

**DIAGNOSTICO DE LAS VARIILLAS UBICADAS A LA INTEMPERIE EN LA OBRA
DE LA ESTACIÓN DE METROLINEA PAPI QUIERO PIÑA, POR MEDIO DE UN
ANALISIS MECANICO A TRACCIÓN Y ENSAYO ELECTROQUIMICO.**

GALA RINCÓN MORA.

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

BUCARAMANGA

2017

**DIAGNOSTICO DE LAS VARIILLAS UBICADAS A LA INTEMPERIE EN LA OBRA
DE LA ESTACIÓN DE METROLINEA PAPI QUIERO PIÑA, POR MEDIO DE UN
ANALISIS MECANICO A TRACCIÓN Y ENSAYO ELECTROQUIMICO.**

GALA RINCÓN MORA.

Tesis de grado para optar al título de ingeniero civil

DIRECTOR

NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

SECCIONAL BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2017

*“...Hablar y escribir no es poner
acertijos y adivinanzas, es comunicarse con otros,
hacer que participen de lo que pensamos...”*

Héctor Abad Faciolince.

AGRADECIMIENTOS

Para llegar a este momento son varias las personas que me han acompañado, un grupo docente que imprimió su conocimiento en el transcurrir de estos cinco años, resaltando a mi directora de proyecto Norma Cristina Solarte V., la cual confió en el tema de mi elección para la realización de este proyecto, y así mismo con su ejemplo de mujer integra y creyente apporto a mi crecimiento personal.

Por otro lado está mi familia, mis papas y hermano, quienes sin dudas confían en mis capacidades, valores y decisiones, y han formado la mujer que soy hoy; la que hoy les da las gracias por estar siempre ahí impulsándome a ser mejor cada día, a retarme, y demostrarme que tengo las capacidades para afrontar diferentes circunstancias.

Agradezco a la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), quienes me colaboraron con la realización y guía de ensayos específicos en el área de la corrosión; poniendo a mi disposición un excelente grupo de trabajo.

GALA RINCÓN MORA

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 MARCO TEÓRICO	17
1.1 CONCRETO	17
1.1.1 <i>Componentes del concreto</i>	17
1.1.1.1 Cemento	17
1.1.1.2 Aditivos	18
1.1.1.3 Agregados	18
1.1.2 <i>Comportamiento</i>	19
1.2 ACERO DE REFUERZO	19
1.2.1 <i>Requisitos Mecánicos</i>	21
1.2.1.1 Ensayo de tensión	21
1.2.1.2 Propiedades de doblado	22
1.2.2 <i>Comportamiento estructural</i>	22
1.2.3 <i>Acero Galvanizado</i>	23
1.3 CONCRETO REFORZADO	24
1.4 CORROSIÓN	25
1.5 CORROSIÓN DEL REFUERZO.	27
1.5.1 <i>Corrosión del refuerzo en el concreto</i>	29
1.6 TIPOS DE CORROSIÓN	31
1.6.1 <i>Corrosión Localizada</i>	31
1.6.1.1 Corrosión por picadura	31
1.6.1.1 Corrosión en espacios confinados	33
1.6.1.2 Corrosión bajo tensión	34
1.6.1.3 Corrosión por corrientes de interferencia	34
1.6.2 <i>Corrosión Uniforme/Generalizada</i>	35

1.6.3	<i>Corrosión Galvánica</i>	35
1.7	FACORES QUE AFECTAN LA ARMADURA (ACERO)	35
1.7.1	<i>Estado superficial del acero</i>	35
1.7.2	<i>Humedad Ambiental</i>	36
1.7.3	<i>Efecto de la Temperatura</i>	36
1.7.4	<i>Corrosión inducida por cloruros</i>	36
1.7.5	<i>Corrosión por carbonatación</i>	38
1.8	TECNICAS ELECTROQUIMICAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN	39
1.8.1	<i>Método de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)</i>	40
1.8.2	<i>Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)</i>	41
1.8.3	<i>Pulso galvanostático (ocp) de potencial de circuito abierto.</i>	43
2	METODOLOGÍA	44
2.1	INSPECCIÓN IN-SITU	44
2.2	PARÉMETROS DE ESTUDIO	46
2.3	ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y EQUIPOS	46
2.4	ACERO DE REFUERZO	49
2.5	ENSAYOS REALIZADOS	51
2.5.1	<i>Ensayo a Tracción</i>	51
2.5.2	<i>Gráficas de Esfuerzo (σ) vs Deformación (ϵ)</i>	52
2.5.3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	64
2.5.3.1	Porcentaje de elongación	64
2.5.3.2	Porcentaje de reducción de área.	65
2.5.3.3	Límite de fluencia	66
2.5.3.4	Módulo de elasticidad	66
2.5.3.5	Decapado del Acero	67
2.5.3.6	Velocidades de Corrosión por pérdida en peso.	67

2.5.3.7	Cálculo de la velocidad de Corrosión. -----	69
2.5.3.8	Ensayo de Potenciales de Corrosión (Eoc). -----	70
2.5.3.9	Diagrama de Pourbaix para el hierro. -----	72
2.6	INSPECCIÓN VISUAL -----	73
2.6.1	<i>Características visuales</i> -----	73
3	CONCLUSIONES -----	76
4	RECOMENDACIONES -----	78
5	NOMENCLATURA -----	80
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS -----	82
7	ANEXOS -----	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESFUERZO – DEFORMACIÓN DEL ACERO -----	23
FIGURA 2. CELDA DE CORROSIÓN -----	26
FIGURA 3. PROCESO DE REFINACIÓN DEL ACERO -----	28
FIGURA 4 CELDA DE CORROSIÓN EN EL ACERO VERTIDO EN CONCRETO -----	29
FIGURA 5. CONDICIONES PARA QUE EXISTA O NO CORROSIÓN. -----	31
FIGURA 6. CORROSIÓN POR PICADURA -----	32
FIGURA 7. RESUMEN DE ETAPAS DE LA CORROSIÓN EN ESPACIOS CONFINADOS. -----	33
FIGURA 8. CORROSIÓN GENERALIZADA -----	35
FIGURA 9. GRAFICA DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN -----	41
FIGURA 10. DIAGRAMA DE NYQUIST DEL ESPECTRO DE IMPEDANCIA MEDIDA DE BARRAS DE ACERO EN EL HORMIGÓN FRESCO (PUNTOS) Y SU MODELO ELÉCTRICO (LÍNEA) CON LA ECUACIÓN DE IMPEDANCIA -----	43
FIGURA 12. DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL HIERRO A 25°C. -----	73

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 1. ACERO UBICADO A LA INTEMPERIE SIN NINGUNA PROTECCIÓN -----	44
FOTOGRAFÍA 2. COLUMNAS NO FINALIZADAS. -----	45
FOTOGRAFÍA 3. ESTADO VISUAL DE LAS COLUMNAS.-----	45
FOTOGRAFÍA 4. VARILLAS DE ENSAYO A TRACCIÓN 2 Y 3 -----	46
FOTOGRAFÍA 5. VARILLAS DE ENSAYO A TRACCIÓN 1Y 4 -----	47
FOTOGRAFÍA 6.CALIBRADOR DE VERNIER UTILIZADO EN EL ENSAYO.-----	47
FOTOGRAFÍA 7. MAQUINA UNIVERSAL- ENSAYO DE TENSIÓN -----	49
FOTOGRAFÍA 8. MARCA DE VARILLAS DE ACERO ENSAYADAS. -----	50
FOTOGRAFÍA 9. ESTADO DE LAS PROBETAS EXPUESTAS Y NUEVAS ANTES DEL PROCESO DE DECAPADO. -----	68
FOTOGRAFÍA 10. PROBETAS DESPUÉS DEL DECAPADO. -----	68
FOTOGRAFÍA 11. ESTADO DETALLADO DE LAS PROBETAS DESPUÉS DEL DECAPADO -----	69
FOTOGRAFÍA 12. POTENCIOSTATO Y CELDA PARA MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS.-----	70
FOTOGRAFÍA 13. ASPECTO FÍSICO QUE PRESENTAN ALGUNAS VARILLAS -----	75

LISTA DE GRÁFICAS

GRAFICA 1. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 1, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO NO CORROÍDO. -----	54
GRAFICA 2. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 2, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO NO CORROÍDO. -----	55
GRAFICA 3. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 3, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO NO CORROÍDO. -----	56
GRAFICA 4. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 4, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO NO CORROÍDO. -----	57
GRAFICA 5. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 5, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO NO CORROÍDO. -----	58
GRAFICA 6. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 6, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO QUE PRESENTA CAPA DE OXIDO. -----	59
GRAFICA 7. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 7, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO QUE PRESENTA CAPA DE OXIDO. -----	60

GRAFICA 8. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 8, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO QUE PRESENTA CAPA DE OXIDO. -----	61
GRAFICA 9. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 9, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO QUE PRESENTA CAPA DE OXIDO. -----	62
GRAFICA 10. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA PROBETA 10, QUE REFLEJA LA LÍNEA ESFUERZO-DEFORMACIÓN REAL Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN , CON SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, DEL GRUPO QUE PRESENTA CAPA DE OXIDO. -----	63
GRAFICA 11. CURVAS DE POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO (E_{oc}) -----	72

RESUMEN GENERAL DE TABAJO DE GRADO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DIAGNOSTICO DE LAS VARIILLAS UBICADAS A LA INTEMPERIE EN LA OBRA DE LA ESTACIÓN DE METROLINEA PAPI QUIERO PIÑA, POR MEDIO DE UN ANALISIS MECANICO A TRACCIÓN Y ENSAYO ELECTROQUIMICO.

AUTOR(ES): Gala Rincón Mora

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Norma Cristina Solarte Vanegas

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en el análisis y diagnostico de las varillas que se encuentra expuestas hace seis años a los factores atmosféricos, en la obra del portal Papi Quiero Piña de la empresa METROLINEA S.A.S, las cuales se compararon contra varillas totalmente nuevas, haciendo uso de herramientas de estudio como el ensayo a tracción, cuyo resultado proporcionó características físico - mecánicas que se compararon con la norma NTC 2289, detectando que parámetros habían presentado cambios. Un análisis electroquímico llamado Potencia a circuito abierto, permitió detentar si se encontraba presencia de corrosión en las varillas y así mismo calificar la agresividad del medio, por medio de un decapado químico y saber a que velocidad de corrosión se encuentra influenciada.

PALABRAS CLAVES:

Corrosión, Decapado, Velocidad de Corrosión, Potencia a Circuito Abierto.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DIAGNOSIS OF THE RODS LOCATED TO THE WEATHER IN THE WORK STATION OF METROLINEA PAPI I WANT PINEAPPLE, THROUGH A MECHANICAL ANALYSIS TO TRACTION AND ELECTRO-CHEMICAL TESTING.

AUTHOR(S): Gala Rincón Mora

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Norma Cristina Solarte Vanegas

ABSTRACT

This project focuses on the analysis and diagnosis of rods exposed six years ago to atmospheric factors, in the work of the portal Papi Quiero Piña METROLINEA SAS, which were compared against totally new rods, making use of Study tools such as the tensile test, the result of which provided physical - mechanical characteristics that were compared with the standard NTC 2289, detecting which parameters had presented changes. An electrochemical analysis called open circuit potencial, allowed to detect if there was presence of corrosion in the rods and also to characterize the aggressiveness of the medium, by means of a chemical pickling and to know to what speed of corrosion is influenced.

KEYWORDS:

Corrosion, Pickling, Corrosion Speed, Open Circuit Potencial.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado con varillas de acero, presentó gran acogida en la industria como uno de los materiales más empleados en la realización de proyectos en el campo de la ingeniería civil, debido a la facilidad de moldearse y adaptarse a diferentes espacios, formas en estado fresco; consigo trajo una constante búsqueda de diferentes usos y cualidades aplicables, al mismo tiempo que generó gran impacto en la economía mundial.

En la construcción es considerado uno de los materiales con mayor vida útil. Sin embargo, esta teoría ha ido modificándose puesto que sus propiedades se han visto afectadas por fenómenos como la corrosión, tema importante a lo largo del desarrollo del presente proyecto, o por cambios internos del pH del concreto causando el proceso de carbonatación en el acero, corroyéndose en el conjunto concreto-acero.

A nivel mundial se cuenta con los siguientes registros económicos debido a este problema; la mitad de los 575.000 puentes de Estados Unidos de Norteamérica se encuentran afectados por problemas de corrosión y un 40 % es considerado deficiente a nivel estructural, los costos rodean un valor de US\$50 billones, cifra que está en continuo crecimiento (CYTED).

También se encuentran otros países como el Reino Unido que estima sus costos de reparación en más de 620 millones de libras, en Iberoamérica no se cuenta con estudios económicos detallados por la corrosión, sin embargo es uno de los factores principales de deterioro de sus estructuras.

Países como Brasil, Dal Molin realizó un estudio a 1512 casos con diferentes patologías, dando como diagnóstico que la corrosión de la armadura representa el 40% del total de los daños

registrados. En Colombia se pierde más de 26 millones de dólares debido al deterioro de los materiales por corrosión, solo el 2% de las estructuras del país se encuentran galvanizadas para disminuir el ataque por este fenómeno. (GALVANIZADO EN CALIENTE). Es importante que se considere que la calidad de las reparaciones y así mismo su durabilidad, dependerán del correcto y oportuno diagnóstico a la estructura de concreto reforzado

Este trabajo esta concebido en el ambiente de la corrosión, tema principal del estudio, como factor degradante de las características mecánicas de las varillas expuestas a este fenómeno o que ya presentan procesos corrosivos activos; para esto se conto con varillas de prueba que fueron extraídas de la construcción del portal de Metrolinea Papi Quiero Piña, quien suspendió las actividades en el año 2011 por problemas económicos. Debido a esto y a la mala disposición del material, las varillas de acero figurado en su totalidad, fueron apiladas y dejadas a la intemperie durante estos 6 años, sin ninguna protección o aislamiento, tanto de la atmosfera como del suelo en el cual se encuentran depositadas.

Para esto se formularon los siguientes objetivos:

Objetivo General.

- Estudio de presencia de corrosión y/o pérdidas de propiedades fisico-mecánicas en las varillas que se encuentran a la intemperie, pertenecientes a la obra del Portal Papi Quiero Piña (PQP), de la empresa Metrolinea S.A.S.

Objetivos Específicos.

- Analizar el comportamiento de muestras de varillas extraídas aleatoriamente de la obra y de otras adquiridas directamente de proveedores de materiales para la ejecución de este proyecto para someterlas a esfuerzos de tensión axial.
- Realizar una comparación entre las varillas adquiridas de la construcción del Portal de Metrolinea Papi Quiero Piña y unas varillas nuevas, en donde se identifiquen las propiedades mecánicas de las muestras, como zona elástica y plástica, límite fluencia, el esfuerzo de ruptura y la elongación, por medio de un ensayo de tensión.
- Comparar e interpretar las gráficas de Esfuerzo vs Deformación para el ensayo de tensión entre los resultados obtenidos de las probetas de las varillas nuevas y las varillas proporcionadas por Metrolinea.
- Diagnosticar si hay presencia de corrosión y de qué tipo, en las varillas extraídas de su punto de almacenamiento, sus propiedades electroquímicas, como velocidad de corrosión, propiedades de la interface, por medio de ensayos electroquímicos.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 CONCRETO

Es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, se deriva de la mezcla de cemento, agua y aditivos que dependen de las especificaciones, y su parte granular compuesta por agregados finos (arena) y gruesos (grava) (Del Valle, Pérez & Martínez,2001). La reacción entre el cemento y el agua genera una masa que se denominada pasta cementante, la cual se encarga de unir los agregados conformando un solo sistema.

1.1.1 Componentes del concreto

1.1.1.1 Cemento

El cemento es un aglomerante conformado por la mezcla de arcillas y calizas, las cuales son trituradas y tienen la cualidad que al momento de entrar en contacto con el agua comienza un proceso de endurecimiento, este material tiene propiedades de adherencia y cohesión generando la unión con los fragmentos minerales, conformando un sistema resistente, compacto y durable.

El cemento Portland es uno de los más utilizados para la generación de concreto; es una mezcla cerámica artificial que se fabrica a partir de arcilla y piedra caliza. La primera aporta sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en tanto que la segunda proporciona la cal (CaO) cuyos intervalos de composición normal son: 19-25% SiO_2 , 5-9% Al_2O_3 , 60-64% CaO y 2-4% FeO . (Rodríguez,2009).

La calidad de este cemento se encuentra regido por la norma ASTM C 150. Tabla 1.

Tabla 1 Tipos de cemento Portland

CEMENTO	USO
TIPO I	Cemento de uso general, cuando no hay especificaciones de otro tipo.
TIPO IA	Para el mismo uso del tipo I, con incorporación de aire.
TIPO II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y moderada resistente a los sulfatos.
TIPO IIA	Para los mismos usos del tipo II, con incorporación de aire.
TIPO III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado.
TIPO IIIA	Para los mismos usos del tipo III, con incorporación de aire.
TIPO IV	Presenta calor de hidratación más bajo que el tipo III. Apto para uso masivo.
TIPO V	Alta resistencia a alta acción de sulfatos. (Aguas freáticas y domestica).

Fuente: Norma ASTM C 150. p, 1.

1.1.1.2 Aditivos

Es definido como un material que no siendo agua, agregado, cemento hidráulico o fibra de refuerzo, es empleado como un ingrediente del concreto, añadiéndolo durante el mezclado (ASTM C 125), hay diferentes tipos químicos, de incorporación de aire, acelerantes, retardantes, etc., los cuales cumplen las especificaciones según la norma ASTM C 494 y ASTM C 494M.

1.1.1.3 Agregados

Material granular como arena, grava, piedra triturada, dividida en diferentes tipos, agregados finos, aquellos que pasa el tamiz No. 4 y se encuentra retenido casi en su totalidad en el tamiz No.

200, agregados gruesos, el predominante y retenido en el tamiz No.4, estos dos son unos de los más utilizados pero también contamos con agregados de alta, normal y baja densidad, agregado liviano y pesado (NTG – 41006, pg. 6).

1.1.2 Comportamiento

El concreto presenta ventajas como fácil preparación, fácil manipulación en estado blando, alta resistencia a la compresión, etc., pero al mismo tiempo es un material frágil al ser sometido a esfuerzos de tensión. La curva Esfuerzo – Deformación a compresión tiene una forma parabólica, obteniendo en su esfuerzos máximo deformaciones unitarias entre 0.002 y 0.0035, la normas NSR 10 recomienda tomar como deformación máxima 0.003, en concretos de densidad normal esto quiere decir aquellos que se encuentren entre los 21 y 35 Mpa.

1.2 ACERO DE REFUERZO

El acero de refuerzo es la aleación entre hierro y carbono, generalmente su acabado es corrugado debido a que genera mayor adherencia en la unión con el concreto, estos se encuentran equidistantes en la longitud total de la barra, la norma NSR 10 estipula que las varillas de superficie lisa “...solo puede utilizarse en estribos, espirales o tendones, y refuerzo de repartición y temperatura” (NSR 10 – Titulo C, 2010,pg 56) , los aceros de refuerzo son fabricadas bajo las normativas:

- NTC 2289- (ASTM 706M)
- NTC 4013 (ASTM A767M)
- NTC 161 (ASTM A615M)

La implementación de este material en conjunto con el concreto a permitido generar mayores beneficios sismo resistentes a las estructuras, por lo que es importante realizar las caracterizaciones del acero para determinar sus dimensiones (Tabla 2), como también los ensayos pertinentes para la identificación de sus propiedades mecánicas (fluencia, rotura, deformación máxima, esfuerzo máxima, etc.), es por eso que las barras deben cumplir los siguientes criterios establecidos en la Tabla 3, al momento de ser sometidas a ensayos de tensión, requisitos de ensayo de doblado (NTC – 2289, 2007, pg 4), y ensayos de composición química debido a que el porcentaje de cada uno de sus componentes juegan un papel importante para que cumpla las propiedades mecánicas que se mencionan en la Tabla 3, junto con las tablas encontradas en el Anexo A de la norma NTC 2289, así se podrá tener claridad del material que se desea utilizar al momento de llevar acabo una actividad.

Por lo tanto el acero presenta beneficios como alta resistencia a la tensión, mayor ductilidad y dureza; una característica importante es que la resistencia a tensión y a compresión en estado de fluencia en los aceros comunes es aproximadamente 15 veces la resistencia a compresión del concreto y mas de 100 veces su resistencia a la tensión, así mismo una de sus desventajas es su alto costo, la facilidad con la que puede iniciar un proceso corrosivo y que a altas temperaturas disminuye su resistencia debido a su alta conductividad térmica. (Rodríguez, 2009)

Tabla 2. Número de designación de las barras corrugadas y rollos, peso (masa) nominal, dimensiones nominales y requisitos de los resaltes.

Numero de designación de la barra ^A	Peso (masa) nominal lb/pie (kg/m)	Dimensiones nominales ^B			Requisitos de los resaltes, pulgadas (mm)		
		Diámetro pulgadas (mm)	Área de la sección transversal pulgadas ² (mm ²)	Perímetro pulgadas (mm)	Promedio máximo del espaciamiento	Promedio mínimo de altura	Separación entre los extremos de los resaltes (máximo 12,5% del perímetro nominal)
2	0,167 (0,249)	0,250 (6,35)	0,049 (31,67)	0,785 (19,95)	0,175 (4,45)	0,010 (0,25)	0,098 (2,49)
3	0,376 (0,560)	0,275 (9,5)	0,11 (71)	1,178 (29,9)	0,262 (6,7)	0,015 (0,38)	0,143 (3,6)
4	0,668 (0,994)	0,500 (12,7)	0,20 (129)	1,571 (39,9)	0,350 (8,9)	0,020 (0,51)	0,191 (4,9)
5	1,043 (1,552)	0,625 (15,9)	0,31 (199)	1,963 (49,9)	0,437 (11,1)	0,028 (0,71)	0,239 (6,1)
6	1,502 (2,235)	0,750 (19,1)	0,44 (284)	2,356 (59,8)	0,525 (13,3)	0,038 (0,97)	0,286 (7,3)
7	2,044 (3,042)	0,875 (22,2)	0,60 (387)	2,749 (69,8)	0,612 (15,5)	0,044 (1,12)	0,334 (8,5)
8	2,670 (3,973)	1,000 (25,4)	0,79 (510)	3,142 (79,8)	0,700 (17,8)	0,050 (1,27)	0,383 (9,7)
9	3,400 (5,060)	1,128 (28,7)	1,00 (645)	3,544 (90,0)	0,790 (20,1)	0,056 (1,42)	0,431 (10,9)
10	4,303 (6,404)	1,270 (32,3)	1,27 (819)	3,990 (101,3)	0,889 (22,6)	0,064 (1,63)	0,487 (12,4)
11	5,313 (7,907)	1,410 (35,8)	1,56 (1006)	4,430 (112,5)	0,987 (25,1)	0,071 (1,80)	0,540 (13,7)
14	7,65 (11,38)	1,693 (43,0)	2,25 (1452)	5,32 (135,1)	1,185 (30,1)	0,085 (2,16)	0,648 (16,5)
18	13,60 (20,24)	2,257 (57,3)	4,00 (2581)	7,09 (180,1)	1,58 (2,59)	0,102 (2,59)	0,864 (21,9)

^A Los números de las barras están basados en octavos de pulgada y corresponden al diámetro nominal de las barras.

^B Las dimensiones nominales de las barras corrugadas son equivalentes a la de las barras lisas que tengan el mismo peso (masa) nominal por pie (metro) de longitud.

Fuente: Norma NTC 2289

1.2.1 Requisitos Mecánicos

1.2.1.1 Ensayo de tensión

Es el ensayo principal para hallar las propiedades mecánicas de este tipo de material, su practica se lleva acabo en una maquina especializada, la cual aplica a la probeta una carga gradual que aumenta y de tal forma va registrando el valor de la fuerza actuante en la probeta y sus deformaciones . Los valores que establece la norma NTC 2289 para barras de baja aleación se encuentra en la tabla continua.

Tabla 3 Requisitos de tensión

Resistencia a la tracción mínima psi (MPa)	80 000 (550) ^A
Resistencia a la fluencia mínima psi (MPa)	60 000 (420)
Resistencia a la fluencia máxima psi (MPa)	78 000 (540)
Alargamiento mínimo en 8 pulgadas para el sistema inglés ó 200 mm para Sistema Internacional (SI)	
Número de designación de las barras	%
2, 3, 4, 5, 6	14
7, 8, 9, 10, 11	12
14, 18	10
^A La resistencia a la tracción debe ser igual o mayor a 1,25 veces la resistencia a la fluencia.	

Fuente: Norma NTC 2289

1.2.1.2 Propiedades de doblado

Para este ensayo la probeta debe ser capaz de soportar el doblamiento alrededor de un mandril, sin llegar a presentar doblamiento en el exterior de la zona doblada, los ángulos a los cuales deben ser sometida la barra al ser doblada se encuentra especificado en la norma técnica colombiana (NTC- 2289 Tabla 3,pg 5), la aplicación de la fuerza de doblamiento en este ensayo es uniforme y continua.

1.2.2 Comportamiento estructural

Este comportamiento es visto en la curva Esfuerzo-Deformación la cual representa diferentes zonas transicionales al momento de someter una probeta a una carga axial, como se puede observar en la Figura 1.

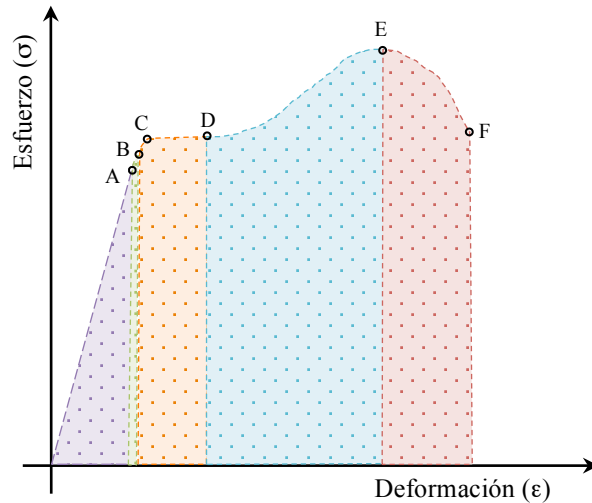


Figura 1. Esfuerzo – Deformación del acero

En la primera parte se registra una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación la cual llega hasta el punto A, esta hace referencia a la zona elástica, consigo viene el punto B correspondiente a la carga máxima que puede soportar la probeta sin perder su elasticidad, lo que quiere decir que al momento que sea retirada la carga este material volverá a su estado original, el punto C hace referencia a la carga con la cual el material empieza a fluir, esta es la zona plástica, donde el material al retirarle la carga con retornara a su estado original y mantendrá una deformación permanente, al llegar al punto D el material aumenta su resistencia a la deformación y aumenta nuevamente la carga para llegar al punto E, el cual corresponde a la carga máxima, después de este punto es observable en la probeta de ensayo una reducción en el área central lo que genera una reducción de la carga hasta la ruptura y falla del material, punto F. (Pisarenko, Yákovlev & Matvéev, 1979).

1.2.3 Acero Galvanizado

Este acero es obtenido después de aplicarle varias capas de una aleación de hierro y Zinc, lo que genera este recubrimiento es una excelente protección ante fenómenos corrosivos y también el aumento de sus propiedades. El galvanizado ante la corrosión genera tres efectos: protección por efecto barrera, protección catódica o de sacrificio y restauración de zonas desnudas; Esta capa también combate a agentes atmosféricos agresivos como lo son: los cloruros, óxidos de azufre que se registran en las zonas costeras, otra función es apartarlo de entrar en contacto directo del agua dulce o de mar.

1.3 CONCRETO REFORZADO

El mutualismo que existe entre estos dos materiales se evidencia debido a que el concreto suministra una capa de protección tanto química como física en contra de la corrosión; con respecto a la parte química, la alcalinidad del concreto hace que se genere una capa de óxido en la superficie del acero deteniendo el proceso corrosivo del mismo, cuanto a la parte física, el concreto actúa como un aislante de los agentes ambientales como los son el oxígeno (O_2), agua (H_2O), cloruros, dióxido de carbono (CO_2) (LÓPEZ, R., PÉREZ, J., TORRES, A., MARTINEZ, M., MARTÍNEZ, W., ARIZA, L., ZAMUDIO, E., GENESCÁ, J., & VALDEZ, B., 2006); es importante considerar que en ambientes agresivos donde la concentración de cloruros, sulfatos y dióxido de carbono de las zonas urbanas, es elevada, estos elementos traspasarán la capa protectora de concreto hasta llegar al acero, lo que llega a generar el deterioro del alma metálica.

Así mismo como el concreto no soporta esfuerzos a tensión ya que es un elemento frágil, el proporcionarle acero a las fibras o zonas sometidas a estas tensiones generará el mejoramiento del sistema.

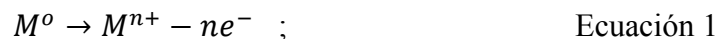
1.4 CORROSIÓN

El fenómeno de la corrosión es un proceso electroquímico que se da mediante el flujo de electrones e iones, generando en el material un deterioro tanto físico como químico de sus propiedades. Se genera pérdida del metal, el cual tiene cabida en la parte anódica del mismo y en el cátodo no hay pérdida de metal ya que esta es el área protegida.

Para que se lleve a cabo un proceso corrosivo es necesario que se conformen celdas de corrosión, que se componen por cuatro partes:

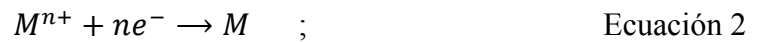
- Ánodo
- Cátodo
- Electrolito
- Camino metálico

El ánodo, es la porción del material donde ocurre una reacción de oxidación, este proceso consiste en la pérdida de electrones ya que el metal se está transformando a su forma iónica, como ejemplo podemos ver la Ecuación 1, donde “n” representa el número de electrones



En un cátodo, tiene cabida la reacción catódica, es una reacción de reducción, lo que quiere decir que hay una ganancia de electrones, esto ocurre debido a los iones que se encuentran en el

electrolito y los electrones que viajan por el camino metálico; cuando se encuentran los dos en la superficie catódica (electrones e iones) reaccionan y un ion acepta un electrón convirtiéndose en átomo, así mismo cuando este se une a otros átomos formará moléculas, las cuales pueden permanecer en la superficie catódica o ser liberada.



El camino metálico, o circuito externo es aquel conector por medio del cual se da el movimiento de electrones, desde la parte anódica hacia el cátodo, generando los electrones necesarios para la reacción de reducción. En cuanto el electrolito es el medio por el cual se transportan iones cargados, los de carga positiva (cationes) van del ánodo al cátodo, y aquellos de carga negativa (aniones) se mueven del cátodo al ánodo, este tipo de transferencia de carga recibe el nombre de circulación electrolítica.

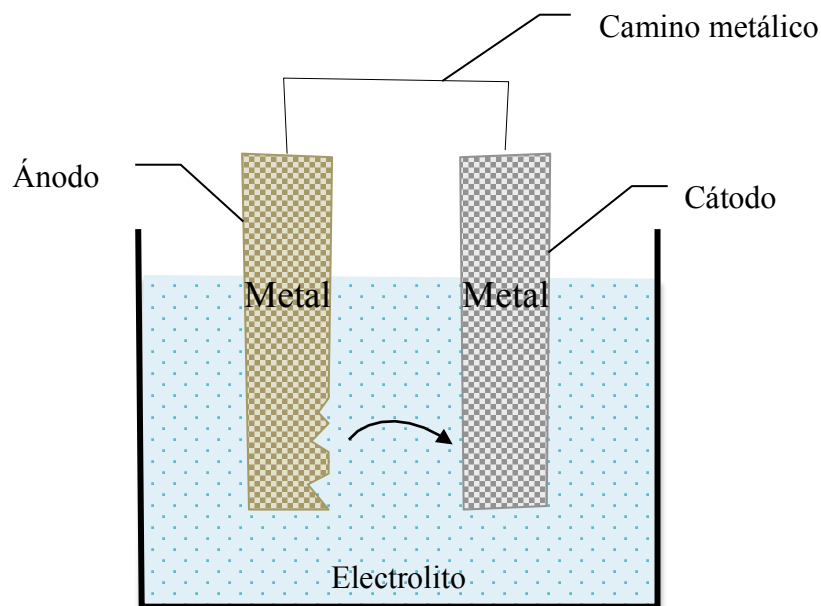


Figura 2. Celda de corrosión

Fuente: Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibra de carbón. P,5.

1.5 CORROSIÓN DEL REFUERZO.

Un metal puede ser el causante y fuente de la formación de su propia celda de corrosión, ya que posee un voltaje impulsor; estas diferencias de potenciales se ocasionan debido a las variaciones de la estructura granular del metal, la composición resultantes de las aleaciones o si se desarrolla alguna imperfección durante el proceso de fabricación. (NACE, 2006)

El acero es la unión de diferentes metales que se encuentran en la naturaleza, estos se hallan en forma de compuestos químicos que se conocen con el nombre de pirita, a las cuales se les extrae su compuesto metálico; para transformar estos metales es necesario realizar diferentes procedimientos, independientemente de cual sea el procedimiento seleccionado, lo que va a generar en el metal es una absorción de energía, esta energía que absorbe, se conoce como energía requerida, y es la necesaria para su transformación determinando el estado activo del metal, entre mayor sea la energía, mas activo será el metal por lo que tendrá mayor tendencia a corroerse; pues esta energía que capturó quiere ser devuelta por lo que se corroe y se forma el óxido.

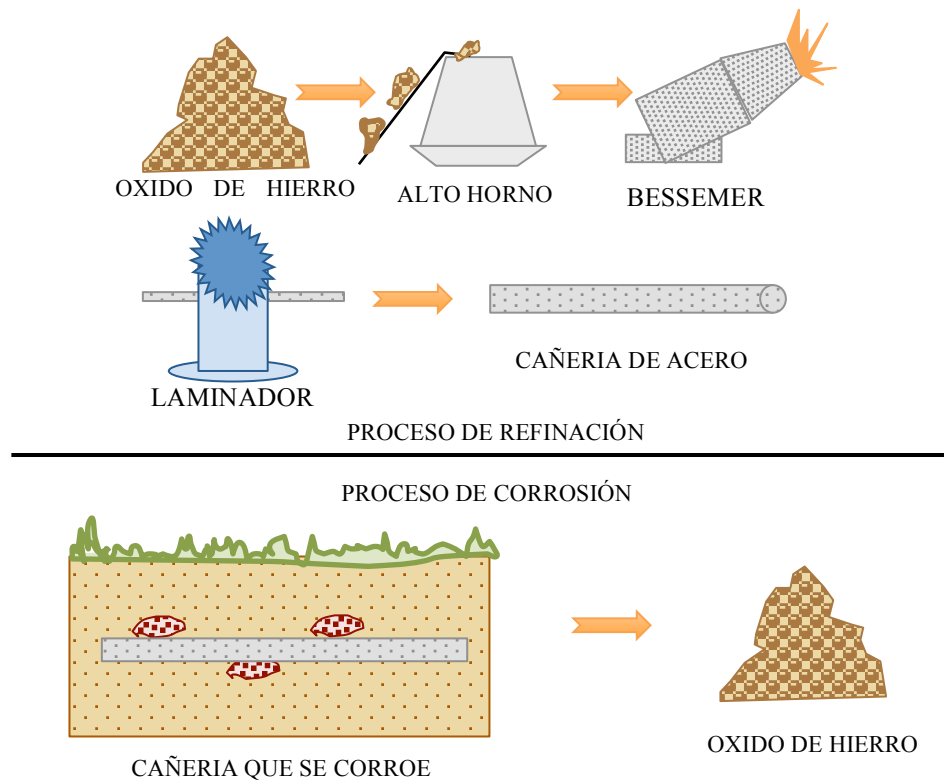


Figura 3. Proceso de refinación del acero

Fuente: TROCÓNIS DE RINCÓN, O., & MIEMBROS DE A RED DURAR. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.*- CYTED. Cuarta Edición. – Maracaibo, Venezuela. 2006

Lo que se representa en la Figura 3 es el proceso de refinación en el hierro y en el acero, se encuentra en forma de pirita y se le aplica energía para convertir ese oxido de hierro en hierro y acero, el proceso que se realiza en el alto horno es la eliminación de oxígeno , luego se implementan otros materiales e ingresa al Bessemer, por ultimo pasa a ser laminado en la forma requerida según la actividad a desempeñar. Cuando llega a su lugar de disposición y entra en contacto con el electrolito, sea agua dulce o marina, tierra, concreto, etc., puede ser propenso a desencadenar la corrosión, lo que pasa en este proceso es que la energía anteriormente ganada para su fabricación la empieza a perder ocasionando que el hierro se combine con el oxígeno y forme óxido de hierro, que es el estado de menor energía y su estado original.

1.5.1 Corrosión del refuerzo en el concreto

Generalmente el concreto le otorga al acero doble protección, por un lado es la barrera física que aísla el acero del medio ambiente y por el otro, en los poros del concreto se encuentra líquido depositado que ayuda a generar un óxido protector (pasivación); la concentración acuosa está conformada por OH^- , a lo que se debe la alta alcalinidad y su pH se encuentra entre 13 a 14, esto puede tender a variar un poco dependiendo de la composición y características del cemento, su grado de hidratación y de la relación agua – cemento (a/c).

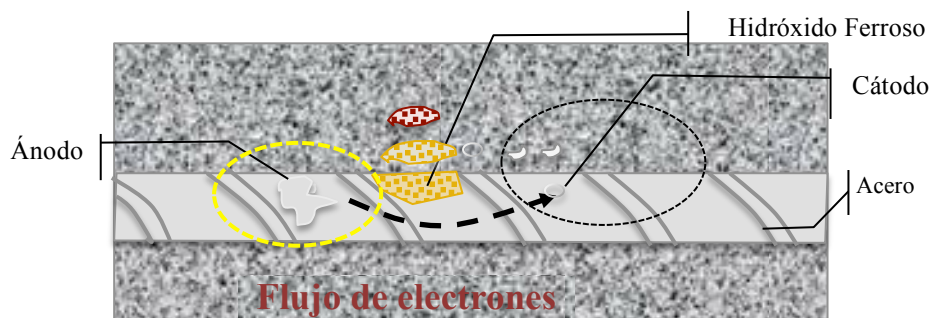


Figura 4 Celda de corrosión en el acero vertido en concreto

Fuente: Guzmán G. OMAR, Influencia del agrietamiento del concreto en la corrosión del acero de refuerzo, 2008.

La corrosión que se presenta en el refuerzo, se debe a la presencia de zonas heterogéneas en la superficie del material metálico debido a que se encuentra conformado por secciones de diferentes niveles de energía, aceros, soldaduras, o por alguna razón entraron en contacto con metales menos activos, lo que ocasiona la formación de celdas electroquímicas. Como se puede observar en la Figura 4 se encuentran los cuatro aspectos necesarios para que pueda existir un proceso corrosivo, como primer integrante esta la zona anódica que se convertirá en la zona corroída, y donde se formen reacciones de oxidación, en segundo lugar la zona catódica y pasivante que estará protegida y se llevarán en ella reacciones de reducción, la armadura es el

tercer componente , su papel es se el conductor electrónico entre el ánodo y el cátodo, por ultimo esta el concreto, el cual es el conductor iónico que se conoce como electrolito (Del Valle, Pérez & Martínez,2001). Se sabe que esta corrosión es normalmente prevenida por la creación de la película de óxido de hierro pasivante, que se ha mencionado en ocasiones anteriores, pero cuando las condiciones cambian y empieza a verse alterado por la inmersión de sustancia agresivas en el concreto, se rompe el equilibrio de esta película, desencadenando la corrosión, trayendo consigo consecuencias como:

- El acero disminuye su sección e incluso puede llegar a convertirse completamente en óxido .
- El concreto puede figurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo que se va generando.
- La adherencia armadura-concreto disminuye o puede llegar a desaparecer.(CYTED,2006).

Como resumen en la Figura 5 se podrá observar que características debe cumplir la armadura y el concreto para que esta lleve acabo un proceso corrosivo o no; y así mismo observar que los procesos de corrosión del acero están asociados a su misma despasivación, variaciones del medio, generando flujos de corriente y formación de las celdas de corrosión.

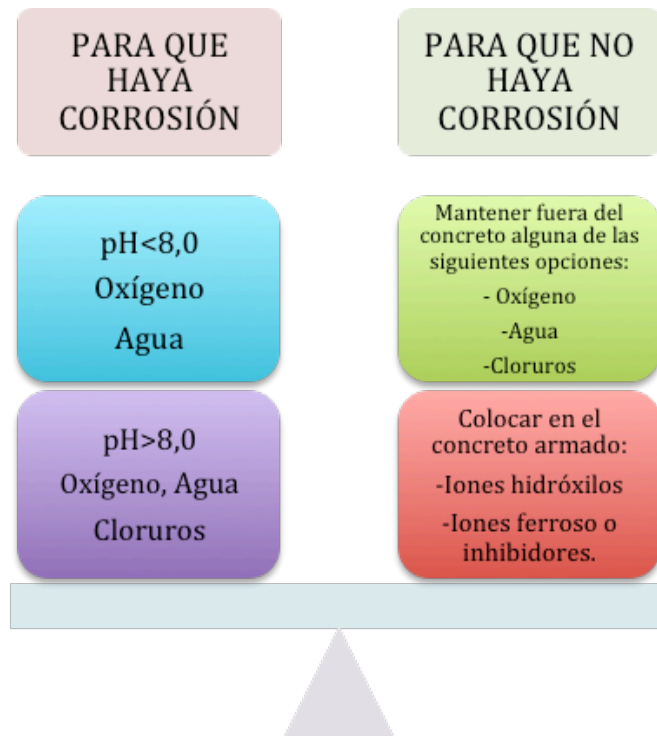


Figura 5. Condiciones para que exista o no corrosión.

Fuente: Autor del proyecto

La corrosión se presenta en diferentes tipos, dependiendo del factor que la genere, se encuentran clasificadas según su aspecto físico, reacción o elemento al cual se pueda asociar.

1.6 TIPOS DE CORROSIÓN

Según el texto *Corrosion Engineering* de Fontana los tipos de corrosión son clasificados según su apariencia física, según esto el acero puede presentar los siguientes casos:

1.6.1 Corrosión Localizada

1.6.1.1 Corrosión por picadura

La picadura se forma por la disolución localizada de la película pasiva. Típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea por que provienen del medio exterior o por que fueron incorporados en la masa del concreto (Figura 6).(CYTED,2006).

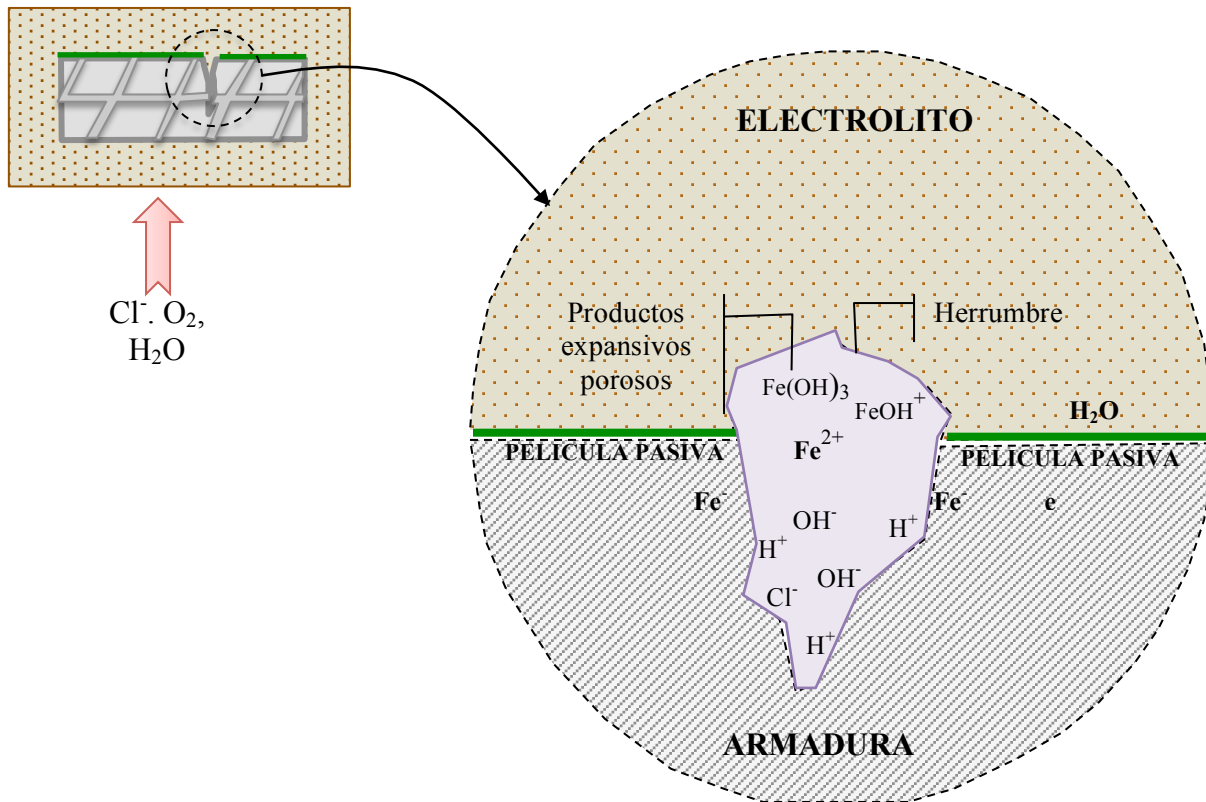


Figura 6. Corrosión por picadura

Fuente; TROCÓNIS DE RINCÓN, O., & MIEMBROS DE A RED DURAR. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.*- CYTED. Cuarta Edición. – Maracaibo, Venezuela. 2006

Lo que quiere hacer ver la figura anterior es la formación de una celda de corrosión, donde existe un área pasivada intacta, la cual se referencia como el cátodo, y el área donde se ha perdido la película juega el papel de zona anódica, lugar donde va a observarse una disolución del hacer. Para que estas picaduras sean mas o menos agresivas depende de varios factores, conociéndose que las picaduras son autocatalíticas, esto quiere decir, que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento.

En el ánodo ocurre la producción de ácido, debido a que los iones de cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para la formación de H^+ Y Cl^- libres. Esto decrece el pH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio para seguir interviniendo en el proceso de corrosión, agravando el problema. (CYTED,2006).

1.6.1.1 Corrosión en espacios confinados

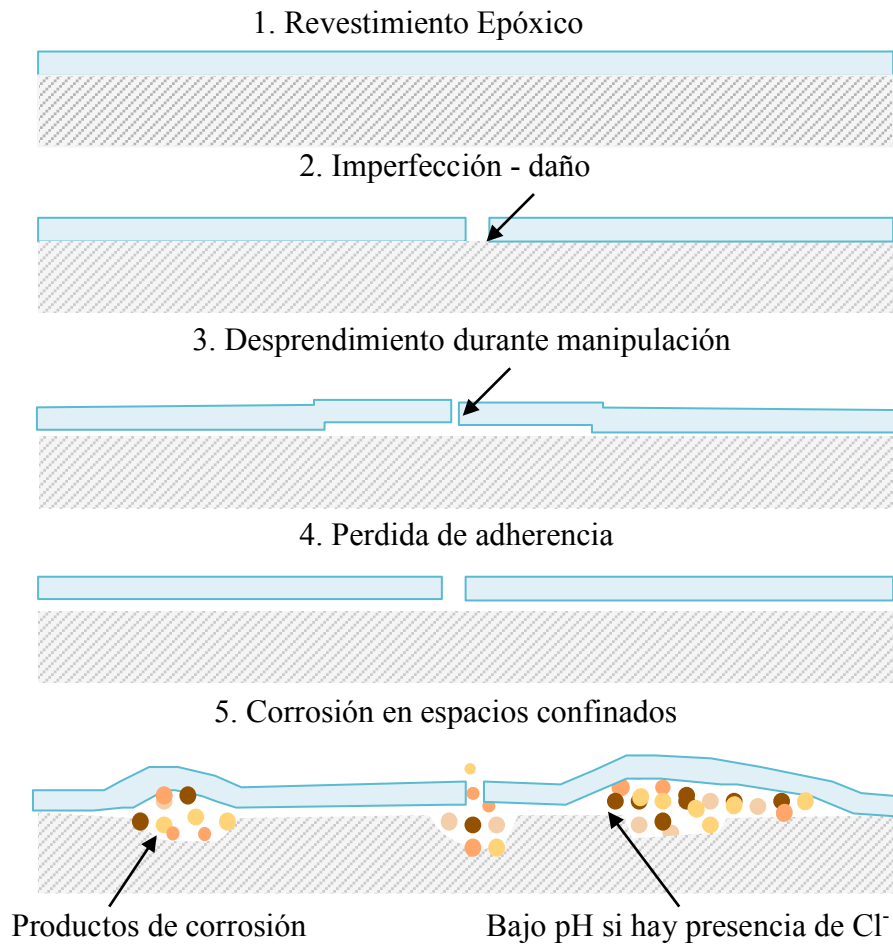


Figura 7. Resumen de etapas de la corrosión en espacios confinados.

Fuente: TROCÓNIS DE RINCÓN, O., & MIEMBROS DE A RED DURAR. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.*- CYTED. Cuarta Edición. – Maracaibo, Venezuela. 2006

Esta corrosión se lleva a cabo cuando la superficie del acero se encuentra lo suficientemente resguardado, evitando el acceso de oxígeno a estas zonas, lo que ocasionará creación de celdas diferenciales de oxígeno, induciendo a la corrosión del acero.

1.6.1.2 Corrosión bajo tensión

Este tipo de corrosión se da cuando ocurren dos circunstancias simultáneas: esfuerzos de tensión sobre el acero y un medio agresivo, generalmente se va a hallar este caso en aceros pre o postensados, donde los aceros utilizados son de alta resistencia. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico que generalmente se asocia a la mala calidad del concreto, o a la presencia de determinados iones que generalmente son aportados por los aditivos. (CYTED,2006)..

1.6.1.3 Corrosión por corrientes de interferencia

Estas corrientes son parásitas o vagabundas, las cuales ingresan al sistema de una celda electroquímica o estructura específica, sin hacer parte de la misma; para que haya cabida a este tipo de corrosión es importante la existencia de un intercambio de corriente entre la estructura y el medio electrolítico. Se sabe que tenemos dos tipos de corriente la continua y la alterna, la primera tiene un efecto más pronunciado, puesto que fluye continuamente en una dirección; por el contrario la alterna, causa un efecto menos agresivo, debido a su continuo cambio de dirección.

El punto de entrada de la corriente se reconoce como el cátodo, pero el punto donde la corriente se baja para retornar a su sistema es el ánodo, donde podría ocasionarse disolución del metal,

corroyéndolo. Estas corrientes se pueden generar por sistemas de protección catódica (PC), telúricas, protección eléctrica, entre otros.

1.6.2 Corrosión Uniforme/Generalizada

La corrosión uniforme es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, esto puede ser producido por la carbonatación del concreto y/o presencia de iones de cloruro.

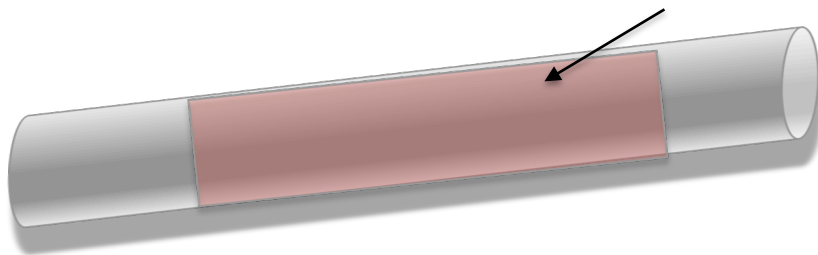


Figura 8. Corrosión generalizada

1.6.3 Corrosión Galvánica

Esta corrosión se presenta cuando tengo dos metales inmersos en el mismo medio electrolítico, uno mas pasivo (noble) que el otro, por lo que uno actuara como sacrificio y el otro será el protegido; o cuando tenemos un acero embebido en el concreto que no desarrolla la película pasiva generándose una zona anódica. Un ejemplo es cuando se encuentra una parte del acero ya fundido con el concreto y otra expuesta, la que se encuentra protegida es aquella que esta con concreto, la otra parte estará expuesta a los agentes que conformen el medio.

1.7 FACORES QUE AFECTAN LA ARMADURA (ACERO)

1.7.1 Estado superficial del acero

La superficie del acero como se ha nombrado en anteriores circunstancias, es la primera defensa ante la corrosión cuando posea la capa pasiva, y en caso de no poseerla, se volverá mas propensa a corroerse. Como dato a resaltar es importante que la superficie de aceros pre y post tensados deben ser limpiados en su totalidad, ya que cualquier óxido puede inducir grietas de corrosión bajo tensión.

1.7.2 Humedad Ambiental

La presencia del agua en medios neutros y alcalinos, genera corrosión , ya que interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno. Aparte esta ayuda al movimiento de iones a través del electrolito; lo que quiere decir que cuanto mayor sea la concentración de humedad en los poros del concreto menor será la resistividad, lo que generaría velocidades de corrosión mas elevadas.; por lo que se encuentra altamente influenciado por la porosidad del concreto, ya que concretos muy poroso serán de mas fácil acceso, pero concretos densos permitirán penetraciones entre 1 -2 cm.

1.7.3 Efecto de la Temperatura

La temperatura influye en dos áreas, por un lado, su incremento genera mayor movilidad de moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otro, su disminución puede dar lugar a la condensación de dichas sustancias y así mismo producir concentraciones localizadas de humedad.

1.7.4 Corrosión inducida por cloruros

La corrosión por cloruros se encuentra presenta en estructuras existentes en medios marinos; donde los iones de cloruro están tanto en el agua de mar como de forma volátil en el aire de la

zona, y de esta manera, transportados por el viento son depositados en estructuras aledañas a las zonas costeras, los cloruros por otra parte también pueden ser transferidos a la masa del concreto en alguna de sus materias primas como los aditivos, cemento, agua, etc., esta cantidad está regulada por códigos de fabricación y normativas que rigen en cada país, quienes evalúan y determinan los límites permitidos. Por ejemplo, en Europa y varios países latino americanos se admite para concreto reforzado 0.4 % en base al contenido de cemento; y para pretensado en la misma base 0.2 %.

En el caso de Colombia se encuentra regido por la norma ACI 222, en la cual se encuentra especificado el contenido máximo de cloruros para los diferentes casos.

Tabla 4. Contenido Máximo de los Iones Cloruro para Construcciones Nuevas ACI 222

TIPO DE CONSTRUCCIÓN Y CONDICIÓN	Límite de ión cloruro, [% Cl ⁻] de la masa del cemento		
	MÉTODO DE ENSAYO		
	Soluble en ácido	Soluble en agua	
	ASTM C 1152	ASTM C 1218	Soxhlet*
Concreto preesforzado	0.08%	0.06%	0.06%
Concreto reforzado expuesto a la humedad en servicio	0.10%	0.08%	0.08%
Concreto reforzado seco en servicio	0.20%	0.15%	0.15%

Fuente: Norma ACI 222

Cuando se tiene un caso donde el factor a tener presente son los cloruros, que penetran desde el exterior, se debe tener en cuenta:

- El tiempo que tarda en llegar hasta el refuerzo.
- La proporción de iones cloruro [Cl^-] que pueden llegar a producir la despasivación.
- La velocidad de corrosión provocada una vez se desencadena la corrosión.

Por este motivo, es de gran importancia el espesor del recubrimiento de la armadura, debido a que este debe ser mayor al calculado, para que de esta forma los iones de cloruro no alcancen a llegar hasta la armadura y cumpla la vida útil estipulada

1.7.5 Corrosión por carbonatación

Se llama por este nombre al fenómeno en el cual el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra en la atmosfera, reacciona al entrar en contacto con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto (agua que queda en las cavidades porosas del concreto), Convirtiendo el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ en carbonato de calcio (CaCO_3), tornándose el pH más alcalino.

Si el acero no perdiera su capa pasivante, ni el concreto cambiara su alcalinidad no dará cabida a la corrosión, si por lo contrario el dióxido de carbono genera cambios y efectos, se logrará que el acero pierda su capa pasiva, lo que quiere decir que el pH es inferior a 11 e iniciará este efecto.

Los factores que llegan a afectar el proceso de carbonatación son: el contenido de CO_2 , humedad, contenido de SO_2 en el ambiente; el proceso de carbonatación tiene sus condiciones óptimas cuando el porcentaje de humedad se encuentra entre el 50% y el 70%, debido a que si el nivel de humedad es muy bajo no habrá suficiente agua para la disolución del dióxido de carbono, y si hay una saturación de humedad, los poros se encontrarán bloqueados y evitaran el ingreso del CO_2 .

Por otra parte la velocidad de corrosión por carbonatación es mucho menor en el caso de los cloruros, y al mismo tiempo lo hace un fenómeno menos peligroso.

Tabla 5. Proceso de Carbonatación en relación con la Humedad Relativa

Humedad Relativa % (HR)	Porcentaje de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO ₂
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50%	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO ₂

Fuente: Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos, publicación técnica 292, 2006.

1.8 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN

La corrosión tiene un periodo de iniciación, donde ocurre la desprotección del acero, el cual da cabida a que inicie la propagación de esta. La estimación del estado de corrosión se puede estudiar haciendo uso de diferentes técnicas, algunas requieren de un tiempo prolongado, debido que si la muestra ya se encuentra embebida en el concreto, se hace necesaria la remoción del material, considerándose una prueba destructiva.

Es por tal motivo que las técnicas electroquímicas han tomado gran acogida y son tomadas como la mejor opción al momento de querer realizar un análisis al acero expuesto a la intemperie o ya embebido en el concreto; para estas técnicas se utiliza señales eléctricas, analizando las respuestas del sistema hacia estas; una de las ventajas de esta técnica es su rapidez de medición, la sensibilidad de los datos y son consideradas pruebas no destructivas; haciendo cada una su

aporte sobre el estado en el cual se encuentra el sistema y el grado de corrosión que esta presentado el acero, entre las más utilizadas se pueden encontrar:

1.8.1 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Es una técnica que proporciona un método más exacto con respecto a otras técnicas como por ejemplo el pulso galvanostático, sin desmeritar que sea una buena técnica para determinar la velocidad a la cual el refuerzo pierde parte de su sección, por la corrosión de la misma, esta recibe el nombre de velocidad de corrosión. El método RPL se basa en la aplicación de corriente, junto con un monitoreo del potencial o una aplicación de un potencial específico seguido de un monitoreo de corriente, ver

Figura 9. En cada experimento se obtienen datos al variar el potencial trabajando alrededor del potencial de corrosión (E_{corr}) en un rango de mas o menos 25 mV, con el objeto de no salirse de la región lineal de Tafel y una velocidad típica de barrido de 0,1 mV/s. Para calcular la velocidad de corrosión usando el método de RPL, se debe calcular primero la i_{corr} con la Ecuación 3, la cual se basa en la relación de Stern-Geary, Ecuación 4. (Barragan,A & Arciniegas, J, 2012)

$$ICorr = \frac{\beta a \beta c}{2.303 R_p (\beta a + \beta c)} \quad ; \quad \text{Ecuación 3}$$

$$ICorr = \frac{B}{R_p} \quad ; \quad \text{Ecuación 4}$$

En la cual R_p es la resistencia a la polarización, en $\Omega \text{ cm}^2$, y A y C son constantes de Tafel.

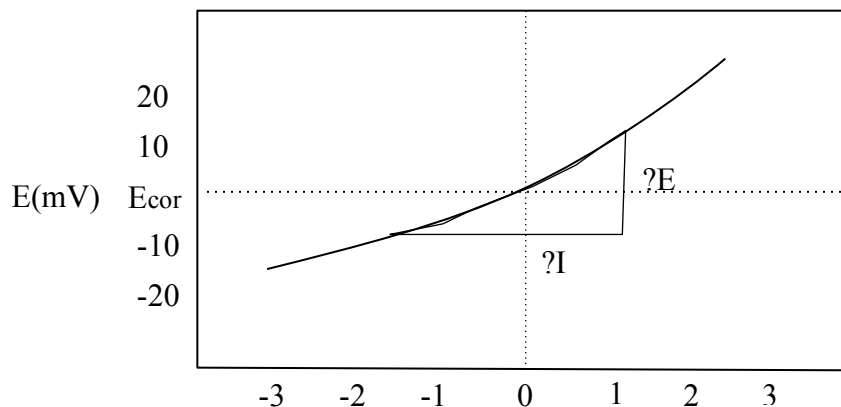


Figura 9. Grafica de resistencia a la polarización

Fuente: BARRAGAN, A., & ARCINIEGAS, J, Evaluación del comportamiento a la corrosión de una varilladle acero galvanizado en concreto reforzado con diferentes concentraciones de cloruro y carbonatos, 2012.

1.8.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) es considerado un método nuevo para el diagnóstico de corrosión y la evaluación de este fenómeno, ya que permite obtener información para deducir el comportamiento del conjunto metal-solución. Con este método se puede determinar el mecanismo principal de la corrosión haciendo uso de los espectros de impedancia medidos y compararlos con los parámetros de los valores establecidos. Su característica principal es la estimulación eléctrica del sistema de corrosión por medio de una señal senoidal, la cual está compuesta por una pequeña amplitud de la tensión; en el momento que el sistema está siendo estimulado, se mide la respuesta de corriente. A partir del espectro modelado, podemos caracterizar el inicio del proceso de corrosión, el grado de corrosión y proceder a evaluarla. (Vavpetic, 2008).

Este método utiliza la corriente alterna, la cual tiene la ventaja de estar en función del tiempo y la frecuencia, ofreciendo la ventaja de cubrir varias órdenes de magnitud de la frecuencia. La analogía entre esta frecuencia y la corriente directa se da en el momento que el valor de la frecuencia es cero. (PROGRAMA DE CORROSIÓN DEL GOLFO DE MEXICO)

Basado en la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} ; \quad \text{Ecuación 5}$$

Para la corriente alterna, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} ; \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde Z, es la impedancia del circuito, V (w) es el potencial en función de la frecuencia e I (w) es la corriente en función de la frecuencia. Cuando es aplicada una señal de voltaje en corriente alterna, se obtendrá la respuesta del sistema de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V = V_{max} * \sin(\omega t) ; \quad \text{Ecuación 7}$$

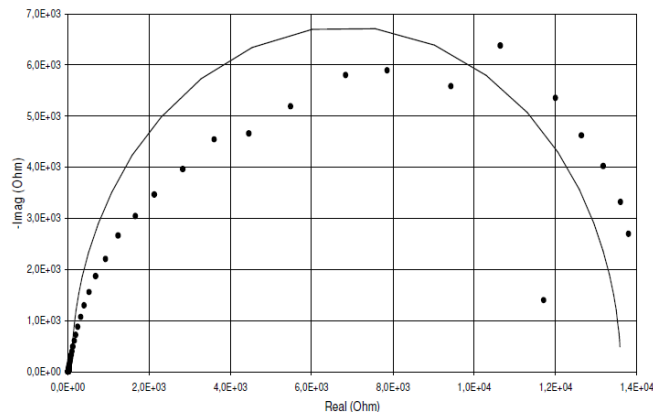


Figura 10. Diagrama de Nyquist del espectro de impedancia medida de barras de acero en el hormigón fresco (puntos) y su modelo eléctrico (línea) con la ecuación de impedancia

1.8.3 Pulso galvanostático (ocp) de potencial de circuito abierto.

El pulso galvanostático es un método rápido y no destructivo que utiliza la técnica de polarización y puede realizarse tanto en laboratorio o in-situ.

Un pulso transitorio de corriente anódica es impreso galvanostáticamente sobre el acero desde un contra electrodo ubicado en el electrolito. La corriente usualmente aplicada es del rango de 100 a 200 μA y la duración del pulso es aproximadamente de 10 segundos. La polarización del acero se da en dirección anódica con respecto al potencial de corrosión del equilibrio del mismo. El cambio medido del potencial electroquímico del metal, se observa en el electrodo de referencia como una función temporal de la polarización. (Tomas, Finn, Jensen & Ralph, 2002).

2 METODOLOGÍA

2.1 INSPECCIÓN IN-SITU

Para llevar a cabo este proyecto se contó con una visita al lugar de la obra “Portal de Metrolinea Papi Quiero Piña” ubicado en la paralela de la autopista sentido Floridablanca – Piedecuesta, la cual se encuentra detenida desde el año 2011; donde se observó el avance de obra, sus estructuras, materiales, estado de deterioro y lugar de disposición de dicho material.

Durante el recorrido se observó acero figurado, apilado de rejas (Fotografía 1) expuestas a la intemperie y directamente puestas sobre el suelo, así mismo la formaleta y andamios. El acero que se utilizó de muestra fue, aquel que se encontraba en el sector intermedio del arrume de rejas de acero con el objetivo de tener una muestra estándar y variables de exposición similares a las demás varillas y por tal motivo se descartaron las de la base, debido a que presentaban condiciones diferentes al estar en contacto con el suelo a causa que este medio electrolítico puede generar en las varillas mayores probabilidades de corrosión, y desde luego una velocidad mayor.

Fotografía 1. Acero ubicado a la intemperie sin ninguna protección



Fuente: Autor del proyecto

En la Fotografía 2, se observa el oxido que se empieza a formar en las varillas y que por agentes atmosféricos como la lluvia empiezan a depositarse en la periferia de las columnas, generando las betas de oxido, a causa que los deshechos de corrosión se van impregnado en la estructura.

Fotografía 2. Columnas no finalizadas.



Fuente: Autor del proyecto

Fotografía 3. Estado visual de las columnas.



Fuente: Autor del proyecto

2.2 PARÉMETROS DE ESTUDIO

Como se estableció en los objetivos de este proyecto, este estudio tiene la finalidad de comparar las propiedades mecánicas y determinar las propiedades físico-químicas que indiquen inicios de corrosión en los especímenes extraídos.

Cinco probetas muestran oxidación e indicaciones de presencia de corrosión y otras cinco se encuentran en buen estado; las que muestran tener un proceso activo de corrosión, se someterán a procesos electro químicos y físicos que permitan establecer si se está o no en un proceso de corrosión activa, y así mismo determinar que velocidad de corrosión presenta. En los ensayos se tuvieron encuentran parámetros como masa correspondiente a cada varilla, resistencia máxima a tracción, plasticidad y fluencia.

2.3 ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS Y EQUIPOS

El proyecto va enfocado a dos aspectos. El primero la parte mecánica, para el cual se le realizó un ensayo de tracción a las muestras.

Fotografía 4. Varillas de ensayo a tracción 2 y 3



Fuente: Autor del proyecto

Se utilizarán diez (10) probetas de ensayo , la mitad de estas serán probetas conformadas del acero proporcionado por Metrolinea de la obra “ Portal Papi Quiero Piña” y cinco (5) de acero en buen estado; y desde luego que estas muestras se encuentran bajo la misma normatividad de fabricación, el mismo grado (60), las mismas dimensiones, 50 cm de longitud, diámetro de 1.59 cm (5/8”) . (

Fotografía 4 y

Fotografía 5)

Fotografía 5. Varillas de ensayo a tracción 1y 4



Fuente: Autor del proyecto

Para realizaar los ensayos se empleó un calibrador de venier (Fotografía 6), cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 6, y una maquina universal modelo UH-500 kNI (Fotografía 7)

Fotografía 6. Calibrador de Vernier utilizado en el ensayo.



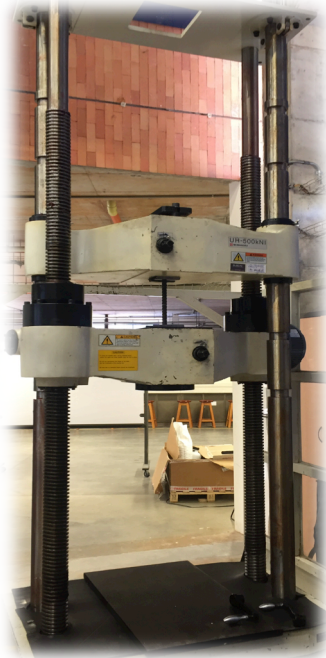
Fuente: Autor del proyecto

Tabla 6. Especificaciones técnicas Vernier.

Rango de medición:	0-150 mm / 0-6 pulgadas
Repetitividad:	0,01 mm / 0,0005 in
Resolución:	0,01 mm / 0,0005 in
Precisión:	+ 0,02 mm / 0,001 in (<100 mm), + 0,03 mm / 0.001 in. (> 100 a 150 mm).
Velocidad de medición:	$\leq 1,5$ m / s
Potencia:	1 x 1.5V SR44 (células de óxido de plata) de la batería
Duración de la batería:	1 año en uso continuo / 3 años bajo operación normal

Fuente: Autor del proyecto

Fotografía 7. Maquina universal- Ensayo de Tensión



Fuente: Autor del proyecto

2.4 ACERO DE REFUERZO

Las varillas fueron cortadas todas a la misma longitud (50 cm), marcadas en los extremos por cinta de papel y enumeradas y así mismo se les realizaron marcas en el centro de su longitud y a partir de esta, 10 cm a cada extremo de la marca central.

Según la norma NTC 2289 en su anexo B, las barras de acero tienen una manera de ser marcadas para su control y que en el sistema ingles es el siguiente:

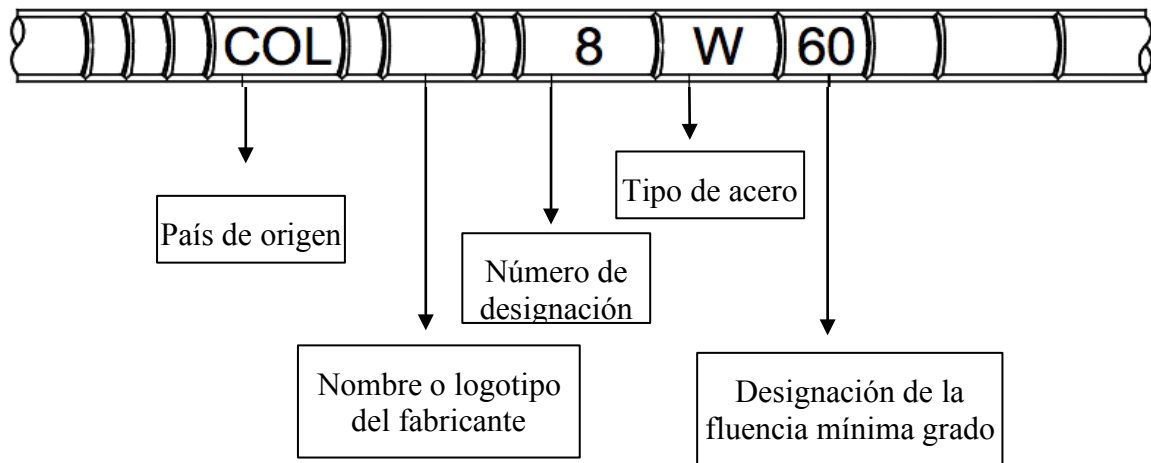


Figura 11. Ejemplo de marcado para barras corrugadas en el sistema ingles.

Fuente. Norma NTC 2289

Las barras de ensayo cuentan con la siguiente marca, país de origen Colombia, fabricante Paz del Río, número de designación cinco (5), tipo de acero “W” que indica que son del grupo de templables al agua, por último el grado de fluencia mínima 60 (60.000 lb/plg²)



Fotografía 8. Marca de varillas de acero ensayadas.

Fuente: Autor del proyecto

El fabricante establece ciertas características de la varilla en cuanto a sus propiedades mecánicas y composición química, direccionado por la norma NTC 2289; y establece que el uso de estas varillas es para el reforzamiento de concreto en estructuras sismo resistentes.

Tabla 7. Propiedades mecánicas establecidas por el fabricante bajo la norma NTC 2289

PROPIEDADES MECÁNICAS		
UNIDADES	LÍMITE DE FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
Kg/mm ²	42-55	56 min
lb/pulg ²	60.000 - 78.000	80.000 min
Mpa	420 - 540	550 min

Fuente: Norma NTC 2289

Tabla 8. Alargamiento mínimo

ALARGAMIENTO EN 200 mm		
Designación		% min
No. Octavos de pulgada	2 a 6	14
	7 a 10	12
en mm	6M a 12M	14

Fuente: Norma NTC 2289

Tabla 9. Composición química especificada por el fabricante

COMPOSICIÓN QUÍMICA					
%C máx	%Mn Máx	%P Máx	%S Máx	%Si Máx	%CE Máx
0,3	1,5	0,035	0,045	0,5	0,55

2.5 ENSAYOS REALIZADOS

2.5.1 Ensayo a Tracción

Después de tener las varillas debidamente marcadas con una sección calibrada de 200 mm de longitud, se procedió a utilizar la maquina Universal para realizar el ensayo de tracción y el análisis de sus propiedades mecánicas. Este ensayo consiste en aplicar una carga axial a tensión, hasta el momento de la falla del material, y para realizar la gráfica Esfuerzo-Deformación es necesario calcular los esfuerzos en cada momento de tiempo, para esto es necesario dividir la carga sobre el área de la sección transversal y para hallar la deformación se divide el alargamiento sobre la longitud calibrada (L_0). (ver Ecuación 8 y Ecuación 9). A demás, para llevar acabo el ensayo se hizo uso de un calibrador o pie de rey digital, que permitió con mayor precisión hacer las lecturas del diámetro final en la zona de estricción y rotura, longitud final, diámetro inicial y longitud calibrada.

$$\sigma (MPa) = \frac{\text{carga (N)}}{A_0 (mm^2)} \quad ; \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$\varepsilon (mm/mm) = \frac{\text{Alardamiento (mm)}}{L_0 (mm)} \quad ; \quad \text{Ecuación 9.}$$

2.5.2 Gráficas de Esfuerzo (σ) vs Deformación (ε)

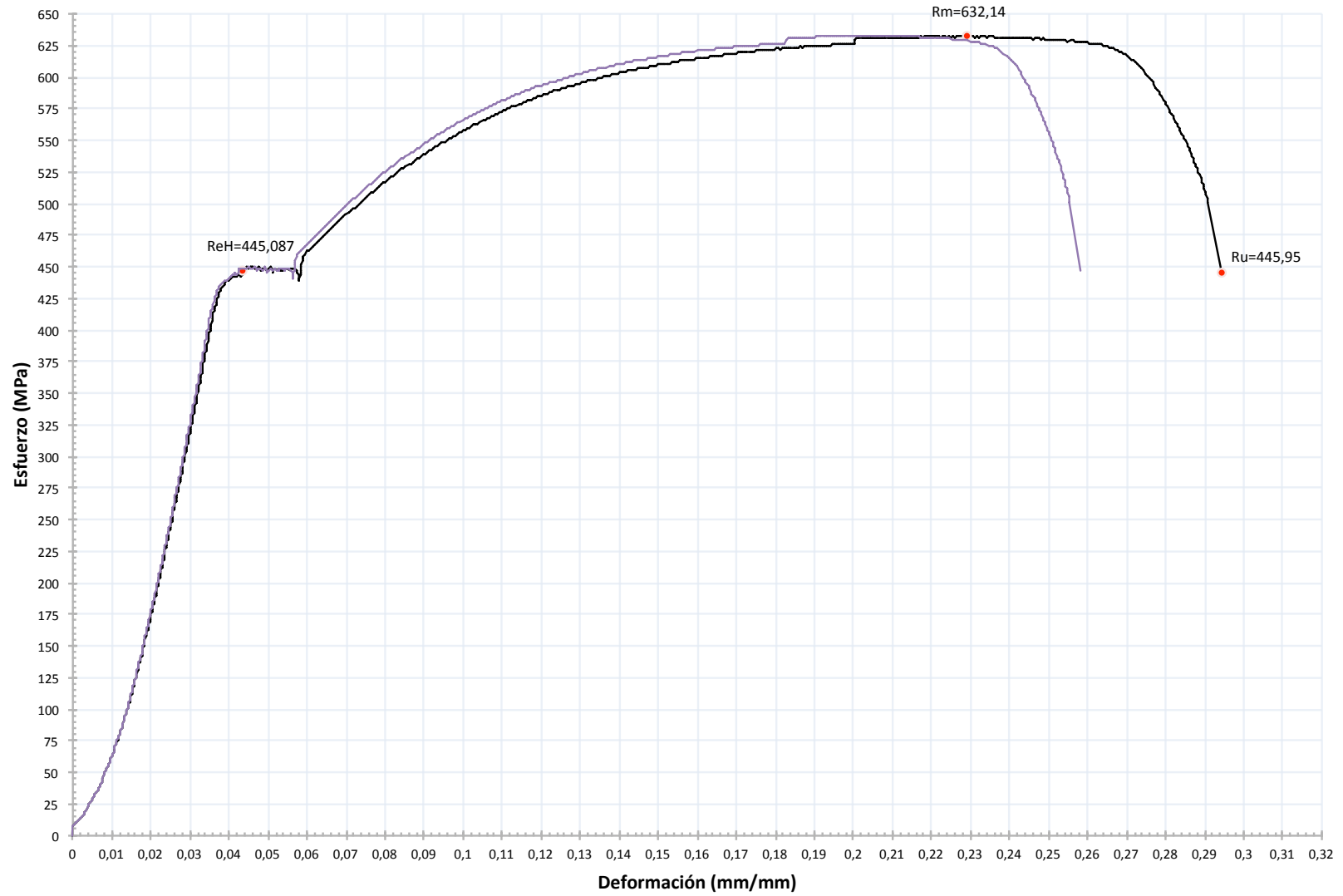
Las gráficas se encuentran compuestas por dos líneas, la de color negro hace referencia a la grafica Esfuerzo – Deformación ingenieril en donde se halla un esfuerzo y una deformación como se observa en la Ecuación 8 y Ecuación 9; la otra línea que esta representada en las

primeras cinco graficas de color morado y en las otras cinco de color anaranjado representan la gráfica Esfuerzo – Deformación real, a diferencia de la anterior, esta tiene en cuenta para hallar el esfuerzo el área instantánea que se reduce a medida que el ensayo va avanzando, y para el cálculo de la deformación, es determinado con la longitud instantánea por unidad de longitud del material. (ver ; Ecuación 10 y Ecuación 11). Para ver los datos recolectados

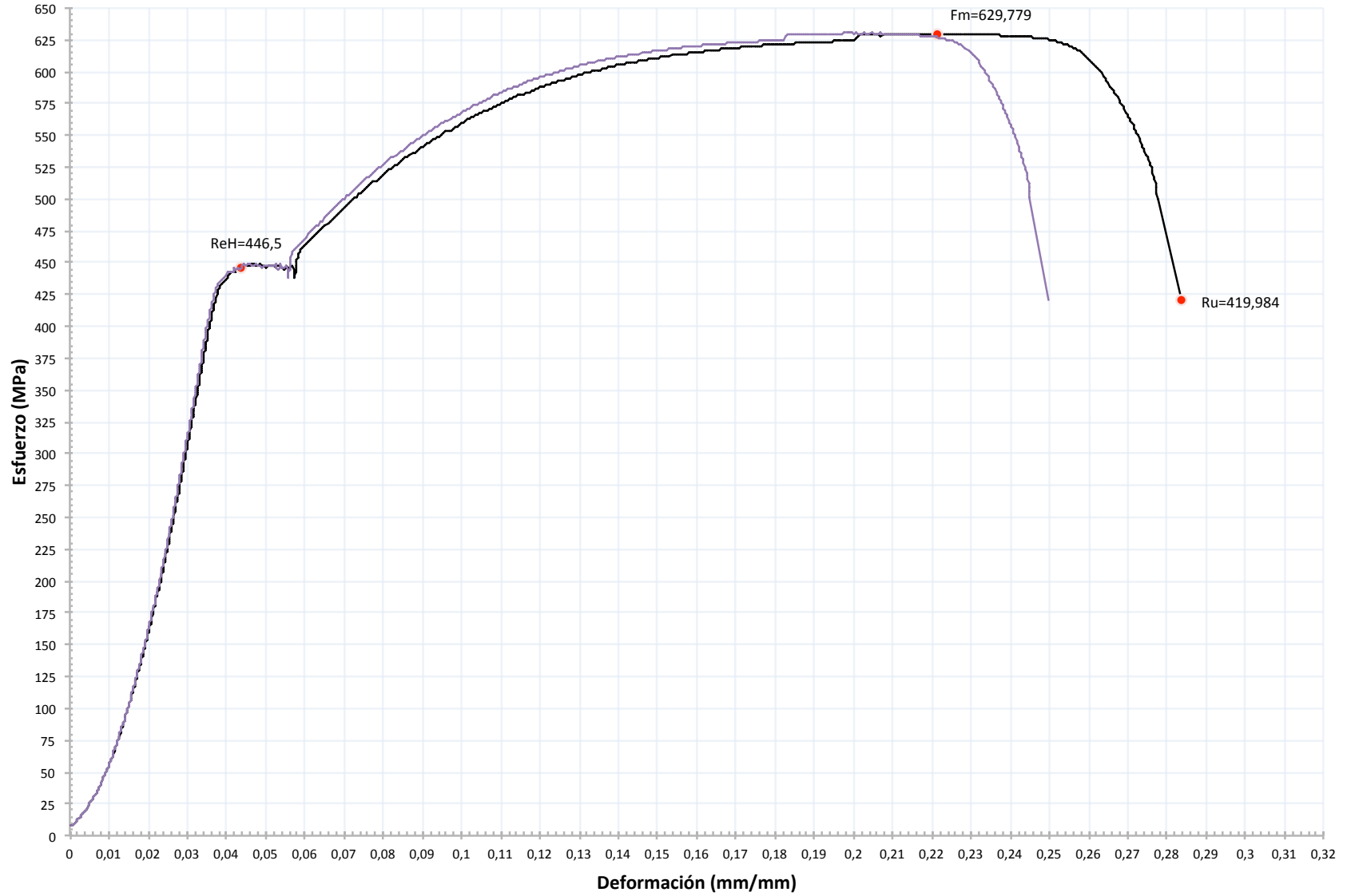
$$\sigma_{real} = \frac{Carga (N)}{A_o (mm^2)} \times \left(1 + \frac{\Delta L}{L_o}\right) ; \quad \text{Ecuación 10.}$$

$$\varepsilon_{real} = \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_o}\right) ; \quad \text{Ecuación 11}$$

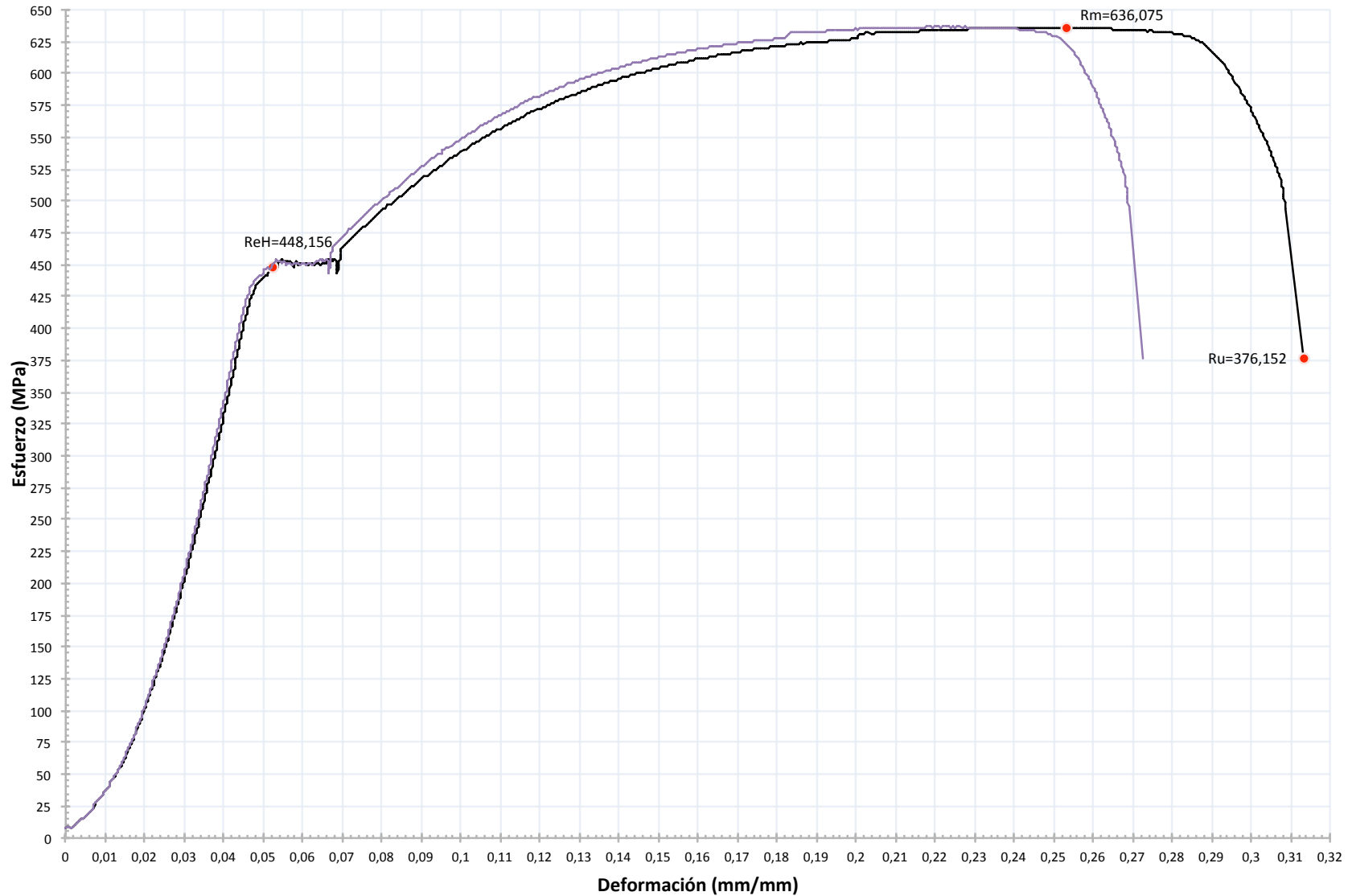
Grafica 1. Ensayo de tracción para probeta 1, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación, con sus características mecánicas, del grupo no corroído.



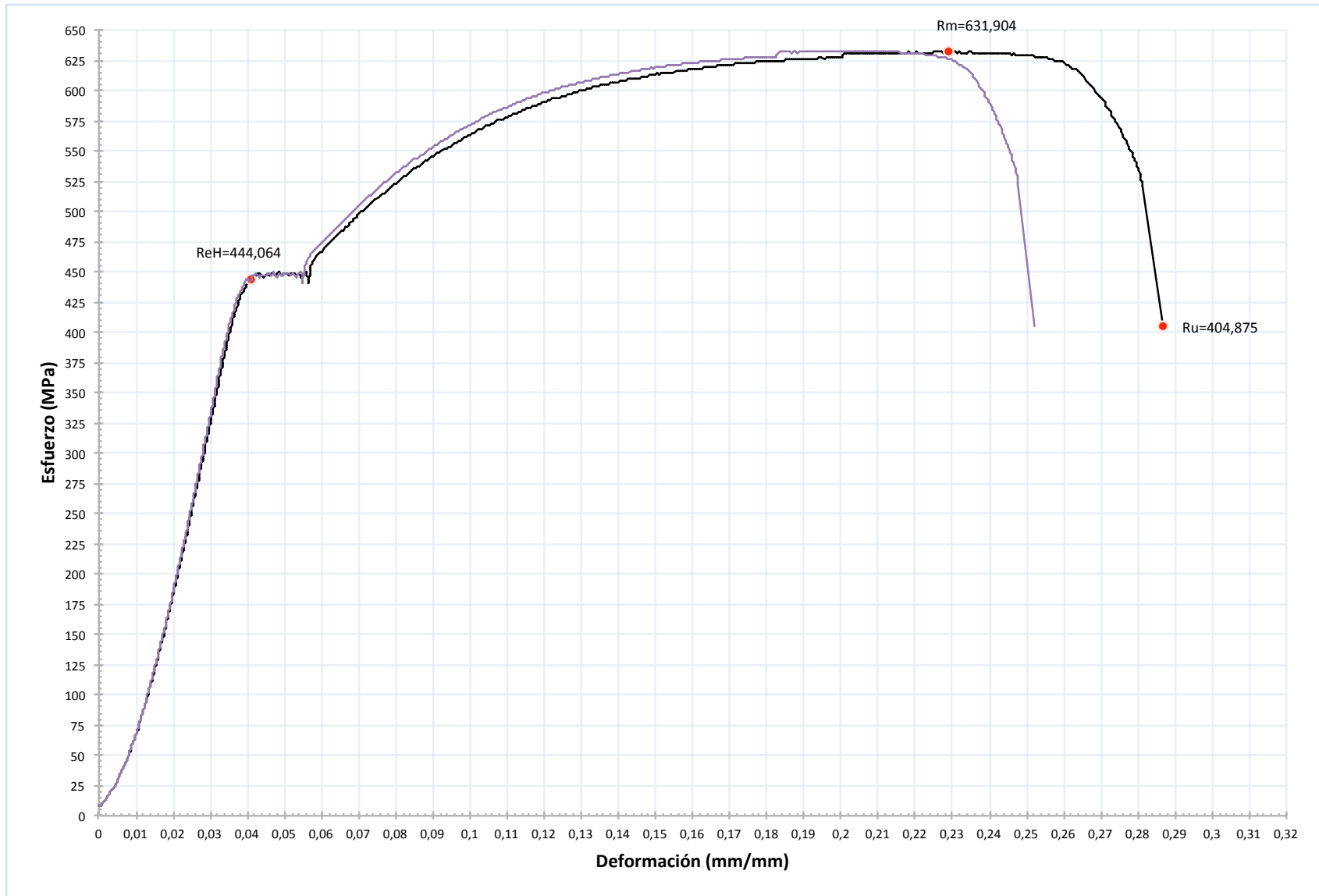
Grafica 2. Ensayo de tracción para probeta 2, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación , con sus características mecánicas, del grupo no corroído.



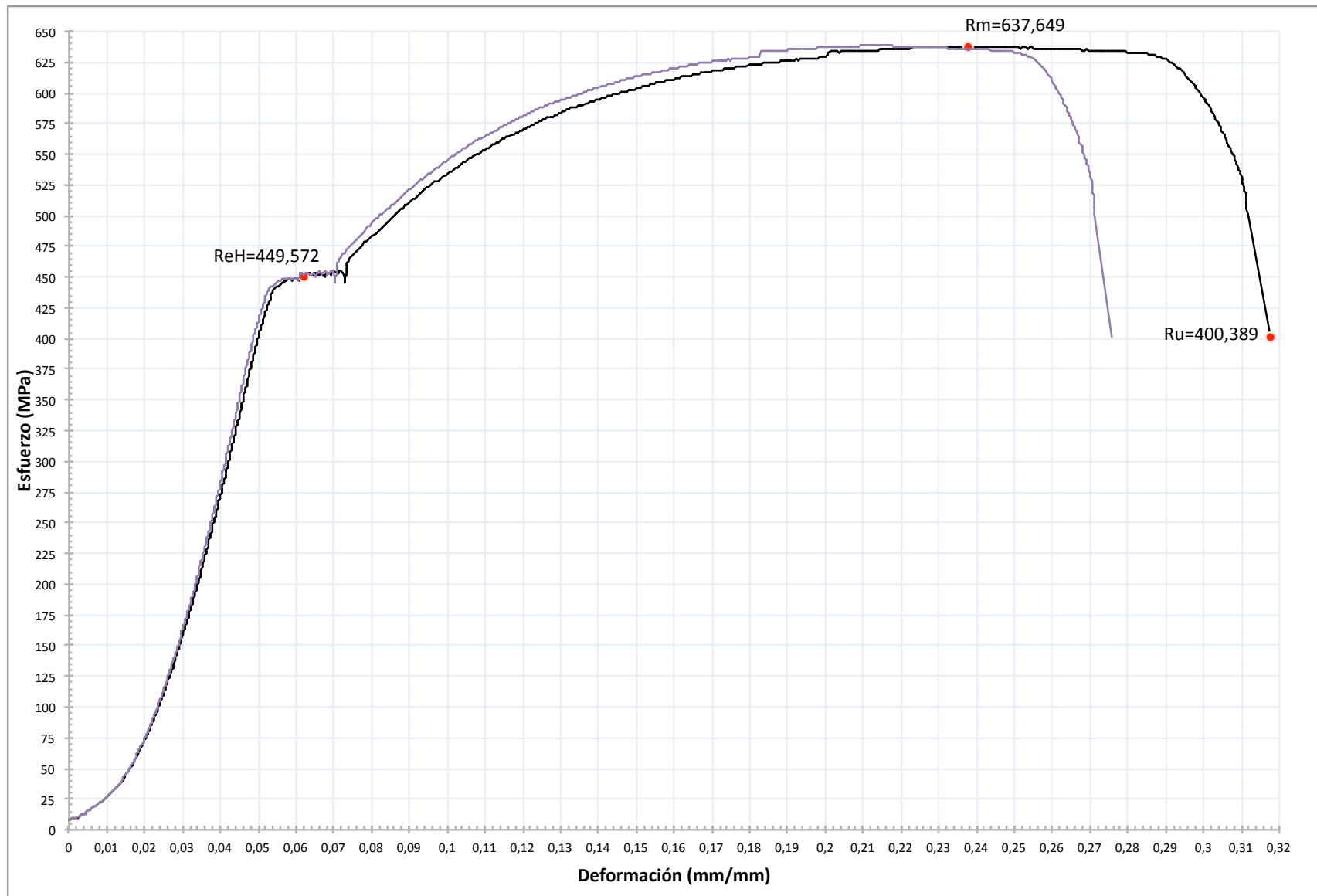
Grafica 3. Ensayo de tracción para probeta 3, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación, con sus características mecánicas, del grupo no corroído.



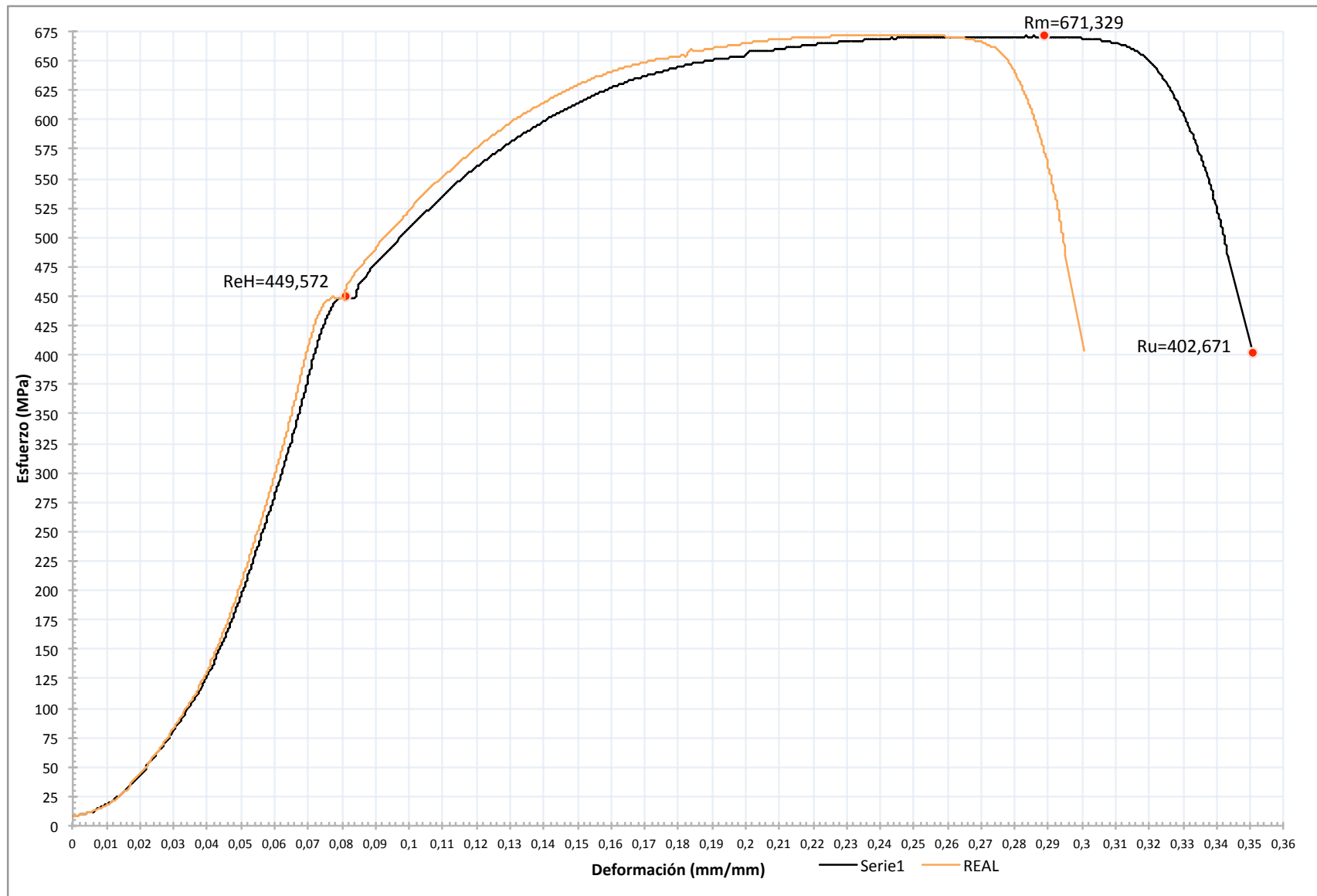
Grafica 4. Ensayo de tracción para probeta 4, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación , con sus características mecánicas, del grupo no corroído.



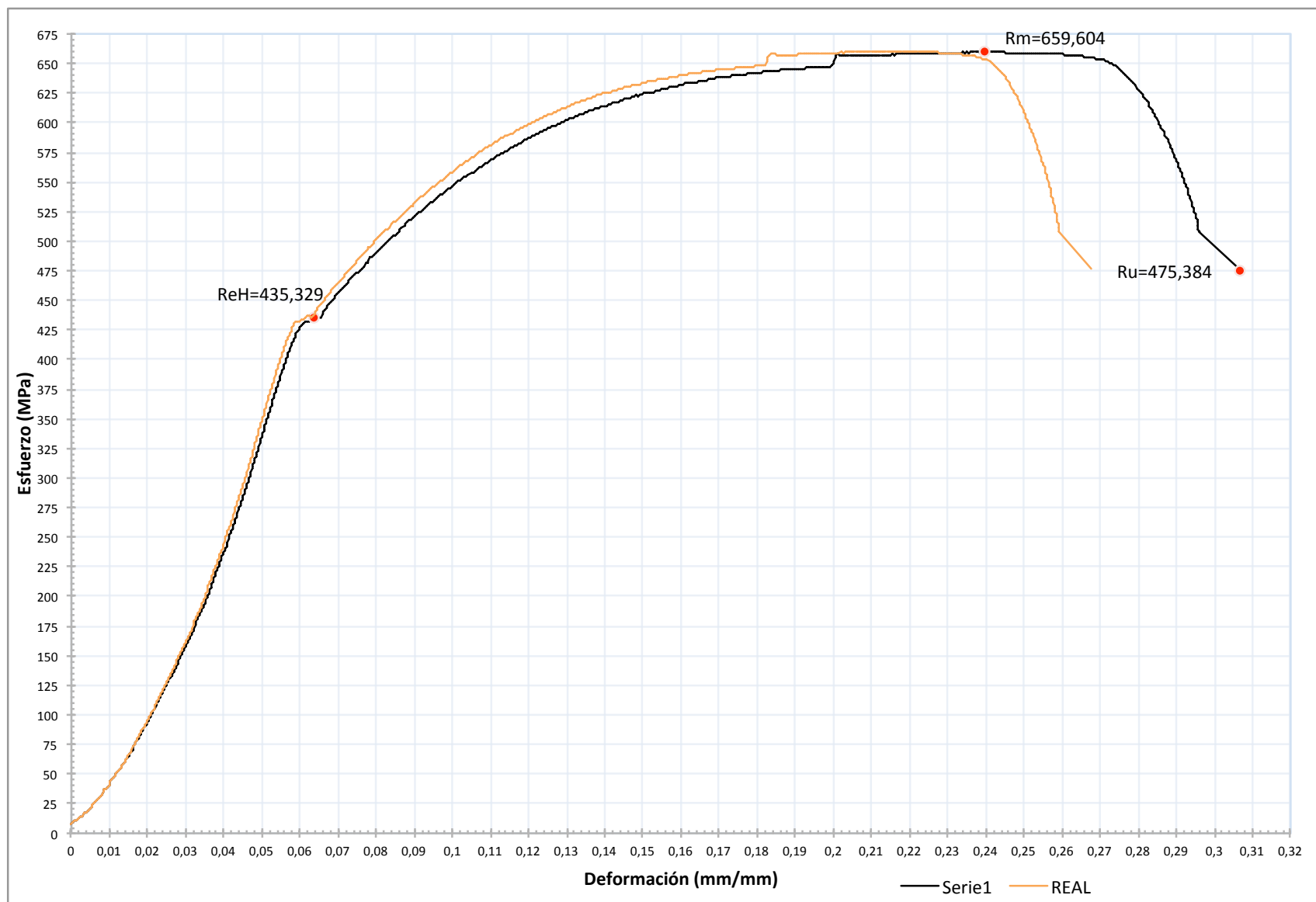
Grafica 5. Ensayo de tracción para probeta 5, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación, con sus características mecánicas, del grupo no corroído.



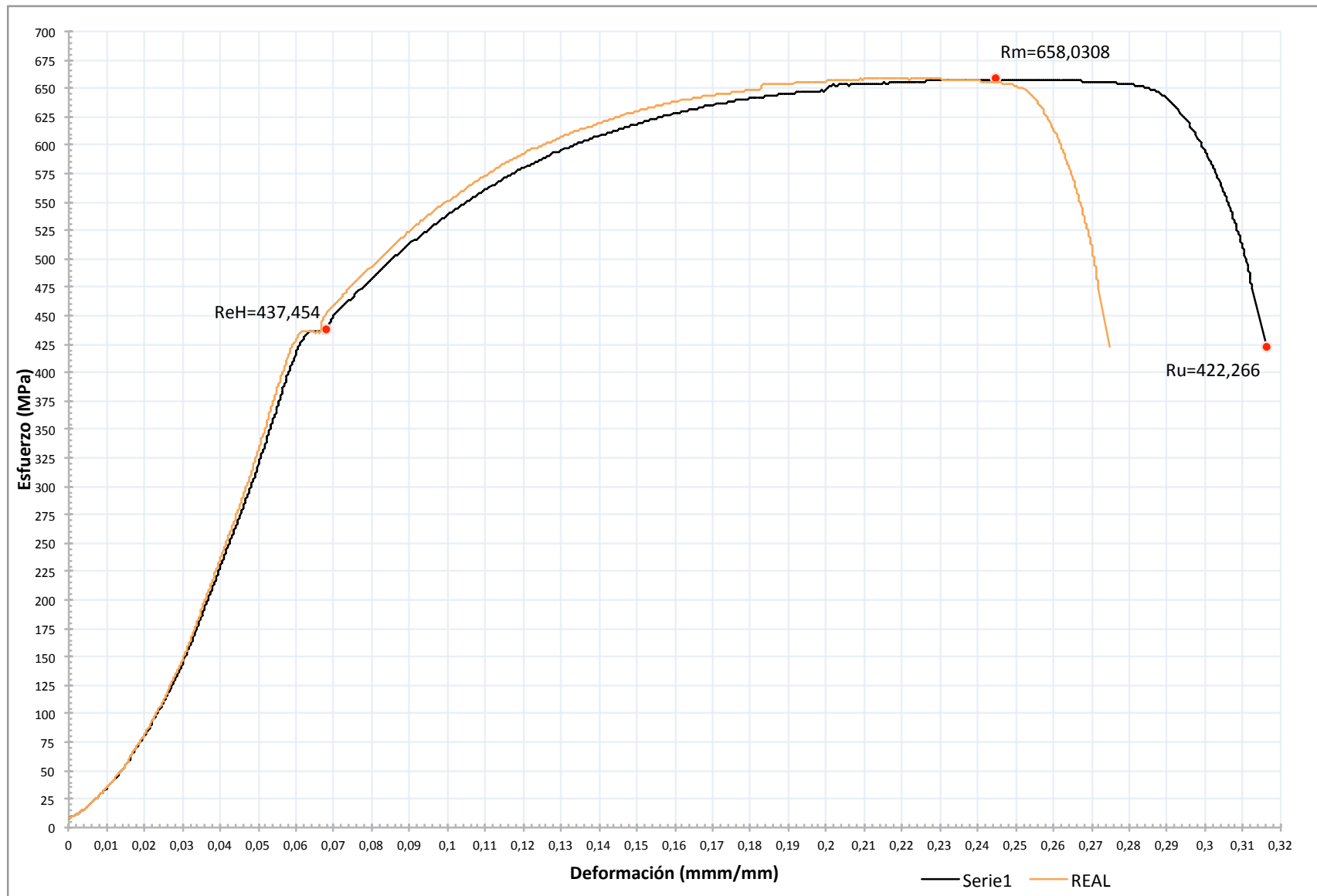
Grafica 6. Ensayo de tracción para probeta 6, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación, con sus características mecánicas, del grupo que presenta capa de oxido.



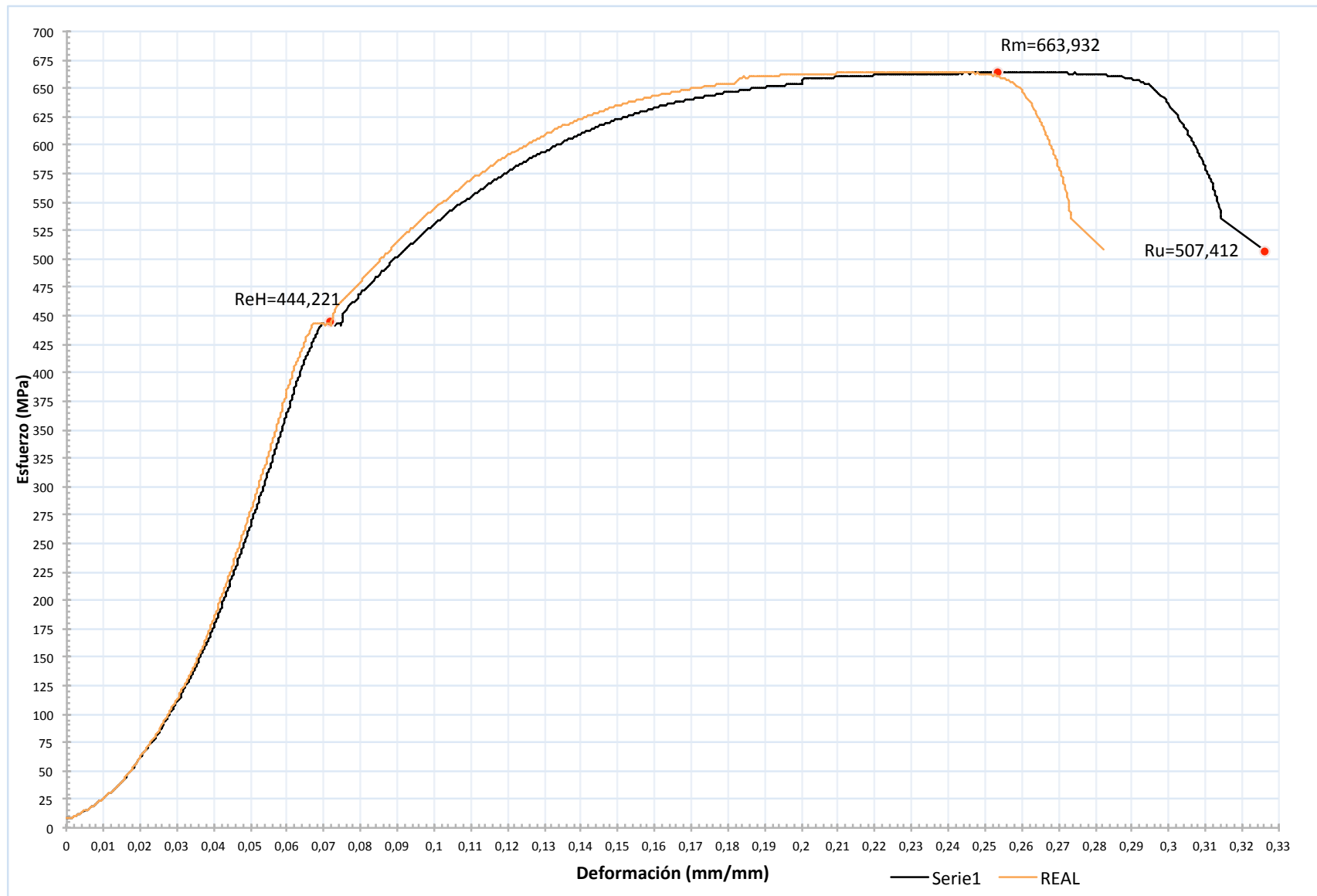
Grafica 7. Ensayo de tracción para probeta 7, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación, con sus características mecánicas, del grupo que presenta capa de oxido.



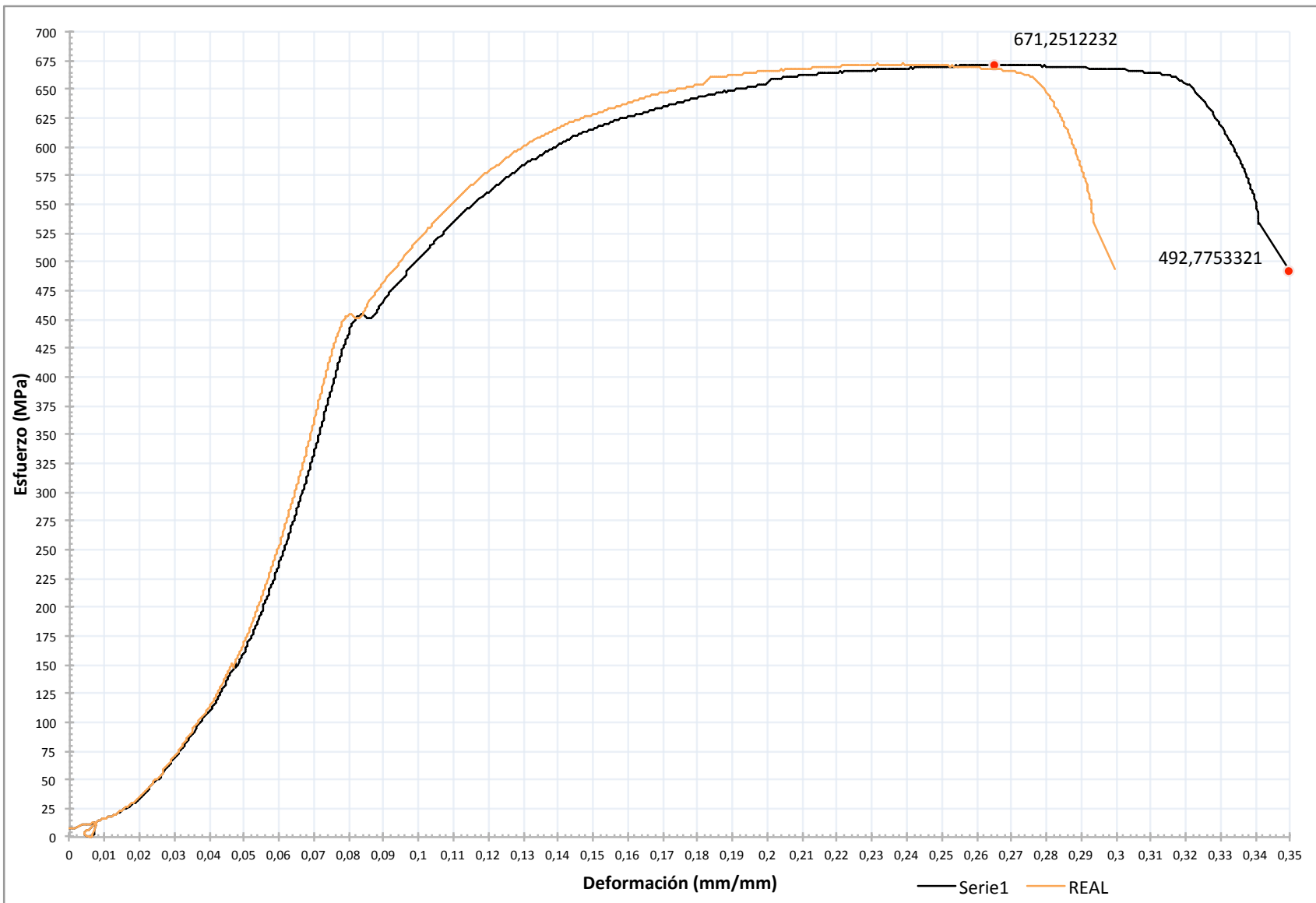
Grafica 8. Ensayo de tracción para probeta 8, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación , con sus características mecánicas, del grupo que presenta capa de oxido.



Grafica 9. Ensayo de tracción para probeta 9, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación , con sus características mecánicas, del grupo que presenta capa de oxido.



Grafica 10. Ensayo de tracción para probeta 10, que refleja la línea Esfuerzo-Deformación real y Esfuerzo-Deformación , con sus características mecánicas, del grupo que presenta capa de oxido.



2.5.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.5.3.1 Porcentaje de elongación

Representa la distancia que la probeta se alarga, plásticamente antes de la fractura.

$$\%Elongación = \frac{L_{inst} - L_0}{L_0} \times 100 \quad ; \quad \text{Ecuac}$$

Tabla 10. Porcentaje de Elongación.

% ELONGACIÓN			
Longitud calibrada (L ₀) (mm)		200	
Probetas NO corroídas		Probetas corroídas	
Longitud final (L _F) (mm)	% Alargamiento	Longitud final (L _F) (mm)	% Alargamiento
241,82	20,91	235,92	17,96
234,62	17,31	233,76	16,88
241,84	20,92	235,34	17,67
234,00	17,00	235,96	17,98
239,88	19,94	236,14	18,07

Fuente: Autor del proyecto

Las varillas NO corroídas presentaron un promedio en su porcentaje de elongación de 19. la varillas corroídas presentan un promedio de 17.71 %, lo que genera una diferencia entre dos valores de 1.51 %, así mismo las primeras tiene un promedio en su longitud final de mm y 235.42 mm respectivamente, con una diferencia entre las dos de 3.01 mm.

2.5.3.2 Porcentaje de reducción de área.

Este porcentaje también representa la deformación plástica, antes de la fractura.

$$\%Z = \frac{A_0 - A_{INST}}{A_0} \times 100 \quad ; \quad \text{Ecuación 13.}$$

Tabla 11. Porcentaje de reducción de área.

% REDUCCIÓN DE ÁREA			
Diametro inicial (Ø)(mm)	15,9	Área inicial (A ₀) (mm ²)	198,56
Probeta NO corroida		Probeta corroida	
Diametro final (mm)	% Z	Diametro final (mm)	% Z
10,6	55,56	9,48	64,45
10,56	55,89	9,98	60,60
11,1	51,26	9,46	64,60
10,86	53,35	10,6	55,56
10,6	55,56	11,2	50,38

Fuente: Autor del proyecto

Si deseáramos obtener el área instantánea, haríamos uso del principio de conservación del volumen el cual dice que el volumen inicial es igual al volumen final, por lo tanto el volumen de la varilla se mantendría a pesar de que esta fuera estirada y así mismo sufriera una reducción de área.

$$A_0 \cdot L_0 = A_{INST} \cdot L_{INST} \quad ,$$

$$A_{INST} = \frac{A_0 \cdot L_0}{L_{INST}} \quad \text{Ecuación 14.}$$

2.5.3.3 Límite de fluencia

En este punto se presenta un incremento considerable de la deformación, sin incrementar el esfuerzo, se considera una de las propiedades más importantes del acero, la cual después de este punto pasa de una deformación elástica a una deformación plástica, que es de 10 a 15 veces la primera deformación, en esta zona de plasticidad la varilla no volverá a retornar a su estado original, sino que va a tener una deformación permanente.

Tabla 12. Resistencia máxima, tensión de rotura y límite de fluencia.

ITEM	ReH 0.1%/FS (N/mm ²)	Fm (N)	Rm (N/mm ²)	Ru (N/mm ²)
NO CORROIDA				
Probeta 1	445,09	125515,63	632,14	445,95
Probeta 2	446,50	125046,88	629,78	419,98
Probeta 3	448,16	126296,88	636,08	376,15
Probeta 4	444,06	125468,75	631,90	404,88
Probeta 5	449,57	126609,38	637,65	400,39
CORROIDA				
Probeta 6	449,57	133296,88	671,33	402,67
Probeta 7	435,33	130968,75	659,60	263,86
Probeta 8	437,45	130656,25	658,03	422,27
Probeta 9	444,22	131828,13	663,93	507,41
Probeta 10	152,27	133281,25	671,25	492,78

Fuente: Autor del proyecto

El promedio del límite de fluencia superior que se presenta en la tabla anterior tiene un promedio para las varillas NO corroídas de 446,68 N/mm² y para las corroídas de 439,92 N/mm².

2.5.3.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria, es un indicador de la rigidez del material y se representa con la letra E.

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación Unitaria}} \quad ; \quad \text{Ecuación 15}$$

2.5.4 Decapado del Acero

Procedimiento realizado para remover partículas de oxido y corrosivas que se encuentren en las varillas con el fin de medir la cantidad de masa perdida, para esto se realiza la medición del peso de la varilla antes de realizar el procedimiento con una balanza, luego se realiza el decapado químico y mecánico, también conocido como proceso de granallado, y posteriormente se procede a realizar nuevamente la medición del peso de la varilla. Con la diferencia obtenida y sabiendo el tiempo de exposición de las varillas en el medio, se obtendrá la velocidad de corrosión del medio.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron probetas de 10 cm de longitud y 5/8” de diámetro, las cuales fueron tomadas de las varillas proporcionadas de la construcción del portal de Papi Quiero Piña.

2.5.4.1 Velocidades de Corrosión por pérdida en peso.

La Fotografía 9, muestra el estado inicial de las probetas nuevas expuestas y antes de realizar el proceso de decapado.

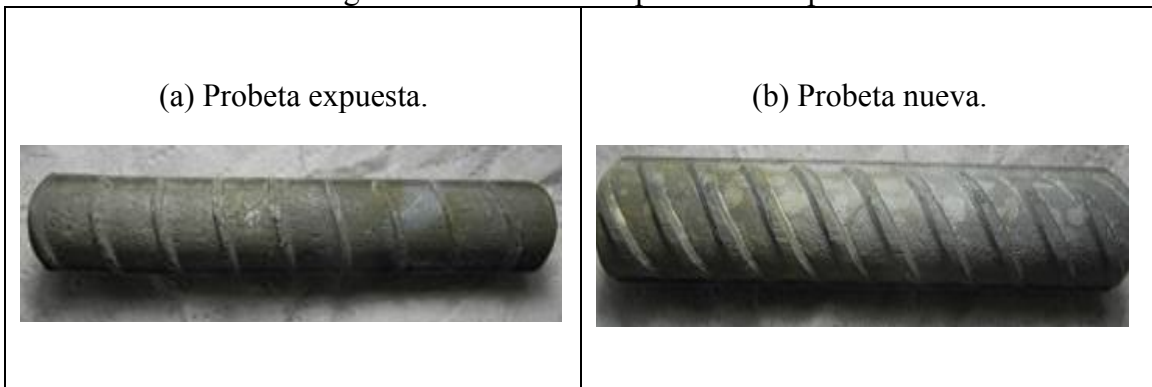
Fotografía 9 Estado de las probetas expuestas y nuevas antes del proceso de decapado.



Fuente: Autor del proyecto

El proceso de decapado (retiro de los productos de corrosión), se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G1 “Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”. La Fotografía 10, muestra el estado final de las probetas con y sin exposición después del decapado.

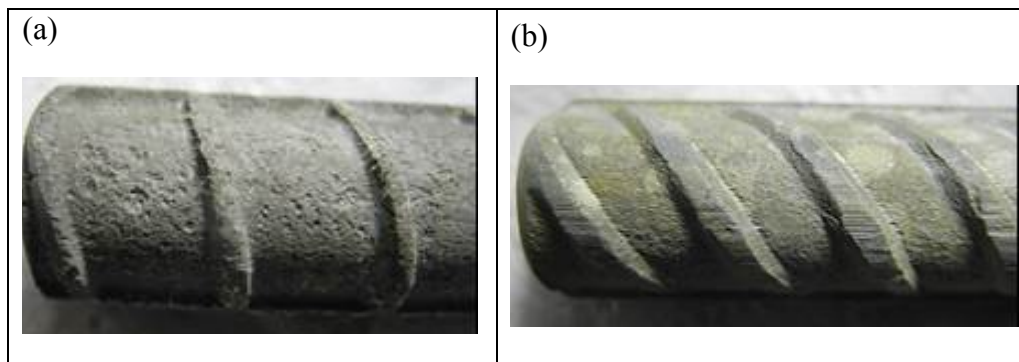
Fotografía 10. Probetas después del decapado.



Fuente: Autor del proyecto

En la fotografía 10, (a), se observan manchas de coloración más café, las cuales son originadas por los proceso de corrosión presentes sobre la superficie. En la fotografía 10, (b), se observa una superficie más homogénea y con leves cambios de tonalidad.

Fotografía 11 Estado detallado de las probetas después del decapado



Fuente: Autor del proyecto

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a), se muestra un acercamiento sobre la probeta expuesta, donde es fácil de identificar pequeñas picaduras producidas por la corrosión que ha sufrido la probeta. De otra parte en 11 (b), se observa la probeta sin exposición con una textura mucho más homogénea.

2.5.4.2 Cálculo de la velocidad de Corrosión.

El cálculo de la velocidad de corrosión de estas varilla expuestas a la intemperie se llevó a cabo siguiéndolos lineamientos de la norma ASTM G1. La pérdida de masa de la probeta después del decapado, es cuantificada, y con base en el área total expuesta y el tiempo total de exposición se cuantificó la velocidad de corrosión.

Para este caso, la pérdida de masa de la probeta expuesta fue de 1,58 gramos, para un área expuesta de $4,13 \text{ cm}^2$ durante un tiempo total de 6 años de exposición a la intemperie. El peso de la probeta expuesta sin decapado fue de 153,45 gramos; mientras que la probeta después de

decapado tuvo un peso de 151,87 gramos. Lo anterior da como resultado, una velocidad de corrosión de 10,02 gr/mt²*año.

Según los lineamientos de la norma ISO 9223 “Corrosion of metals and alloys –Corrosivity of atmospheres – Classification, esta atmósfera puede ser clasificada como de “Corrosividad Baja (C2)”. Estos resultados son coherentes con los mostrados a partir de las mediciones de potencial de corrosión.

2.5.5 Ensayo de Potenciales de Corrosión (Eoc).

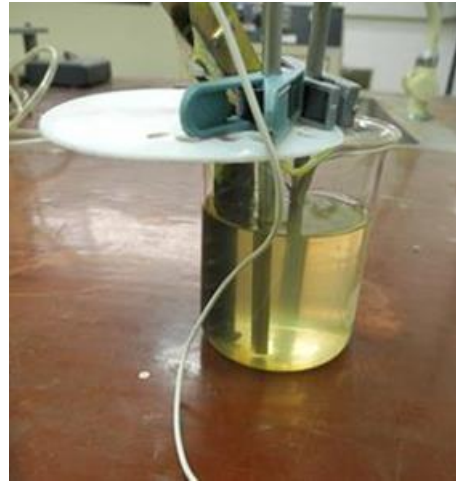
Los potenciales de corrosión para las varillas fueron tomados con un potenciostato GAMRY INSTRUMENTS 600, utilizando como contra electrodo y electrodo referencia dos varillas de acero inoxidable 316L; como electrolito fue utilizada una solución preparada con agua desionizada con una concentración de cloruro de sodio al 1% en peso. La fotografía 12.a, muestra el equipo mediante el cual se realizan las mediciones y en 12.b, se observa la celda electroquímica con el electrodo de trabajo y los dos electrodos de SS316L.

Fotografía 12 Potenciostato y celda para mediciones electroquímicas.

- Potenciostato para mediciones electroquímicas.



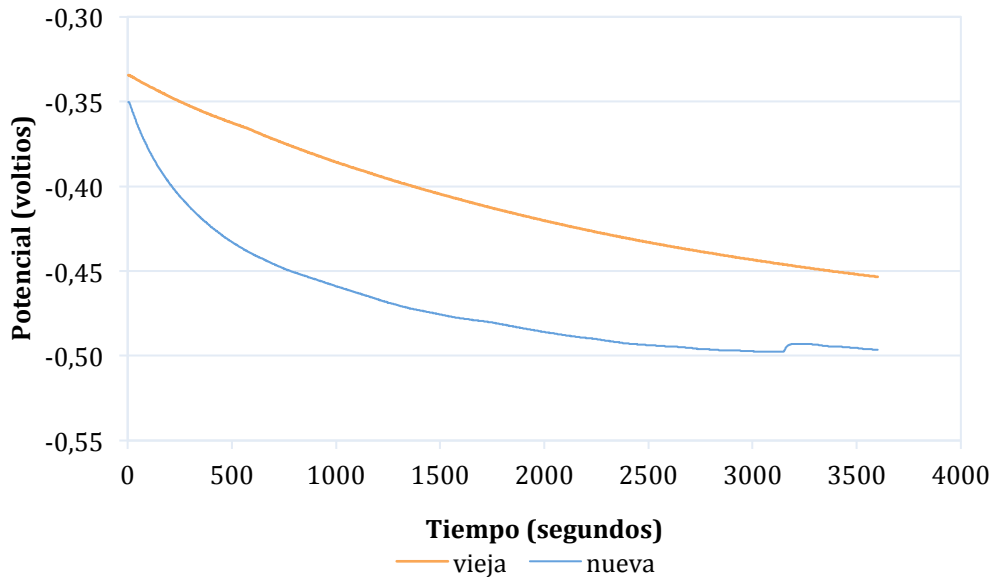
- Celda electroquímica.



Fuente: Autor del proyecto

La Grafica 11 muestra los potenciales de corrosión (E_{oc}), para las varillas nueva y la expuesta durante 6 años. Después de 1 hora de exposición se observa una diferencia de potencial de aproximadamente 50 milivoltios entre las dos curvas. La varilla vieja tienen un potencial menos negativo, lo que en términos de susceptibilidad a la corrosión, significa que tenemos una estructura con más películas de corrosión formadas, que en la varilla nueva. Esto es corroborado a través de los diagramas de Pourbaix para el hierro, mostrado en la Figura 12, donde se observa que la zona de inmunidad para un pH de 7 (que es el pH de la solución de evaluación), se encuentra a potenciales más electronegativos que -0,6 voltios. Por tanto esta varilla nueva se encuentra en una posición donde lograr la inmunidad del material (a través de potenciales de protección catódica por ejemplo), es más fácil que para la varilla vieja. Sin embargo la relativa baja diferencia del potencial de corrosión, mostrada por las dos varillas es un indicio más de la baja criticidad mostrada por las varillas de seis años de exposición.

Grafica 11. Curvas de potencial de circuito abierto (E_{oc})

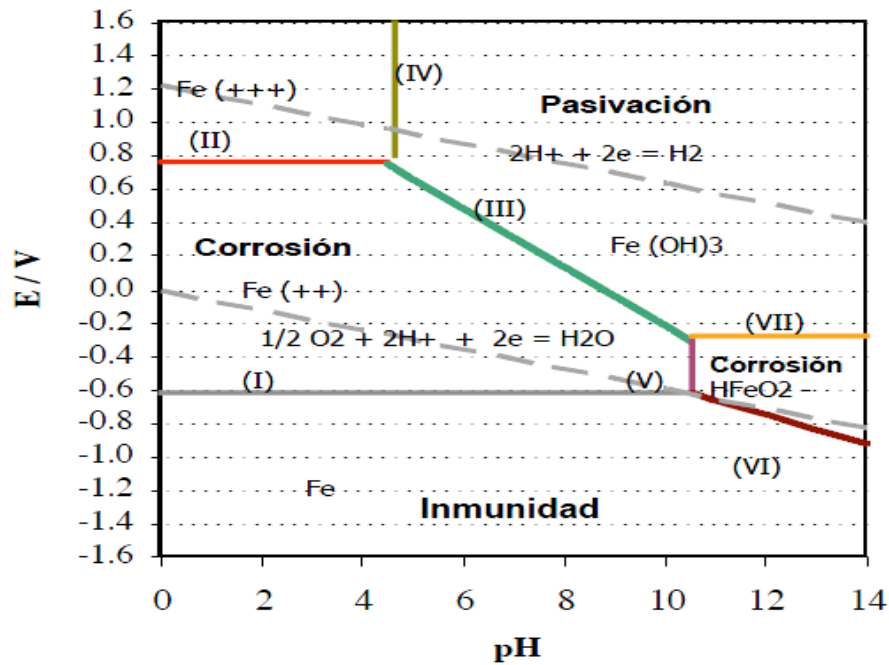


2.5.5.1 Diagrama de Pourbaix para el hierro.

En términos prácticos los diagramas de Pourbaix muestran los estados más estables de un material expuesto a un electrolito acuoso dependiendo de su potencial y su pH. Es decir una vez definido el pH de una solución acuosa en la cual está inmerso un material X, el potencial medido de este material con respecto a un electrodo de referencia, entrega desde el punto de vista termodinámico el estado de oxidación más probable de este material.

Por tanto en el caso específico del hierro, para un pH neutro ($\text{pH}=7$), a potenciales más positivos, predominaran los diferentes estado de oxidación del hierro como Fe^{+2} , y Fe^{+3} , respectivamente. A medida que nos acercamos a potenciales más negativos, entonces será más probable encontrar el hierro en estado de inmunidad (Fe^0). Es por esto que podemos afirmar que las diferencia de E_{oc} mostradas por los dos electrodos evaluados ratifican que no se tienen un material en un estado de corrosión muy avanzado o crítico.

Figura 12. Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25°C.



2.6 INSPECCIÓN VISUAL

2.6.1 Características visuales

La caracterización visual es considerada una técnica válida, en este caso se realiza con la finalidad de determinar el estado corrosivo de las varillas, caracterizar y describir su estado físico que se observa de la cobertura de las mismas, y de esta forma obtener un punto de correlación entre el aspecto físico y los resultados generados por los ensayos mecánicos y electroquímicos.

Para este análisis se tendrán en cuenta:

- Indicios de aparición de corrosión por picadura.
- Al entrar en contacto con la varilla y tocar su superficie aparición de óxido.

- Si presenta alguna escamación o formación de alguna capa diferente a su estado natural.
- Observación del medio en el que se encontraba inicialmente

En primer lugar el aspecto del medio donde se encuentran las varillas se observa en las que están simplemente puestas sobre el terreno sin ningún tipo de apoyo que además lo aisle del contacto con la tierra y tampoco tiene ninguna protección contra agentes atmosféricos como la lluvia y el sol, véase , Fotografía 2 y Fotografía 3, donde se observan las varillas a través de la vegetación alta.

Cuando entramos a evaluar el- ¿Cómo se ven las varillas?- , podemos ver que estas ya no tienen el color, ni la textura de cuando están libres de corrosión por su condición de recién fabricadas, sino que estas presentan colores ocres y rojizos, una textura mas áspera y algunas tienen adheridas material del suelo.

En la Fotografía 13, en la imagen tres se puede observar como en ciertos lugares de las varilla empiezan a presentar colores diferentes (puntos); esto se debe a que la varilla no es homogénea en su conformación y presenta diferencias, intragranulares, y así mismo diferencia en el voltaje impulsor que lleva a la creación de micro celdas de corrosión.

Fotografía 13. Aspecto físico que presentan algunas varillas



Fuente: Autor del proyecto

3 CONCLUSIONES

- El medio en el cual se encuentran las varillas de acero, depositadas no es altamente agresivo, considerando que en el ambiente no tiene agentes como cloruros, sulfatos, ácidos, que perjudiquen el desempeño, por lo que no se desencadenó reacciones agresivas que pudieran deteriorar con una mayor velocidad las varillas, y así obtener resultados degenerativos que promuevan el no uso de estas.
- La película de óxido, que se forma de manera natural sobre el acero que se encuentra expuesto al aire, suministra una protección importante contra futuros ataques por los diferentes medios y gracias a la formación de esta película en el acero como otros metales, no se corroerán rápidamente al entrar en contacto con el aire y el agua.
- Al comparar las propiedades mecánicas de las muestras de varillas extraídas del lugar de obra “Portal de Metrolinea Papi Quiero Piña” y las varillas en buen estado, se detectó que la zona plástica de las varillas de la obra, disminuyó su magnitud; mientras las nuevas presentan un delta de deformación en promedio de 0.0141 (mm/mm), las que presentan deterioro un delta de 0.0048 (mm/mm), el cual representa el 34 % del promedio obtenido en las varillas nuevas, sin embargo mantiene sus características como elongación, resistencia a fluencia, sobre los parámetros establecidos por la norma NTC 2289.
- Teniendo en cuenta que el porcentaje mínimo según la norma NTC 2289 para elongación es de 14 %, como se consigna en la Tabla 3, se deduce que las varillas corroídas a pesar de presentar un porcentaje menor al de las varillas en buen estado, aun se encuentran por encima del porcentaje mínimo en un 3 % aproximadamente.

- La resistencia a la fluencia mínima en la norma NTC 2289 , Tabla 2, página 4, es de 420 Mpa y una resistencia máxima a la fluencia de 540 Mpa, los valores para las probetas ensayadas de varillas corroídas se encuentran en un promedio de 439,92 Mpa, por lo tanto se encuentra dentro del rango establecido.
- La velocidad de corrosión presentada por el medio, en las varillas de acero es de 10,02 gr/mt²*año., lo que se interpreta como un medio corrosivo de agresión baja y no se generó en los 6 años un daño significativo que determine el no uso de este material; según la norma ISO 9223 “Corrosion of metals and alloys –Corrosivity of atmospheres – Classification.
- La varilla que permaneció expuesta por un periodo de 6 años es mas electro-positiva con respecto a la varilla nueva en 50 mV y esto se genero debido a que la varilla que se mantuvo en exposición atmosférica durante ese periodo de tiempo, es mas propensa a desarrollar procesos corrosivos.

4 RECOMENDACIONES

- Antes de utilizar nuevamente el acero, debe ser correctamente limpiado, con la finalidad que no tenga oxido que pueda reaccionar químicamente con los componentes del concreto, y generar procesos corrosivos.
- Aplicar una pintura Epóxica, como aislante del medio, permitiendo crear una capa protectora y así mismo llevar al mínimo cualquier posibilidad de que se genere corrosión.
- Como temas relacionados a próximas investigaciones propongo que se realicen estudios en donde se analice, qué consecuencia traería el disponer varillas con oxido en una mezcla de concreto determinando las reacciones se generan además de observar el comportamiento y reacción de estas varillas después de un tiempo estipulado.
- Otro tema de investigación relacionado con la corrosión del acero, es someterlo a diferentes medios con concentraciones diferentes de compuestos, para identificar cuales componentes y agentes del medio son los mas agresivos para el acero; así mismo puede existir otras variantes como acompañarlo de sistemas de protección catódica por corriente impresa o ánodos de sacrificio y diferentes pinturas y/o tipos revestimiento, que permitan determinar en cuales condiciones su uso es óptimo evaluando desempeño vs. Costo económico.
- Es necesario promover en los estudiantes de pregrado temas diferentes, que promuevan la investigación en áreas que aun relacionadas con su carrera no son tan profundizadas al momento de cursar esta, sin embargo si aportarán investigación y conocimientos importantes en la temática y serán generadores de próximas investigaciones.

- La ingeniería Civil en los países desarrollados ha dado un giro tendiente a evaluar precisamente los efectos y consecuencias de la corrosión del acero inmerso en concreto, pues estudios previos demuestran el alto costo económico causado por el fenómeno electroquímico de la corrosión en todo tipo de estructuras en concreto reforzado.
- La anterior percepción y tendencia mundial sugiere y recomienda muy respetuosamente a la Universidad Pontificia Bolivariana considerar la factibilidad perfilar en esta dirección tecnológica a los futuros profesionales en Ingeniería Civil, lo que constituiría la oportunidad de ser pioneros en Colombia ante la tendencia creciente del control de corrosión en estructuras de concreto reforzado.
- Por último, y respecto al estudio realizado, teniendo en consideración que los ensayos determinaron que el porcentaje mínimo de elongación de las varillas evaluadas está en un 3% por arriba del mínimo exigido por la norma NTC 2289 para elongación, se recomienda que si este estudio es tenido en cuenta para la toma de decisiones al respecto de la continuidad en obra y considerando que el material ha continuado aún más tiempo en igual condición de ambiental, realizar nuevamente los ensayos que reevalúen estas variables con el objeto de asegurar que aún se mantienen dentro de los estándares de la norma.

5 NOMENCLATURA

Este trabajo se desarrolla bajo los siguientes símbolos:

F_{eH}	Fuerza que corresponde al punto de fluencia superior R_{eH} .
F_m	Carga máxima registrada (corresponde a R_m).
R_{eL}	Punto inferior de fluencia.
Z	Reducción porcentual del área de la probeta.
ε	Deformación ingenieril ($\varepsilon = e / L_e$).
A	Elongación o alargamiento porcentual de la probeta.
F_{eL}	Fuerza que corresponde al punto de fluencia inferior R_{eL} .
R_{eH}	Punto superior de fluencia.
R_m	Resistencia a la tracción.
$R_{p0,2}$	Límite convencional de fluencia para una deformación permanente del 0,2 %.
σ	Tensión ingenieril.

S_0 Sección transversal inicial de la probeta.

PC Protección Catódica

E_{oc} Potencial a circuito abierto

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Del Valle, A., Pérez, T., & Martínez, M.. (2001). Publicación Técnica No.182. *El Fenómeno De La Corrosion En Estructuras De Concreto Reforzado*. México: Sanfandila.

RODRÍGUEZ , W.. (2009). *Evaluación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto afectada por la acción de la corrosión en el refuerzo* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander.

BARRAGAN, A., & ARCINIEGAS. J.. (2012). *Evaluación del comportamiento a la corrosión de una varilladle acero galvanizado en concreto reforzado con diferentes concentraciones de cloruro y carbonatos* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander.

NORMA ASTM C 150. (2007). *Especificación Normalizada para Cemento Portland*. Pensilvania, EEUU.

NORMA ASTM C 125. (2014). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. EEUU.

NORMA TECNICA GUATEMALTECA-NTG 41006. (2010). *Terminología referente al concreto y agregados para concreto*. Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía. Guatemala. p, 6-7.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (2007) NTC – 2289. *Barras Corrugadas Y Lisas De Acero De Baja Aleación, P Ara Refuerzo De Concreto* .Bogotá.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (1995). NTC – 2. *Ensayo De Tracción Para Materiales Metálicos. Método De Ensayo A Temperatura Ambiente*. Bogotá.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (2001). NTC – 161. *Barras (Y Rollos) Lisos Y Corrugados De Acero Al Carbono*. Bogotá.

PISARENKO, G.S., YÁKOVLEV, A.P.& MATVÉEV, V.V (1979). *Manual de resistencia de materiales*. Moscú: Editorial Mir Moscú.

LÓPEZ, R., PÉREZ, J., TORRES, A., MARTINEZ, M., MARTÍNEZ, W., ARIZA, L., ZAMUDIO,E., GENESCÁ,J., & VALDEZ, B. (2006). *Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesto a Diferentes Ambientes Urbanos de México*. Publicación Técnica No 292. Secretaria de comunicaciones y transporte e instituto Mexicano del transporte. Sanfandila.

THOMAS, F., FINN, M., JENSEN & RALPH, B. (2002). *Smart structures: determination of reinforcement Corrosion rate by means of the galvanostatic pulse Technique*. First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS.

TROCÓNIS DE RINCÓN, O., & MIEMBROS DE A RED DURAR. (2006) *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.-* CYTED. Cuarta Edición. – Maracaibo, Venezuela.

DAL MOLIN, D. (1988). *Fisuras en Estructuras de Concreto Armado: Análisis das Manifestaciones Típicas e Levantamiento de Casos corridos no Estado do Rio Grande do Sul* (Tesis de Maestría). Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

LEE, F., TORRES, A., TERÁN, J., & MARTINEZ, M. (2006). Publicación Técnica 295. *Caracterización De Un Sistema De Refuerzo-Protección En Elementos De Concreto Reforzado Dañados Por Corrosión, Utilizando Compuestos Base Fibras De Carbón*. Sanfandila.

VAVPERTIC. P. (2008). Seminar *Corrosion in concrete steel*. University of Ljubljana. Kamnik. Pag 12.

PROGRAMA DE CORROSIÓN DEL GOLFO DE MEXICO. *Aplicación de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) en el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto*. Universidad Autónoma de Campeche.


NOTICIAS UNIVERSIA COLOMBIA. (2013). *Más de 26 mil millones de pesos pierde la industria colombiana debido a la corrosión de materiales*. [online] Disponible en internet: <<http://noticias.universia.net.co/actualidad/noticia/2013/08/29/1045848/mas-26-mil-millones-pesos-pierde-industria-colombiana-debido-corrosion-materiales.html>> [Consultado el 3 Enero de 2017, 10:44 am].

GALVANIZADO EN CALIENTE. (2011). *El Impacto de la Corrosión en la Infraestructura Pública*. [online]. Disponible en internet: <<https://galvanizadoencaliente.wordpress.com/2011/07/01/el-impacto-de-la-corrosion-en-la-infraestructura-publica/>> [Consultado 3 Enero. 2017].

7 ANEXOS

ANEXO A

Tabla con los datos originales para la conformación de las gráficas Esfuerzo-Deformación-

ENSAYO DE TRACCIÓN									
 Universidad Pontificia Bolivariana	Lugar del ensayo:	LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL -UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA							
	Solicitado por:	GALA RINCÓN MORA		Norma:	NTC - 2	Numero de muestra:	1/10		
	Nombre de ensayo	varilla 1.tui		Forma:	Cilindrica	Fm (N):	125515,63	Reducción de área(Z) (%):	48,32
	Material:	Varilla de acero 5/8"		Diametro (mm):	15,9	Rm (N/mm ²):	632,14	Elongación(A) (%):	16,26
	Modo de Ensayo	Sencillo		Longitud Calibrada L ₀ (mm):	200,0	Ru (N/mm ²):	445,95	ReH 0.1%/FS (N/mm ²):	445,09
	Control	Alargamiento		Área (mm ²):	198,56	Longitud final L _f (mm):	232,52	Área final (mm ²):	102,61
		Velocidad de ensayo 1	3	Velocidad de ensayo 2	10	Velocidad de ensayo 3	25	Punto de Cambio 1	PF
		Punto de Cambio 2	40 mm	Despl.de origen	0.3%/ET	Sensibilidad:	40	Nivel:	4
	Tiempo (Seg)	Carga (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (Mpa=N/mm ²)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (Mpa=N/mm ²)		
	0	0	0	0	0	0	0		
0,05	1484,375	0,002	0,00001	7,475831451	9,99995E-06	7,475831825			
0,1	1484,375	0,006	0,00003	7,475831451	2,99996E-05	7,475832573			
0,15	1484,375	0,008	0,00004	7,475831451	3,99992E-05	7,475832947			
0,2	1484,375	0,01	0,00005	7,475831451	4,99988E-05	7,47583332			
0,25	1515,625	0,012	0,00006	7,633217377	5,99982E-05	7,633219667			
0,3	1562,5	0,016	0,00008	7,869296265	7,99968E-05	7,869299412			
0,35	1484,375	0,018	0,00009	7,475831451	8,9996E-05	7,475834815			
0,4	1531,25	0,02	0,0001	7,711910339	9,9995E-05	7,711914195			
0,45	1562,5	0,024	0,00012	7,869296265	0,000119993	7,869300986			
0,5	1562,5	0,026	0,00013	7,869296265	0,000129992	7,86930138			
0,55	1531,25	0,028	0,00014	7,711910339	0,00013999	7,711915738			
0,6	1593,75	0,03	0,00015	8,02668219	0,000149989	8,02668821			
0,65	1546,875	0,032	0,00016	7,790603302	0,000159987	7,790609534			
0,7	1578,125	0,036	0,00018	7,947989227	0,000179984	7,94799638			
0,75	1578,125	0,038	0,00019	7,947989227	0,000189982	7,947996778			
0,8	1609,375	0,04	0,0002	8,105375153	0,00019998	8,105383258			
0,85	1578,125	0,044	0,00022	7,947989227	0,000219976	7,94799797			
0,9	1609,375	0,046	0,00023	8,105375153	0,000229974	8,105384474			
0,95	1609,375	0,048	0,00024	8,105375153	0,000239971	8,105384879			
1	1671,875	0,052	0,00026	8,420147003	0,000259966	8,420157949			
1,05	1609,375	0,054	0,00027	8,105375153	0,000269964	8,105386095			
1,1	1687,5	0,056	0,00028	8,498839966	0,000279961	8,498851864			
1,15	1640,625	0,058	0,00029	8,262761078	0,000289958	8,262773059			
1,2	1671,875	0,062	0,00031	8,420147003	0,000309952	8,420160054			