

**EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE PARA CAMAS ANÓDICAS EN
SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA**

DARÍO HUMBERTO RUEDAS PACHECO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

Bucaramanga

2004

**EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE PARA CAMAS ANÓDICAS EN
SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA**

DARÍO HUMBERTO RUEDAS PACHECO

**Informe final de la práctica empresarial realizada en la Corporación para la
Investigación de la Corrosión con el fin de optar al título de Ingeniero
Metalúrgico**

Tutor:

Msc. CUSTODIO VASQUEZ

Cotutor:

Ing. CARLOS ALBERTO RODELO RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Bucaramanga**

2004

*A mis padres Heriberto y Chiquinquirá,
por el apoyo que me han brindado.
A mi hermana Eslendy,
por su perseverancia*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar los más sinceros agradecimientos a:

Sandra Lucía Ballesteros Lancheros, por su apoyo incondicional, sus sabios consejos, su dulzura y ser fuente de mi inspiración

Dora Lucía Lancheros por la confianza depositada

A los funcionarios de la Corporación para La Investigación de la Corrosión, por ser mis maestros y mis amigos, en especial a los Ingenieros Omar Rodrigo Delgado y Carlos Alberto Rodelo Rueda

MsC Custodio Vásquez, por su profesionalismo y pasión por la Corrosión

Pedro Martín Carvajal Jiménez, compañero incondicional y por su calidad humana

Wilmar González Rincón, mi amigo y consejero

Isaid Quintero Arévalo, por su sincera amistad

Al grupo Macrocosmo por sembrar en mí el espíritu docente

Y alguien que siempre que siempre ha confiado en mí: MI abuelo Silvano Pacheco.

CONTENIDO

	Pág.
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL COQUE	23
3.1.1 Humedad	23
3.1.2 Materia Volátil	23
3.1.3 Cenizas	24
3.1.4 Azufre.....	24
3.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL COQUE.....	24
3.2.1 Solidez	24
3.2.2 Densidad.....	24
3.2.3 Porosidad.....	25
3.2.4 Color	25
3.2.5 Sonido.....	25
3.2.6 Reactividad	25
5.1 GRAFITO.....	28
5.2 ACERO	29
5.3 ACERO INOXIDABLE	30
5.4 HIERRO	30
5.5 HIERRO CON ALTO CONTENIDO DE SILICIO	30
5.6 FUNDICIÓN DE HIERRO	31
5.7 ALUMINIO	32
5.8 ZINC	32
5.9 PLATINO	32
5.10 TITANIO PLATINIZADO.....	33
5.11 NIOBIO Y TANTALIO PLATINIZADO.....	33
5.12 ÁNODOS A BASE DE PLOMO.....	34

6.1 ELECTRODO Ag/AgCl	39
7.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CAJA PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES	40
7.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA PARA LA EVALUACIÓN DE COQUES EN LABORATORIO.....	41
7.2.1 Metodología para el diseño de la celda de ensayos en laboratorio	44
7.3 MONTAJE DE LOS COQUES EN LA CELDA DE ENSAYOS EN LABORATORIO	56
7.3.1 Cálculo de los parámetros de diseño	58
7.3.2 Especificaciones del ánodo de acero inoxidable empleado en el diseño...	65
7.3.3 Tipos de rellenos empleados	66
7.3.4 Especificaciones y consideraciones generales del ensayo.....	67
7.3.5 Procedimiento de pruebas y puesta en marcha.....	68
7.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA A NIVEL DE LABORATORIO EN CAMPO	68
7.4.1 Cálculo de los parámetros de diseño	70
8.1 RESISTENCIA DE LAS CAMAS ANÓDICAS EMPLEANDO COQUE LORESCO SC3 Y COQUE COLOMBIANO COMO RELLENO DE LAS CAMAS ANÓDICAS A NIVEL DE LABORATORIO	78
8.2 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA CON RESPECTO AL ELECTRODO Ag/AgCl DURANTE EL ENSAYO.....	79
8.3 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO DE LOS RELLENOS EMPLEADOS EN LAS CELDAS DE LABORATORIO.....	80
8.4 RESISTENCIA DE LA CAMA ANÓDICA EMPLEANDO COQUE LORESCO SC3 COMO RELLENO DE LAS CAMAS ANÓDICAS A NIVEL DE LABORATORIO EN CAMPO.....	81
8.5 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA CON RESPECTO AL ELECTRODO Cu/CuSO₄ DURANTE LOS PRIMEROS DÍAS DE OPERACIÓN.....	82

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. DENSIDADES DE LOS RELLENOS	27
TABLA 2. RESISTIVIDAD DE LOS RELLENOS CARBONÁCEOS EN $\Omega \cdot \text{CM}$	27
TABLA 3. TASA DE CONSUMO DEL GRAFITO EN DIFERENTES AMBIENTES	29
TABLA 4. VELOCIDADES DE CORROSIÓN DEL PT Y TI PLATINIZADO	33
TABLA 5. COMPARACIÓN DE LOS VOLTAJES DE FALLA (V)	34
TABLA 6. DESEMPEÑO DEL ÁNODO EN DIVERSOS MEDIOS	34
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁNODOS PARA CORRIENTE IMPRESA	36
TABLA 7. (CONTINUACIÓN). CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁNODOS PARA CORRIENTE IMPRESA	37
TABLA 8 CARACTERÍSTICAS DEL CÁTODO	45
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA POTABLE DE PIEDECUESTA	48
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	57
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LA CAMA ANÓDICA	61
TABLA 12. RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA LOS CABLES SEGÚN LA AWG	63
TABLA 13. PROPIEDADES DEL COQUE LORESCO SC3	66
TABLA 14. PROPIEDADES DEL COQUE COLOMBIANO	67
TABLA 15. PESO DE LAS MUESTRAS DE COQUE A EVALUAR	68
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	69
TABLA 17. CARACTERÍSTICAS DE LA CAMA ANÓDICA	73
TABLA 18. PESO DE LOS COQUES PARA ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO	80
TABLA 19. MONITOREO DE LAS CELDAS DE LABORATORIO PARA LOS MONTAJES DE COQUE LORESCO SC3 Y COQUE COLOMBIANO	83

TABLA 19. (CONTINUACIÓN). MONITOREO DE LAS CELDAS DE LABORATORIO PARA LOS MONTAJES DE COQUE LORESCO SC3 Y COQUE COLOMBIANO	84
TABLA 20. MONITOREO DE LA CELDA DE LABORATORIO EN CAMPO DURANTE LOS PRIMEROS DÍAS DEL ENSAYO.	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. CELDA DE CORROSIÓN MICROSCÓPICA	19
FIGURA 2. PROTECCIÓN CATÓDICA DE UNA ESTRUCTURA POR CORRIENTE IMPRESA	21
FIGURA 3. CONFORMACIÓN DE UNA CAMA ANÓDICA	22
FIGURA .4. DESCRIPCIÓN DEL ELECTRODO AG/AGCL.	39
FIGURA 5. CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.	41
FIGURA 6 DIMENSIONES DE LA CELDA METÁLICA PARA ENSAYO ACELERADO.	46
FIGURA 7. FORMA DEL ÁNODO DE ACERO INOXIDABLE.	52
FIGURA 8. CIRCUITO DE LA CELDA DE ENSAYO ACELERADO SIN MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE PROTECCIÓN Y SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIAL ESTRUCTURA/ELECTROLITO.	54
FIGURA 9. CIRCUITO DE LA CELDA DE ENSAYOS EN LABORATORIO CON MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DEL CIRCUITO.	54
FIGURA 10. ESTRUCTURA A PROTEGER	56
FIGURA 11 .DISPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA CAMA ANÓDICA.	60
FIGURA 12. ESTRUCTURA A PROTEGER	69
FIGURA 13. DISPOSICIÓN DEL EQUIPO PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA	71
FIGURA 14. .CORTE TRANSVERSAL DE LA CAMA ANÓDICA.	73

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
GRÁFICA 1. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN	49
GRÁFICA 2. PENDIENTES TAFTEL	49
GRÁFICA 3 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LAS CAMAS ANÓDICAS EN LAS CELDAS DE LABORATORIO CON EL TRANSCURSO DEL TIEMPO	85
GRÁFICA 4. VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA EN LAS CELDAS DE LABORATORIO CON EL TRANSCURSO DEL TIEMPO	85
GRÁFICA 5. COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIA DE LA CAMA ANÓDICA DISEÑADA EN CAMPO DURANTE LOS PRIMEROS DÍAS DE LA PRUEBA.	87
GRÁFICA 6. GRADO DE POLARIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL SISTEMA DISEÑADO EN CAMPO DURANTE LOS PRIMEROS DÍAS DE LA PRUEBA.	87

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
FOTOGRAFÍA 1. FUENTE DE TENSIÓN 25 VDC 5 A.	53
FOTOGRAFÍA 2. DISPOSICIÓN FINAL PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES.	98
FOTOGRAFÍA 3. DETALLE DEL PANEL DE CONTROL DEL EQUIPO PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES	98
FOTOGRAFÍA 4. DISPOSICIÓN FINAL DE LAS DOS CELDAS EMPLEADAS EN LABORATORIO	100
FOTOGRAFÍA 5. VISTA SUPERIOR DE LA CELDA DE LABORATORIO.	101
FOTOGRAFÍA 6. FORMA Y CARACTERÍSTICA DE LA CAMA ANÓDICA	101
FOTOGRAFÍA 7. CONTROL DE LA RED DE SUMINISTRO DE AIRE PARA LAS CELDAS DE LABORATORIO	102
FOTOGRAFÍA 8 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA EMPLEANDO EL ELECTRODO DE REFERENCIA AG/ AGCL	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
MANUAL DE INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN DE LA CAJA PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES	95
FOTOGRAFÍAS DE LA CELDA DE ENSAYOS Y ACCESORIOS DE LABORATORIO PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE.	100

RESUMEN DEL PROYECTO

TÍTULO: EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE PARA CAMAS ANÓDICAS EN SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA *

DARÍO HUMBERTO RUEDAS PACHECO**

PALABRAS CLAVES

- Cama anódica
- Corriente impresa
- Coque
- Celda electroquímica
- Resistencia eléctrica

El coque además de los usos tradicionales en metalurgia puede emplearse como material de relleno en sistemas de protección catódica por corriente impresa. La industria nacional proporciona un coque que no satisface plenamente las exigencias de los usuarios, razón por la cual esta investigación formula un mecanismo que permite evaluar el desempeño del coque metalúrgico para el relleno de las camas anódicas en los sistemas de protección catódica por corriente impresa mediante la medición de resistencia eléctrica de la cama anódica.

Para el desarrollo de este proyecto se empleó una muestra de coque colombiano procedente del departamento de Boyacá caracterizada mediante análisis último, densidad y resistividad eléctrica, además, simultáneamente fue evaluada una muestra de coque Loresco SC3 bajo las mismas condiciones de operación con el objetivo de establecer comparaciones en lo correspondiente al cambio de la resistencia eléctrica en función del tiempo.

Las muestras de coque fueron sometidas a pruebas de simulación acelerada en una celda electroquímica, donde se analizó el cambio de la resistencia eléctrica en función del tiempo.

Los resultados obtenidos reflejaron una diferencia significativa en el cambio de la resistencia eléctrica de la cama anódica con el transcurso del tiempo, implicando un desgaste significativo en la cama anódica empleando como relleno el coque, lo cual se traduce en una disminución de la eficiencia del drenaje de corriente no deseable en sistemas de protección catódica por corriente impresa.

*Trabajo de grado (Práctica empresarial)

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas,
Escuela de Ingeniería Metalúrgica
Director: Custodio Vásquez Quintero

TITLE: EVALUATION OF COKE FILLINGS FOR ANODIC BEDS OF CATHODIC PROTECTION SYSTEMS BY PRINTED CURRENT*

DARIO HUMBERTO RUEDAS PACHECO**

KEY WORDS

- Anodic bed.
- Printed current.
- Coke.
- Electrochemical cell.
- Electrical resistance.

Besides traditional coke uses in metallurgy, it can be as well used like material of stuffed in cathodic protection systems by printed current. The national industry provides a coke that totally does not satisfy the exigencies of its users, reason for which this investigation formulates a mechanism that allows evaluating the performance of the metallurgical coke for the filling of anodic beds of cathodic protection systems by printed current throughout measurement of electrical resistance of the anodic bed.

For the development of this project it was used a Colombian coke sample coming from the department of Boyacá, characterized by means of last analysis, density and electrical resistivity. In addition, simultaneously it was evaluated a coke sample reference Loresco SC3 under the same conditions of operation with the objective of establishing comparisons concerning the change of the electrical resistance based on the time.

The coke samples were tested under simulation accelerated in an electrochemical cell, where the change of the electrical resistance based on the time was analyzed.

The results obtained with this project reflected a significant difference in the change of the electrical resistance of the anodic bed with the course of the time, implying a significant wear away of the anodic bed using the coke like stuffed, which is translated in a diminution of the efficiency of the drainage of non desirable current in cathodic protection systems by printed current.

* Project (Practical internship)

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas,
Escuela de Ingeniería Metalúrgica
Director: Custodio Vásquez Quintero

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno electroquímico e irreversible que ataca a los materiales, especialmente los materiales metálicos que se encuentran expuestos a un medio ambiente electrolítico, afortunadamente existen varios mecanismos para tratar de minimizar su impacto y prolongar la vida útil. Estos mecanismos pueden implementarse individualmente o combinados para obtener un mejor grado de protección contra la corrosión.

Uno de ellos es la protección catódica por corriente impresa, que requiere de una fuente externa de corriente directa y un ánodo o cama anódica que permita el drenaje de la corriente de protección.

Uno de los componentes principales es la cama anódica, compuesta por ánodos y el relleno de coque. El coque es conductor y transfiere la corriente del ánodo al electrolito. La eficiencia y desempeño en el tiempo de la cama anódica está determinada principalmente por el relleno de coque que rodea el ánodo, el cual debe tener apropiadas características fisicoquímicas y brindar una baja resistencia. Un relleno de malas características ocasiona daños al ánodo, taponamiento de la interfase ánodo/relleno aumentando la resistencia, lo que conlleva a la pérdida de eficiencia, disminución de la capacidad para drenar corriente y de esta manera una falla en todo el sistema de protección catódica.

Finalmente se arriesga la integridad de la infraestructura y se generan altos costos por mantenimiento.

El coque tradicionalmente se emplea en la industria siderúrgica, para la producción de acero, otras pequeñas cantidades se usan para fundiciones especiales. En los últimos años, el coque colombiano ha entrado a competir con coques importados en el uso como relleno en protección catódica.

Desafortunadamente no existen parámetros establecidos para determinar la calidad de sus propiedades electroquímicas que aseguren su permanencia en el mercado. Esta incertidumbre ha llevado a que muchas de las grandes empresas Colombianas tanto petroleras como petroquímicas, prefieran seguir importando este producto.

El siguiente informe formula un mecanismo que permite evaluar el desempeño del coque metalúrgico para el relleno de las camas anódicas en los sistemas de protección catódica por corriente impresa mediante la medición de resistencia eléctrica de la cama anódica. Los resultados se traducirán en una metodología que conduzca a valorar la calidad del coque nacional para este tipo de aplicación.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar muestras de coque para relleno de camas anódicas en sistemas de protección catódica por corriente impresa utilizando mediciones de resistencia eléctrica de la cama anódica.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

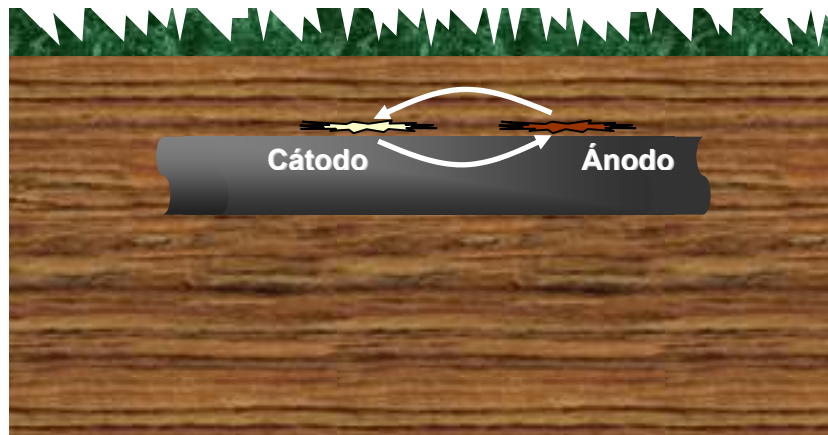
- Establecer la metodología para la evaluación de rellenos de coque en laboratorio
- Diseñar y construir una celda para medición de resistividades de los coques y electrolitos empleados en protección catódica a nivel de laboratorio.
- Diseñar y construir celdas de ensayos acelerados para evaluación de rellenos de coque.
- Diseñar y construir un sistema de protección catódica por corriente impresa en campo.

2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

En las estructuras enterradas los recubrimientos son la primera línea de defensa en muchos programas de control contra la corrosión [1], desafortunadamente, los recubrimientos poseen defectologías y ocurre corrosión acelerada en las zonas donde falla el recubrimiento, la protección catódica es utilizada para prevenir corrosión del sustrato de acero en dichos lugares.

Como lo muestra la figura 1, el área donde la corrosión se presenta es llamada anódica lo que significa que ella esta descargando una corriente de corrosión a un electrolito conductivo. Cuando la corriente sale de la superficie de la tubería metálica hacia el electrolito, es asociada a la pérdida de metal, y el tubo sufre deterioro corrosivo. De otra manera, cuando la corriente fluye desde un medio ambiente electrolítico hacia la superficie de la tubería es un área catódica, no hay daño corrosivo [2].

Figura 1. Celda de Corrosión Microscópica



Existe una forma de convertir todas las áreas anódicas de la superficie de un tubo enterrado o sumergido en áreas catódicas libre de corrosión, esto se logra mediante un apropiado diseño, instalación y mantenimiento de un sistema de protección catódica. Básicamente, este se hace utilizando alguna fuente externa de corriente directa para neutralizar y contrarrestar la descarga natural de corriente de corrosión desde las áreas anódicas

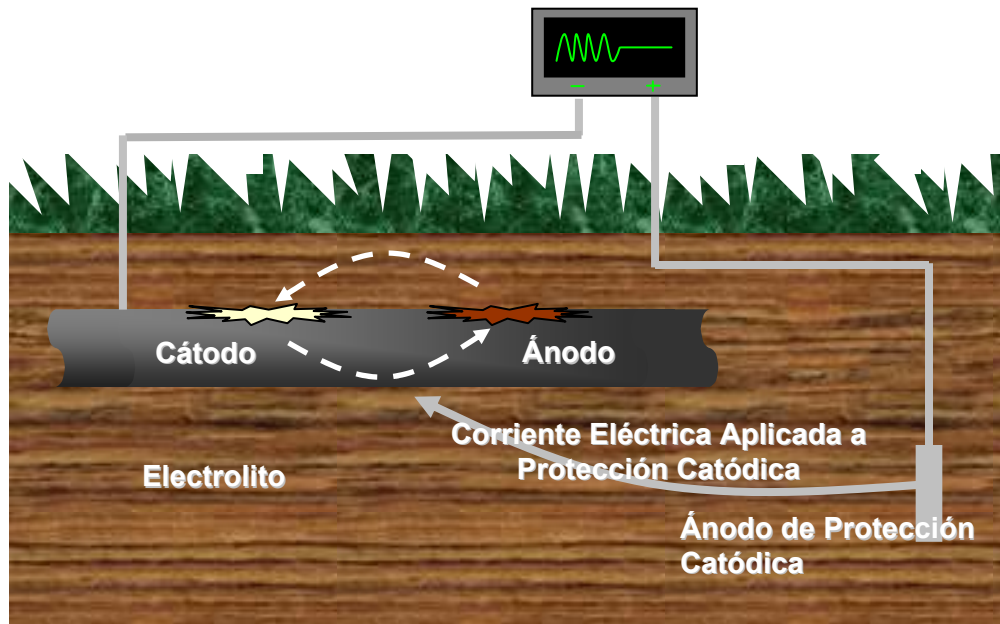
Entonces, un sistema de protección catódica, aunque mantiene la superficie de la estructura protegida libre de corrosión, no elimina la corrosión, transfiere el efecto corrosivo desde las estructuras tales como tuberías a un lugar conocido (la puesta a tierra) donde los reemplazos deben ser realizados periódicamente (10 a 15 años o más) sin afectar la operación de la estructura.

Existen dos tipos de protección catódica, estos son: sistemas de ánodos galvánicos o sacrificio que generan su propia energía eléctrica para protección y los sistemas de corriente impresa que requiere de una fuente de energía externa como se aprecia en la figura 2.

Los ánodos utilizados en un sistema de corriente impresa son usualmente contruidos de un material relativamente inerte, porque estos materiales se corroen a una muy baja velocidad de corrosión, comparados con las velocidades de corrosión de los materiales de los ánodos galvánicos. En la figura 3 se ilustra la conformación de la cama anódica.

Los ánodos de corriente impresa son generalmente rellenos con coque metalúrgico y el coque calcinado de petróleo, este relleno sirve para tres propósitos:

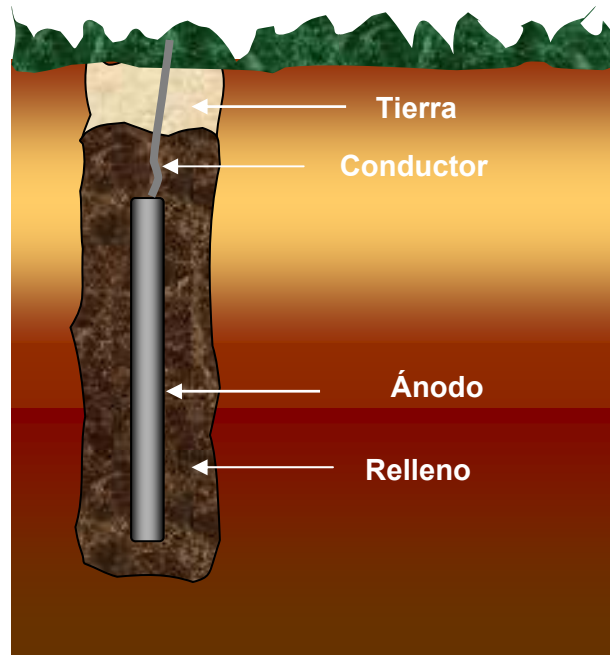
Figura 2. Protección catódica de una estructura por corriente impresa



- Reducir la resistencia ánodo a tierra
- Incrementar la capacidad de corriente de salida del ánodo por extensión del área de la superficie del ánodo.
- Prolongar la duración de vida de los ánodos [3,4].

El criterio ideal para el diseño de un sistema de protección catódica es que suministre el grado de protección requerido al mínimo costo total anual sobre la vida proyectada de la estructura protegida [5]. Estos costos totales anuales se refieren a la suma de los costos por potencia y mantenimiento, que son directamente proporcionales al comportamiento y eficiencia de la resistencia de la cama anódica.

Figura 3. Conformación de una cama anódica



Las grandes empresas proveedoras de coque para relleno de las camas anódicas manejan sus propios procedimientos y técnicas para su producción, y, a nivel internacional los desarrollos en este campo son generalmente empíricos, por tanto, la información al respecto es limitada.

3. EL COQUE

El coque se define como el producto sólido de la destilación a alta temperatura de un carbón o mezcla de carbones (generalmente bituminosos), al cual se le elimina el contenido de volátiles, incrementando el carbono fijo, con o sin adición de otros materiales. Al proceso también se le llama carbonización.

El proceso se realiza con base en una destilación seca y el producto residual que se obtiene es un compuesto poroso, de propiedades físicas y químicas específicas. Algunas de las propiedades químicas del coque se describen a continuación:

3.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL COQUE

3.1.1 Humedad

El contenido de humedad en coque varía según el sistema de apagado y las propiedades físicas de este, por lo tanto esta no depende de la humedad del carbón, ni de las condiciones de coquización. La humedad del coque constituye un inerte que reduce el contenido de carbono, y por lo tanto el poder calorífico del coque.

3.1.2 Materia Volátil

El contenido de materia volátil en el coque es despreciable, si las hay provienen de sustancias que durante la coquización no han sufrido un rompimiento térmico completo, debido a la temperatura insuficiente alcanzada en el horno. Este principio es más significativo en los hornos de pampa y de colmena.

3.1.3 Cenizas

Constituyen la parte incombustible del coque y provienen de la materia mineral del carbón de origen. Constituyen un inerte que disminuye el contenido de carbono y el poder calorífico. Las cenizas del coque están constituidas por sílice (40-50%) y por cantidades menores de cal, óxido de titanio, álcalis, anhídrido sulfúrico y fosfórico.

3.1.4 Azufre

Es perjudicial en cualquier empleo del coque y las cantidades toleradas son muy pequeñas.

3.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL COQUE

Las principales propiedades físicas del coque se describen a continuación

3.2.1 Solidez

Es la resistencia que presenta el coque a sufrir fracturamiento y abrasividad. Estas son producidas por falta de cohesión y generación de polvo por rozamiento. La fragilidad del coque es debida principalmente a su estado de fisuración, en tanto que la abrasividad es consecuencia de una fusión insuficiente.

3.2.2 Densidad

Está relacionada con el volumen que ocupe el coque en el alto horno. Puede determinarse la densidad real de coque pulverizado, donde se elimina la influencia de la porosidad y la densidad aparente de trozos de coque.

3.2.3 Porosidad

Influye en la reactividad del coque por la distribución y tamaño de los poros, así como por el espesor de sus paredes y la comunicación que hay entre ellos. El tamaño está relacionado con la adsorción de gases en el alto horno.

Generalmente los poros en el coque son clasificados de acuerdo a su tamaño en tres tipos: macro poros > 50 nm de ancho, meso-poros de 2 a 50 nm de ancho y micro poros < 2 nm de ancho.

3.2.4 Color

El coque tendrá un color negruzco si se ha apagado con agua y lo será más cuanta más agua contenga; tendrá un color gris claro o plateado si no ha estado en contacto con el agua; el buen coque metalúrgico es de color gris metálico.

3.2.5 Sonido

Al golpear un trozo de coque se aprecia un sonido metálico seco, que corresponde a un buen coque; si el sonido es sordo y apagado su calidad es mala, es decir que su coquización no ha sido completa.

3.2.6 Reactividad:

Se define como la velocidad del coque en presencia de un gas reactante como dióxido de carbono, oxígeno, hidrógeno o vapor de agua.

Comúnmente, la reactividad de un coque se mide como la pérdida en peso que experimenta cuando reacciona con CO_2 bajo condiciones operacionales de tiempo y temperatura controladas.

4. CARACTERISTICAS DE LOS RELLENOS DE LAS CAMAS ANÓDICAS

Los rellenos de coque son usados principalmente con el objetivo de extender el área superficial de la cama anódica, bajar la resistencia de la cama anódica, mejorar el contacto entre el ánodo y la tierra o electrolito, permitir la difusión de los gases producidos en las reacciones anódicas y minimizar el ataque selectivo de los ánodos.

En ocasiones, se agregan sustancias químicas como carbonatos de calcio en proporciones cercanas al 10%, con el fin de contrarrestar la pérdida de humedad por efecto de la electro-osmosis. La electro-osmosis es el movimiento de agua a través del suelo como resultado a un gradiente de potencial, por tanto, es esencial la presencia de un electrolito acuoso para conducir la corriente de protección a la estructura.

La electroquímica y naturaleza física del coque conlleva a la formación de CO_2 y O_2 sobre una gran área superficial, reduciendo el desgaste prematuro del ánodo.

El coque es oxidado en primera instancia a CO_2 , el cual, si la cama es adecuada permite el escape de este gas a la atmósfera al igual que el oxígeno. Si todo el oxígeno reacciona, la velocidad de consumo del relleno es de 1 Kg/A-Año, sin embargo, en la práctica el consumo es de solamente 0,25 Kg/A-Año.

En la tabla 1 y 2 se señalan las densidades típicas de rellenos para camas anódicas y el comportamiento de la resistividad del relleno con respecto a la influencia de variables como la humedad y la compactación, respectivamente.

Tabla 1. Densidades de los rellenos

Relleno	Densidad (Kg./m³)
Coque metalúrgico	650 – 800
Coque calcinado de petróleo	700 – 1100
Grafito natural	1100 – 1300

Tabla 2. Resistividad de los rellenos carbonáceos en $\Omega \cdot \text{cm}$.

Relleno	Seco	Compactado	Húmedo
Coque metalúrgico	55	45	15
Grafito granular	150	120	20

A nivel nacional se han realizado diversos estudios e investigaciones en torno a los carbones coquizables en la obtención de coque metalúrgico a nivel de laboratorio para su uso en sistemas de protección catódica, E. Mogollón [6] logro un coque conductivo con mezclas de carbón y brea nacionales, alcanzando valores de resistividad de la muestra de coque, hasta de $2 \Omega \cdot \text{cm}$.

5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁNODOS EMPLEADOS EN PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

Para realizar un diseño y montaje de un sistema de protección catódica por corriente impresa, se emplean diversos tipos de ánodos que difieren en características tales como: la composición química, velocidad de consumo, dimensiones, eficiencia, costos, entre otros.

Para conocer en forma general las características de los ánodos empleados en protección catódica a continuación se presenta una breve descripción de los mismos.

5.1 GRAFITO

El desempeño del grafito en agua de mar, donde el cloro es el principal gas presente, es considerablemente mejor que en agua fresca donde el oxígeno es producido libremente debido a que el grafito es inmune a los cloruros.

En la práctica comúnmente el grafito es impregnado con aceite de linaza o resinas sintéticas comerciales. El objetivo de esta técnica es reducir la porosidad y de esta manera, inhibir la evolución de gas en las áreas subsuperficiales que pueden iniciar el desgaste y la falla prematura del mismo. El imprégnate ideal será aquel que tenga, una tasa de descomposición similar a la del, grafito, así por ejemplo si la velocidad de descomposición de este es inferior a la del grafito, origina un aumento de la resistencia en la superficie del ánodo y la densidad de la corriente drenada, que conduce a un deterioro acelerado.

La acidez tiende a incrementar la velocidad de descomposición del ánodo, de igual manera la presencia de iones sulfatos; estos factores pueden ser controlados teniendo en cuenta el ambiente de trabajo y tratamientos químicos de los rellenos.

El ánodo de grafito no es recomendado para usos a temperaturas superiores a 50°C, donde el consumo se incrementa sustancialmente.

La tabla 3 muestra algunos resultados obtenidos con grafito bajo condiciones diferentes.

Los resultados fueron obtenidos con una instalación particular usando un ánodo de 1 m de longitud y 100 mm de diámetro operando a 0.69 mA/ cm² y estimando una vida de 20 años [7] .

Tabla 3. Tasa de consumo del grafito en diferentes ambientes

Ambiente	Consumo (Kg/A-año)	Densidad de corriente (mA/cm ²)
Relleno	0.9	<= 1.08
Agua caliente	0.9	----
Agua de mar	0.045	0.43-10.7
Agua fresca	0.45	0.35
Lodo	1.36	3.24

5.2 ACERO

El acero fue uno de los primeros materiales utilizados en protección catódica por corriente impresa. Son económicos y satisfactorios para grandes geometrías.

Estos ánodos tienden a aumentar la resistencia a la polarización debido a la formación de voluminosos productos de corrosión particularmente cuando se encuentran inmersos o enterrados, esto puede contrarrestarse cubriendo el ánodo con relleno carbonáceo.

El problema de la alta resistencia a la polarización puede disminuir con un incremento del nivel de salinidad como sucede la inmersión en agua de mar donde estos ánodos son particularmente útiles.

Una ventaja de los ánodos de acero es la baja gasificación del electrodo durante la operación (la reacción predominante es la corrosión del hierro) que ejerce influencia en la resistencia a la polarización debido al bloqueo por gases que a menudo se presenta cuando se usan materiales más inertes.

5.3 ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable ha sido probado como un ánodo inerte, principalmente bajo condiciones de laboratorio dando como resultado éxitos parciales. A bajas densidades de corriente en agua fresca la mayoría de estas aleaciones sufren falla por picado, si embargo existen otras que muestran habilidad para pasivarse a bajas densidades de corriente.

5.4 HIERRO

El hierro es usado para fabricar platos galvánicos en intercambiadores de calor, particularmente para aplicaciones marinas. El hierro puede ser usado como ánodo de corriente impresa en forma similar al acero.

5.5 HIERRO CON ALTO CONTENIDO DE SILICIO

Estos ánodos presentan un desempeño similar al grafito cuando se usan con rellenos carbonáceos, pero es superior en ausencia de este último en suelos de baja resistividad.

Este tipo de ánodo permite el uso de densidades de corriente más altas en comparación con el ánodo de grafito a una tasa de consumo similar. La composición química típica de los ánodos es: 4.4% Si, 0.7% Mn, 0.95% C y el remanente de Fe.

La superficie tiene una porosidad del 50% y con un contenido de 75% de dióxido de Silicio que es un buen conductor electrónico. Cuando son enterrados tienden a aumentar la resistencia en la superficie, pero no afectan significativamente el desempeño, por lo general estos cambios en la resistencia son debidos a la polarización gaseosa (bloqueo por gases) causados por deficiente ventilación o un relleno inadecuado.

Los ánodos de hierro con alto contenido de silicio son atacados por iones halógenos causándoles picado, por tal razón se debe evitar el uso en agua de mar.

Son apropiados para agua fresca con menos de 200 ppm de iones cloruros y a temperaturas inferiores a 38°C. Además es importante señalar que la adición de molibdeno o cromo a esta aleación mejora el desempeño e ambientes que no cumplan con las condiciones anteriormente mencionadas.

La tasa de consumo depende de la densidad de corriente; experiencias en agua fresca señalan que el consumo aproximado es de 0.5 Kg/A-año.

La correcta instalación de un relleno carbonáceo y la ausencia de cloruros pueden disminuir el consumo a 0.25 Kg./A-año, pero si el ánodo es enterrado directamente en el suelo la tasa de consumo se incrementa a 1 Kg/A*año.

5.6 FUNDICIÓN DE HIERRO

La fundición de Hierro puede ser usada bajo circunstancias similares a las del acero, pero con propiedades mecánicas inferiores.

Los ánodos pueden estar protegidos con una película de grafito para disminuir la tasa de consumo (la evolución de gases ocurrirá en la superficie del grafito), sin

embargo, si la capa de grafito sufre una ligera fractura, las partículas de grafito pueden causar corrosión localizada al ánodo.

5.7 ALUMINIO

Este ánodo se ha usado extensivamente para la protección de tanques para almacenamiento de agua fresca. Las aleaciones H14 y H15 son usadas para este propósito, el Aluminio puro se prefiere para ambientes marinos.

En agua fresca los productos de corrosión (generalmente Hidróxido de Aluminio) puede causar un gran incremento de la resistencia ánodo/electrolito, esta podría duplicarse o incrementarse en mayores proporciones, originando un aumento en las densidades de corriente en algunas zonas que conlleva al consumo localizado del ánodo. En agua de mar la resistencia a la polarización es insignificante.

Teóricamente el consumo de estos ánodos está en el orden de 6.4 Kg/A-año, pero en la práctica el consumo aproximado es de 4.5 Kg/A-año, sin embargo en los diseños son utilizados factores de seguridad para garantizar la integridad del ánodo.

5.8 ZINC

En sistemas de protección catódica por corriente impresa, la tasa de consumo es de aproximadamente 10.8 Kg/ A-año, y, una eficiencia del 90% cuando son usados como ánodos de sacrificio.

5.9 PLATINO

Las propiedades del platino como electrodo inerte en diversos procesos electrolíticos son bien conocidas. Estudios realizados en Estados Unidos en 1953 indican las siguientes tasas de consumo del platino y sus aleaciones:

Pt, Pt-12Pd, Pt-5Ru, Pt-10Ru, Pt-5Rh, Pt-5Ir, Pt-10Ir oscilan entre 6 y 7mg/A-año.

5.10 TITANIO PLATINIZADO

El titanio es intrínsecamente un metal muy reactivo, presentando una fuerte tendencia a pasivarse. Cuando es expuesto a soluciones con cloruros, forma una película de TiO_2 (rutilo) que presenta una alta resistividad eléctrica, haciendo de este un ánodo inadecuado en dichos medios.

El titanio platinizado se fundamenta en el aprovechamiento del carácter inerte y conductividad eléctrica del platino, este es aplicado en delgadas capas (0.0025 mm). La ventaja de este ánodo radica en la posibilidad de utilizarse en protección catódica de superficies sumergidas y en condiciones de hasta $500 \text{ mA} / \text{cm}^2$.

Las velocidades de corrosión del platino y el titanio platinizado son descritas en la tabla 4.

Tabla 4. Velocidades de corrosión del Pt y Ti platinizado

Condición	Velocidad de corrosión (mg/A*-año)
Pt puro en agua de mar $54\text{-}540 \text{ mA} / \text{cm}^2$	6-7
Pt-Titanio en agua de mar $130 \text{ mA} / \text{cm}^2$. Temperatura $0\text{-}15^\circ\text{C}$	8.76

5.11 NIOBIO Y TANTALIO PLATINIZADO

El principio de estos ánodos es similar al del titanio platinizado. El niobio y el tantalio son metales que forman capas de óxidos dieléctricos, son más costosos que el titanio platinizado, pero a su vez, son más eficientes cuando se requiere un alto voltaje.

Algunos de estos ánodos han fallado a diferentes voltajes en diversos ambientes, tal como lo describe la tabla 3

Tabla 5. Comparación de los voltajes de falla (V)

Solución	Ti	Nb	Ta
Agua de mar	9	115	155
Sulfatos/carbonatos	60	255	280
Fosfatos/boratos	80	250	280

5.12 ÁNODOS A BASE DE PLOMO

Los principales usos de estos materiales son los ambientes marinos. Varias aleaciones de Pb han sido estudiadas en soluciones salinas arrojando los siguientes resultados: el Pb puro falla en este medio, pb + 6 a 8 Sb requiere más de 20 mA/cm² para pasivarse.

La aleación más comercial y ampliamente usada es Pb-6Sb-1Ag. La tabla 4 resume el comportamiento de estos ánodos:

Tabla 6. Desempeño del ánodo en diversos medios

Resistividad del electrolito a 35°C (Ω*cm)	Consumo promedio a 10.8 mA/cm ² (Kg/A-año)	Tiempo de prueba (días)
16.3 (mar)	0.086	236
16.3 (NaCl)	1.99	1.75
50 (mar)	0.0145	236
50(NaCl)	0.654	1.75
1000(mar)	23.80	5.75
1000(NaCl)	23.70	1.75
5000(mar)	0.10	236
5000(NaCl)	11.64	1.75

La tabla 7 presenta un resumen general de las características de los ánodos descritos anteriormente permitiendo establecer comparaciones y la posibilidad de seleccionar correctamente el ánodo para un diseño determinado [7].

Tabla 7. Características generales de los ánodos para corriente impresa.

CARACTERÍSTICAS		GRAFITO	ACERO	Fe	Fe con alto contenido de Si	Fundición de Fe	Fe-Cr con alto contenido de Si	Al
Tasa de consumo (Kg/A-Año)		0.1-1.0 B	6.8-9.1	9.5	0.25-1.0 B	4.5-6.8	0.25-1.0 B	4.5
Máx. densidad de corriente recomendada (mA/cm ²)	Agua de mar	3	L	L	----	L	12	2
	Agua fresca	0.25	L	L	12	L	12	2
	Suelo	1 A	0.5	0.5	6	0.5	6	0.25
Resistividad específica a 20°C (Ω*cm*10 ⁻⁶)		700	17	12	72	55	72	3.3
Densidad (g/cm ³)		1.56-1.67	7.7	7.82	7	7.1	7	2.7
Resistencia a la tensión aprox. (Kgf-cm ²)		280	5000	3000	1300	1500	1100	850
Dureza (aprox.)		----	130-160HB	120-170HB	450HB	140-170HB	520HB	----
Usos	Agua de mar	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO(N)
	Agua potable	SI	NO*	NO	SI	NO	NO(N)	SI
	Con relleno carbonáceo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
	Directamente en el suelo	NO(N)	NO(N)	NO(N)	SI	NO(N)	SI	NO(N)

*no aplica para aceros inoxidables (ver propiedades del acero inoxidable)

Tabla. 7. (Continuación). Características generales de los ánodos para corriente impresa.

CARACTERÍSTICAS		ZINC	PLATINO	TITANIO PLATINIZADO	NIOBIO PLATINIZADO	TANTALO PLATINIZADO	PLOMO-PLATINO	Pb-6Sb-1Ag
Tasa de consumo (Kg/A-Año)		10.8	8.63*10 ⁻⁶ B	B	B	B	0.09 B	0.09 B
Máx. densidad de corriente recomendada (mA/cm ²)	Agua de mar	2	B	H	H	H	50 E	20 E
	Agua fresca	2	B	H	H	H	----	----
	Suelo	0.25	B	B	B	B	----	----
Resistividad específica a 20°C (Ω*cm*10 ⁻⁶)		6.2	9.85	48.2	15.2	12.5	22 F	25 F
Densidad (g/cm ³)		7.1	21.45	4.51	8.57	16.6	11.3	10.9
Resistencia a la tensión aprox. (Kgf-cm ²)		----	2500 K	4700-6300	2400-3900	3500-12600	250	300
Dureza (aprox.)		-----	200-400HV J	----	75-95 HV	80-100 HV	4HB	10.7-13HB
Usos	Agua de mar	SI	NO(N)	SI	SI	SI	SI	SI
	Agua potable	NO	NO(N)	SI	NO(N)	NO(N)	NO	NO
	Con relleno carbonáceo	NO	NO(N)	NO(N)	NO(N)	NO(N)	NO	NO
	Directamente en el suelo	NO(N)	NO(N)	NO(N)	NO(N)	NO(N)	NO	NO

A-Usado con relleno carbonáceo, ver características generales. **E**-mínima densidad de corriente para pasivación 5mA /cm²

B-Ver características generales de los ánodos.

C-normal máxima en dirección longitudinal.

F-Resistividad del PbO₂ 40-50 Ω*c

J-Electrodepositado

H-40 mA / cm² por micrómetro de Pt

N-Usado en circunstancias especiales

L-No limitada para aguas en movimiento.

Fuente: SHREIR, L. L., Corrosion V 2. Corrosion Control. Newnes – Butterworths. London.

6. CRITERIOS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

Aunque en protección catódica se hable de una corriente de protección requerida para lograrla, el único parámetro que asegura su protección es el de potencial de la estructura en todas sus partes. Las razones por las cuales se considera a la corriente como un indicador de protección no muy confiable son esencialmente materias de discusión.

Los valores de potencial recomendados son del tipo de material a proteger. Se ha establecido que para el hierro y acero enterrados, el potencial debe ser de $-0,850$ VDC relativos al electrodo Cu/CuSO_4 o $-0,800$ VDC con respecto al electrodo Ag/AgCl , si el electrolito es agua de mar. En suelos anaeróbicos o aguas que contienen bacteria sulfatos reductoras se recomienda para el acero $-0,950$ VDC con respecto al electrodo Cu/CuSO_4 por la posibilidad de protección bacteriana.

También es aceptado el criterio de un negativo cambio de potencial de 300 mV con respecto al potencial de corrosión natural de la estructura, bajo condiciones aeróbicas, incrementándose en 100 mV más negativos para condiciones anaeróbicas.

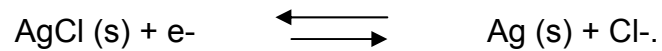
Otro criterio aceptado, es el una mínima polarización negativa de 100 mV con respecto al potencial natural o libre, medidos inmediatamente después de desconectar la protección (instant off) y de 150 mV, para condiciones anaeróbicas.

Para los ensayos en laboratorio se utilizó como electrodo de referencia el de Ag/AgCl y a continuación se hará una breve descripción [8]

6.1 ELECTRODO Ag/AgCl

Consiste de un alambre de plata cubierto con AgCl sumergido en una solución que contiene iones cloruros Cl⁻.

La reacción de equilibrio es:



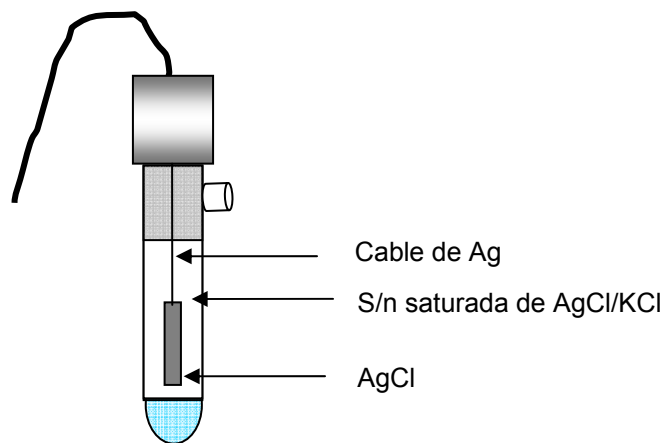
A 25 C se tiene:

$$E_{\text{eq}} = 0,222 - 0,0591 \log [a] \text{Cl}^-$$

Donde [a] es la actividad de la especie

En una solución 1 M de KCl el potencial del electrodo es 0,222 Voltios.

Figura .4. Descripción del electrodo Ag/AgCl.



7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para lograr los objetivos propuestos se desarrollaron las actividades que se describen a continuación:

7.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CAJA PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES

La resistividad de un material es una propiedad de tipo eléctrico, y guarda una relación directa con la resistencia que presenta dicho medio al paso de cargas iónicas y eléctricas que en su defecto, depende de las propiedades y los elementos característicos de cada material, tales como sulfatos, sales, contenido de humedad, compactación, entre otros.

La medición de la resistividad de un electrolito desempeña un papel muy importante en el diseño y construcción de un sistema de protección catódica. Para la evaluación de rellenos de coque a nivel de laboratorio, la medición de la resistividad es un parámetro que debe evaluarse con el objeto de analizar las propiedades conductoras del relleno, y la resistividad del electrolito a emplearse, por tal razón, la construcción de una caja de medición de resistividades se convierte en una actividad indispensable para dichos propósitos

Para realizar la medición de resistividad de diferentes tipos de muestras se requiere contar con los siguientes equipos y elementos:

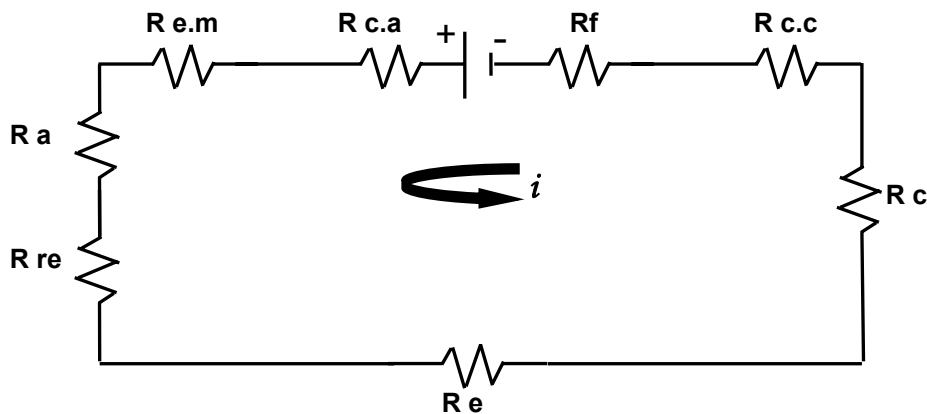
- Equipo medidor de resistencia eléctrica
- Caja de resistividades.
- Cables de conexionado.

Los parámetros de diseño, construcción y procedimiento de operación son contemplados en el anexo A.

7.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA PARA LA EVALUACIÓN DE COQUES EN LABORATORIO

Un sistema de protección catódica por corriente impresa se asume como un circuito eléctrico, que consta de los siguientes elementos: Cátodo, cama anódica, electrolito, conductor metálico y una fuente de tensión (Figura 5). Con el fin de realizar ensayos acelerados en laboratorio para evaluar el desempeño de los rellenos de coque mediante la medición de su resistencia eléctrica con respecto al tiempo, se propone el diseño y selección a escala de cada uno de estos elementos.

Figura 5. Circuito eléctrico del sistema de protección catódica por corriente impresa.



Del circuito eléctrico mostrado en la Figura 5, se tiene:

Rf : Resistencia de la fuente.
Rcc : Resistencia del cable del cátodo.
Rc : Resistencia del cátodo.
Re : Resistencia del electrolito.
Rre Resistencia del relleno.
Ra : Resistencia del ánodo.
Rem : Resistencia del equipo de medición.
Rca : Resistencia del cable del ánodo.

De acuerdo a la Ley de Ohm,

$$V = I_p \times R_t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V: Tensión de salida de la fuente.
Ip: Corriente de protección.
Rt: Resistencia total del sistema de protección catódica.

La resistencia total es la suma de cada una de las resistencias de los elementos en serie que componen el circuito del sistema de protección catódica, tal como lo señala la ecuación 2

$$R_t = R_f + R_{cc} + R_c + R_e + R_{re} + R_a + R_{em} + R_{ca} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La anterior expresión puede simplificarse, de la siguiente manera:

$$R_t = R_c + R_{em} + R_{ca} + R_{cama} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde se tiene que:

Rc: Resistencia de las longitudes totales de los cables

Rem: Resistencia del equipo de medición

Rca: Resistencia del cátodo

Rcama: Resistencia de la cama anódica

Luego, conociendo la resistencia total del circuito se puede calcular la resistencia de la cama anódica a partir de la ecuación 3, de la siguiente manera:

$$R_{cama} = R_t - (R_c + R_{em} + R_{ca}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Lo anterior se fundamenta teniendo en cuenta la expresión propuesta por Dwight (ecuación 5), en la cual se relaciona la resistividad del suelo en la interfase de la cama anódica y se asume el ánodo y el relleno como un sólo elemento al que se denomina cama anódica. También se debe señalar que la resistencia de la fuente de corriente representa un aporte numéricamente pequeño, por tal razón se consideró despreciable en comparación con las demás resistencias que constituyen el circuito.

$$R_v = \frac{0,159 \times \rho}{L} \left[L \ln \frac{8L}{D} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

Rv: Resistencia de la cama anódica en posición vertical (Ω).

L: Longitud total de la cama anódica (cm).

D: Diámetro total de la cama anódica (cm).

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$).

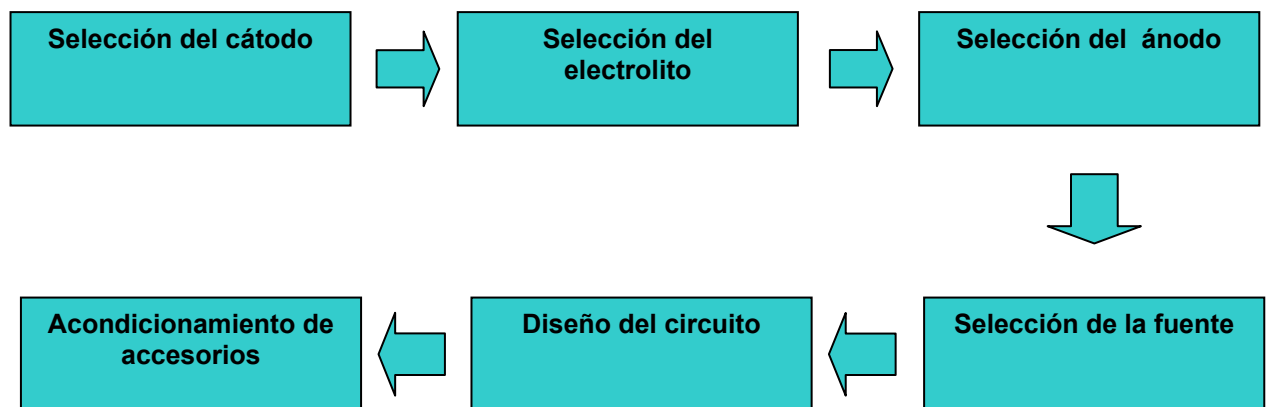
Al analizar la expresión anterior se encuentra que la resistencia de la cama anódica depende de la geometría del ánodo y del relleno

Cuando la cama anódica esta en operación, tenderá a sufrir variaciones por diversos factores como la densidad de corriente drenada, la naturaleza del electrolito, entre otras, que generaran diferentes reacciones en el relleno, que influirán en un posible incremento de la resistencia eléctrica, afectando de esta manera el sistema de protección.

Al paso de la corriente de protección se oponen diversas resistencias dadas en la ecuación 3. En los ensayos a realizar en laboratorio, las resistencias del cátodo, cables, equipos de medición, electrolito y el ánodo permanecerán constantes, permitiendo de esta manera conocer la resistencia de la cama anódica de acuerdo a la ecuación 4

7.2.1 Metodología para el diseño de la celda de ensayos en laboratorio

Para el diseño de la celda de ensayos acelerados se siguió la siguiente metodología:



a. Selección del cátodo

Para la selección del cátodo fueron consideradas los siguientes factores:

- **Material**

Cómo material catódico fue seleccionado un segmento de tubería de acero API 5LX-56, [9] teniendo en cuenta que es uno de los materiales empleados para la construcción de líneas de transporte de gas e hidrocarburos.

Las características generales de dicho material son descritas en la tabla 8

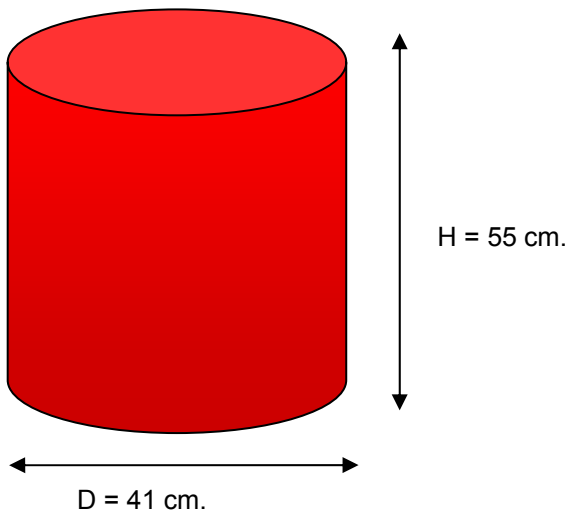
Tabla 8 Características del cátodo

Característica		Valor mínimo	Valor máximo
Composición química	Carbono		0.26%
	Manganeso		1.35%
	Fósforo		0.030%
	Azufre		0.030%
Propiedades mecánicas			
Esfuerzo de fluencia		56000 PSI 386MPa	
Resistencia última a la tracción		71000 PSI 489MPa	

- **Dimensiones**

Para realizar las pruebas simuladas de sistemas de protección catódica por corriente impresa a nivel de laboratorio, se asume un área de superficie a proteger aproximadamente de 0,8 m², las dimensiones de la celda metálica se especifican en la figura. 6.

Figura 6 Dimensiones de la celda metálica para ensayo acelerado.



○ **Construcción del recipiente**

El recipiente cilíndrico fue construido soldando en uno de los extremos una lámina de acero de igual composición a la del tubo. La parte interior del cilindro que se encuentra expuesta al electrolito fue sometida a un proceso de Sandblasting con el objetivo de eliminar las capas de óxido presentes y cualquier impureza superficial, la parte exterior del recipiente cilíndrico fue recubierta con imprimante Epóxico Rojo.

La conexión eléctrica se realizó aplicando soldadura Cadweld entre el recipiente y un cable 14AWG de 3.7 m de longitud.

Para facilitar el manejo del recipiente fueron soldadas 2 argollas metálicas en la parte superior.

Selección del electrolito

En un sistema de protección catódica, el electrolito se constituye en un parámetro fundamental debido a la influencia de factores intrínsecos como la resistividad, pH, contenido de humedad, entre otros.

En la práctica se encuentran diversas soluciones acuosas que difieren en su conductividad y por lo tanto al exponer un metal a dichos medios tendrán una velocidad de corrosión característica, que implican requerimientos de corriente para protección catódica diferentes para cada medio.

Además, por la naturaleza de este ensayo, es indispensable que el electrolito conserve sus propiedades durante el periodo de prueba, con el objetivo de garantizar un seguimiento al cambio de la resistencia de la cama anódica en función del tiempo.

Para cumplir con este alcance, se plantea la utilización de una solución acuosa que permita simular algunos ambientes encontrados en la práctica donde los valores de resistividad pueden hallarse en el orden de 10 a 1000000 $\Omega \cdot \text{cm}$, y, además que sea de fácil obtención y manejo. A nivel de laboratorio es apropiado emplear electrolitos con valores de resistividad bajos e intermedios debido a la facilidad de alcanzar los voltajes requeridos para protección catódica.

En este orden de ideas se encontró que el agua potable cumple con las condiciones mencionadas anteriormente y puede emplearse para este propósito.

Para analizar detalladamente el agua potable que se utilizó como electrolito en este ensayo se presenta en la tabla 9 una caracterización de sus propiedades físicas y químicas de la misma.

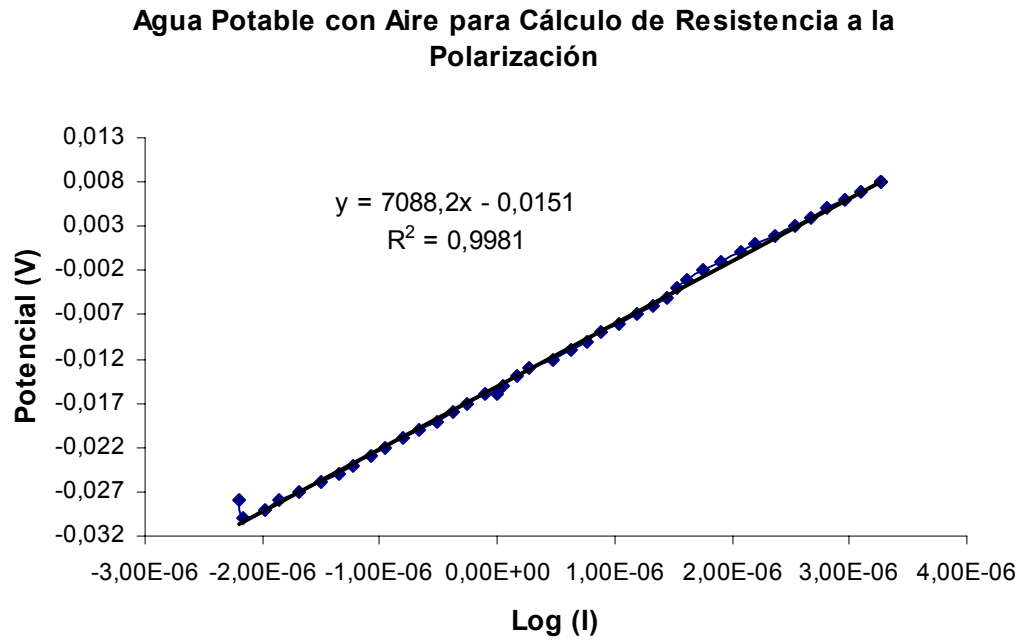
Tabla 9. Características del agua potable de Piedecuesta

RESULTADOS			
PARÁMETRO	VALOR	VALOR ADMISIBLE (Decreto 1594 de 1984)	UNIDADES
PH	7	6.5-9	
TEMPERATURA	25.3	-	°C
TURBIEDAD	0	≤5	FTU
ALCALINIDAD TOTAL	46.62	100	mg/L de CaCO ₃
DUREZA TOTAL	43	160	mg/L de CaCO ₃
CLOURS	33.996	250	mg/L de Cl ⁻
SÓLIDOS TOTALES	72	≤500	mg/L

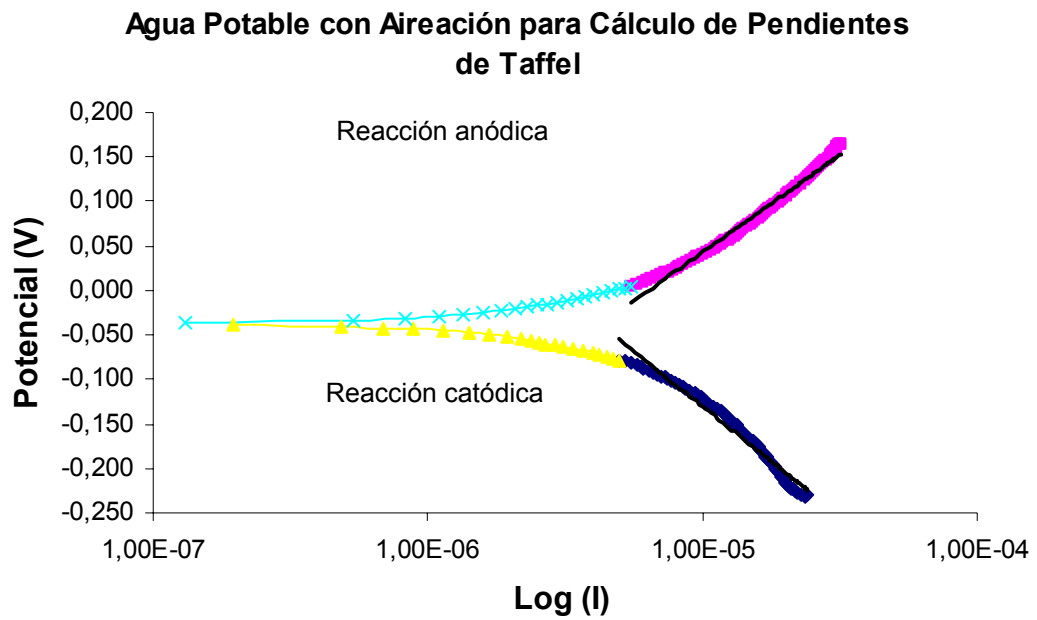
Para conocer las características corrosivas del electrolito seleccionado sobre la estructura a proteger), se efectuó el cálculo de la densidad de corriente de corrosión empleando un analizador de impedancias marca ZANHER con software de referencia THALES.

En las Gráfica 1 y Gráfica 2 se ilustran las curvas de polarización para cálculo de Resistencia a la polarización R_p y las pendientes Taffel (β_a y β_c) respectivamente.

Gráfica 1. Resistencia a la polarización



Gráfica 2. Pendientes Taffel



A partir de estas gráficas, se encontraron los siguientes valores para las pendientes Taffel para las reacciones anódicas y catódicas:

$$\beta_a = 245 \text{ mV/dec.}$$

$$\beta_c = 225 \text{ mV/dec.}$$

$$R_p = 7.088 \text{ K}\Omega$$

Luego, empleando la ecuación 6: se calcula el I_{corr} :

$$I_{corr} = \frac{\beta_a * \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c) * R_p} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

β_a = pendiente Taffel anódica (mV/dec)

β_c = pendiente Taffel catódica (mV/dec)

R_p = resistencia a la polarización (K Ω)

I_{corr} = densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Reemplazando con los valores obtenidos de las gráficas tenemos:

$$I_{corr} = \frac{245 * 225}{2.3(245 + 225) * 7.088}$$

$$I_{corr} = 7.19 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 71.9 \text{ mA}/\text{m}^2$$

Este resultado es de gran importancia al momento de calcular los requerimientos de corriente en protección catódica.

Se debe tener en cuenta que la selección del electrolito es un parámetro que se fija en el proceso de diseño y construcción de la celda, y algunos, de los otros parámetros de la celda, estarán en función de dicho medio; además, la celda posibilita el empleo de otros electrolitos, que cumplan condiciones cercanas a las establecidas en el presente diseño.

Selección del ánodo

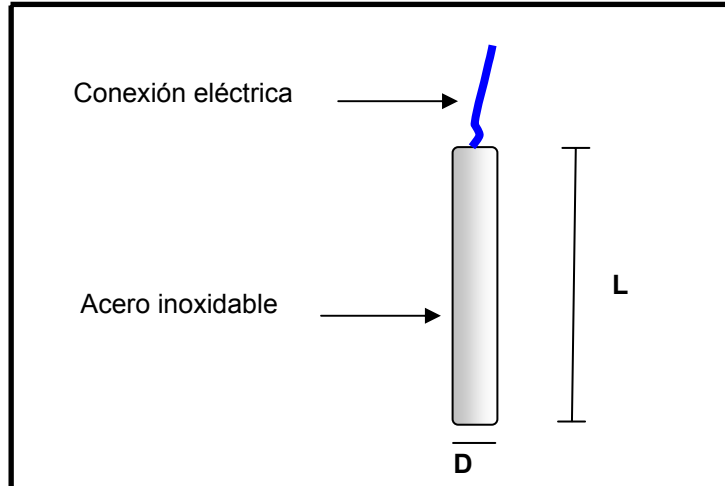
Al analizar las características descritas anteriormente se encuentra que existen variables que deben estudiarse cuidadosamente al momento de definir el ánodo, uno de los factores mas importantes es el electrolito al cual será expuesto, para el caso particular del agua potable se encontró que los ánodos de grafito, hierro con alto contenido de Silicio, Aluminio y Titanio platinizado pueden emplearse en este medio, la diferencia radica en la tasa de consumo propia de cada ánodo.

Debido a los requerimientos de trabajo de la celda, entre los cuales se debe garantizar que el cambio en la resistencia en la cama anódica sea debido exclusivamente al desempeño del coque, es necesario seleccionar un ánodo inerte. A nivel de laboratorio el acero inoxidable puede emplearse y se convierte en el ánodo de trabajo.

a. Forma y dimensiones del ánodo:

El ánodo de acero inoxidable es una barra de sección circular, provista de una conexión eléctrica, empleando para ello, cable encauchetado 18 AWG y las dimensiones se establecen según los cálculos del sistema de protección a evaluar. (Ver figura 7)

Figura 7. Forma del ánodo de acero inoxidable.



Selección de la fuente

Un sistema de protección catódica por corriente impresa se caracteriza por el requerimiento de una fuente de corriente directa que suministra la tensión necesaria para proteger la estructura.

A nivel de laboratorio es conveniente la utilización de una fuente que permita ajustar el voltaje de salida requerido. Para la celda en estudio se empleará una fuente de voltaje variable con una capacidad máxima de salida de 25 VDC y una corriente de salida de 5 A. (Ver fotografía 1).

Fotografía 1. Fuente de tensión 25 VDC 5 A.



Diseño del circuito

Basados en la Ley de Ohm, que establece la relación $V = (I) \cdot (R)$, se calcula el valor de la resistencia (R).

Al fijar una tensión de salida (V) y conectar un amperímetro en serie se puede medir la corriente del circuito. El circuito se esquematiza en la figuras 8 y 9.

Figura 8. Circuito de la celda de ensayo acelerado sin medición de la corriente de protección y sistema de medición de potencial estructura/electrolito.

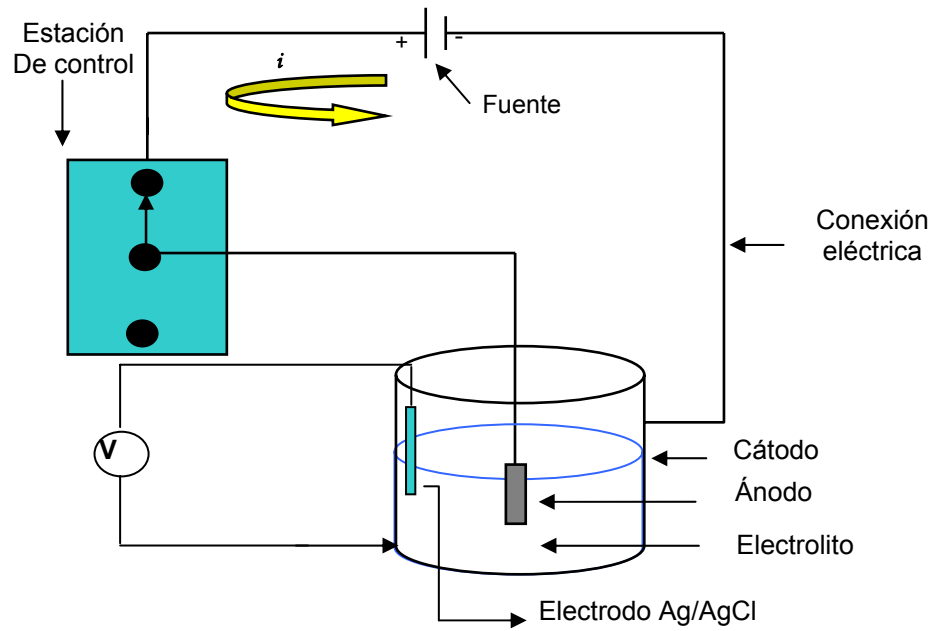
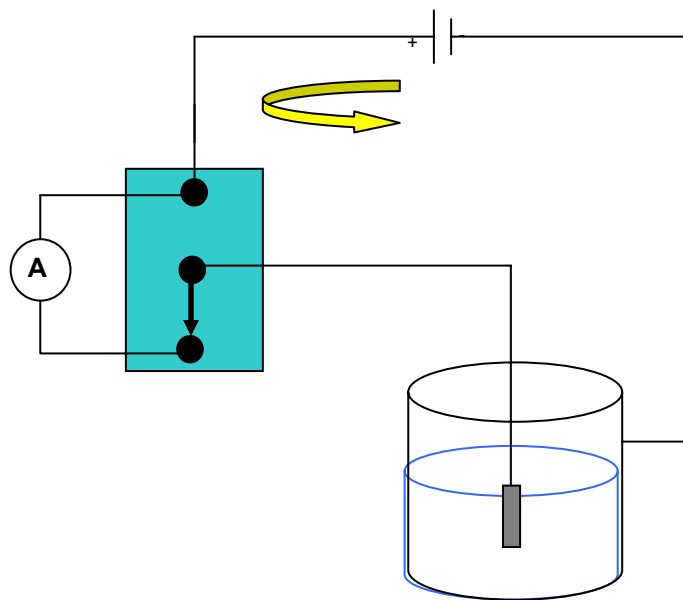


Figura 9. Circuito de la celda de ensayos en laboratorio con medición de la corriente del circuito.



El monitoreo de la corriente permite graficar la tendencia de la resistencia del relleno en función del tiempo, manteniendo una tensión aplicada constante (V).

Adecuación de accesorios

El oxígeno es un agente catalizador de la velocidad de las reacciones catódicas en un sistema de protección catódica. Por tal razón hay que garantizar una saturación de oxígeno en la celda, la cual, se suministra a través de un sistema de aireación constante.

Para mantener las condiciones de aireación establecidas en el diseño, se implementó una red de aire que garantiza un flujo constante que se distribuye dentro de la celda por medio de una manguera provista de agujeros equidistantes, controlado mediante un regulador ubicado en la entrada de aire.

En la figura 8 se establece el sistema de medición de potencial estructura/electrolito, empleando para ello un voltímetro digital de alta impedancia y un electrodo de referencia Ag/AgCl marca METROHM. Para establecer el criterio de protección se debe fijar el potencial estructura/electrolito en no menos de $-0,85$ VDC con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl.

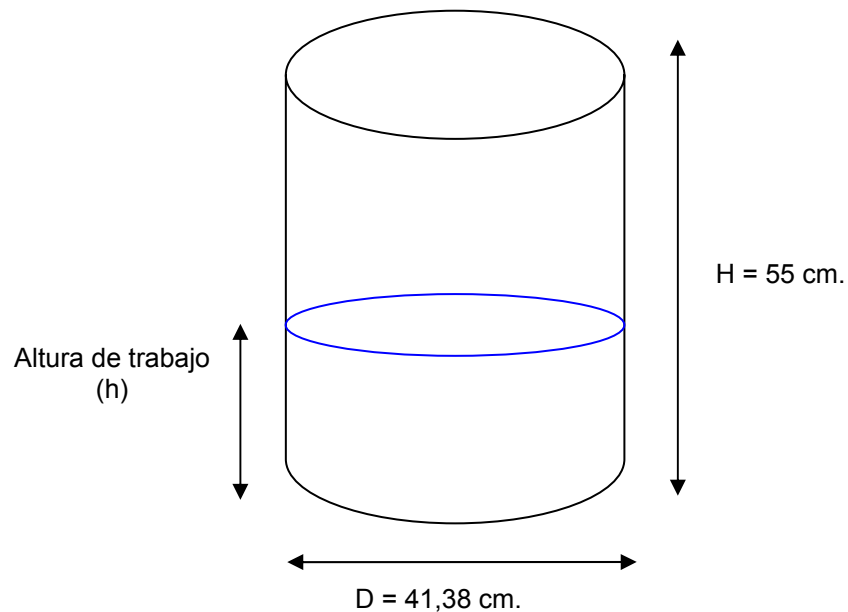
Las principales características de las partes constitutivas de la celda de ensayos a nivel de laboratorio se ilustran en el anexo B.

7.3 MONTAJE DE LOS COQUES EN LA CELDA DE ENSAYOS EN LABORATORIO

Para evaluar el desempeño del coque se diseñó un sistema de protección catódica para la estructura que se ilustra en la figura 10 y que corresponde al cátodo de la celda construida para tal objetivo.

La principal característica geométrica de esta estructura es que permite variar el nivel de electrolito hasta una determinada altura de trabajo (h) y por consiguiente permite seleccionar un área en particular. El cátodo de estudio corresponde a un segmento de tubería, tal como se ilustra en la figura 10

Figura 10. estructura a proteger



Los datos que se tuvieron en cuenta para el diseño se describen en la tabla 10.

Tabla 10. Características de los parámetros de diseño

Característica	Valor
Altura de trabajo	0.18 m
Diámetro de la tubería	0.4168 m
Área total	0.368 m ²
Eficiencia del recubrimiento	0% (acero desnudo)
% Total del Área a proteger	100%
Resistividad del electrolito (agua potable)	9300 Ω *cm.
<i>i</i> corrosión	66.56 mA/m ²¹
Densidad de corriente (J)	200 mA/m ²²
Corriente necesaria	73.6 mA
Resistencia de la cama anódica	196.891 Ω
Resistencia de los cables de conexión	0.0631 Ω
Resistencia del cátodo	8.316*10 ⁻⁶ Ω
Resistencia del amperímetro	0.075 Ω
Resistencia total del circuito	197 Ω
Voltaje requerido para protección catódica	16.5 V
Cantidad de ánodos de acero inoxidable	1 en posición vertical
Tasa de consumo del ánodo de acero inoxidable	1 Kg. / A*año
Eficiencia	80 %

¹resultado obtenido mediante el cálculo de las pendientes Tafel y Resistencia a la polarización

²valor asumido para protección de la estructura teniendo en cuenta el *i corr.*

7.3.1 Cálculo de los parámetros de diseño

a) Resistividad del electrolito

La medición de la resistividad del electrolito se realizó empleando la caja para medición de resistividades construida en la primera fase del proyecto, donde se siguen los lineamientos establecidos en la norma ASTM G-57 “ Field Measurements of soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method”.

Este ensayo es uno de los más utilizados para evaluar rápidamente la agresividad por corrosión de un determinado electrolito. La resistividad del electrolito es una propiedad de tipo eléctrico, y, guarda una relación directa con la resistencia que presenta el medio al paso de cargas iónicas y eléctricas.

Al efectuar mediciones en diferentes tiempos se encontró que el valor de la resistividad para el agua potable es 9300 Ω *cm.

b) Área a Proteger

El área a proteger está constituida por una sección de tubería y una tapa circular metálica para el fondo del recipiente. Luego, el área total se calcula de acuerdo a la ecuación 1.

$$\hat{A}_{total} = \pi r^2 + 2\pi r h \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde:

r: radio del segmento de tubería

h: altura de trabajo

Al sustituir los respectivos valores del radio y la altura de trabajo descritos en la tabla 10 se tiene que:

$$\dot{A}_{\text{total}} = \pi(0.2069)^2 + 2\pi(0.2069)(0.18)$$

$$\dot{A}_{\text{total}} = 0.36848 \text{ m}^2$$

c) Corriente de protección DC necesaria (I)

La corriente requerida se calcula empleando la ecuación 2:

$$I = (J) \cdot (A) \text{ (ecuación 8)}$$

Donde:

J: densidad de corriente

A: área total a proteger

Luego, al sustituir los respectivos valores descritos en la tabla 1 se tiene:

$$I = (200 \text{ mA/m}^2) \cdot 0.36848 \text{ m}^2$$

$$I = 73.6 \text{ mA} = 0.0736 \text{ A}$$

d) Resistencia total del circuito.

La resistencia total es la suma de cada una de las resistencias de los elementos en serie que componen el circuito del sistema de protección catódica, tal como se señaló en la ecuación 2:

Al analizar dicha expresión se aprecia que la resistencia de la cama anódica depende de la geometría del ánodo y del relleno. La cama anódica para este ensayo se instalará en posición vertical como lo ilustra la figura 11.

Teniendo en cuenta que la cama anódica se encuentra inmersa en un medio acuoso, se construyó una bolsa de tela de forma cilíndrica con el objetivo de conservar la integridad del relleno y definir la geometría de la cama anódica. Para la instalación mostrada en la figura 11, la tabla 11 describe las características más importantes de la cama anódica empleada en el ensayo.

Figura 11 .Disposición y características de la cama anódica.

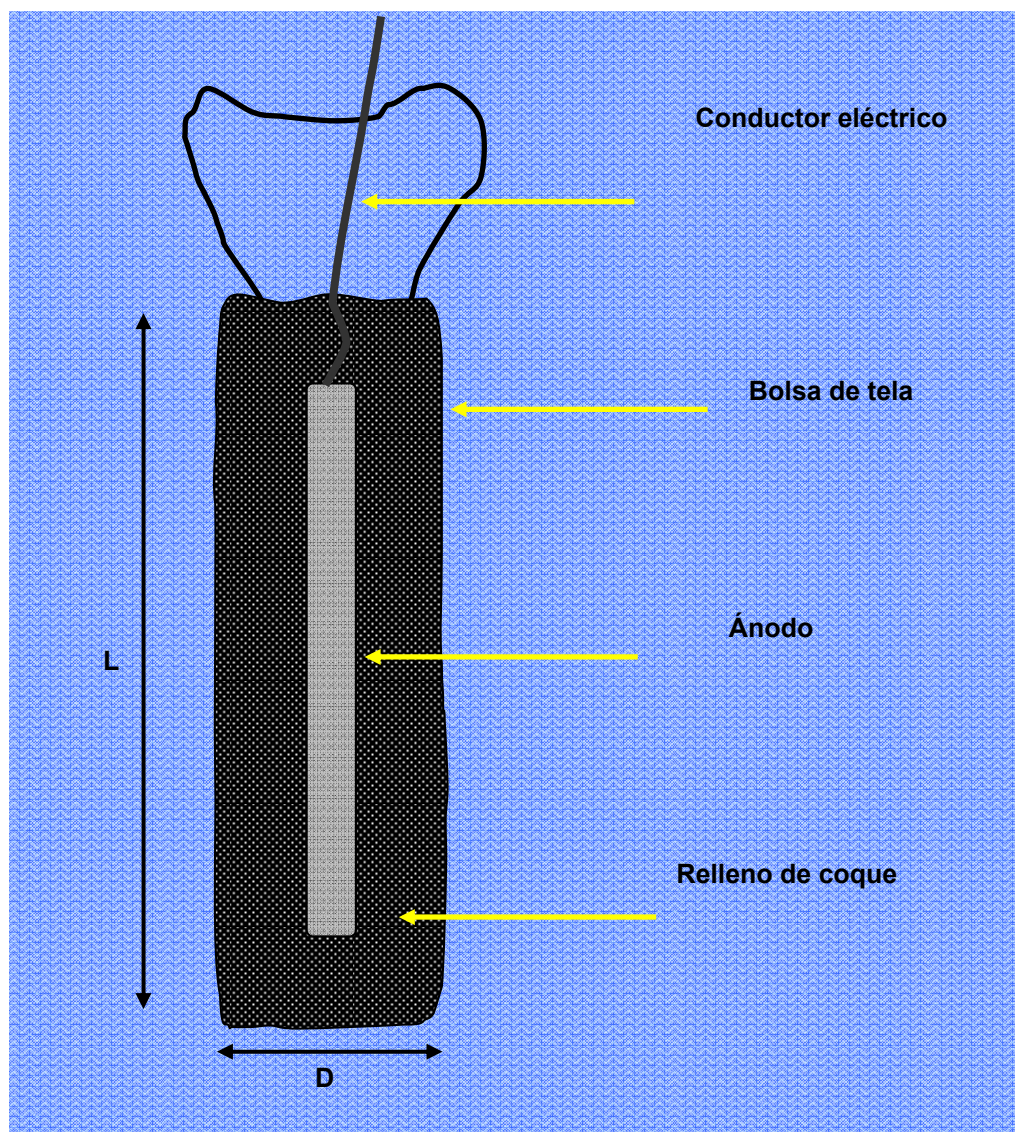


Tabla 11. Características de la cama anódica

característica	Valor
Longitud del ánodo	5 cm.
Diámetro del ánodo	2 cm.
Peso del ánodo (acero inoxidable)	300 g.
Longitud total de la cama anódica (L)	8 cm.
Diámetro total de la cama anódica (D)	9 cm.

Con la información suministrada anteriormente los valores de cada una de las resistencias que constituyen el circuito, se tiene que:

○ **Resistencia de la cama anódica**

$$\bullet R_{\text{cama anódica}} = \frac{0,159 \times \rho}{L} \left[\ln \frac{8L}{D} - 1 \right]$$

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0,159 \times 9300}{9} \left[\ln \frac{8(9)}{8} - 1 \right]$$

$$R_{\text{cama anódica}} = 196.8956831\Omega$$

○ **Resistencia del cátodo**

La resistencia del cátodo se calcula teniendo en cuenta la resistencia del material de la tubería, este valor se encuentra tabulado en tablas y está en función diámetro y el espesor de la pared del tubo

La resistencia del cátodo se calcula mediante la ecuación 9

- $R_{\text{cátodo}} = (R_{\text{tubería}}) * (L)$ (ecuación 9)

Donde:

$R_{\text{tubería}}$ = Resistencia de la tubería

L = longitud del tubo

El cátodo empleado corresponde a un segmento de tubería de 16 pulgadas de diámetro y un espesor de pared de 0.375 pulgadas que posee una resistencia de $15.12 \mu\Omega/\text{m}$ y una longitud de 0.55 m, luego se tiene que:

$$R_{\text{cátodo}} = (15.12) * (0.55)$$

$$R_{\text{cátodo}} = 8.316 * 10^{-6} \Omega$$

○ Resistencia de los cables

Para el circuito eléctrico se emplearon cables 14 AWG con una longitud total de 7.62 m.

Para conocer la resistencia de los cables se emplea la siguiente expresión emplean los valores de resistencia eléctrica para el tipo de cables empleados (tabla 12) y la longitud total de los cables que constituyen el circuito, tal como lo señala la ecuación 10

$$R_{\text{cables}} = (\text{Longitud del cable}) * (\text{resistencia lineal del cable}) \quad (\text{ecuación 10})$$

Tabla 12. Resistencia eléctrica para los cables según la AWG

AWG	Diámetro (pulgadas)	Diámetro (mm)	Ω/ Km.
0000	0.46	11.684	0.16072
000	0.4096	10.40384	0.202704
00	0.3648	9.26592	0.255512
0	0.3249	8.25246	0.322424
1	0.2893	7.34822	0.406392
2	0.2576	6.54304	0.512664
3	0.2294	5.82676	0.64616
4	0.2043	5.18922	0.81508
5	0.1819	4.62026	1.027624
6	0.162	4.1148	1.295928
7	0.1443	3.66522	1.634096
8	0.1285	3.2639	2.060496
9	0.1144	2.90576	2.598088
10	0.1019	2.58826	3.276392
11	0.0907	2.30378	4.1328
12	0.0808	2.05232	5.20864
13	0.072	1.8288	6.56984
14	0.0641	1.62814	8.282

Luego al sustituir estos valores se tiene que:

$$R_{\text{cables}} = (8.282 \Omega/\text{Km.}) * (7.62 * 10^{-3} \text{Km})$$

$$R_{\text{cables}} = 0.0631 \Omega$$

- **Resistencia de la fuente**

La fuente de corriente continua posee una resistencia eléctrica de valores extremadamente pequeños, por tal razón puede considerarse despreciable en comparación con las demás resistencias señaladas

- **Resistencia del equipo de medición**

Para la monitorear la corriente total del circuito, se empleó un multímetro digital Hewlett Packard 34401, que posee una resistencia de 0.075 Ω

Para el cálculo de la resistencia total del circuito se tiene en cuenta la ecuación 3, tal como se describe a continuación:

$$R_t = R_c + R_{em} + R_{ca} + R_{cama}$$

$$R_t = 0.0631 + 0.075 + 8.316 * 10^{-6} + 196.895$$

$$R_t = 197 \Omega$$

e) Voltaje requerido

El voltaje total requerido se calcula utilizando la ley de Ohm, más la adición de 2 voltios de tensión contra – electromotriz, tal como lo describe la ecuación 11:

$$V = (I_{\text{Req.}}) * (R_T) + 2 \text{ (ecuación 11)}$$

Donde

V = Voltaje

I_{Req} = Corriente requerida

R_T = Resistencia total del Circuito

Al sustituir los anteriores valores (ver tabla 10) se encuentra que el voltaje requerido es.

$$V = (0.0736) * (197) + 2$$

$$V = 16.5 \text{ v}$$

El voltaje anteriormente calculado fue sobredimensionado hasta un valor de 25 V teniendo en cuenta la naturaleza acelerada del ensayo, garantizando de esta manera una mayor exigencia a la cama anódica.

7.3.2 Especificaciones del ánodo de acero inoxidable empleado en el diseño

Teniendo en cuenta la forma cilíndrica de la estructura a proteger, se analizó la influencia del diámetro del ánodo en el proceso de polarización de las paredes del recipiente; para tal efecto se seleccionaron 2 ánodos con diámetros de 1cm. y 2 cm. y una longitud constante de 5 cm.

Los anteriores ánodos se colocaron en operación en la celda de ensayos de laboratorio en ausencia de relleno. El voltaje de salida de la fuente se llevó al valor máximo entregado por la fuente (25 V). Bajo las condiciones señaladas anteriormente se encontró que con diámetro de 1 cm. la estructura no logró el voltaje de protección requerido, el potencial obtenido fue de -0.80 V con respecto al electrodo Ag/AgCl.

Al emplear el ánodo de 2 cm. de diámetro se logró un grado de polarización satisfactorio, el potencial de estructura registrado fue de -0.85 V con respecto al electrodo Ag/AgCl. De acuerdo a la anterior se seleccionó un ánodo de forma cilíndrica de 2 cm. de diámetro y 5 cm. de longitud, conectado a un alambre conductor con núcleo de cobre. El peso del ánodo es de 300 gr.

7.3.3 Tipos de rellenos empleados

El ensayo está orientado a establecer comparaciones del desempeño de la cama anódica empleando 2 tipos diferentes de rellenos: un coque comercial importado marca Loresco de referencia SC3, y un coque nacional proveniente del departamento de Boyacá.

a) Coque Loresco SC3

El coque Loresco es un producto calcinado del petróleo. Las propiedades más importantes de este relleno se resumen en la tabla 13

Tabla 13. Propiedades del coque Loresco SC3

PROPIEDAD	VALOR
Carbono fijo	99.35% min.
Cenizas	0.6% máx.
Humedad	0.05%
Volátiles	0% (950°C)
Densidad Aparente	1.18 g/cm ³
Granulometría (partículas esféricas)	< 1 mm.
Resistividad(Ω *cm)	23

b) Coque Colombiano

El coque colombiano es producido por la empresa Colcarbón, dedicada a la producción y comercialización de coque para la exportación., La planta seleccionada para recolectar la muestra de coque está ubicada en la vereda de Salamanca, municipio de Samacá.

El proceso de muestreo, recolección, molienda y caracterización de la muestra fue realizado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Las propiedades más importantes del Coque Colombiano son descritas en la tabla 14

Tabla 14. Propiedades del coque Colombiano

PROPIEDAD	VALOR
Carbono fijo	81.61%
Cenizas	14.04%
Humedad	1.08%
Volátiles	3.27%
Densidad Aparente	0.95 gr/cm ³
Granulometría	< 3 mm.
Resistividad(Ω *cm)	49

7.3.4 Especificaciones y consideraciones generales del ensayo

Para establecer comparaciones de una manera más precisa, se construyeron 2 celdas con las mismas características y bajo las mismas condiciones de trabajo.

Para evaluar el coque Loresco se construyó una celda denominada celda 1 y para el coque colombiano una celda denominada celda 2. Es importante señalar que la única diferencia radica en la masa de coque a evaluar: el coque Loresco al tener

una mayor densidad (1.18 g/cm^3) en comparación con el coque colombiano (0.95 g/cm^3), lo cual se refleja en la diferencia de masas para cada cama anódica.

Las cantidades de muestra a evaluar se describen en la tabla 15

Tabla 15. Peso de las muestras de coque a evaluar

Tipo de coque	Peso (g)
Coque Loresco	380
Coque colombiano	283

7.3.5 Procedimiento de pruebas y puesta en marcha

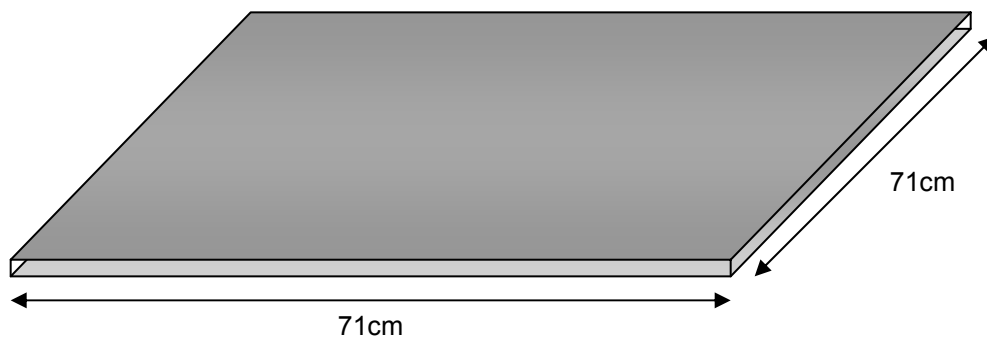
Una vez instalado el sistema de protección, se registraron los valores de la corriente del circuito y posteriormente se calculará la resistencia total del circuito, además, la fuente de corriente se colocó en operación y se registraron los monitoreos del potencial de la estructura verificando que se encontrara en un valor mínimo de $-0,85 \text{ V}$ con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl

7.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÒDICA POR CORRIENTE IMPRESA A NIVEL DE LABORATORIO EN CAMPO

Para evaluar el desempeño de una cama anódica se diseñó un sistema de protección catódica por corriente impresa para una estructura metálica empleando como relleno coque Loresco SC3.

Se empleó una lámina de acero naval ASTM 131 Grado A Las dimensiones de la estructura metálica con señaladas en la figura 12.

Figura 12. Dimensiones de la estructura a proteger



Los datos que tenidos en cuenta para el diseño se describen en la tabla 16.

Tabla 16. Características de los parámetros de diseño

Característica	valor
Área total a proteger	1,0082 m ²
Eficiencia del recubrimiento	0% (acero desnudo)
% Total del Área a proteger	100%
Resistividad del suelo	3000 Ω *cm
Corriente requerida	0.10
Resistencia de la cama anódica	38.115Ω
Resistencia de los cables de conexión	0.2636Ω
Resistencia del cátodo	36.5*10 ⁻⁶ Ω
Resistencia del amperímetro	0.075
Resistencia total del circuito	38.45 Ω
Voltaje requerido	3.845 V
Número de ánodos	1 en posición vertical
Tasa de consumo del ánodo de Hierro con alto Silicio	0.25Kg. / A*año
Eficiencia	80 %

7.4.1 Cálculo de los parámetros de diseño

a) Resistividad.

La medición de la resistividad del suelo se realizó empleando el método de los cuatros pines siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM G-57[13] “Field Measurements of soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method”.

Este ensayo representa universalmente uno de los indicadores más representativos para establecer la capacidad que tiene el suelo de facilitar la existencia de un proceso corrosivo con la estructura con la cual interactúa.

La resistividad del suelo es una propiedad física de carácter eléctrico que es función directa de la resistencia que presenta al paso de cargas eléctricas e iónicas y depende esencialmente de los elementos que la constituyen, tales como sales y sulfatos. De igual manera, la resistividad del suelo es afectada por el contenido de humedad, la capacidad de retención de agua o higroscopía, el grado de compactación , la temperatura y la presencia de material inerte (grava, rocas, entre otras).

Para calcular la resistividad del suelo, se parte de la medición de su resistencia eléctrica, la cual para este caso particular, fue realizada mediante el método de los cuatro pines y el equipo Nilsson Modelo 400. La figura 13 ilustra el montaje de la técnica y el equipo empleado.

Por otra parte, el valor de la resistividad del suelo depende de la profundidad a la cual se realice la medición, y que para el caso de este método de medición, se representa como la distancia entre pines.

Basados en lo anterior, la resistividad del suelo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho = (2) * (\pi) * a * (R)$$

Donde:

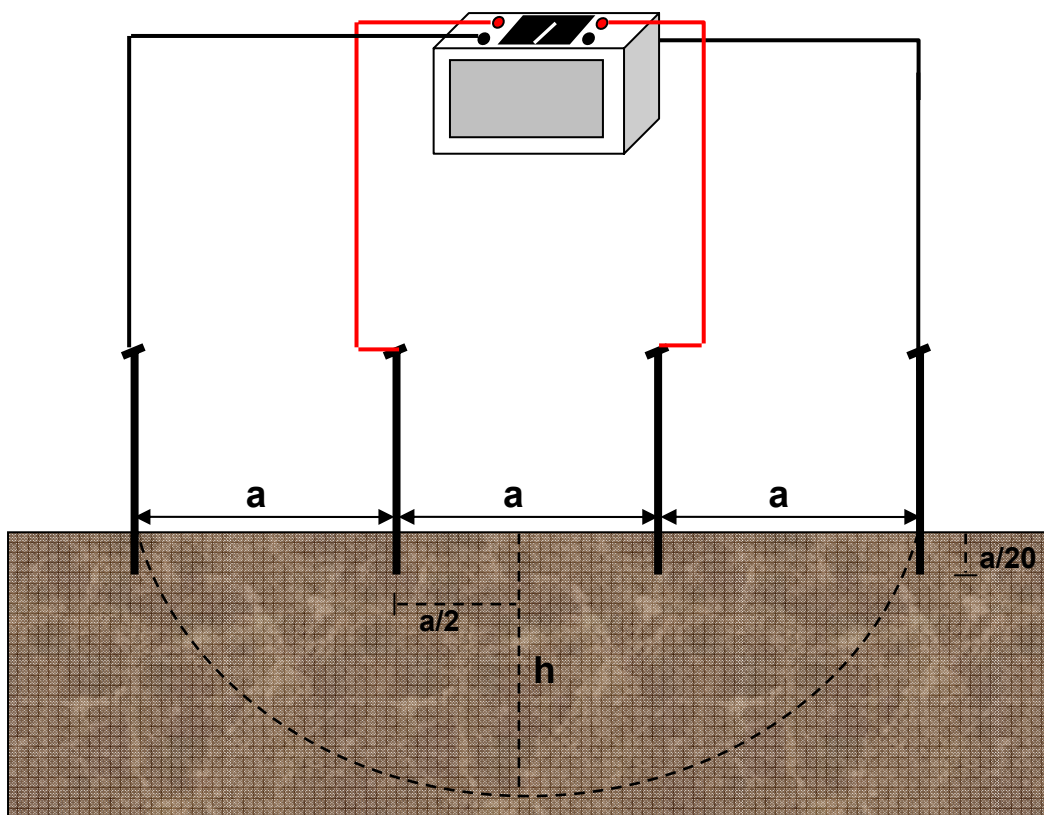
ρ : Resistividad del suelo expresado en $\Omega * \text{cm}$

π : Constante igual a 3.141516

a : Profundidad de la medición o distancia entre pines expresada en cm

R : Resistencia eléctrica del suelo expresada en Ω

Figura 13. Disposición del equipo para la medición de la resistencia eléctrica



Al efectuar mediciones de resistividad del suelo en el área de trabajo se encontró que el valor de la resistividad de dicho suelo es $3000 \Omega * \text{cm}$.

b) Área a proteger

El área a proteger está constituida por una lámina de acero de forma cuadrada cuyos lados tienen una longitud de 71 cm, la cual será expuesta por las dos caras.

El área a proteger se calcula según la fórmula de un cuadrado (ecuación 12)

$$Á_{\text{total}} = (2) \cdot (L) \cdot (L) \text{ (ecuación 12)}$$

Donde:

L: Longitud del lado de la lámina en cm

Luego se tiene que:

$$Á_{\text{total}} = (2) \cdot (71) \cdot (71)$$

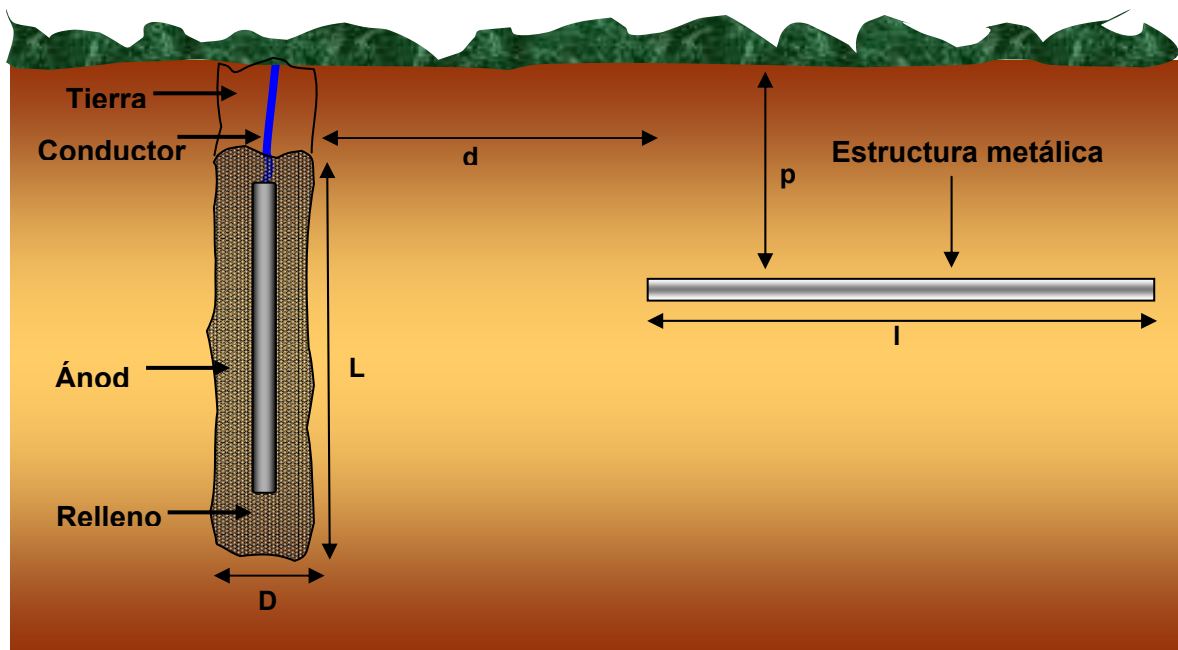
$$Á_{\text{total}} = 10082 \text{ cm}^2 = 1.0082 \text{ m}^2$$

c) Resistencia total del circuito

La resistencia total es la suma de cada una de las resistencias de los elementos en serie que componen el circuito del sistema de protección catódica, tal como se señaló en la ecuación 3.

La cama anódica para este ensayo se instalará en posición vertical como lo ilustra la figura 14.

Figura 14. .Corte transversal de la cama anódica.



Para la instalación mostrada en la figura 14, la tabla 17 describe las características más importantes de la cama anódica empleada en el ensayo.

Tabla 17. Características de la cama anódica

característica	Valor
Longitud del ánodo	4.5 cm.
Diámetro del ánodo	9.5 cm.
Peso del ánodo (Hierro con alto contenido de Silicio)	1292.10 g.
Longitud total de la cama anódica (L)	25 cm.
Diámetro total de la cama anódica (D)	10 cm.
Profundidad de la estructura bajo la tierra (p)	30 cm.
Distancia entre la cama anódica y la estructura (d)	2 m.

Con la información suministrada anteriormente los valores de cada una de las resistencias que constituyen el circuito, se tiene que:

- **Resistencia de la cama anódica**

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0,159 \times \rho}{L} \left[\ln \frac{8L}{D} - 1 \right]$$

$$R_{\text{cama anódica}} = \frac{0,159 \times 3000}{25} \left[\ln \frac{8(25)}{10} - 1 \right]$$

$$R_{\text{cama anódica}} = 38.115 \Omega$$

- **Resistencia del cátodo**

Al calcular la resistencia eléctrica de la lámina metálica se obtuvo el valor de $36.5 \mu\Omega$. El resultado anterior fue obtenido teniendo en cuenta que se empleó una lámina cuyo espesor es 0.5 cm y 71 cm de longitud y asumiendo una resistividad del acero de $3.68 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \rho \cdot (L/A)$$

$$R = 3.68 \times 10^{-4} (0.05/0.5041)$$

$$R = 36.5 \times 10^{-6} \Omega.$$

- **Resistencia de los cables**

Para el circuito eléctrico se emplearon cables 14AWG con una longitud total de 32 m. Para conocer la resistencia de los cables se emplea la siguiente expresión emplean los valores de resistencia eléctrica para el tipo de cables empleados (tabla 12) y la longitud total de los cables que constituyen el circuito, tal como se señaló en la ecuación 10

$$R_{\text{cables}} = (\text{Longitud del cable}) \cdot (\text{resistencia lineal del cable})$$

Luego al sustituir estos valores se encontró que:

$$R_{\text{cables}} = (8.282\Omega/\text{Km.}) * (32 * 10^{-3} \text{Km})$$

$$R_{\text{cables}} = 0.2636\Omega$$

- **Resistencia del equipo de medición**

Para la monitorear la corriente total del circuito, se empleó un multímetro digital Hewlett Packard 34401, que posee una resistencia de 0.075Ω

Para el cálculo de la resistencia total del circuito se tiene en cuenta la ecuación 3 tal como se describe a continuación:

$$R_t = R_c + R_{em} + R_{ca} + R_{cama}$$

$$R_t = 0.236 + 0.075 + 36 * 10^{-6} + 38.115$$

$$R_t = 38.45\Omega$$

d) Corriente requerida

Para calcular la corriente requerida se realizó una prueba de recurso de corriente procediendo de la siguiente manera: se dispuso en primer lugar de una cama de anódica temporal en el sitio propuesto para la cama anódica final, luego, se conectó en serie un interruptor de corriente relevando los potenciales "ON" y "OFF" a lo largo de la estructura a proteger con un voltímetro de alta impedancia y un electrodo de referencia portátil en cobre- sulfato de cobre (Cu/CuSO_4). Se aumentó la corriente de salida de la cama anódica temporal en función de las lecturas de potenciales relevados hasta obtener una protección completa sobre la estructura según el criterio de un voltaje de -0.85 V con respecto al electrodo de referencia (Cu/CuSO_4).

La corriente requerida se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (ecuación 13)

$$\frac{i_{requerida}}{-0.85 - V_{natural}} = \frac{i_{ensayo}}{V_{ON} - V_{OFF}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde

$i_{requerida}$: es la corriente requerida para protección catódica

$V_{natural}$: es el potencial natural o nativo de la estructura

i_{ensayo} : es la corriente medida en el ensayo

V_{ON} : es el voltaje con circuito cerrado

V_{OFF} : es el voltaje con circuito abierto

Durante la prueba fueron obtenidos los siguientes resultados

i_{ensayo} : 0.09 A

$V_{natural}$ de la estructura: -0.57 V

V_{ON} : -0.85 V

V_{OFF} : -0.60

La corriente requerida del ensayo fue de 0.1 A

e) Voltaje requerido para protección catódica

El voltaje total requerido se calcula utilizando la ley de ohm, más la adición de 2 voltios de tensión contra – electromotriz, tal como se señaló en la ecuación 11:

$$V = (I_{Req}) * (R_T) + 2$$

Al sustituir los anteriores valores (ver tabla 16) se encuentra que el voltaje requerido es.

$$V = (0.15) * (38.45) + 2$$

$$V = 7.76 \text{ V}$$

El voltaje anteriormente calculado fue sobredimensionado hasta un valor de 18 V que corresponde a la máxima salida del rectificador de trabajo, garantizando de esta manera una mayor exigencia a la cama anódica.

f) Masa anódica de Hierro con alto contenido de Silicio empleada en el diseño (M)

La masa anódica para el diseño fue de 1,292 Kg.

g) Material de relleno empleado

El sistema fue diseñado empleando un coque comercial importado marca Loresco de referencia SC3 como relleno en la cama anódica, el coque Loresco es un producto calcinado del petróleo. Las propiedades más importantes de este relleno fueron descritas en la tabla 13.

Para la cama anódica diseñada se emplearon 2470 g. de coque

h) Procedimiento de pruebas y puesta en marcha

Una vez instalado el sistema de protección, se registraron los valores de la corriente del circuito y posteriormente se calculó la resistencia total del circuito, además, la fuente de corriente se colocará en operación y se monitoreó el potencial de la estructura verificando que se encontrara en un valor mínimo de - 0,85 V con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 RESISTENCIA DE LAS CAMAS ANÓDICAS EMPLEANDO COQUE LORESCO SC3 Y COQUE COLOMBIANO COMO RELLENO DE LAS CAMAS ANÓDICAS A NIVEL DE LABORATORIO

Una vez realizado el montaje y puesta en operación de las celdas a nivel de laboratorio para el coque Loresco SC3 y el coque Colombiano, se registró la corriente del circuito, posteriormente empleando la ley de Ohm ($V = I \cdot R$) se calculó la resistencia total del circuito, teniendo en cuenta que durante el ensayo permaneció constante el voltaje de la fuente.

Conociendo las resistencias constantes y totales del circuito, se procedió a calcular las resistencias de las camas anódicas para las dos celdas de trabajo, según la ecuación 4

Los valores de corriente del circuito, resistencia total del circuito y resistencias de las camas anódicas son descritos en la tabla 19

Los valores de resistencia total y tiempo de duración del ensayo se representaron gráficamente para analizar las curvas de tendencia del cambio de la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo (ver gráfica 3).

Teniendo en cuenta lo señalado anteriormente y analizando las curvas de tendencia de las camas anódicas empleando como material de relleno coque Loresco SC3 y coque Colombiano se encontró una diferencia notable del cambio de la resistencia eléctrica para los dos coques evaluados.

El comportamiento del coque Loresco SC3 desde el punto de vista del desempeño como material de relleno en sistemas de protección catódica por corriente impresa

es más favorable en comparación con el comportamiento del coque colombiano, esto se fundamenta analizando que en las camas anódicas es indispensable un drenaje de corriente apropiado para satisfacer los requerimientos de protección de la estructura; por consiguiente, un aumento en la resistencia de la cama anódica puede asimilarse como una barrera al drenaje de corriente, que está influenciado directamente de las propiedades físico-químicas del material de relleno y constituye una evaluación indirecta de la calidad del coque material de relleno sistemas de protección catódica por corriente impresa.

8.2 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA CON RESPECTO AL ELECTRODO Ag/AgCl DURANTE EL ENSAYO

El potencial de la estructura fue monitoreado durante el transcurso del ensayo con el objetivo de establecer posibles diferencias al emplear el coque Loresco SC3 y el coque colombiano como material de relleno en las camas anódicas de las respectivas celdas construidas.

Los valores de potencial de la estructura son descritos en la tabla 19

A partir de las lecturas tomadas con el transcurso del tiempo se graficó el cambio del potencial de las estructuras de las celdas (Ver gráfica 4)

Al analizar el grado de polarización de la estructuras empleando los coque objeto de estudio se puede apreciar que no existen grandes diferencias durante el periodo de prueba. Sin embargo, es importante señalar que el voltaje de la fuente fue sobredimensionado hasta su máximo valor de salida (25 V) con el objetivo de alcanzar mayores niveles de corriente y por ende garantizar la protección de la estructura, y por tal razón este hecho tiene una marcada influencia sobre este comportamiento.

8.3 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO DE LOS RELLENOS EMPLEADOS EN LAS CELDAS DE LABORATORIO

Para estimar la tasa de consumo de los dos rellenos empleados se realizó un análisis gravimétrico:

Los datos del análisis de resumen en la tabla 18

Tabla 18. Peso de los coques para análisis gravimétrico

Coque Loresco	Coque Colombiano
Peso inicial: 380 g.	Peso inicial: 283.60 g.
Peso final: 376.830g.	Peso final: 278.30
Pérdida de peso: 3.17 g.	Pérdida de peso: 5.3 g.

Al comparar los datos anteriores se puede apreciar una diferencia en las respectivas pérdidas de peso, es decir, el coque Colombiano presenta un grado de desgaste relativamente mayor que el coque Loresco SC3.

Además al realizar teóricamente el cálculo de la tasa de consumo mediante la expresión

$$M = (C) \cdot (I) \cdot (t) / F \text{ (Ecuación 14)}$$

Donde:

C: tasa de consumo del relleno (Kg/A*año)

I: corriente requerida (A)

t: duración de la prueba (años)

M: masa consumida (Kg.)

F: factor de seguridad (generalmente se asume 0.80)

Al sustituir los valores empleados en la prueba se obtiene una tasa de consumo que se encuentra en concordancia con los valores teóricos de consumo para los rellenos carbonáceos empleados en protección catódica, que señalan un consumo de 0.25Kg/A*año a 1Kg/A*año.

Los anteriores datos fueron obtenidos para un periodo correspondiente a 15 días.

8.4 RESISTENCIA DE LA CAMA ANÓDICA EMPLEANDO COQUE LORESCO SC3 COMO RELLENO DE LAS CAMAS ANÓDICAS A NIVEL DE LABORATORIO EN CAMPO.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de una cama anódica en condiciones cercanas a las encontradas en la práctica, se diseñó y construyó un sistema de protección catódica por corriente impresa en campo abierto, al sistema se le adecuó una estación de monitoreo para tomar las lecturas de voltaje de la estructura y la corriente de circuito, con este último dato se calcula la resistencia total del circuito y la resistencia de la cama anódica de manera similar al caso de las celdas de la laboratorio.

Es importante indicar que la resistencia de la cama anódica para este sistema está condicionada a posibles variaciones de las condiciones del suelo (humedad, entre otros), por lo tanto existe la posibilidad que en el circuito eléctrico equivalente, además de la cama anódica, varíe la resistencia del suelo, perjudicando el monitoreo de la cama anódica únicamente.

Los anteriores valores se registran en la tabla 20.

Las gráficas 5 y 6 muestran el comportamiento de la cama anódica desde el punto de vista de la resistencia eléctrica de la cama anódica y el grado de polarización de la estructura

Al analizar la resistencia de la cama anódica se puede apreciar que el cambio de tendencia es moderado, por lo tanto es recomendable efectuar el seguimiento a la

cama anódica durante un largo periodo de tiempo para encontrar una secuencia de datos representativos, y justamente el sistema fue diseñado para tal propósito.

8.5 COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA CON RESPECTO AL ELECTRODO Cu/CuSO₄ DURANTE LOS PRIMEROS DÍAS DE OPERACIÓN.

Tal como lo señala la gráfica 6, el potencial de la estructura con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄, durante los primeros días del ensayo cumplió satisfactoriamente con el criterio de protección catódica del potencial de estructura mínimo de -0.85 V con respecto al electrodo Cu/CuSO₄.

Es importante tener en cuenta, que el voltaje del rectificador requerido para protección catódica fue sobredimensionado hasta la máxima capacidad de salida del mismo (18V), esto se refleja en el alto nivel de protección de la estructura. El alto voltaje de salida fue impuesto con el objetivo de alcanzar altos niveles de corriente y aumentar el grado de exigencia a la cama anódica con la ventaja de no encontrar efectos secundarios sobre la estructura, pues se trabajó con una lámina 100% desnuda.

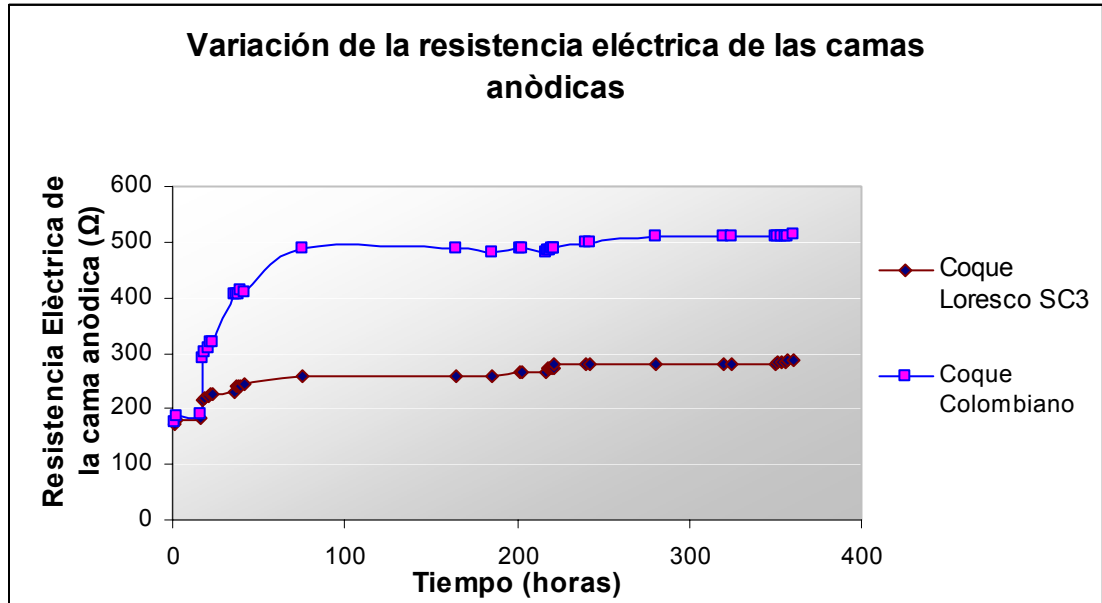
Tabla 19. Monitoreo de las celdas de laboratorio para los montajes de coque Loresco SC3 y coque Colombiano

CELDA 1 (Coque Loresco)					CELDA 2 (Coque Colombiano)					tiempo(horas)
V de la estructura	V fuente (V)	I (mA)	Rt (Ω)	R. cama anòdica (Ω)	V de la estructura	V fuente (V)	I (mA)	Rt (Ω)	R. cama anòdica (Ω)	
-0.63	25	146.25	170.94	170.802	-0.63	25	141.6	176.554	176.416	1
-0.76	25	139.03	179.817	179.679	-0.75	25	134.8	185.460	185.322	2
-0.75	25	136.08	183.715	183.577	-0.75	25	132.05	189.322	189.184	16
-0.84	25	116.22	215.106	214.968	-0.84	25	86.35	289.519	289.381	17
-0.88	25	114.6	218.15	218.012	-0.88	25	82.55	302.847	302.709	19
-0.89	25	112.6	222.025	221.887	-0.88	25	80.55	310.366	310.228	21
-0.89	25	110.35	226.552	226.414	-0.89	25	78.38	318.959	318.821	22
-0.9	25	110.3	226.655	226.517	-0.9	25	78.05	320.307	320.169	23
-0.91	25	108.85	229.674	229.536	-0.9	25	61.6	405.844	405.706	36
-0.95	25	103.93	240.547	240.409	-0.94	25	61.47	406.702	406.564	37
-0.95	25	103.7	241.08	240.942	-0.95	25	61.45	406.835	406.697	38
-0.96	25	103.6	241.313	241.175	-0.93	25	60.700	411.862	411.724	39
-0.96	25	102.1	244.858	244.72	-0.95	25	61.025	409.668	409.530	42
-0.98	25	96.115	260.105	259.967	-0.95	25	51.115	489.093	488.955	75
-0.99	25	96.1	260.146	260.008	-0.96	25	51.02	490.004	489.866	165
-1	25	95.99	260.444	260.306	-0.98	25	51.892	481.77	481.632	185
-1.05	25	94.3	265.111	264.973	-1.02	25	51.16	488.663	488.525	202
-1.05	25	93.6	267.094	266.956	-1.02	25	51.065	489.572	489.434	203

Tabla 19. (Continuación). Monitoreo de las celdas de laboratorio para los montajes de coque Loresco SC3 y coque Colombiano

CELDA 1 (Coque Loresco)					CELDA 2 (Coque Colombiano)					tiempo(horas)
V de la estructura	V fuente (V)	I (mA)	Rt (Ω)	R. cama anòdica (Ω)	V de la estructura	V fuente (V)	I (mA)	Rt (Ω)	R. cama anòdica (Ω)	
-1.04	25	93.4	267.666	267.528	-1.03	25	51.88	481.881	481.743	217
-1.04	25	92.1	271.444	271.306	-1.03	25	51.55	484.966	484.828	218
-1.04	25	91.05	274.574	274.436	-1.02	25	51.54	485.060	484.922	219
-1.05	25	91.03	274.635	274.497	-1.01	25	51.02	490.004	489.866	220
-1.04	25	91.01	274.695	274.557	-1.01	25	51.03	489.908	489.77	221
-1.03	25	89.02	280.836	280.698	-1.01	25	51.001	490.186	490.048	222
-1.03	25	89.02	280.836	280.698	-1	25	50.099	499.012	498.874	240
-1.02	25	89.011	280.864	280.726	-0.99	25	50.088	499.122	498.984	242
-1.02	25	89.01	280.867	280.729	-0.99	25	49.05	509.684	509.546	280
-1.02	25	89.014	280.855	280.717	-0.98	25	49.04	509.788	509.65	320
-1.02	25	89.001	280.896	280.758	-0.98	25	49.03	509.892	509.754	325
1.01	25	88.99	280.93	280.792	-0.97	25	49.0011	510.193	510.055	350
-999	25	87.88	284.479	284.341	-0.96	25	48.99	510.308	510.17	351
-0.98	25	87.68	285.128	284.99	-0.96	25	48.85	511.771	511.633	354
-0.97	25	87.58	285.453	285.315	-0.93	25	48.9	511.247	511.109	356
-0.97	25	87.245	286.549	286.411	-0.9	25	48.9	511.247	511.109	357
-0.97	25	87.33	286.27	286.132	-0.88	25	48.5	515.464	515.326	360

Gráfica 3 Variación de la resistencia eléctrica de las camas anódicas en las celdas de laboratorio con el transcurso del tiempo



Gráfica 4. Variación del potencial de la estructura en las celdas de laboratorio con el transcurso del tiempo

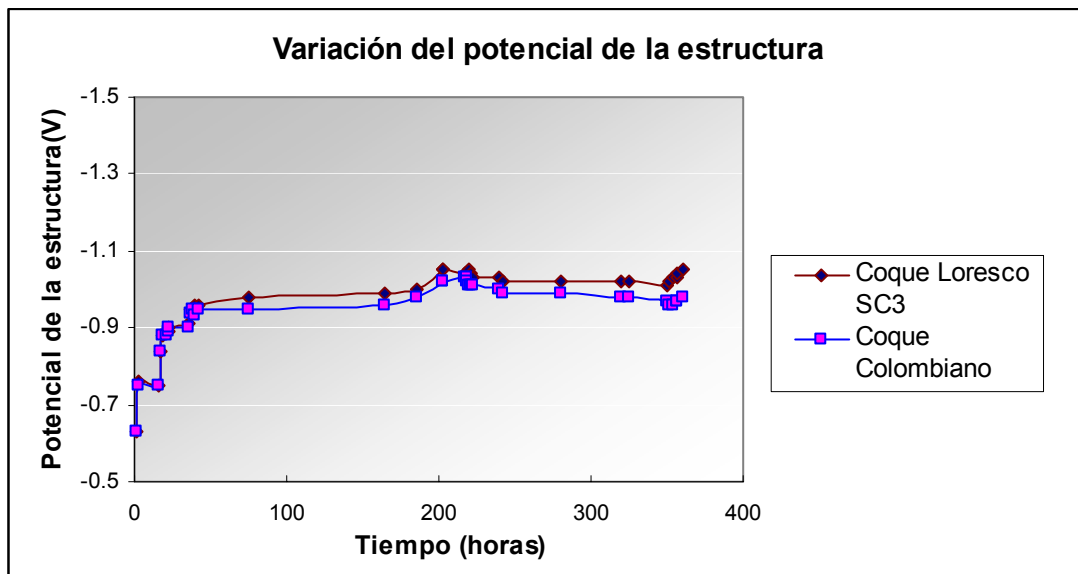
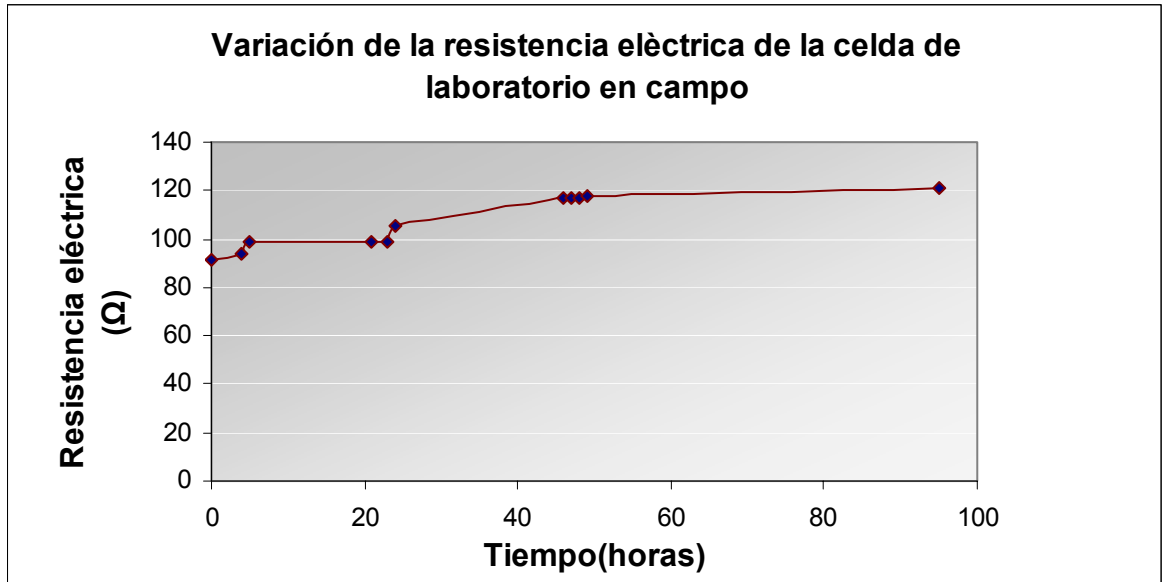


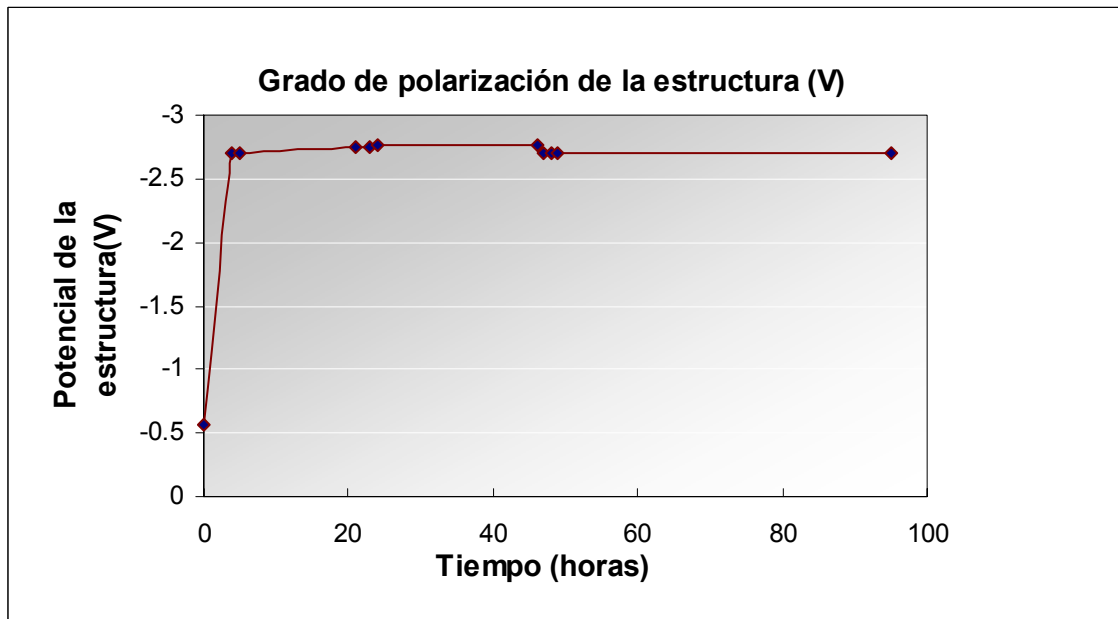
Tabla 20. Monitoreo de la celda de laboratorio en campo durante los primeros días del ensayo.

MONITOREO DE LA CELDA PILOTO DE CAMPO					
V estructura (V)	Vfuente (V)	I (mA)	Rt (Ω)	R. cama anódica (Ω)	t (horas)
-0.57	18	195.8	91.9305	91.5869	0
-2.7	18	190.5	94.4882	94.1446	4
-2.7	18	181.3	99.283	98.9394	5
-2.75	18	182.09	98.8522	98.5086	21
-2.75	18	181.07	99.4091	99.0655	23
-2.76	18	170.3	105.696	105.352	24
-2.77	18	153.5	117.264	116.92	46
-2.7	18	153.22	117.478	117.135	47
-2.7	18	153.1	117.57	117.227	48
-2.7	18	152.58	117.971	117.627	49
-2.7	18	148.54	121.179	120.836	95

Gráfica 5. Comportamiento de resistencia de la cama anódica diseñada en campo durante los primeros días de la prueba.



Gráfica 6. Grado de polarización de la estructura metálica del sistema diseñado en campo durante los primeros días de la prueba.



9. CONCLUSIONES

- La resistencia de la cama anódica empleando como relleno la muestra de coque colombiano presentó valores más altos en comparación con la cama anódica donde se empleó un relleno de coque marca Loresco SC3, reflejando un deficiente drenaje de corriente eléctrica no deseable en sistemas de protección catódica por corriente impresa.
- En las curvas de tendencia del cambio de la resistencia eléctrica en función del tiempo se presentaron 3 zonas bien definidas: un periodo con variaciones leves de resistencia eléctrica, una zona con tendencia creciente, y, una zona final con estabilización del máximo valor de resistencia eléctrica alcanzado.
- Durante los primeros periodos de polarización de la estructura metálica no se registraron cambios significativos de la resistencia eléctrica tanto para la muestra de coque colombiano como para la muestra de coque Loresco SC3, esta tendencia puede explicarse teniendo en cuenta que las camas anódicas durante la primera parte del ensayo no experimentaron altas exigencias de corriente, implicando una leve variación de la misma
- La tasa de crecimiento de la resistencia eléctrica con el transcurso del tiempo presentó la mayor variación empleando coque colombiano como relleno de la cama anódica, en comparación con la muestra de coque Loresco SC3, y dicha tendencia fue evidenciada en el periodo posterior a la polarización de la estructura (periodo comprendido entre las 18 y 100 horas de prueba)

- Después de alcanzarse un máximo valor de resistencia eléctrica (aproximadamente 100 horas después de iniciarse la prueba), dicho valor presentó una tendencia a estabilizarse. Esta situación se presenta tanto para el coque colombiano como para el coque Loresco SC3.
- La etapa de diseño y construcción de la celda para la evaluación de coques empleando medición de resistencia eléctrica constituye la base para el montaje de las muestras objeto de estudio, posibilitando simular un sistema de protección catódica a nivel de laboratorio que permite monitorear la corriente del circuito y el potencial de protección de la estructura.
- La selección de algunos parámetros que constituyen la celda se realizó con el objetivo de realizar los ensayos en condiciones cercanas a las encontradas en la práctica, de fácil obtención y manejo. Además se debe señalar la estrecha relación y dependencia que existe entre algunos de ellos, tal es el caso del ánodo y el electrolito, donde se debe seleccionar un ánodo apropiado en función del ambiente electrolítico al cual será expuesto.
- La diferencia entre las celdas diseñadas radica en la cantidad de muestra a evaluar, siendo mayor para el coque Loresco SC3 en comparación con el coque colombiano debido que poseen densidades diferentes.
- El sistema de protección catódica diseñado en campo se encuentra expuesto a un ambiente natural que puede variar con el tiempo como consecuencia de cambios climáticos y precipitaciones que alteran la resistividad del suelo, por lo tanto, no se puede garantizar que el cambio de la resistencia eléctrica en el circuito eléctrico sea originada únicamente por el desempeño de la cama anódica.

- La cama anódica diseñada en campo corresponde a un montaje a nivel de laboratorio bajo condiciones cercanas a las encontradas en la práctica, por tal razón, se requiere de periodos de tiempo prolongados para analizar el desempeño del sistema.
- Al sobredimensionar el voltaje requerido para protección catódica se alcanzan potenciales de protección superiores a -0.85 con respecto al electrodo Cu/CuSO_4 , además aumenta la corriente del circuito, favoreciendo de esta manera el desgaste de la cama anódica.

10. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta el drástico crecimiento de la resistencia de la cama anódica empleando coque colombiano, se recomienda evaluar dicho coque bajo las mismas condiciones de operación, pero con aditivos que posean óptimas propiedades eléctricas y con granulometría similar a la del coque objeto de estudio.
- Evaluar el efecto de posibles contaminantes del relleno (sulfatos, cenizas, entre otros) en el desempeño de la cama anódica y formular un relleno que desde el punto de vista eléctrico y granulométrico cumpla con los parámetros exigidos en los diseños de protección catódica por corriente impresa.

11. APORTES

- Formulación de la metodología con las especificaciones y recomendaciones para evaluar el desempeño de rellenos de coque para camas anódicas en sistemas de protección catódica por corriente impresa a nivel de laboratorio.
- Diseño y construcción de una celda a nivel de laboratorio para la evaluación de coques empleados como rellenos en sistemas de protección catódica por corriente impresa.
- Diseño y construcción de una caja para medición de resistividades a nivel de laboratorio.
- Diseño del manual de instrucciones de operación y recomendaciones para la caja de medición de resistividades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cathodic protection Level I Training manual, 2000. NACE INTERNATIONAL.
- [2] PEABODY, A. W. Control of pipeline corrosion. 2 ed. Houston, Texas: NACE INTERNATIONAL I, 2001. v.2, p. 124-127.
- [3] RP 0193-2001. External cathodic protection of on-grade carbon steel storage tank bottoms. Standard recommended practice. NACE International.
- [4] RP 0285-2002. Corrosion control of underground storage tank systems by cathodic protection. NACE INTERNATIONAL.
- [5] PARKER, Marshall E.y PEATTIE, Edward G. Pipeline, corrosion and cathodic protection Houston.
- [6] MOGOLLÓN RINCÓN, Enrique Giovanny. Obtención a nivel de laboratorio de coque metalúrgico para su uso en protección catódica. Santafè de Bogotá, 1992. 94p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Diversidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería
- [7] SHREIR, L. L., Corrosion Control. London, 1977. 2V..
- [8] VILA, Gustavo. Corrosión. Publicaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional. Bogotá
- [9] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. . Specification for line Pipe.Exploration and Production Department. 1995
- [10] En Internet: [http:// www.loresco.com](http://www.loresco.com)

[11] En Internet: [http:// www.mcmiller.com](http://www.mcmiller.com)

[12] En Internet: [http:// www.powerstream.com/Wire Size.html](http://www.powerstream.com/Wire Size.html)

[13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode method. United States : ASTM, 1995. 5p. : il. (G-57)

[14] MORGAN, John. Cathodic Protection NACE publication second edition. Houston, Texas, 1987. p. 65-184

[15] RP-0177. The electrical Isolation of Cathodically Protected Structures.NACE INTERNATIONAL,2001

[16] RP-0169-9. Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system .NACE INTERNATIONAL,2001

[17] NEMA-MR-20. Rectifiers Units for Cathodic Protection,2001

ANEXO A

MANUAL DE INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN DE LA CAJA PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDADES

Generalidades.

La resistividad de las muestras se medirá según la norma ASTM G 57. utilizando:

- Una caja plástica cuya principal característica es su relación geométrica $L/A=1$ que permite escribir la ecuación $R=\rho L/A$ como $R=\rho$, donde L es la distancia entre pines y A es la sección transversal de la caja.
- Un equipo de medición de resistencia eléctrica (R) marca Nilsson modelo 400 que permite lecturas de 0.01 Ohm hasta 1.1 MegaOhm.

Procedimiento de operación:

1. Cargar la muestra en la caja plástica.
2. Conectar los postes C (C1 y C2) del equipo Nilsson a los pines extremos de la caja y los postes P (P1 y P2) a los pines adyacentes de la caja.
3. Colocar los diales D1 y D2 a máxima resistencia.

4. Cerrar el circuito dirigiendo el botón (S) hacia el nivel de baja sensibilidad (LOW), con lo cual el flujo de corriente desplaza la aguja (A) hacia la derecha.
5. Disminuir el orden de magnitud de la resistencia con el dial D2 hasta que la aguja (A) se desplace hacia la izquierda.
6. Devolver el dial D2 un orden de magnitud.
7. Devolver el dial D1 hasta que la aguja se ubique en el valor cero.
8. Aumentar la sensibilidad orientando el botón (S) hacia el nivel de alta sensibilidad (HIGH)
9. Rotar el dial D1 hasta que la aguja finalmente se ubique en el valor cero
10. Leer los valores de D1 y D2

Resultados de la medición.

La lectura de resistencia eléctrica se toma como el producto: $(D1) \cdot (D2)$; así por ejemplo, si el valor D1 es 2.5 y D2 es 1 K Ω , la resistencia será $R = 2.5 \cdot 1000 = 2500 \Omega$.

Los valores de resistividad (ρ) se calculan de acuerdo a la ecuación $\rho = RA/L$, donde el cociente A/L se denominará factor F, luego $\rho = R \cdot F$ de la siguiente manera:

Si $F = 1$, entonces $\rho = R$, válido cuando la muestra alcanza el nivel (2) en la caja, es decir cuando está completamente llena (ver figura 1).

Si $F = 0.6125$, entonces $\rho = 0.6125 \cdot R$, válido cuando la muestra alcanza el nivel (1) en la caja (ver Figura 1)

Notas

El nivel (1) en la caja es recomendable cuando la cantidad de muestra es reducida, es evidente que los cálculos se simplifican si se trabaja con la caja completamente llena (nivel 2).

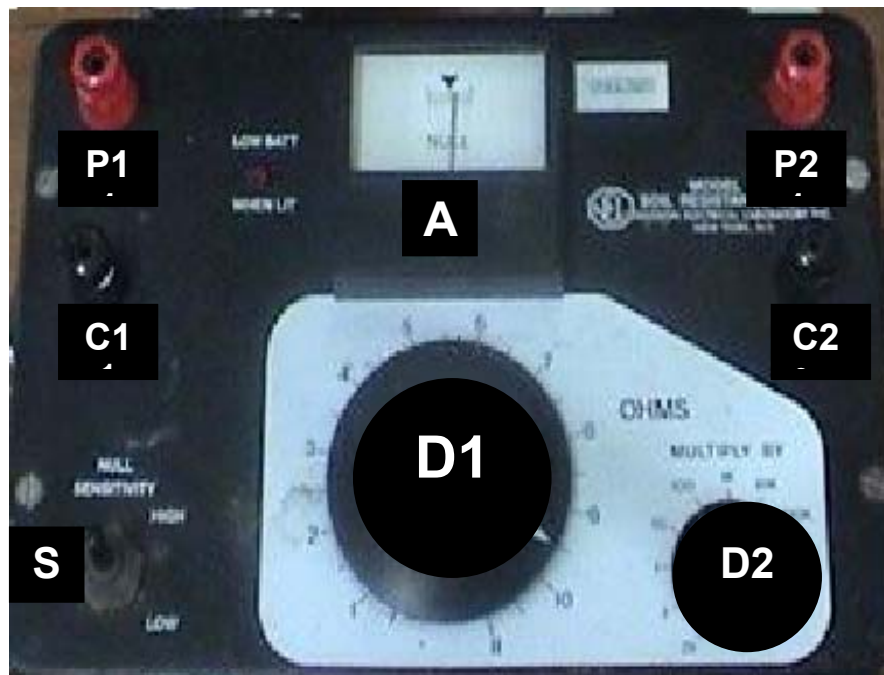
Se recomienda verificar que la caja y los accesorios estén completamente limpios.

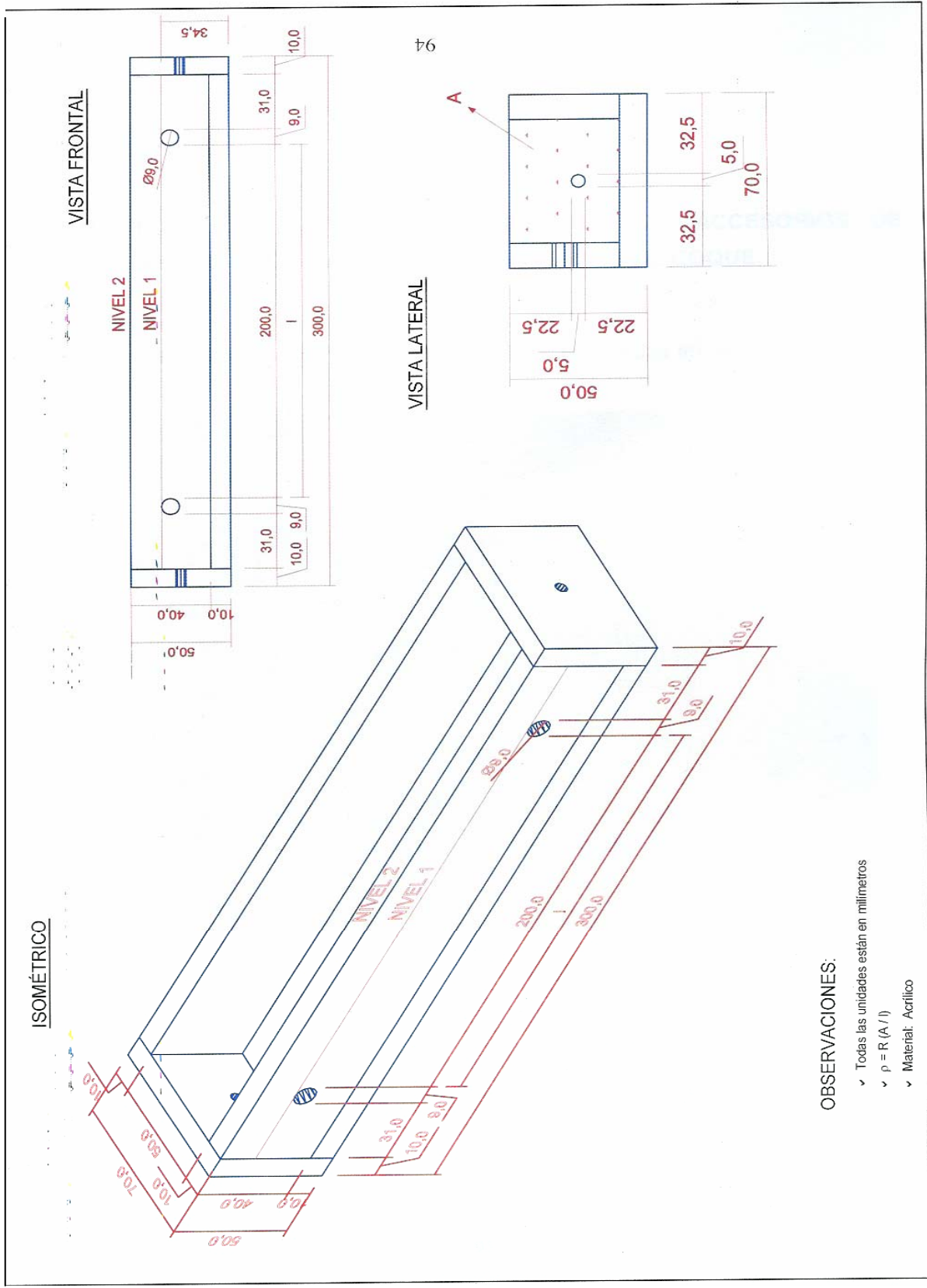
La simbología de los diales se esquematiza en las fotografías 2 y 3.

Fotografía 2. Disposición final para la medición de resistividades.



Fotografía 3. Detalle del panel de control del equipo para la medición de resistividades





ISOMÉTRICO

VISTA FRONTAL

VISTA LATERAL

94

OBSERVACIONES:

- ✓ Todas las unidades están en milímetros
- ✓ p = R (A / I)
- ✓ Material: Acrílico

FIGURA 1

ANEXO B

FOTOGRAFÍAS DE LA CELDA DE ENSAYOS Y ACCESORIOS DE LABORATORIO PARA EVALUACIÓN DE RELLENOS DE COQUE.

Fotografía 4. Disposición final de las dos celdas empleadas en laboratorio.



Fotografía 5. Vista superior de la celda de laboratorio..



Fotografía 6. Forma y característica de la cama anódica.



Fotografía7.Control de la red de suministro de aire para las celdas de laboratorio.



Fotografía 8 Medición del potencial de la estructura empleando el electrodo de referencia Ag/ AgCl

