajo de Grado. Publicado: Universidad Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina.
- Sabino, C (2004). **El proceso de la investigación.** Caracas. Editorial: Panapo.
- Velilla, E; Villada, F & Echeverria, F (2009). **Modelos de pérdida de masa de hacer por corrosión atmosférica en Colombia usando inteligencia computacional.** Trabajo de Grado. Publicado: Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

ANEXOS

ANEXOS

A. Norma E8/E8M de la ASTM, que designa las dimensiones de las probetas a estudiar



Designation: E8/E8M - 13a

American Association of State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T98
An American National Standard

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹

This standard is issued under the fixed designation E8/E8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (e) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope^a

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

1.2 The gauge lengths for most round specimens are required to be 4D for E8 and 5D for E8M. The gauge length is the most significant difference between E8 and E8M test specimens. Test specimens made from powder metallurgy (PM) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the porosity of the material to a specific projected area and density.

1.3 Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A370 and Test Methods B557, and B557M.

1.4 Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C [50 to 100°F] unless otherwise specified.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as separate from inch/pound units. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.08 on Uniaxial Testing.

^a Current edition approved July 1, 2013. Published August 2013. Originally approved in 1926. Last previous edition approved 2013 as E8/E8M - 13. DOI: 10.1520/E0808-13a.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

A356/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines

A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

B557 Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products

B557M Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric)

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E20 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications

E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems

E345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil

E891 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E1012 Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application

D1566 Terminology Relating to Rubber

E1856 Guide for Evaluating Computerized Data Acquisition Systems Used to Acquire Data from Universal Testing Machines

3. Terminology

3.1 Definitions of Terms Common to Mechanical Testing—

3.1.1 The definitions of mechanical testing terms that appear in the Terminology E6 apply to this test method.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

^aA Summary of Changes section appears at the end of this standard.

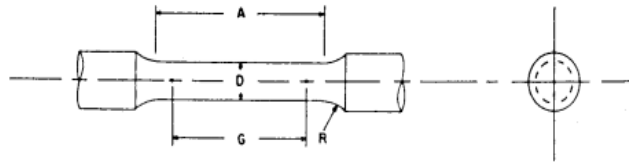
Copyright © ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2900, United States

Standard E8/E8M-13a
Printed in the United States of America
No reproduction or translation permitted without written permission from ASTM

Authorized for Sale From and Sale To: 01/13
Not for Resale: 000000010000000001

Anexo A1: Tabla de dimensiones para probeta simple de sección transversal circular. Dimensiones de probeta seleccionada para el estudio

 **E8/E8M - 13a**



Dimensions, mm [in.]

For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]

	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]	
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]	
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]	
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]	

Dimensions, mm [in.]

For Test Specimens with Gauge Length Five times the Diameter [E8M]

	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	
G—Gauge length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.565 ± 0.005]	
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]	
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]	
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]	

Anexo A2: Ilustración del método de ensayo universal de tracción. Resaltada la zona donde tiende a provocarse la falla en los especímenes.

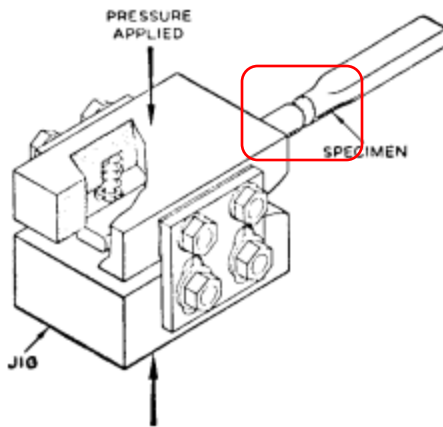
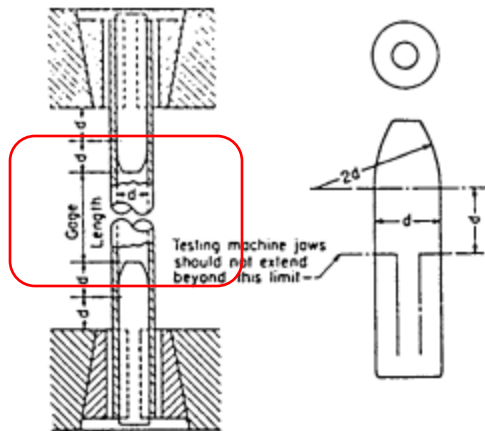


FIG. 10 Squeezing Jig for Flattening Ends of Full-Size Tension Test Specimens



NOTE 1—The diameter of the plug shall have a slight taper from the line limiting the test machine jaws to the curved section.

FIG. 11 Metal Plugs for Testing Tubular Specimens, Proper Location of Plugs in Specimen and of Specimen in Heads of Testing Machine

B. Proceso para la simulación del ensayo a tracción universal en Autodesk Inventor Professional 2018.

Anexo B1: Modelado del espécimen

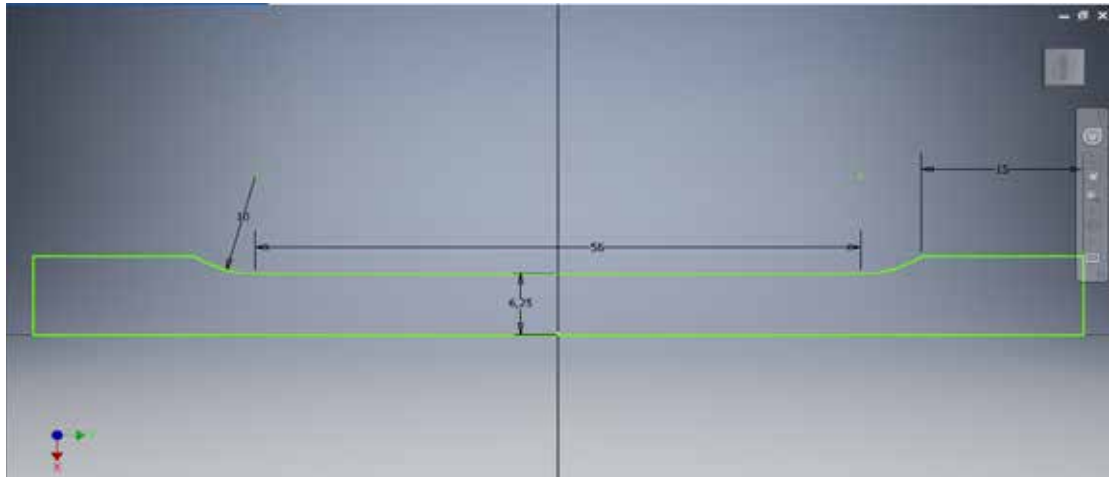


Figura B1.1: Construcción de un boceto de un corte transversal longitudinal de la probeta.

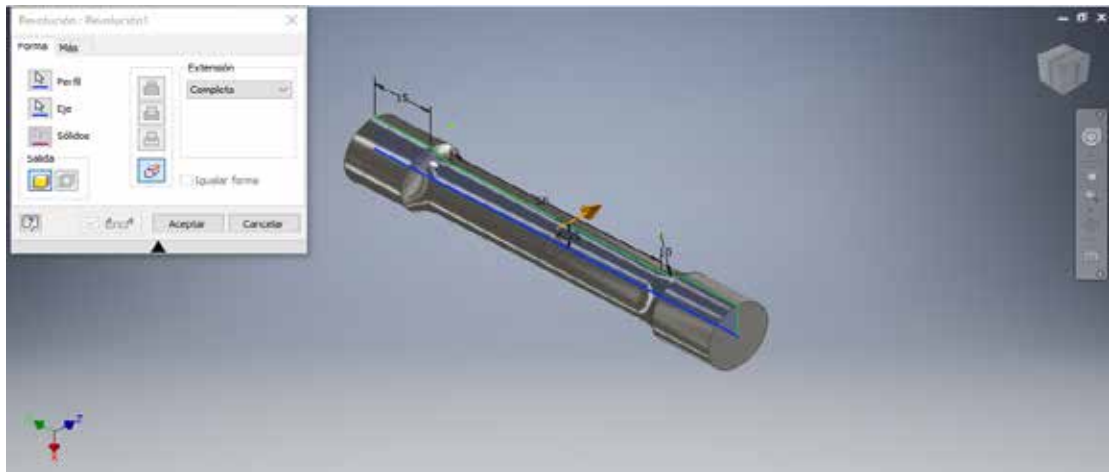


Figura B1.2: Empleo de la operación revolución para crear la geometría de la probeta en 3D.

Donde el eje Azul es el eje de revolución, y el perfil Verde la geometría a revolucionar.



Figura B1.3: Vista en 3D del espécimen.

Anexo B2: Pasos para simulación de ensayo a tracción

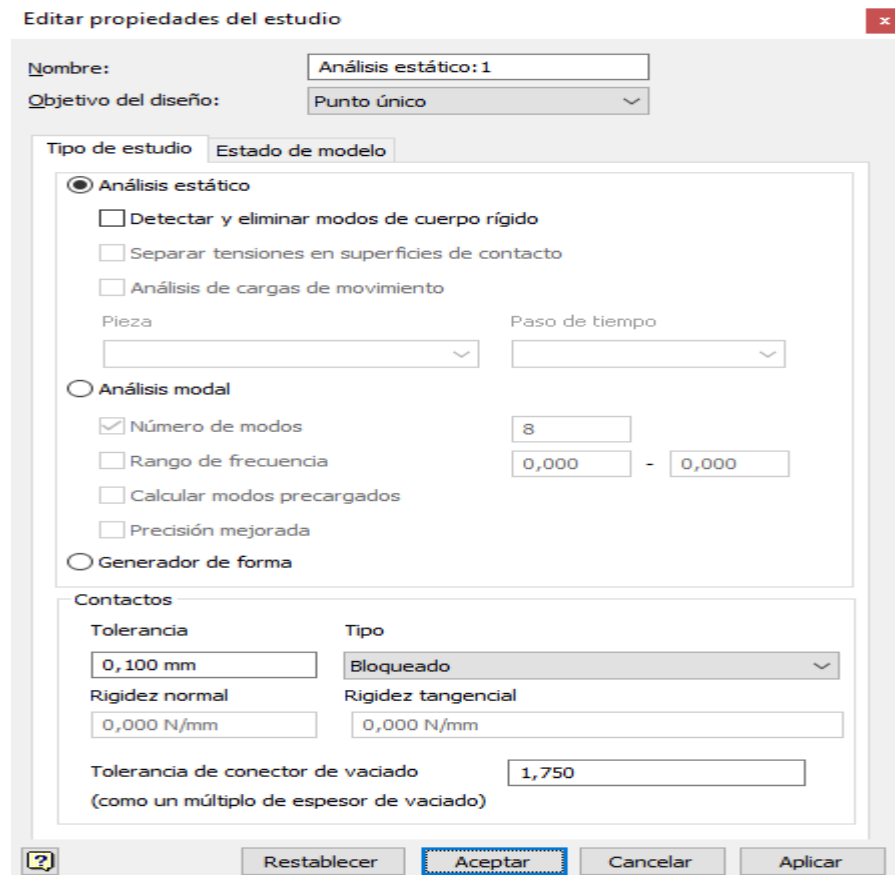


Figura B2.1: Programación de análisis estático.

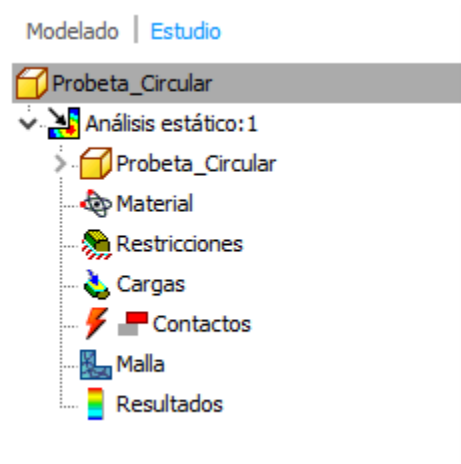


Figura B2.2: Pasos a seguir para realizar el estudio.

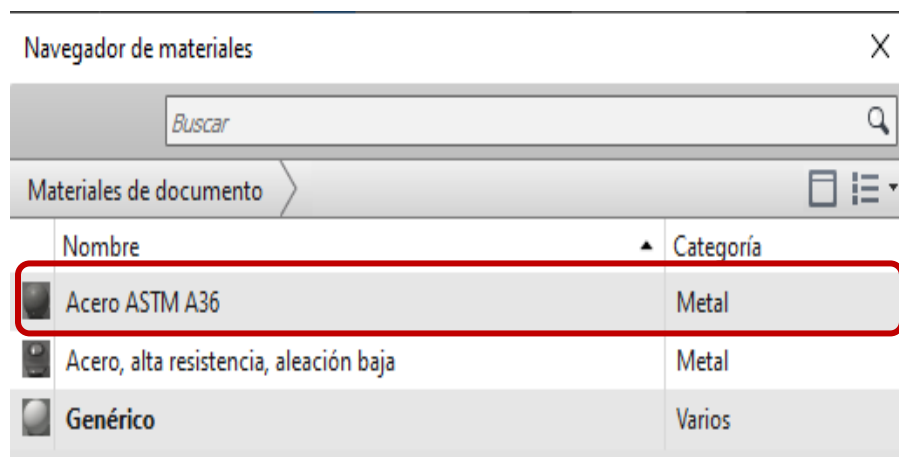


Figura B2.3: Asignación de material a la pieza

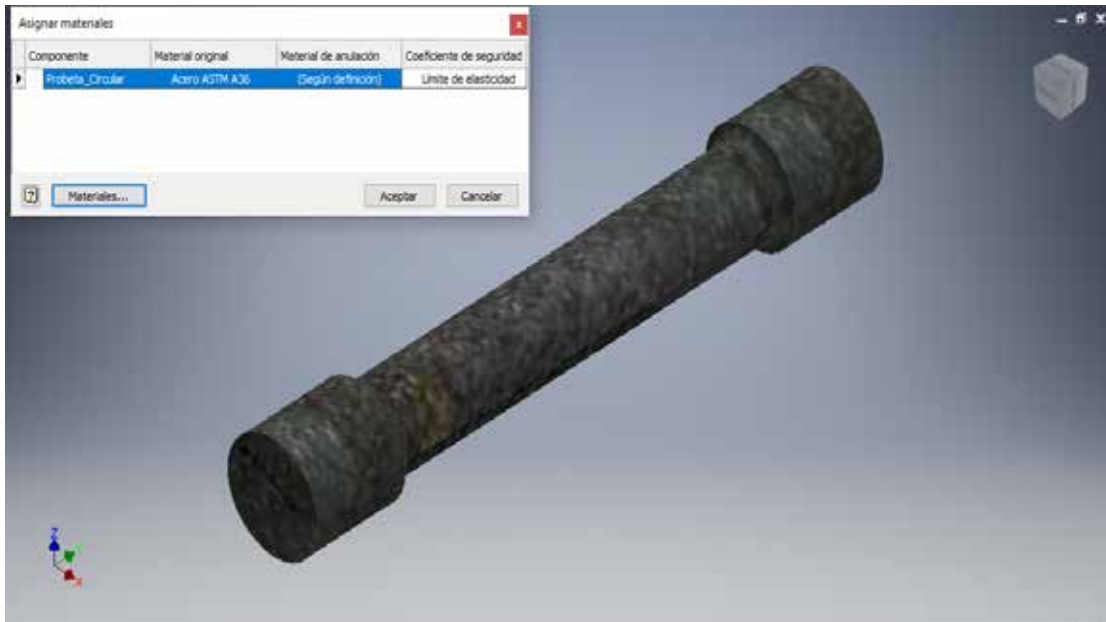


Figura B2.4: Aspecto de la probeta con el material asignado.



Figura B2.5: Aplicación de restricción fija



Figura B2.6: Aplicación de carga en la cara opuesta a la restricción fija.

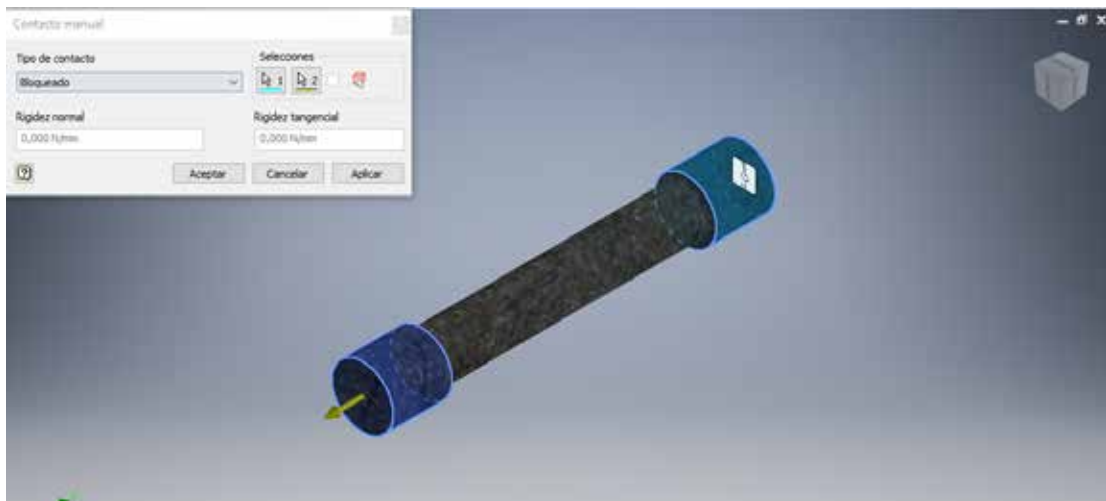


Figura B2.7: Aplicación de contactos. En simulación de agarre de maquina de ensayos universal.

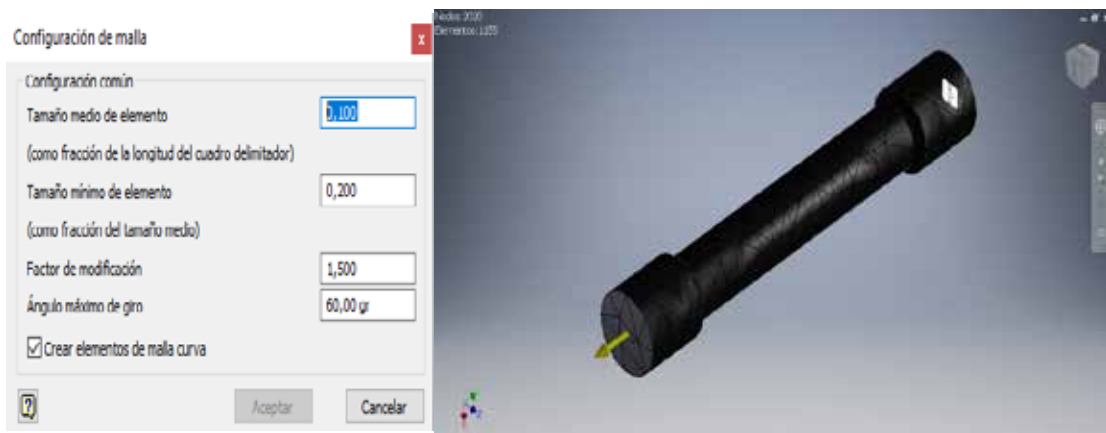


Figura B2.8: Configuración y vista de malla.

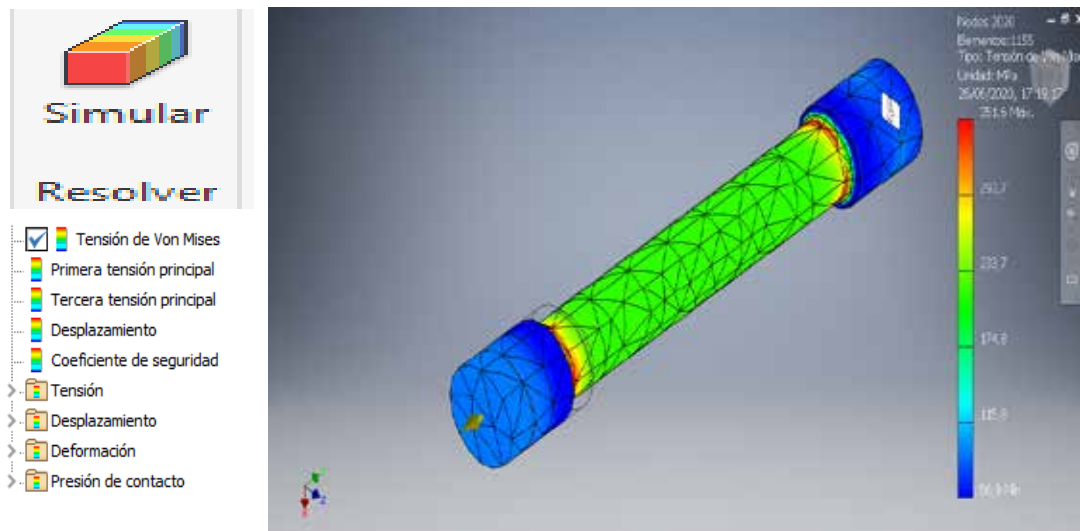


Figura B2.9: Simulación y resultados para posterior análisis.

Anexo C. Tablas de cálculo numerico para la corrosión.

Anexo C1. Vínculo de libro de cálculo

