CURSO - TALLER
CONTROL DE CALIDAD Y PATOLOGÍA DE LAS CONSTRUCCIONES

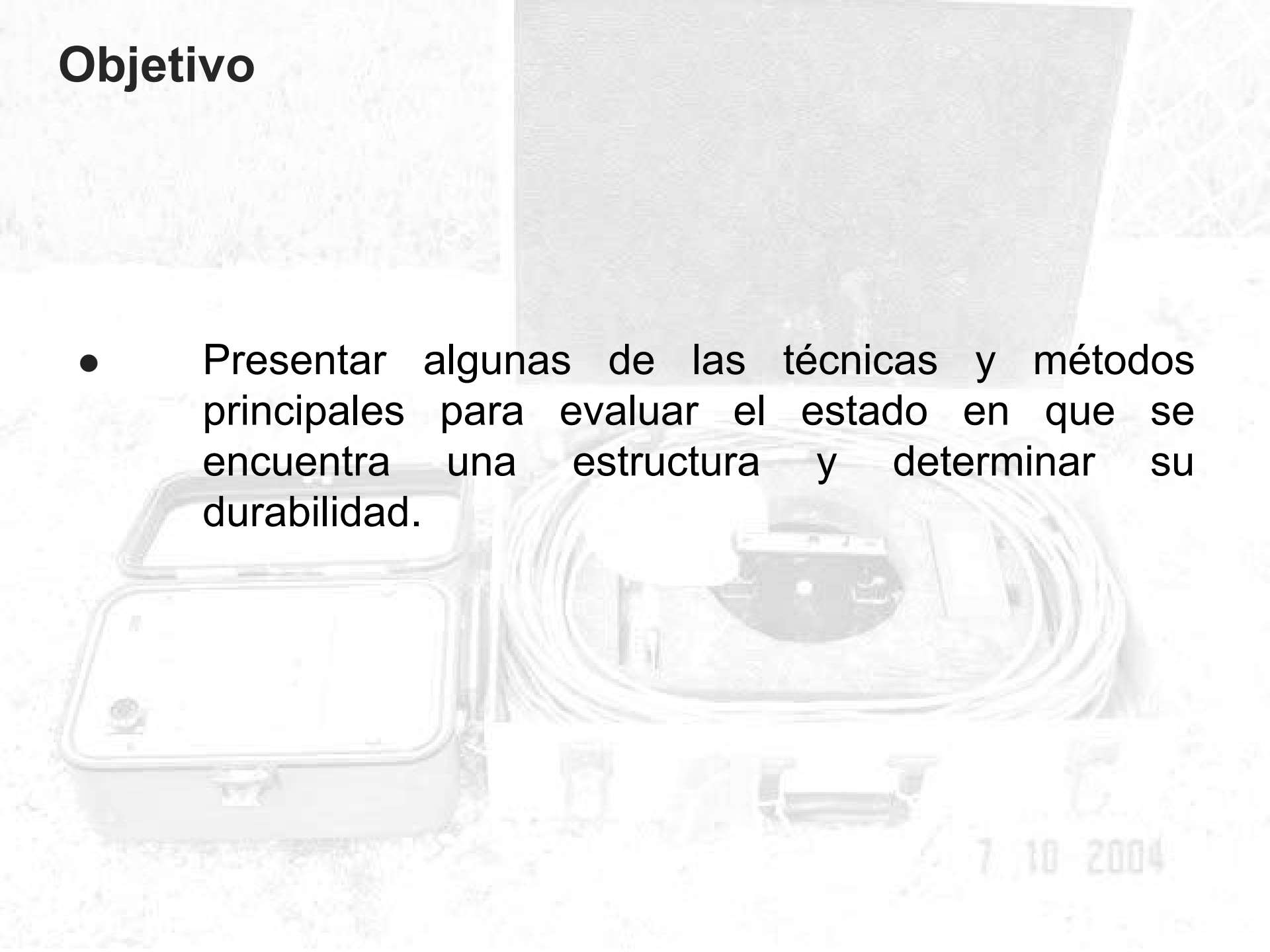
Principios de Patología de la Construcción: Metodologías para desarrollar un buen estudio patológico

Dr. Pedro Castro-Borges

CINVESTAV
Unidad Mérida

Objetivo

- Presentar algunas de las técnicas y métodos principales para evaluar el estado en que se encuentra una estructura y determinar su durabilidad.



Introducción.

- Las investigaciones recientes se han enfocado a resolver los problemas de durabilidad del concreto empleando métodos y técnicas para identificar los factores que afectan la vida útil de la estructura.

Determinación del daño

Para evaluar la problemática de una estructura es necesario elaborar:

1. Plan de trabajo:

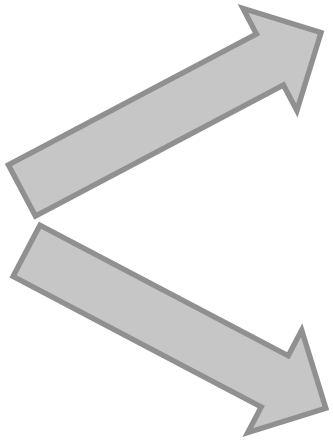
   a. Elaboración de fichas, croquis y/o planos para el levantamiento de daños, plan de muestreo y la tabla de tipificación de daños. (inspección preliminar).

   b. Selección de técnicas de ensayo, medición, análisis. Así como de las zonas y número de ensayos. (inspección detallada).

   c. Planificación de materiales y equipamiento.

Determinación del daño

Inspección de una estructura dañada por corrosión

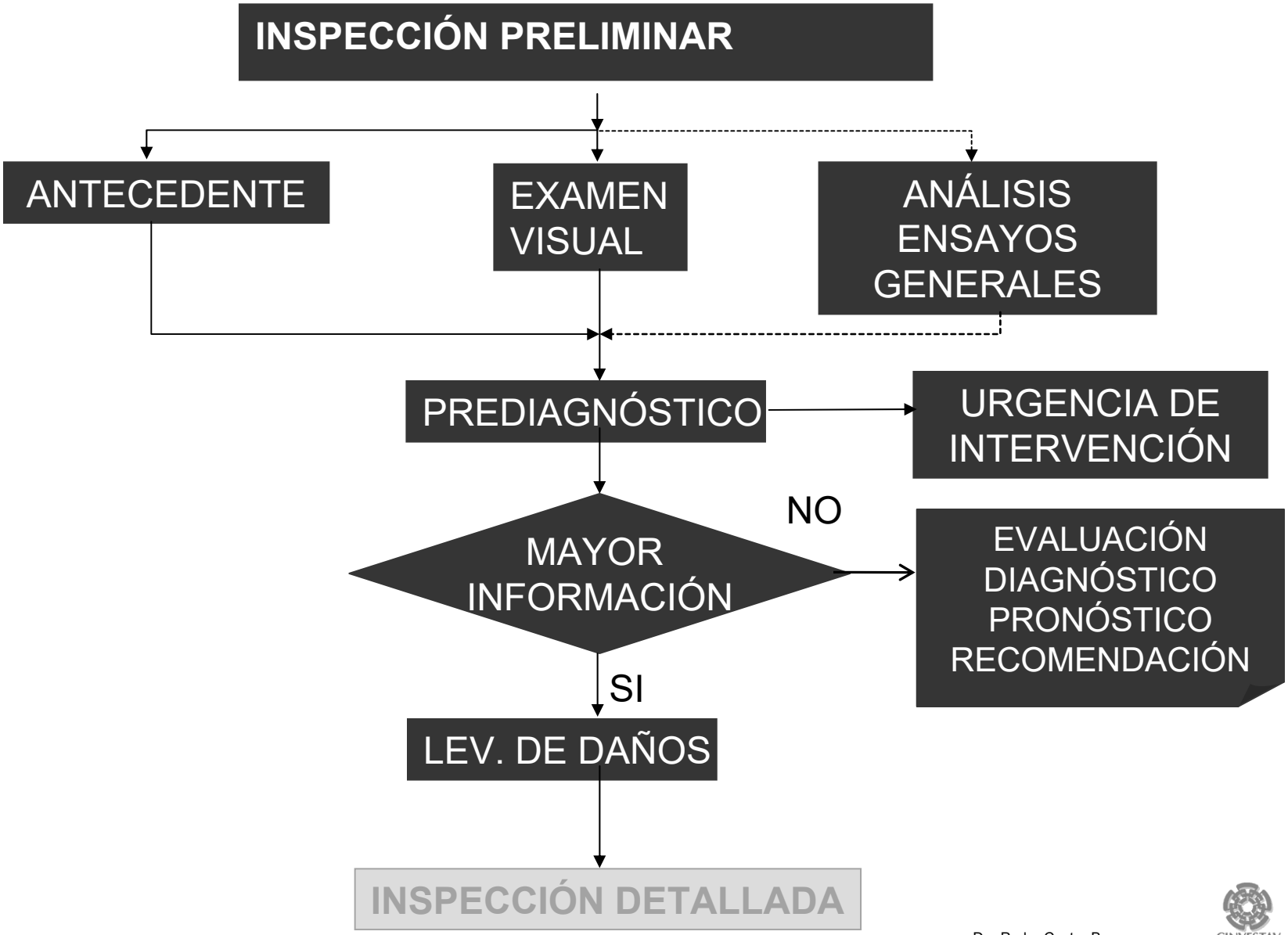


Inspección preliminar

Inspección detallada

Inspección preliminar

Determinación del daño



Determinación del daño

La inspección preliminar

Es un examen visual para determinar síntomas de la estructura y un número pequeño de ensayos que permitan señalar el problema.

La inspección preliminar

Etapas

a) Elaboración de un ficha de antecedentes de la estructura y del medio (con base en información documental y/o visita previa).

b) Examen visual general de la estructura

c) Levantamiento de daños

La inspección preliminar

Antecedentes de la estructura:

- Datos generales
- Datos específicos
- Historial de servicio

FORMATOS

La inspección preliminar

Formulario 1
FICHA DE DESCRIPCIÓN Y ANTECEDENTES DE LA ESTRUCTURA

1. Datos generales de la estructura

1.1 Tipo de Estructura — Descripción básica de los componentes

- Edificación _____
- Puente _____
- Muelle _____
- Muro de Contención _____
- Tanque de Almacenamiento _____
- Plataforma petrolera _____
- Silo _____
- Otro _____

1.2 Fecha de construcción de la estructura:_____

1.3 Uso general de la estructura:_____

_____

_____

1.4. Croquis de ubicación, coordenadas de la fachada, orientación y dirección del viento indicando el medio de exposición:

_____

_____

La inspección preliminar

FICHA DE DESCRIPCIÓN Y ANTECEDENTES DE LA ESTRUCTURA

III. Historial de Vida en Servicio de estructura.
III.1. Fecha de puesta en servicio:_____
III.2. Resistencia del hormigón a la compresión en obra:_____
III.3. Anomalías observadas durante la construcción:_____

III.3 Anomalías anteriores detectadas

III.4. Ensayos y mantenimiento.
Resultados de la prueba de carga:_____
Inspecciones rutinarias:_____
Ensayos particulares:_____
Tipos de mantenimiento:_____

III.5. Reparaciones.

IV. Informe adicional.

Fecha:_____Elaborado por _____

Nombre de la institución:_____

La inspección preliminar

Modelo de ficha de antecedentes de la estructura para la inspección preliminar

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Mérida
CORROSION EN EL ACERO DE REFUERZO
FICHA DE ANTECEDENTES

ESTUDIO: Monitoreo de la corrosión en estructuras de concreto reforzado en el Puerto de Progreso, Yuc.
OBRA: Centro de Estudios Técnicos del Mar (CETMAR)
FECHA: jun-94
LUGAR: Progreso, Yucatán.

A) DATOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA:

LOCALIZACIÓN: Carretera a P. de Abrigo s/n.
ORIENTACIÓN: Vigas en voladizo N-S, trabes E-O.

TIPO DE OBRA: Escuela pública.

TIPO DE ESTRUCTURA: Concreto reforzado.

B) DATOS ESPECÍFICOS DE LA ESTRUCTURA:

Características del concreto:

Dosificación Cemento: No disponible
Arena: No disponible
Agua: No disponible
Grava: No disponible
Tipo de cemento: Tipo I
Resistencia a la compresión a los 28 días (f´c) : 250 kg/cm2
Relación a/c: no disponible

Reglamento usado: NTCC-77 RDF
concreto fabricado en: obra

Características del acero de refuerzo:

Grado: 42
Resistencia a la fluencia: 4200 kg/cm2
Tipo de recubrimiento: no disponible

Detalles constructivos:	**Plano No:**
cimentación	715-I
columnas	715-I
trabes	715-2
losas	715-2

C) HISTORIAL DE SU VIDA DE SERVICIO:

Edad de la estructura: 8 años.
Mantenimiento dado: pintura

Reparaciones previas: reparación de concretos en partes desprendidas por la corrosión del acero.
En algunas columnas se pintó el refuerzo con pintura antioxidante.

D) DATOS DEL MEDIO:

Tipo de atmósfera: marina
Temperatura ambiente: 26.1 ºC
Humedad relativa: 79%
Precipitación pluvial: 468 mm
Tipo de suelo: friccionante (arena de playa)
Tipo de agua manto: agua de mar. alta salinidad
Agentes agresivos en el ambiente: cloruros y sulfatos

La inspección preliminar

Antecedentes del medio.

- Datos del medio

FICHA DE DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

I. Agentes físico- químicos en contacto con la estructura.

◻ Atmósfera	◻ Agua		◻ Suelo	◻ Otro medio
◻ Rural	◻ natural	◻ dulce ◻ salobre	◻ Natural	◻ Alta temperatura
◻ Urbana	◻ doméstica	◻ potable ◻ residencial	◻ Relleno	◻ Agentes químicos
◻ Marina	◻ industrial			◻ Corrientes de interferencia
◻ Industrial				◻ Atmósfera específica

II Propiedades físicas y químicas del medio

◻ Atmósfera*	◻ Agua	◻ Suelo
◻ Humedad relativa:_____	◻ Cloruros:_____	◻ Cloruros_____
◻ Temperatura:_____	◻ Sulfatos:_____	◻ Sulfatos:_____
◻ Régimen de vientos:_____	◻ PH:_____	◻ PH:_____
	◻ Temperatura:_____	◻ Potencial redox:_____
		◻ Resistividad Eléctrica:_____
		◻ Humedad:_____
		◻ Nivel freático:_____

*Si es posible, obtener datos meteorológicos promedio.

La inspección preliminar

Examen visual general de la estructura

- Tipificación del daño.

	Delaminación, Acero expuesto
	Parcheo de reparación
	Grieta
	Manchas de humedad
	Manchas de óxidos
	Concreto fofo
	Cangrejera
	Núcleo extraído
	Protuberancia
	Protuberancia con acero expuesto
	Lixiviación
	Intemperismo

La inspección preliminar

Examen visual general de la estructura

- Registro fotográfico.

Registro fotográfico

Área de estacionamiento
de Hotel de gran turismo

Nivel 2, trabe A norte

CINVESTAV
Unidad Mérida

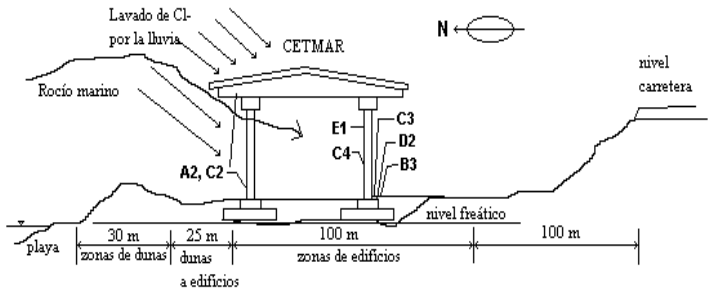
La inspección preliminar

Modelo de ficha del levantamiento fotográfico

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Mérida
CORROSION EN EL ACERO DE REFUERZO
INSPECCIÓN VISUAL GENERAL DE LA ESTRUCTURA

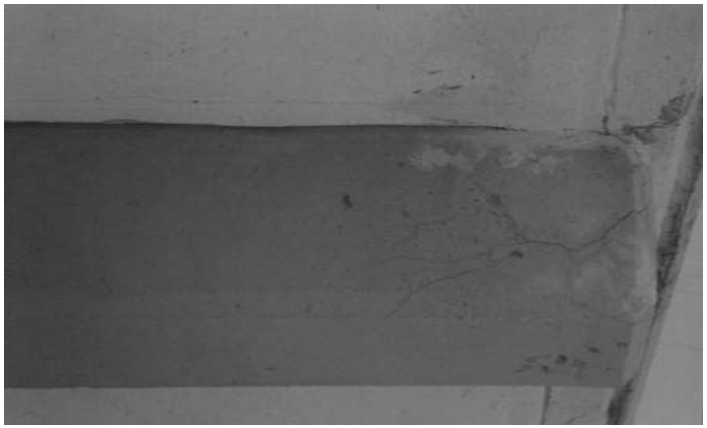
Tipo de Estructura:	concr. reforzado	Edad:	8 años
Ubicación:	frente al mar Progreso, Yuc.	Ambiente:	tropical-marino
Orientación:	Edificios con mira al norte	Fecha de inspección:	jul-94

A) CROQUIS DE TIPIFICACIÓN DE DAÑOS EN LA ESTRUCTURA:



Croquis de la estructura con levantamientos de daños generales
(para nomenclatura de daños generales ver Tabla 1)

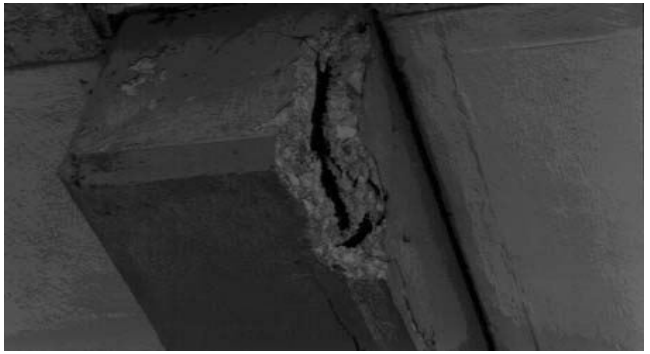
B) REGISTRO FOTOGRÁFICO:



La inspección preliminar

Modelo de ficha del levantamiento fotográfico

B) REGISTRO FOTOGRÁFICO:



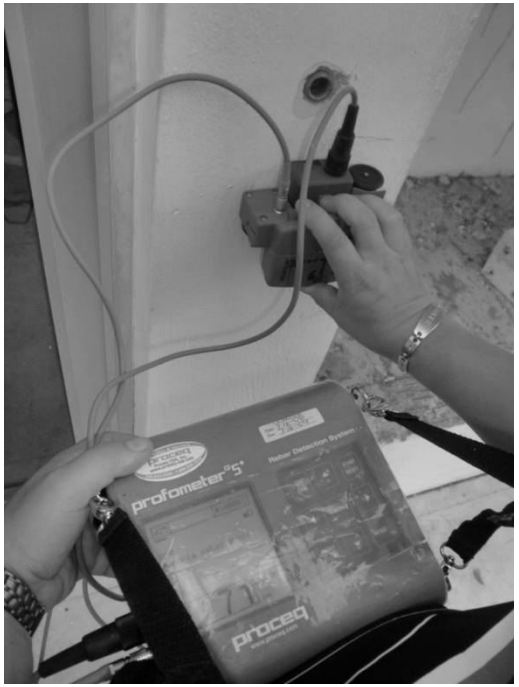
Desprendimientos del recubrimiento (C2)

Delaminaciones en a base de la columna (C3)

La inspección preliminar

Examen visual general de la estructura

- Ensayos mínimos
  - Localización del refuerzo y determinación del espesor del recubrimiento del concreto
  - Determinación cualitativa o cuantitativa de los cloruros.
  - Profundidad de carbonatación



La inspección preliminar

Examen visual general de la estructura

- Ensayos mínimos
- Deberá realizarse en zonas representativas:
- Zonas expuestas a las condiciones ambientales más agresivas.
- Zonas sometidas a las mayores exigencias mecánicas y estructurales.
- Zonas que representan los mayores daños o signos evidentes de corrosión.
- Zonas de vientos predominantes y asoleamiento
- Zonas que representan la situación contraria en cada caso.

La inspección preliminar

Después de obtener los datos necesarios para evaluar la estructura se realiza :

1. Un pre-diagnóstico en el que se describen los daños visibles de la estructura y sus posibles causas.

2. Decidir si es necesario una inspección detallada de la estructura y especificar los ensayos y mediciones que tengan que realizarse en esta etapa.

La inspección preliminar

Modelo de formato de extensión de daños en la estructura y pre-diagnóstico.

C) EXTENSIÓN Y GRAVEDAD DE LOS DAÑOS.

1) Agrietamiento y desprendimientos de concreto acompañados de corrosión del acero de refuerzo en la parte inferior de las columnas y en cimentación. Los agrietamientos siguen un patrón definido en sentido del refuerzo longitudinal (A2). Daños severos como consecuencia de desprendimientos puntuales (C2) y delaminaciones.

2) Manchas de óxido sin agrietamiento en zonas muy húmedas como cimentación y pisos. Daños estructurales probables.

3) Intemperismo (C4) y vacíos antre agregados (D2) por falta de vibración en concretos de pisos y columnas. Facilita la entrada de agentes agresivos.

D) ENSAYOS MÍNIMOS A REALIZAR

ENSAYO	LUGAR	RESULTADO
Determinación de cloruros/sulfatos:	Base de columnas a nivel superficial y del acero de refuerzo.	Cs= 4 kg/cl- de concreto Cb= 4 kg/cl- de concreto Cs=concentración superficial Cb=concentración en la barra
Profundidad de carbonatación:	ceja perimetral	concretos superficiales carbonatados hasta aprox. 1 cm de profundidad.
Espesor de recubrimiento:	en columnas en vigas	3 a 4 cms 3 cms

E) PREDIAGNÓSTICO:

De acuerdo con la inspección visual de los daños, a la tipificación de los mismos y al resultado de de algunos ensayos se estima que la estructura está deteriorándose por la acción de cloruros que están accesando al acero de refuerzo en tres formas:

a) a través del suelo desde la cimentación.
b) a través del techo por el aerosol marino que se cuela por las grietas.
c) a través de la superficie de las columnas y trabes.

Los mecanismos que intervienen en la degradación de la estructura aún no se aprecian en esta etapa.

Inspección detallada

INSPECCIÓN DETALLADA

Plan de muestreo

SELECCIÓN DE ANÁLISIS/ ENSAYOS, MEDICIONES

SELECCIÓN DE ZONAS

FICHAS PLANOS

pH, Cl^-, SO_4^{-2}, f'c, ρ, porosidad, e_ε, E, i_{corr}

EJECUCIÓN DE PLAN DE TRABAJO

LEV. DE INFORMACIÓN

MAYOR INFORMACIÓN

SI

NO

DIAGNÓSTICO CORROSIÓN ESTRUCTURAL

Inspección detallada

a. Elaboración del plan de muestreo

La estructura debe ser dividida en elementos que sean representativos de la situación de deterioro, tomando uno o varios de éstos para hacer la evaluación.

Inspección detallada

a. Elaboración del plan de muestreo

Criterios para la clasificación de las zonas:

- Diferenciar las zonas con diferentes exigencias estructurales/mecánicas.
- Determinar las características originales del concreto cuando fue puesto en servicio.
- Diferenciar las zonas sometidas a distintos medios agresivos.
- Establecer grados de deterioro en el concreto y en el acero.

Inspección detallada

1. Evaluación de la calidad del concreto:

- ❑ Su degradación por agrietamiento y delaminación a través de:
  - Exámenes visuales,
  - Mapeo de infrarrojo, mapeo de radar y ensayos acústicos
- ❑ Evaluación de su comportamiento:
  - Mapeo de grietas (levantamiento de daños)
  - Ensayos de carga (evaluación estructural)

2. Evaluación del estado de la armadura.

- ❑Profundidad y localización de la armadura
- ❑Potencial de corrosión
- ❑Velocidad de corrosión.

Técnicas de Medición

Inspección detallada

1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Metodología

Resistividad

Objetivo:
Determinar la Resistividad Eléctrica del concreto en campo o en laboratorio.

La resistividad en un material se define como la resistencia eléctrica de un cubo unitario.

La resistividad de un material depende específicamente de su estructura, de sus dimensiones, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de humedad y del contenido de iones.

Metodología

Resistividad

Materiales o equipos:

1. Equipo para la toma de núcleos cilíndricos.

2. Medidor de resistividad eléctrica . (Método de Wenner). 4 electrodos tipo pines.

3. Equipo para medir en dimensiones con precisión de décimas.

Metodología

Resistividad

En caso de no disponer de un equipo de resistividades:

- Fuente de corriente alterna o baterías.
- Voltímetro con capacidad de lectura de 50 V y precisión del 1% e impedancia alta (>10MΩ)
- Miliamperímetro, con capacidad de 0.1 a 250 mA y precisión del 1%.
- Electrodos.

Metodología

Resistividad

Procedimiento para medir resistividad:

- No debe realizarse sobre el acero.
- El concreto debe estar libre de carbonatación.
- En la extracción de testigos debe usarse un mínimo de agua.

✓ Ensayos a nivel laboratorio:

- ❑ Toma de probetas testigo
- ❑ Dimensionamiento (área, A, diámetro, ϕ, y longitud, L).

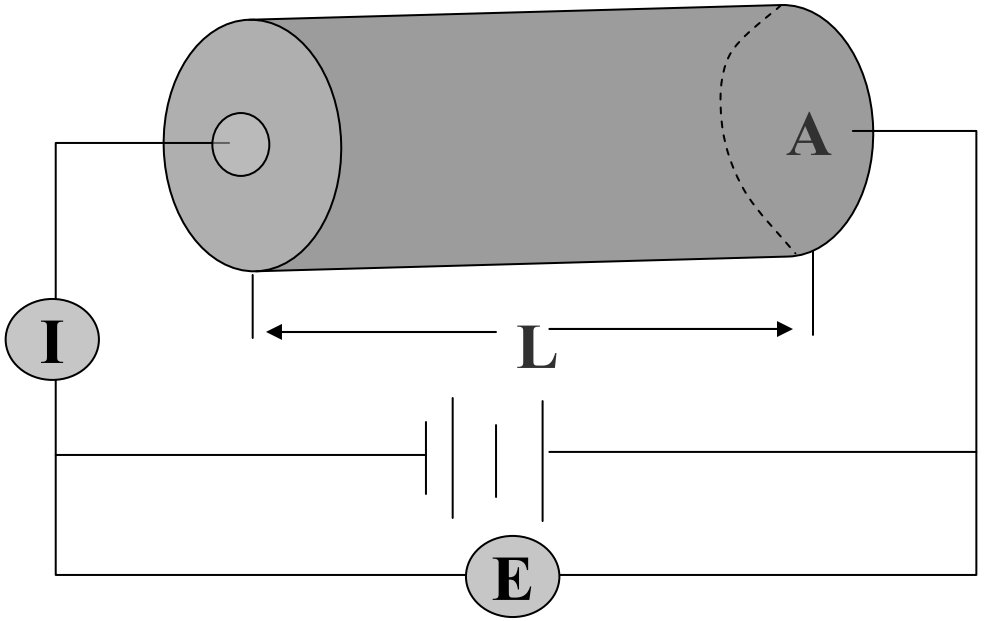
Metodología

Resistividad

- ✓ Ensayos a nivel laboratorio:
  - ❑ Toma de probetas testigo
  - ❑ Dimensionamiento (área, A, diámetro, ϕ, y longitud, L).

Metodología

Resistividad en probetas de laboratorio



$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad \text{ohm - cm} \quad (\text{ohm - m})$$

Donde: A = área transversal del espécimen

L = longitud del espécimen

R_e = Resistencia = E/I ohms

CINVESTAV Unidad Mérida

Metodología

Resistividad en probetas de laboratorio

Metodología

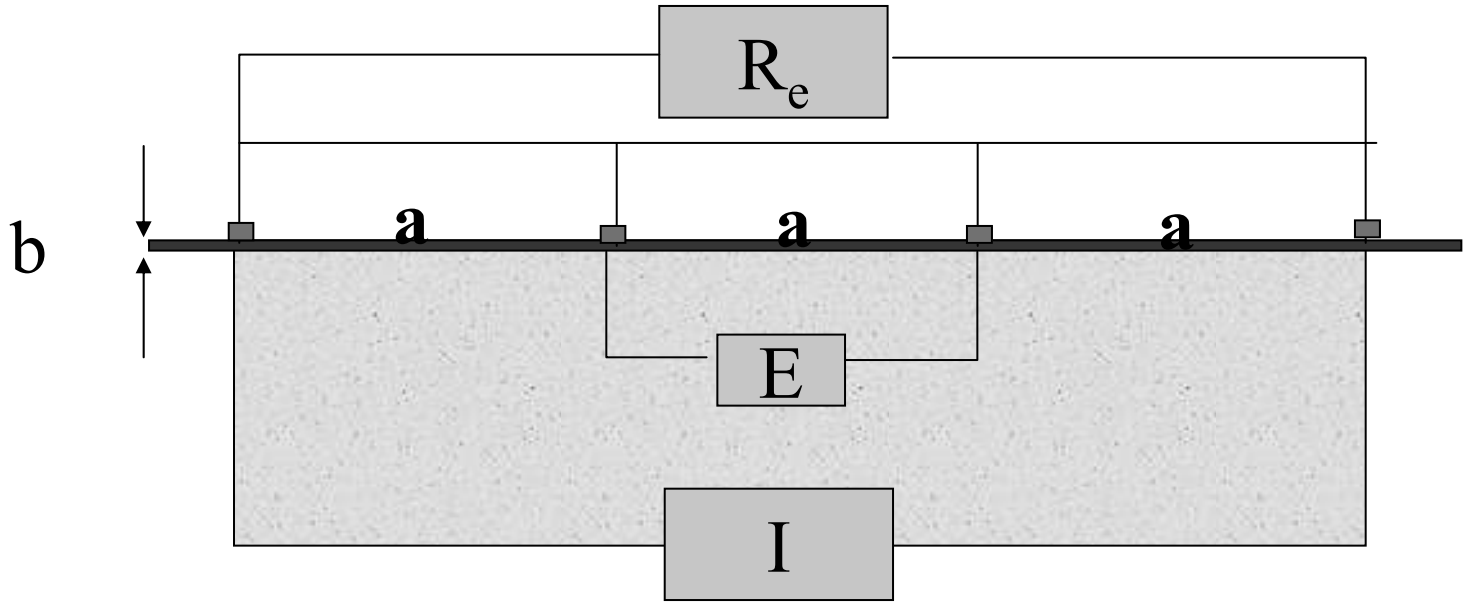
Resistividad “in situ”

Método de Wenner (ASTM G57-84)

- Puntas de los pines prehumedecidas
- Terminales alineadas
- Espaciado uniforme (a)
- Profundidad (b)< (a) o no exceder el valor de (a) en un 5%.

Metodología

Resistividad “in situ”



Esquema del arreglo de Wenner

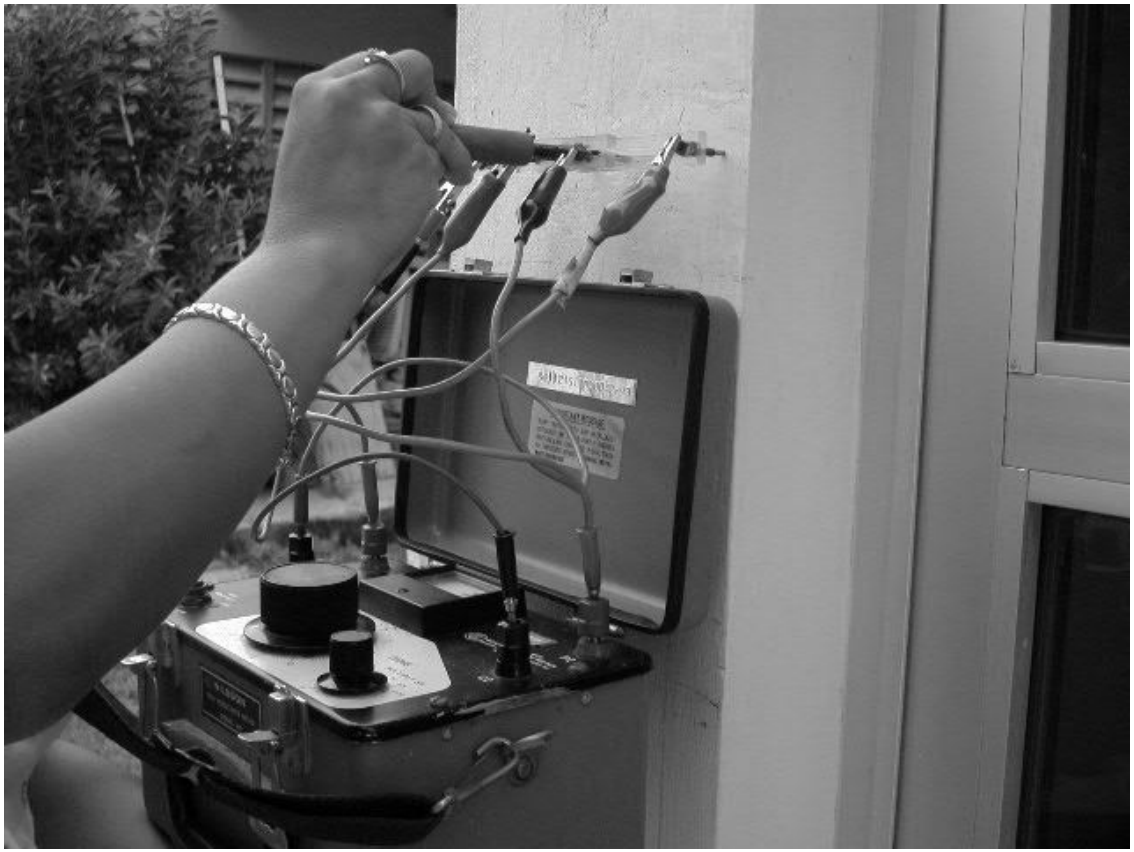
La resistividad se calcula como:

$$\rho = 2\pi a R_e \text{ ohm-cm (ohm-m)}$$

CINVESTAV Unidad Mérida

Metodología

Resistividad “in situ”



Ejemplo de la medición de la resistividad “in situ”

Metodología

Criterios de evaluación:

Resistividad del concreto

Resistividad KΩ - cm	Velocidad de corrosión
< 5	Muy alto
5 – 10	Alto
10 – 20	Moderado bajo
> 20	Bajo

S.G. Millard, “Corrosion rate measurement of in-situ reinforced concrete structures”, Proc. Instn Civ. Engrs. Structs & Bldgs, 1993, 99, Feb., 84-88.

Metodología

1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Metodología

Ultrasonido:

Este ensayo no destructivo tiene como principales objetivos:

a) Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del concreto.

b) Detectar las fallas internas (presencia de vacíos), profundidad de fisuras y otras imperfecciones.

c) Monitorear las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

Metodología

Ultrasonido:

Definición:

Velocidad de pulso: La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que trata en recorrerla.

Metodología

Ultrasonido:

Equipos y Materiales:

- Pacómetro
- Acoplante (silicona, vaselina).
- Equipo comercial de ultrasonido.

Procedimiento

Determinar Grado de Homogeneidad del Concreto

↓

Preparar testigos o zonas de ensayo

↓

Calibrar el ensayo

↓

Colocar y presionar transductores a zona de ensayo

↓

Calcular v = l/t

↓

Análisis Estadístico

↓

Registro

Metodología

Ultrasonido:

Procedimiento

1. Especímenes o zonas de ensayo.
    - Superficie plana y lisa.
    - Limpia
    - No carbonatada.
    - Homogénea

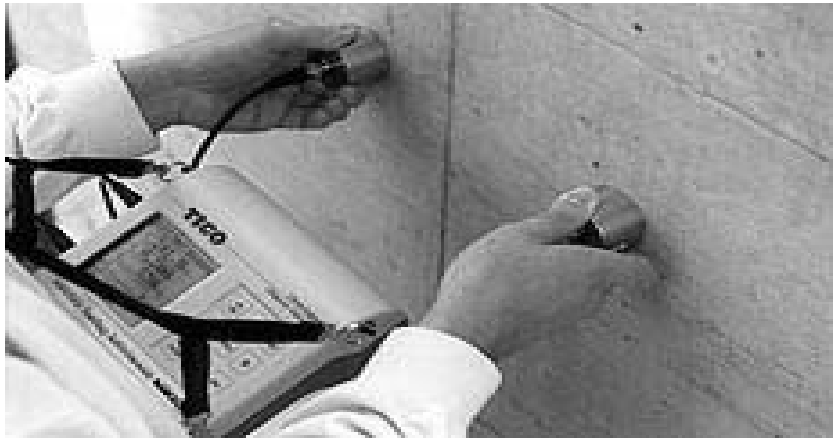
2. Calibración.
    - Transmisión directa con los transductores en las caras opuestas.
    - Transmisión indirecta, transductores en la misma cara.
    - Transmisión semidirecta, transductores en las caras adyacentes.

Metodología

Ultrasonido:

Procedimiento

3. Colocar y presionar los transductores.
    - Variación mínima del 1%



Metodología

Ultrasonido:

Procedimiento

4. Calcular la velocidad de propagación de ondas:

$$v = l/t$$

Donde:

v = Velocidad de propagación (m/s).

l = Distancia entre los puntos de acoplamiento.

t = Tiempo de recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.

Metodología

Ultrasonido:

Información de los resultados

- Localización de la estructura e identificación de la zona de ensayo.
- Distancia entre las superficies de contacto de los transductores.
- Dirección de la propagación de onda.
- Indicación de la posición relativa de los transductores.
- Velocidad de propagación.

Metodología

Ultrasonido:

Criterios de evaluación.

Existen varios criterios, uno de ellos puede ser:

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del concreto
< 2000	Deficiente
2001 a 3000	Normal
3001 a 4000	Alta
> 4000	Durable

Manual de inspección , evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, (Manual DURAR, p 134)

Metodología

1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Metodología

Esclerometría:

Tiene como objetivo evaluar la dureza superficial del hormigón mediante el uso del esclerómetro de reflexión sin tener que destruirlo.

Definición:

El índice esclerométrico **(IE)** es el valor obtenido a través de un impacto del esclerómetro de reflexión sobre un área de ensayo, medido como el número de rebote del martillo

Metodología

Esclerometría:

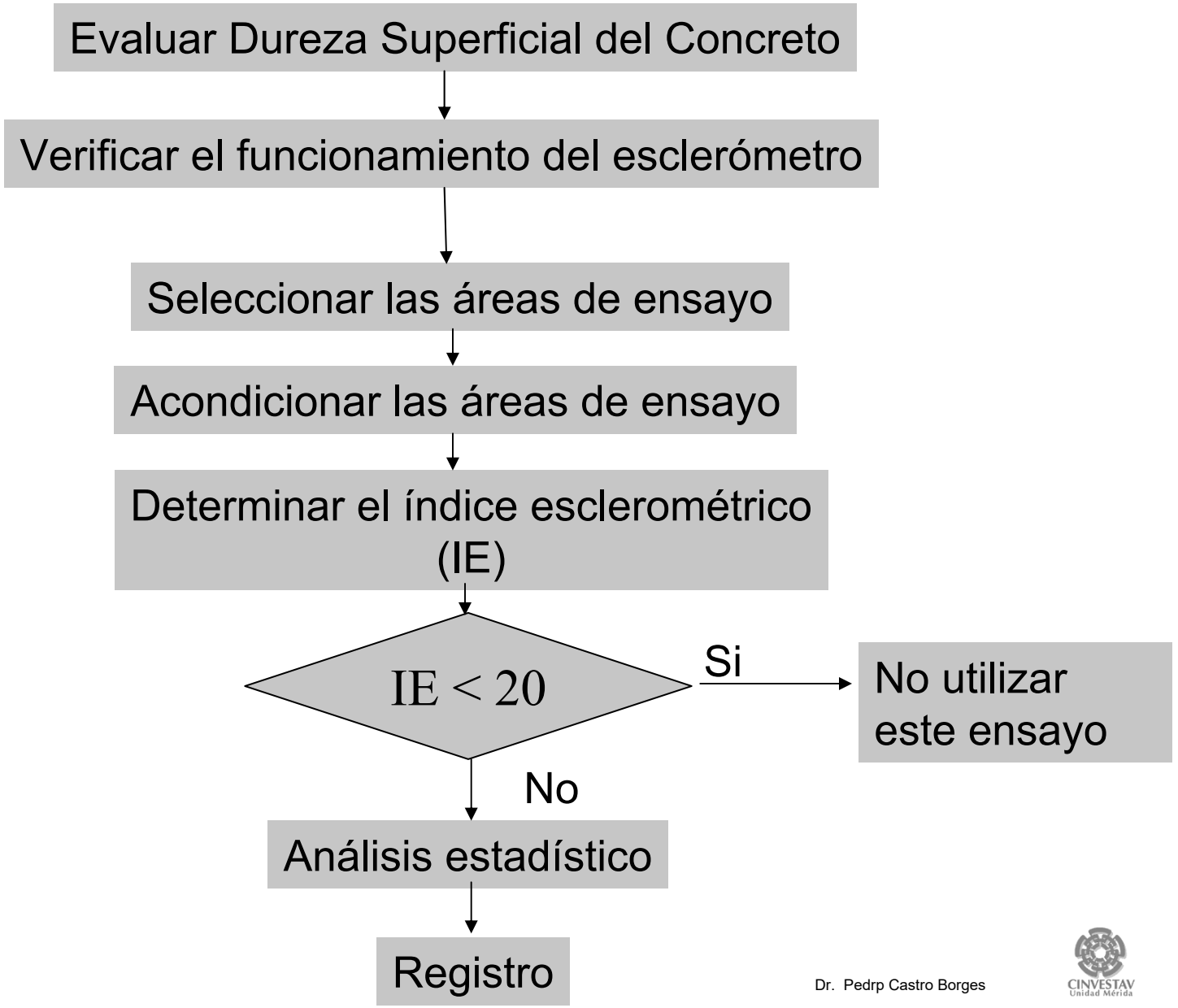
Equipos y materiales:

- Esclerómetro de reflexión.
- Disco o piedra abrasiva.

Campo de aplicación:

- ✓ Determinación de la uniformidad de la dureza superficial del concreto
- ✓ Comparación de concretos como una referencia.
- ✓ Estimación de la resistencia a la compresión.

Procedimiento



Metodología

Esclerometría:

Funcionamiento:

El esclerómetro debe ser verificados antes de su utilización o cada 300 impactos realizados en una misma inspección.

Metodología

Esclerometría:

Áreas de ensayo:

- Caras verticales.
- Alejadas de regiones afectadas por segregación, exudación, concentración excesivas de acero, juntas.
- Alejadas por lo menos 60mm de los cantos o aristas.
- Superficie entre 81 cm^2 (9x9 cm) y 400 cm^2 (20x20 cm)

Metodología

Esclerometría:

Acondicionamiento de áreas de ensayo:

- Secas
- Limpias.
- Planas.
- No carbonatadas.

Metodología

Esclerometría*:*

Realización de la prueba:

- Mínimo 9 impactos por área.
- Evitar impactos sobre agregados y acero
- No más de un impacto por punto.
- Distancia mínima entre impactos de 30 mm.

Metodología

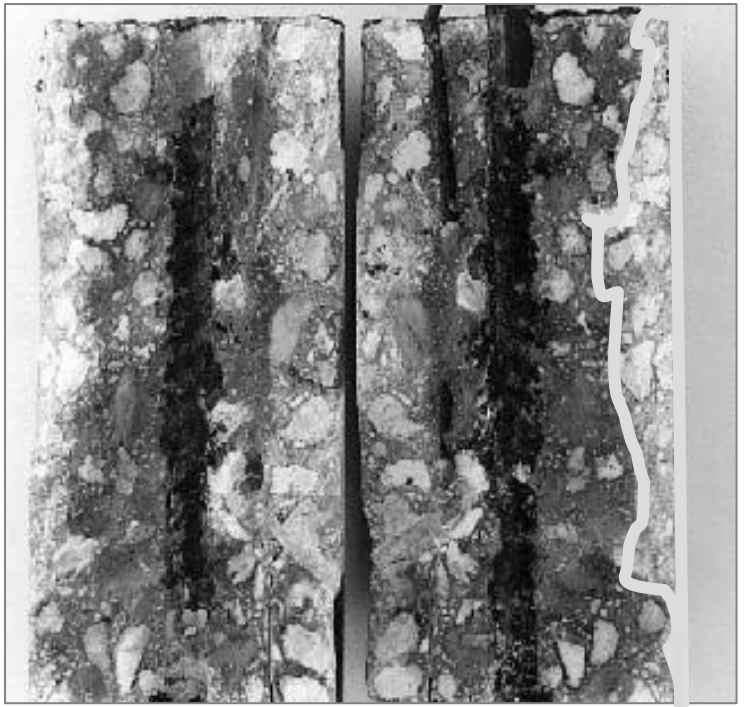
1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Carbonatación

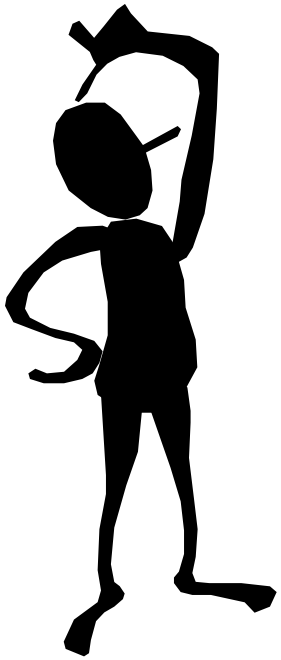
Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material; produciéndose una cambio abrupto del pH generando la aparición de un frente carbonatado, que se revela con el indicador de fenoltafleína[1].



Frente carbontado

1 Manual de inspección , evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, (Manual DURAR, p. 42)

¿Cómo se mide la carbonatación?

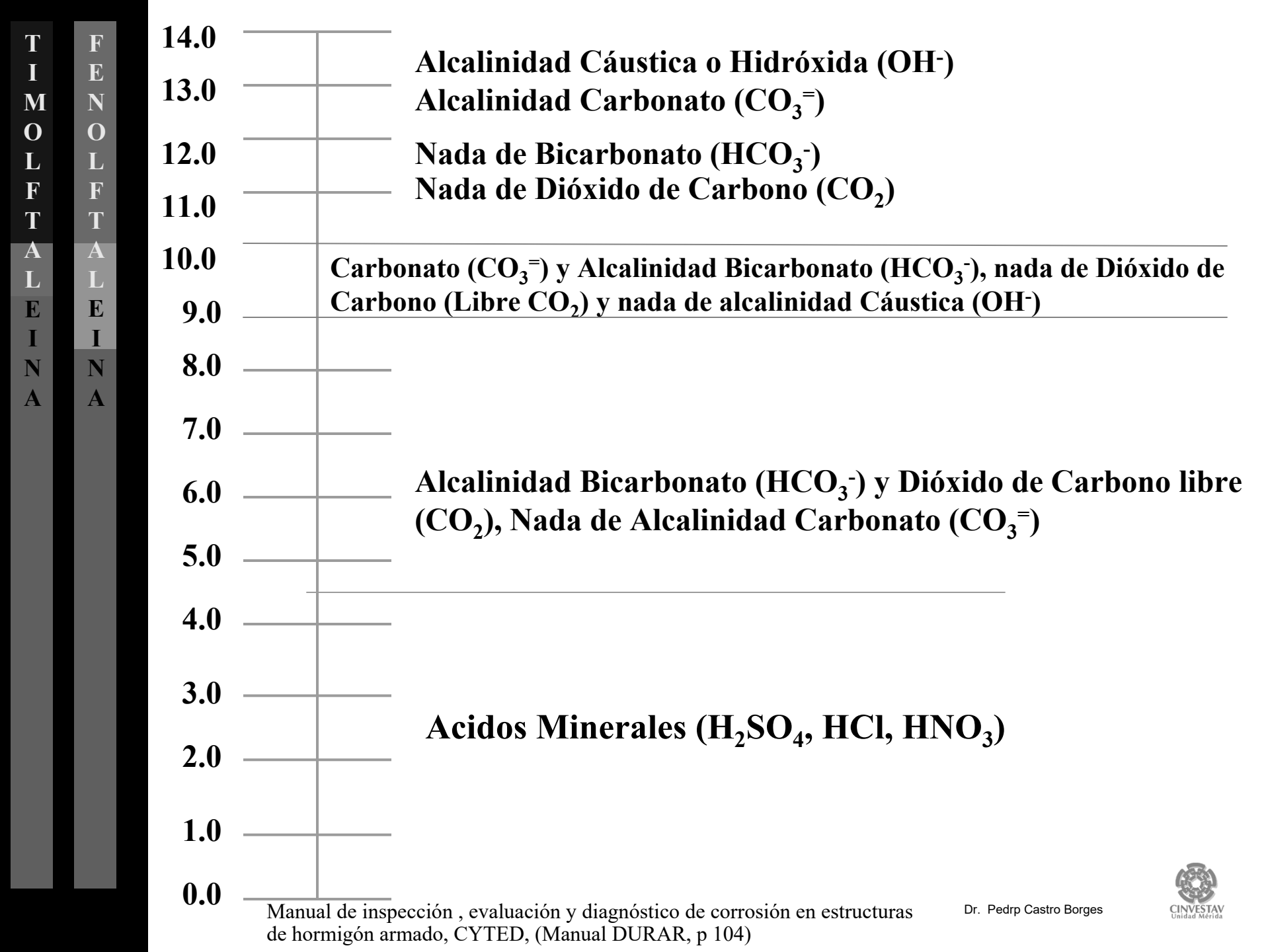


Criterios de Evaluación

1. **Nivel del pH**. En función del indicador ácido – base seleccionado se establecerá el pH de **frente incoloro** en la muestra.

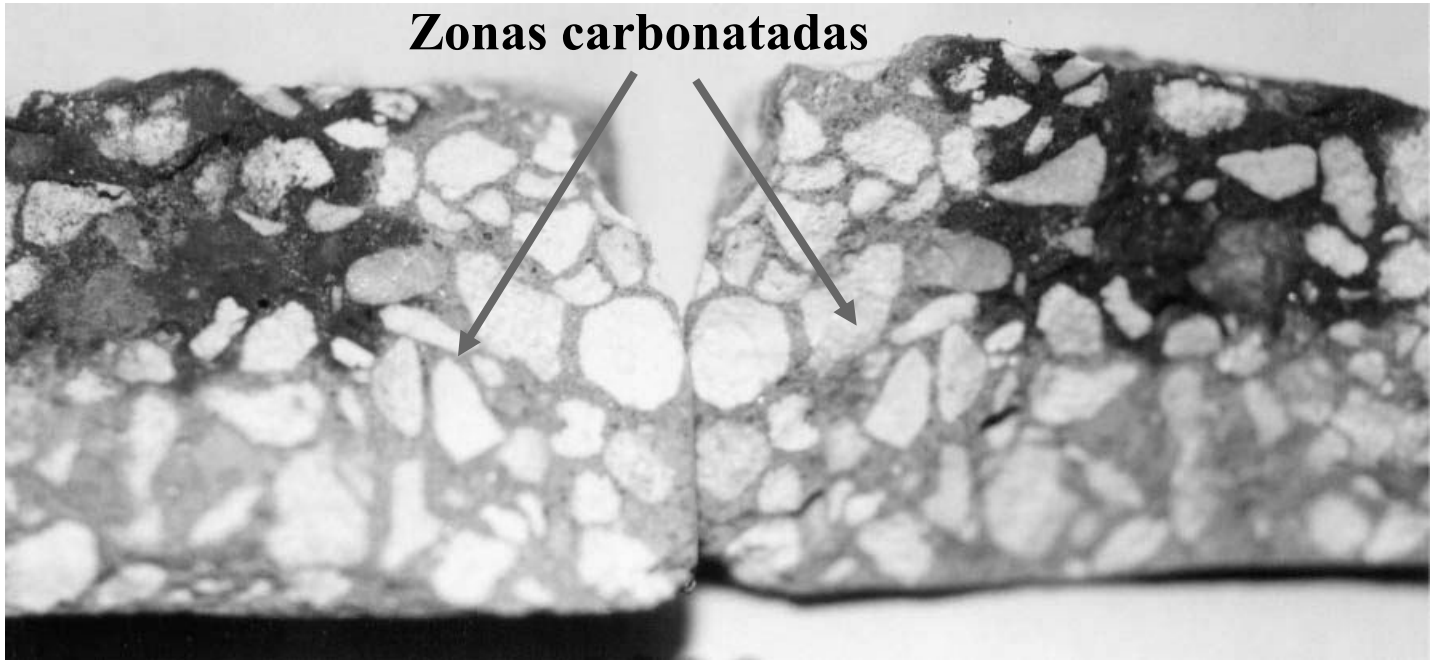
    - **Fenolftaleína**, es el indicador más utilizado y su rango de viraje está entre pH 8.2 y pH 9.8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

    - **Timolftaleína,** su rango de viraje está entre pH 9.3 y pH 10.5 con tonalidades de incolora a azul.

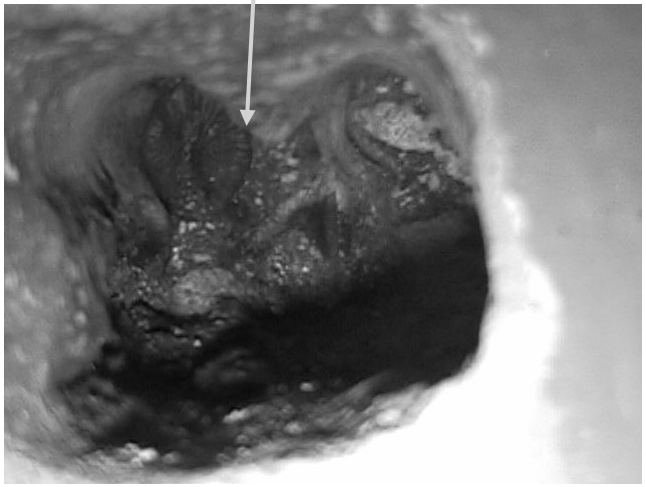


Manual de inspección , evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, (Manual DURAR, p 104)

Carbonatación



Zonas no carbonatadas



Criterios de Evaluación

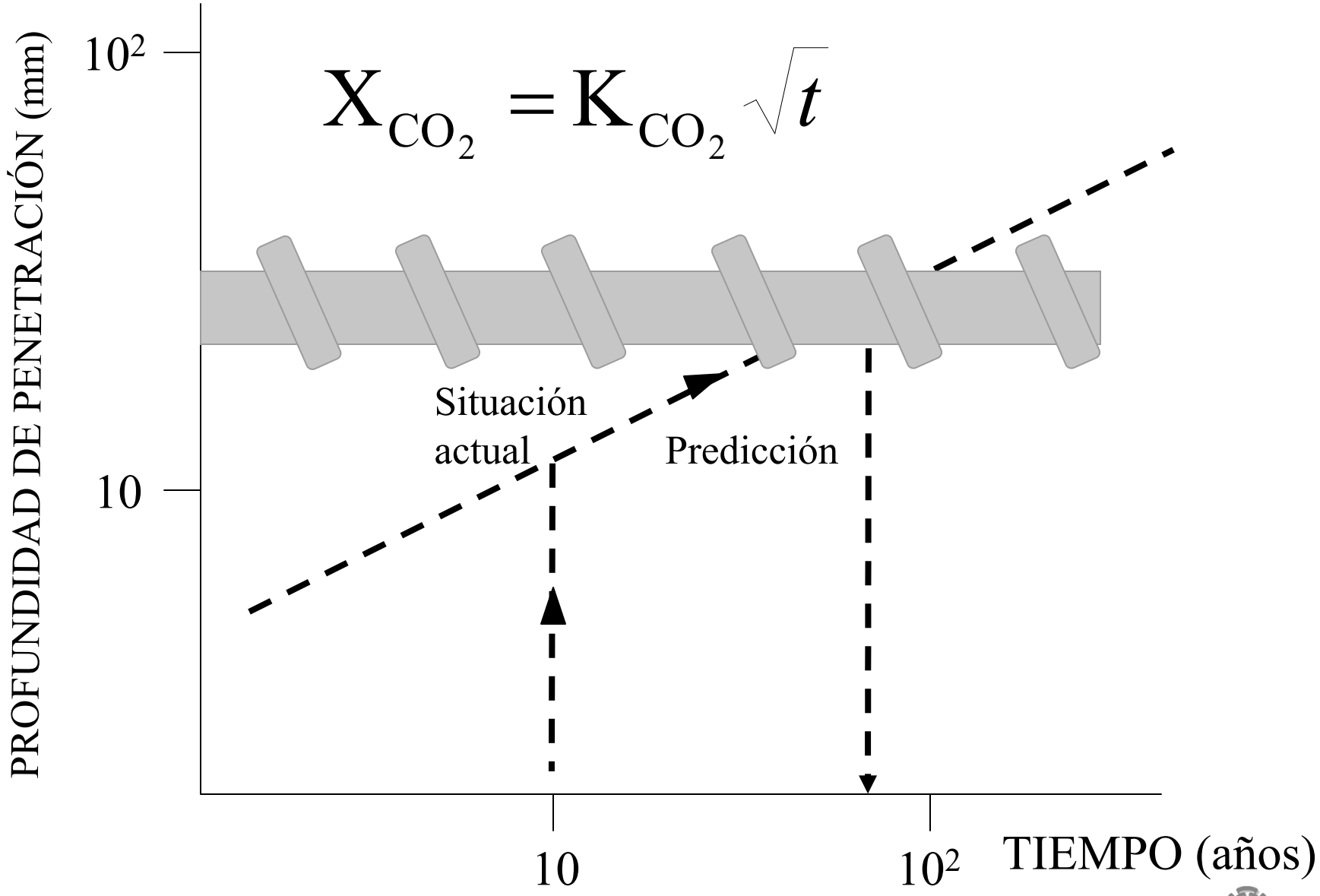
2. **Cálculo de la velocidad de carbonatación**. La velocidad de carbonatación del concreto armado es la que relaciona la profundidad de la carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$X_{CO_2} = \overset{X_{CO}}{K}_{CO_2} \sqrt{t}$$

X_{CO2} = Profundidad de carbonatación, mm

K_{CO2} = Constante de carbonatación, mm.año$^{-0.5}$

t = Tiempo en años



Dr. Pedrp Castro Borges

Carbonatación en clima tropical húmedo. Metodología

Constante de carbonatación K

Con la profundidad de carbonatación, se calcula la constante K

$$X = K\sqrt{t}$$

Valores típicos de K para diferentes calidades de concreto.

Calidad del concreto	Concreto pobre	Concreto promedio	Concreto bueno
K (mm/año$^{0.5}$)	> 9	9 > K > 6	< 6

P. Castro, M.A. Sanjuán, J. Genescá "Carbonation of Concretes in the Mexican Gulf", Building and Environment pp. 145-149

CINVESTAV Unidad Mérida

Metodología

1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Metodología

Concentración de cloruros:

- Determinación de la concentración de los cloruros totales y libres, presentes en la masa del concreto a diferentes niveles de profundidad,

- Cálculo del coeficiente de difusión aparente

- Velocidad de penetración del mismo en el tiempo.

Metodología

Concentración de cloruros:

Definiciones:

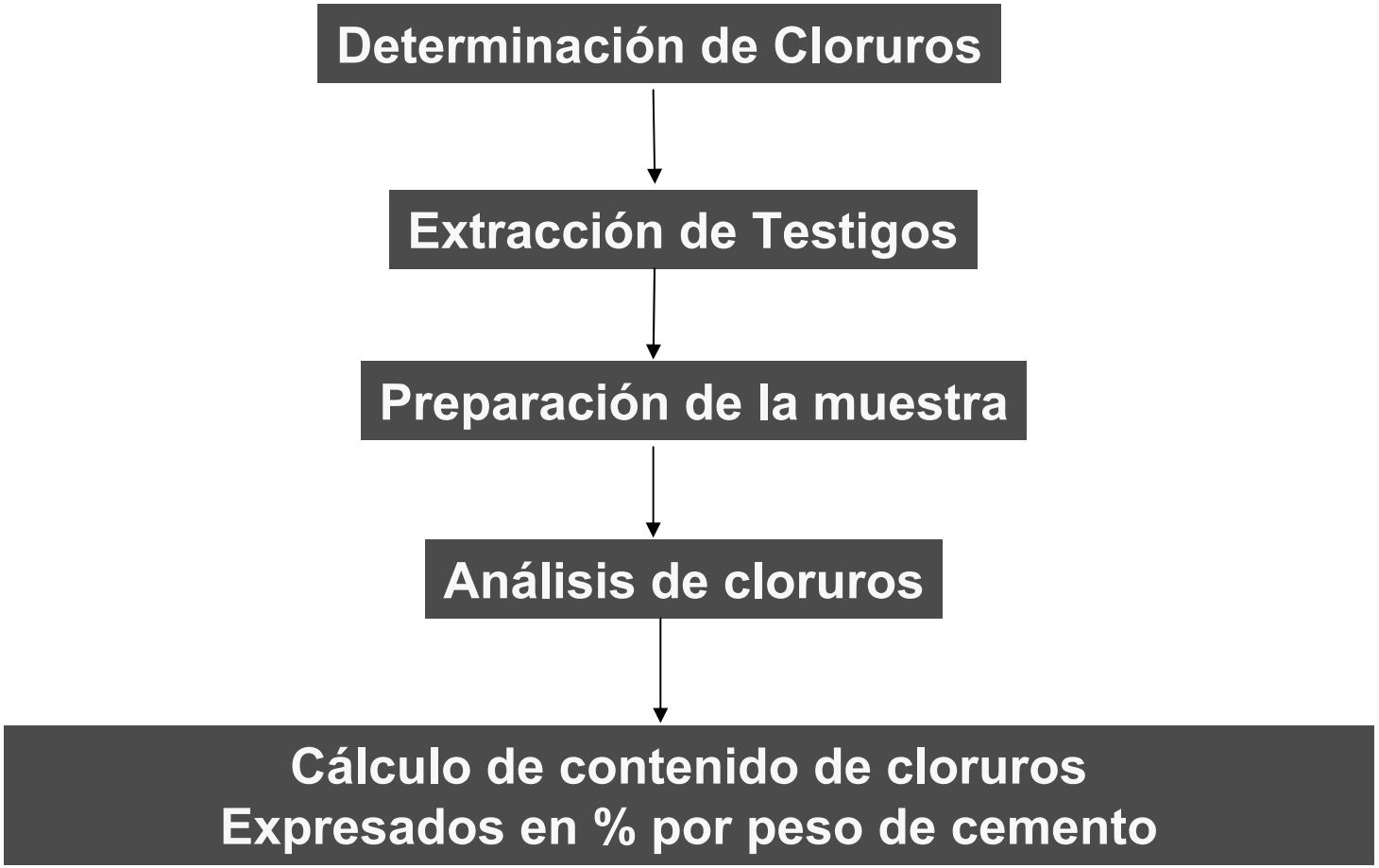
Cloruro libre: Son los solubles en agua y éstos son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo al alcanzar niveles críticos y causar su despasivación.

Cloruro enlazado: Este es el cloruro combinado a las diferentes fases o compuestos de la pasta de cemento, de los cuales el principal es el aluminato tricálcico.

Cloruros totales: Es la sumatoria del cloruro enlazado y el cloruro libre.

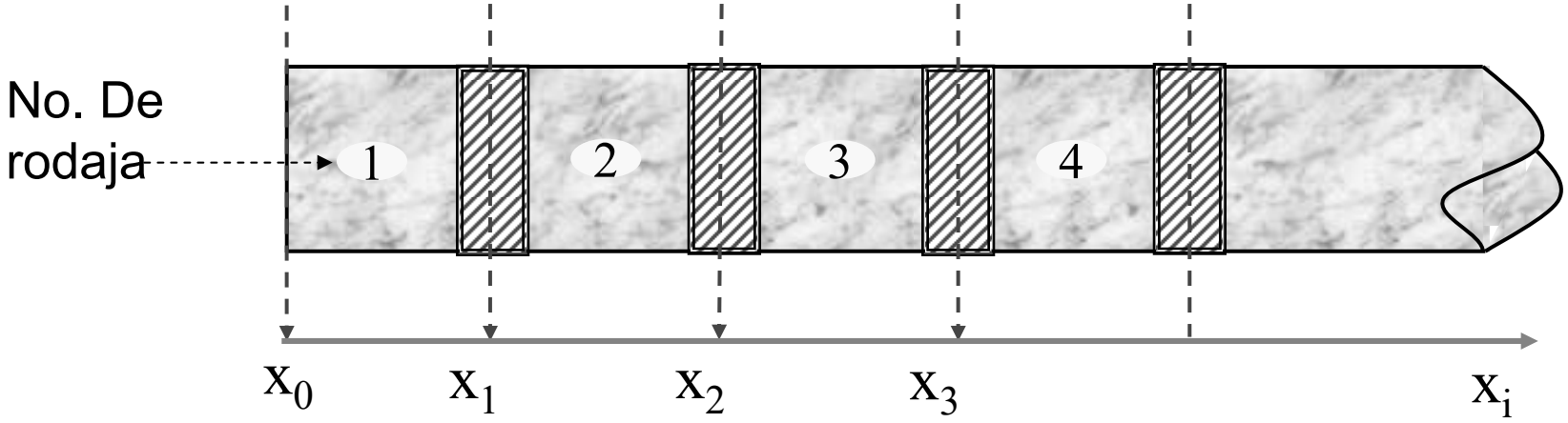
Coeficiente de difusión aparente (Dap): Coeficiente obtenido por ajuste de una ecuación al perfil de cloruros determinado en el concreto.

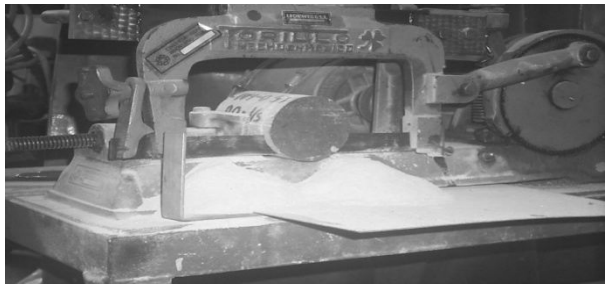
Procedimiento



Metodología

Preparación de la muestra





Metodología

Análisis la muestra

- Cloruros totales - ASTM C-1152.
- Cloruros solubles - ASTM C-1411

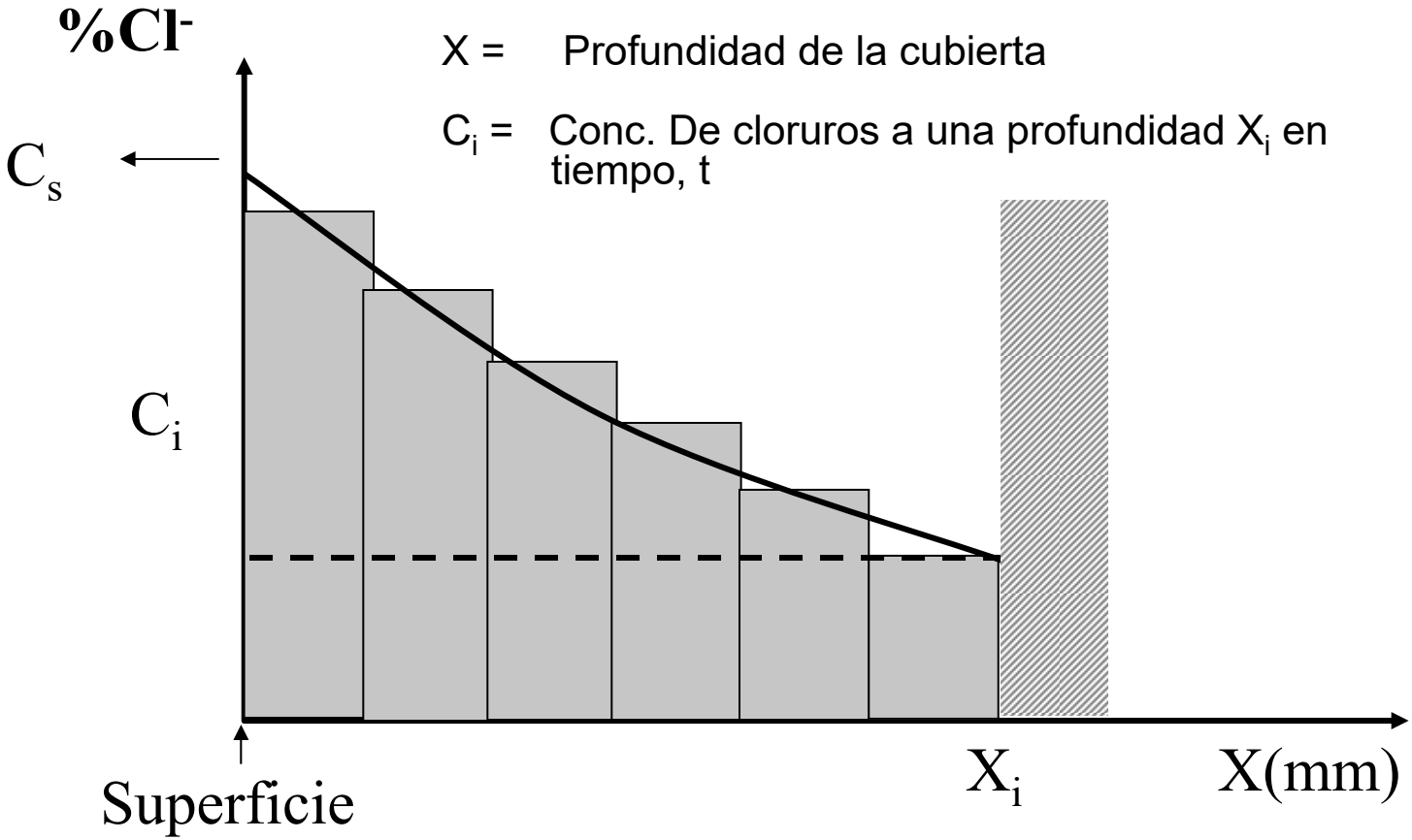
Metodología

Cálculo de Cloruros

C_s= Concentración superficial de Cl por interpolación gráfica.

X = Profundidad de la cubierta

C_i = Conc. De cloruros a una profundidad X_i en tiempo, t



Perfil de cloruros

Criterios de Evaluación

W/C ratio	Rango del umbral de cloruros usando i_{corr}* (% por peso de cemento)	Promedio del umbral de cloruros usando i_{corr}* (% por peso de cemento)	Rango del umbral de cloruros usando i_{med} (% por peso de cemento)	Promedio del umbral de cloruros usando i_{med} (% por peso de cemento)
0.46	0.38 – 0.54	0.46	1.06 – 1.98	1.52
0.53	0.55 – 0.79	**0.67**	2.00 – 4.26	**3.13**
0.59	0.52 – 0.68	**0.60**	1.12 – 1.63	**1.37**
0.70	0.35 – 0.47	**0.41**	0.52 – 0.80	**0.66**
0.76	0.35 – 0.49	**0.42**	0.43 – 0.66	**0.54**

P. Castro, "The Chloride Threshold for Corrosion onset of Reinforced Concrete in two Tropical Marine Micro-Climates of Yucatán, México. Proceedings Third International Conference on Concrete under Severe Conditions, Edited by N.Banthia, Et al., The University o British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.

Metodología

1. **Evaluación de la calidad del concreto:**

   A. Ensayos a realizar

   - Resistividad
   - Ultrasonido
   - Esclerometría
   - Profundidad de carbonatación
   - Concentración de cloruros
   - Porosidad.

Metodología

Porosidad

Objetivo:

Determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de su compacidad

Definiciones:

Como porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de concretos y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación.

Metodología

Porosidad

- Poros de gel:
  - Tamaño <15-25Å
  - Espacios intersticiales del gel de cemento.
  - Intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades < 20%.

- Poros capilares:
  - Forma y tamaño variable (2nm a 1μm)
  - Interconectados y abiertos al exterior.
  - Pastas permeables y vulnerables a los agentes externos.

- Poros de aire.
  - Burbujas de aire atrapadas.
  - No están interconectados.
  - Dimensiones mayores de 0.05mm
  - Efecto benéfico en la durabilidad.

Metodología

Porosidad

Absorción capilar:

Se considera a la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el hormigón se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agresivos ambientales.

Equipos y materiales:

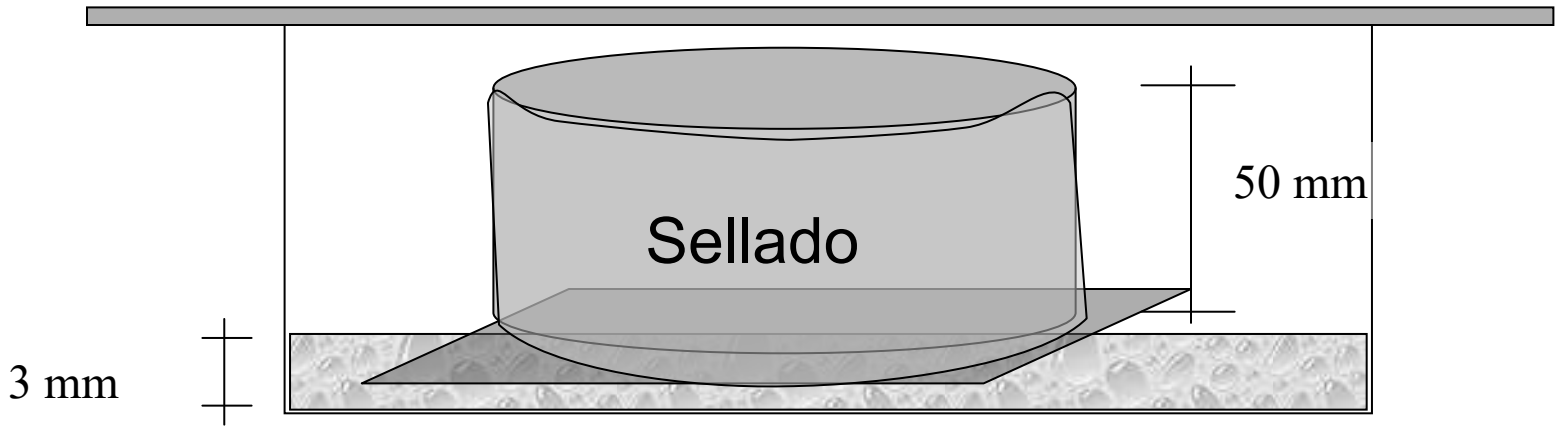
- Estufa
- Cubeta de fondo plano y con tapa
- Esponja
- Resina epoxi o parafina
- Balanza
- Especímenes de ensayo

Procedimiento

Metodología

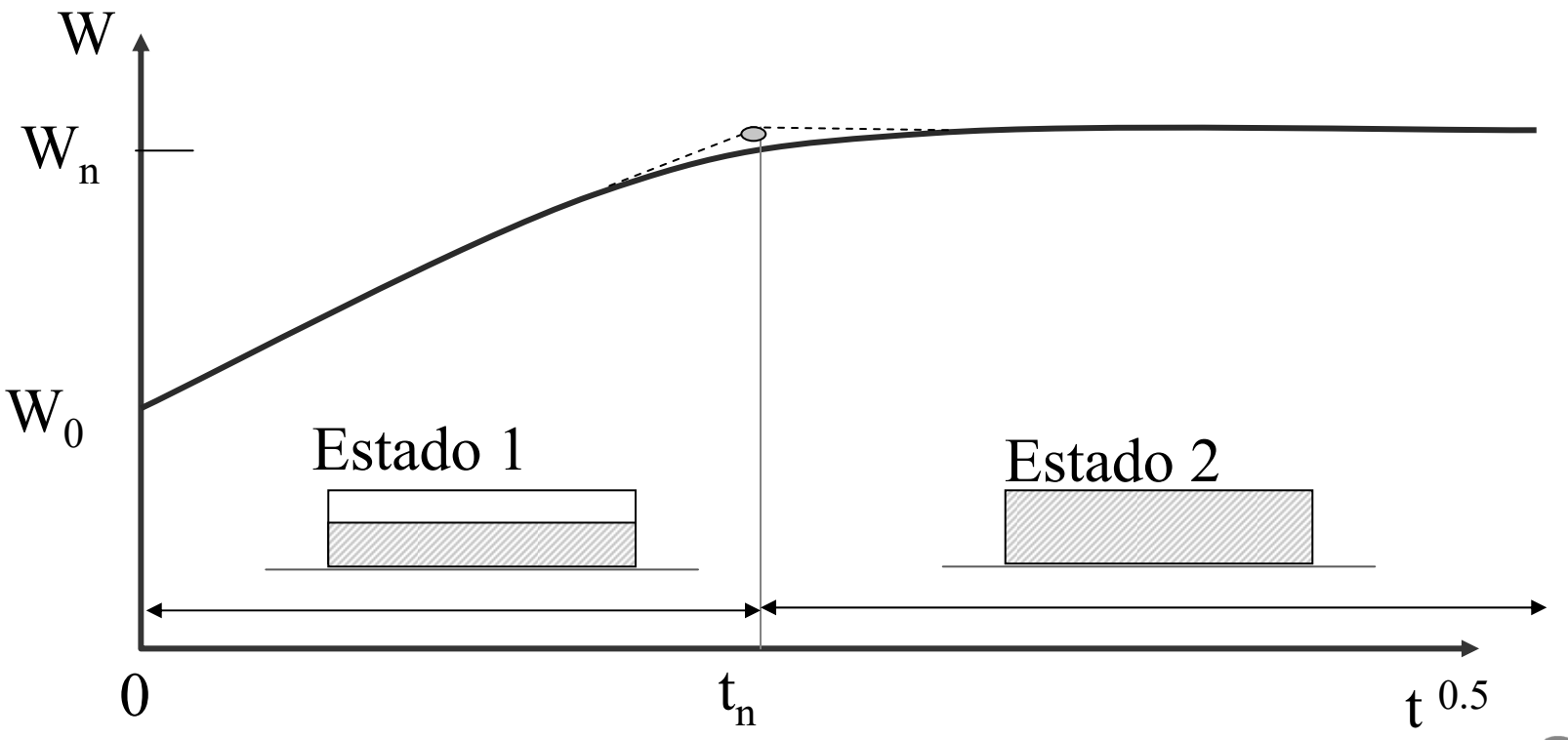
Preparación de testigos:

- Especímenes con espesor (H) $\leq$ 50 mm
- Sellado de las caras laterales
- Pre-acondicionamiento de secado a 50ºC por 48 horas (hasta peso constante).
- Enfriamiento en un desecador.
- Registro de peso inicial W_0
- Colocación de la muestra.



Metodología

El cambio de peso ($W_t - W_0$) de la probeta por unidad de área expuesta del espcímenes (A) se registrar a intervalos de 1/12, 1/6, 1/4, ½, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48 ... horas.



Curva típica de absorción de agua

Metodología

Se calculan los siguientes coeficientes:

Resistencia a la penetración del agua ***(m)***:

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\mathrm{s/m^2})$$

Donde: z = profundidad de penetración
t = tiempo.

Coeficiente de absorción capilar ***(k)***:

$$k = \frac{(W_t - W_0) / A}{\sqrt{t}} \quad (\mathrm{kg/m^2 s^{0.5}})$$

Porosidad efectiva ***(ε_e)***:

$$\varepsilon_e = \frac{k \sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$

Metodología

2. Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo.

   - Localización del acero
   - Mediciones de potenciales
   - Estimación de las velocidades de corrosión.

Metodología

Localización del acero.

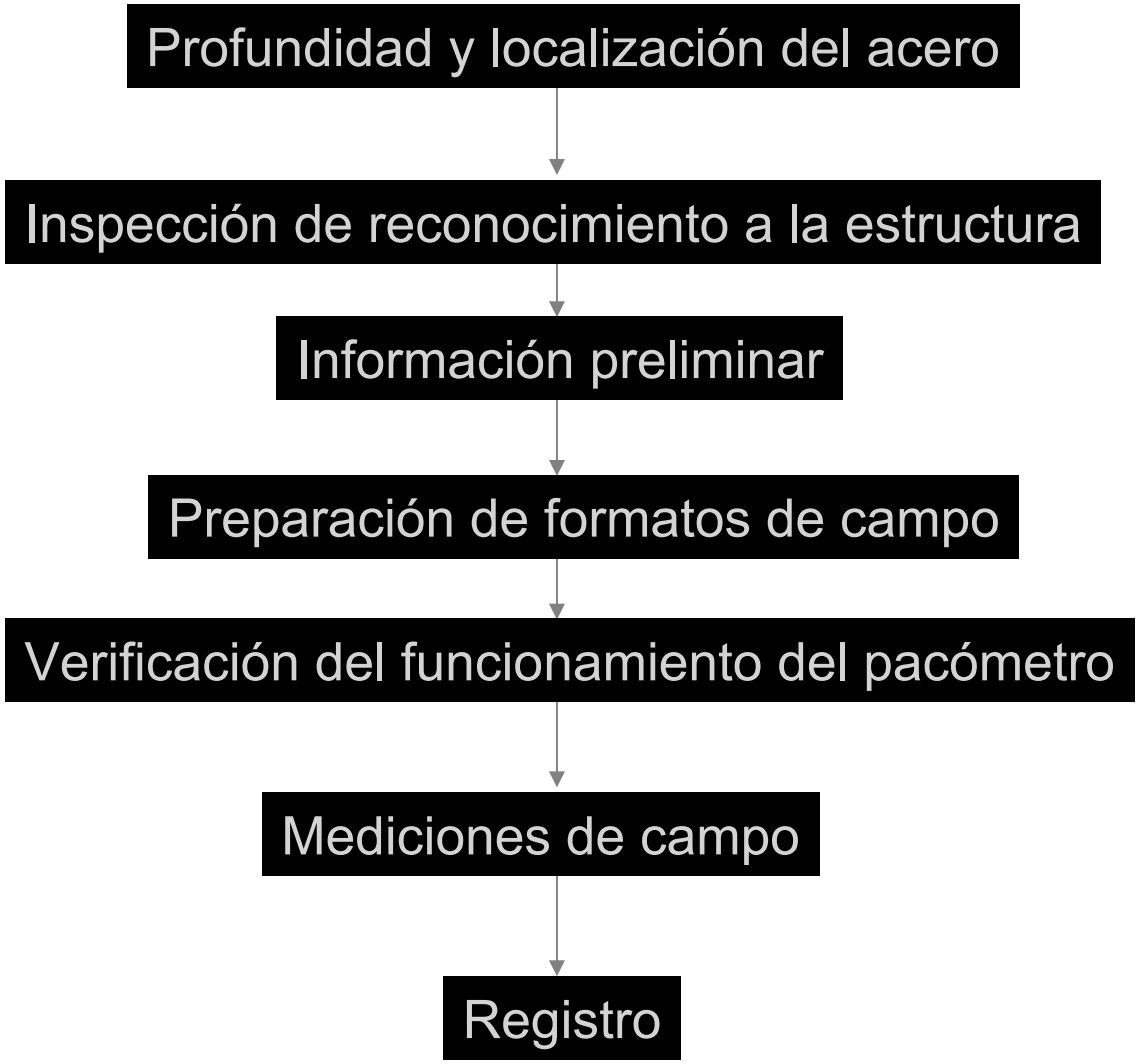
Objetivo:

Definir la ubicación del acero embebido en el concreto armado y determinar la profundidad de éste desde la cara exterior del elemento.

Equipos y materiales

1. Pacómetro
2. Regla metálica de 2m
3. Marcador indeleble
4. Formatos para información de campo.

Procedimiento



Metodología

Procedimiento

a) Información preliminar.
   - Planos definitivos
   - Diámetros de las barras
   - Espesor del recubrimiento.
   - Otros elementos metálicos embebidos..

b) Localización del acero.

Metodología

Procedimiento

Localización del acero

Metodología

Procedimiento

Elaboración de la retícula

Metodología

2. Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo.

   - Localización del acero
   - Mediciones de potenciales
   - Estimación de las velocidades de corrosión.

Metodología

Medición de potenciales

Objetivo:

Medir el potencial del acero del concreto mediante el uso de electrodos de referencia.

Definiciones:

Potencial electroquímico: Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto.

Mapa de potenciales: Son líneas de isopotencial que se dibujan sobre la superficie evaluada con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial.

Metodología

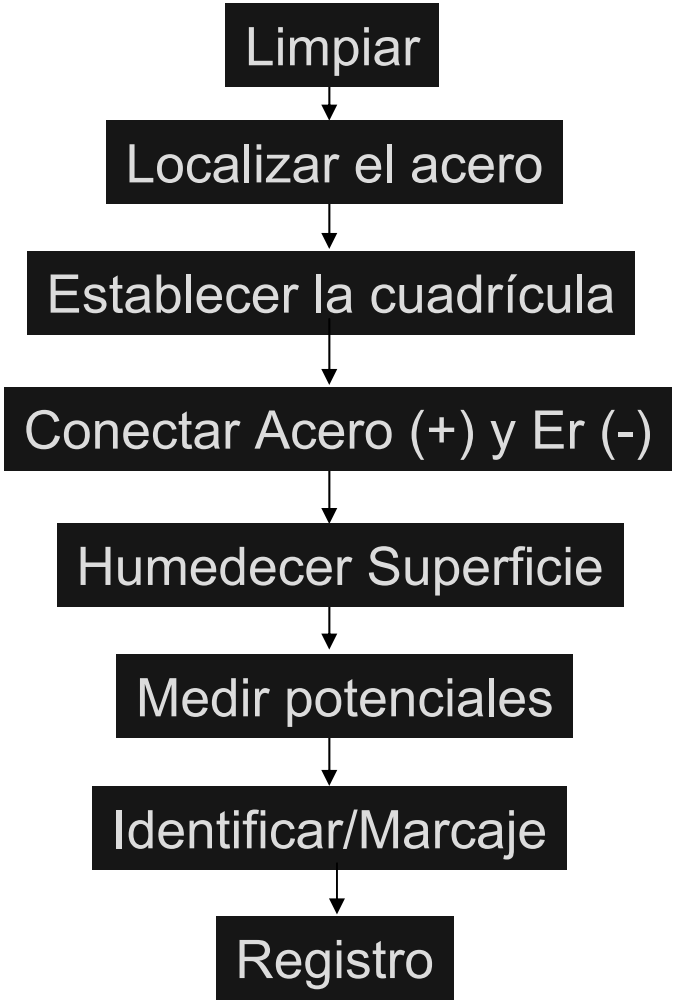
Medición de potenciales

Equipos y Materiales.

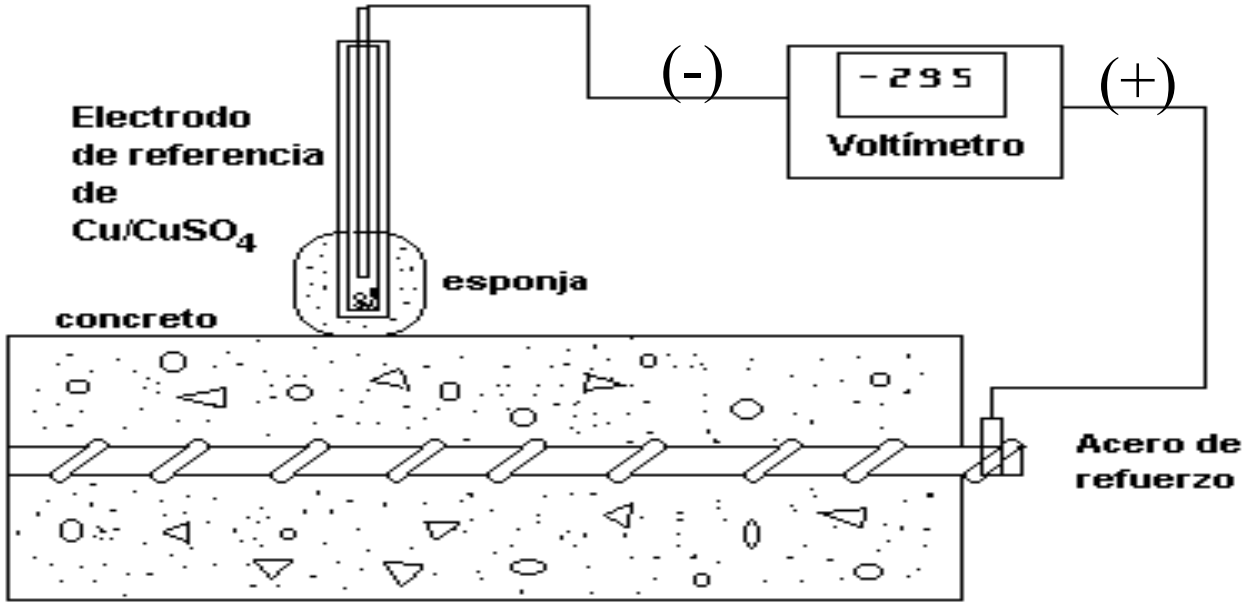
- ✓ Brocha, cepillo, lima y otras herramientas para limpieza manual/mecánica de la superficie.
- ✓ Cables y conectores.
- ✓ Esponja plana, agua potable para humedecer la superficie, etc.
- ✓ Electrodo de referencia apropiado. Ejemplo $Cu/CuSO_4$.

Procedimiento

Selección/Indicación del área de ensayo



Metodología



Circuito formado con el electrodo de referencia para medir potenciales de corrosión.

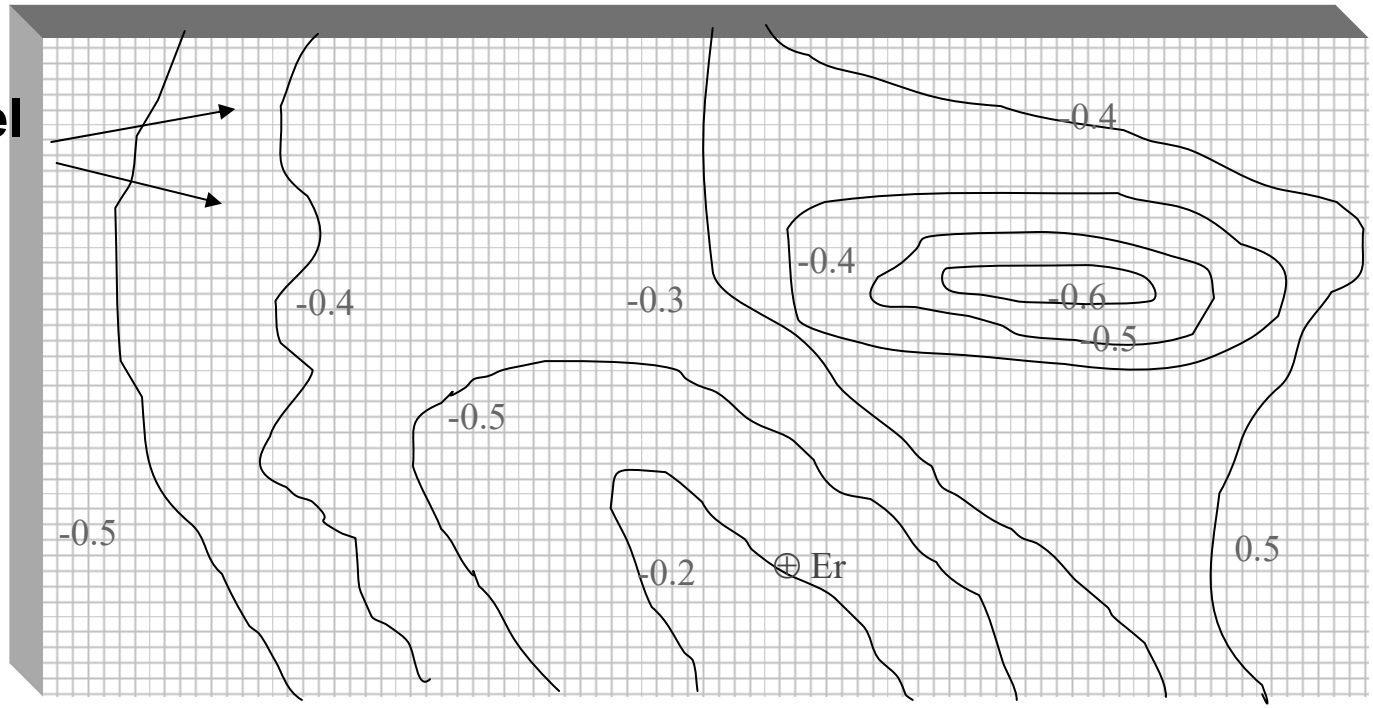
Metodología

Circuito formado con el electrodo de referencia para medir potenciales de corrosión

Metodología

Ubicación del acero de refuerzo

Sección de concreto a analizar



Er. Electrodo de referencia

Mapa de potenciales
(Líneas Isopotenciales)

Metodología

Criterios de evaluación

Potenciales de corrosión (ASTM C876).

Potencial (mV vs CSE)	Condición
Ecorr >-200	Menos del 10% de probabilidad de corrosión
-200>Ecorr>-350	Corrosión incierta
Ecorr<-350	Más del 90% de probabilidad de corrosión

Metodología

2. Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo.

   - Localización del acero
   - Mediciones de potenciales
   - Estimación de las velocidades de corrosión.

Metodología

Medida de la velocidad de Corrosión

Objetivo:

Determinar la velocidad a la cual la armadura pierde sección, por corrosión de la misma.

Definiciones:

Se llama velocidad o intensidad de corrosión (i_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 día, aunque la forma usual es en $\mu A/cm^2$, transformado a partir de la densidad del metal en unidades de penetración (mm/año).

Metodología

Medida de la velocidad de Corrosión

Equipos y materiales:

Método.

Los potenciostatos/galvanostatos son los instrumentos capaces de medir la resistencia a la polarización (Rp), que se relaciona con la i_{corr} a través de la fórmula de Stern y Geary.

$$Rp = \frac{B}{i_{corr}}$$

Donde:

B: constante (26-52 mV)

Rp: Ω-cm^2

i_{corr}: μA/cm^2

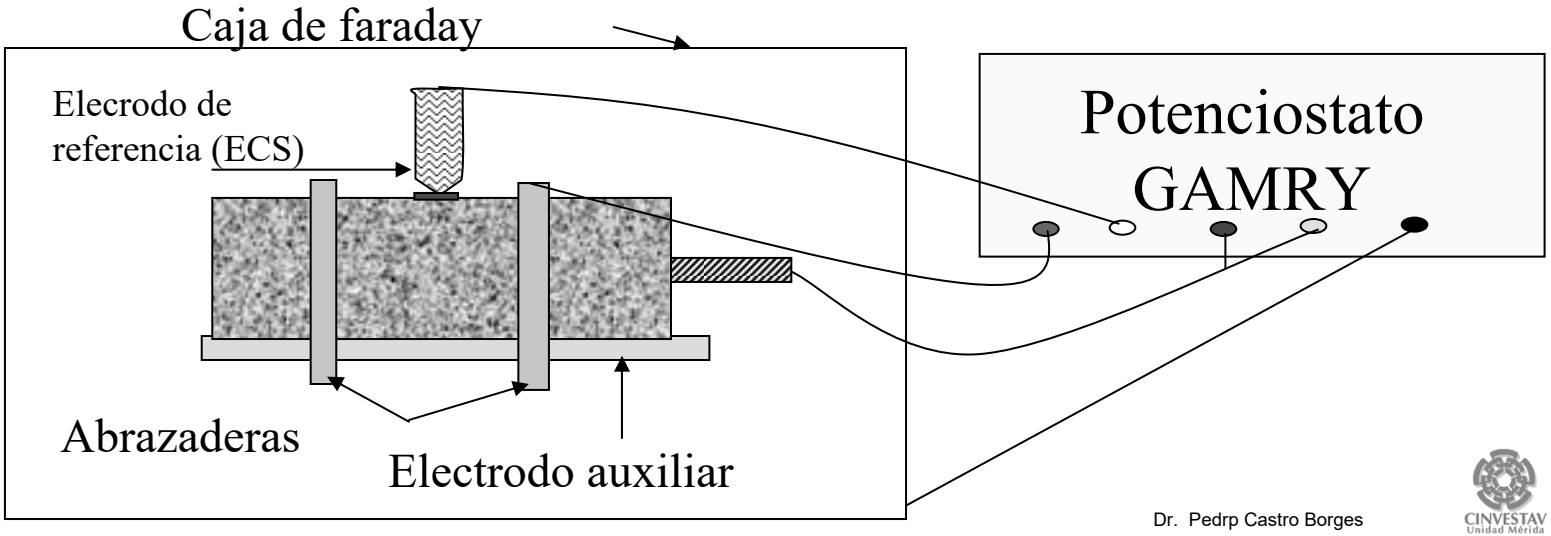
Metodología

Medida de la velocidad de Corrosión

Equipos y materiales:

La medida puede efectuarse en:

1. Probetas de pequeño tamaño y área de acero conocida.

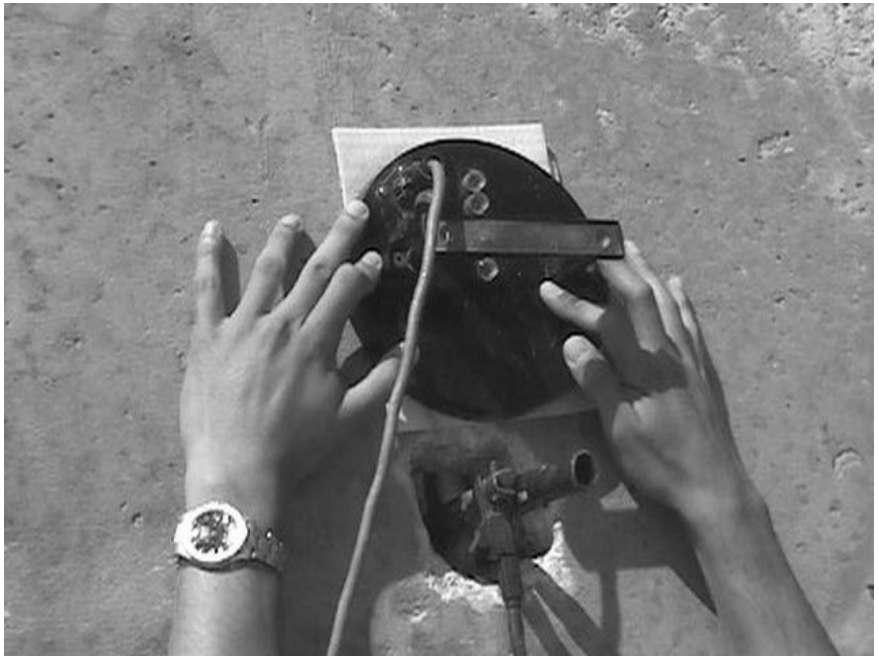


Metodología

Medida de la velocidad de Corrosión

Equipos y materiales:

2. A pie de obra usando un sensor que contiene un anillo de guarda para restringir el área de acción.



Metodología

Medida de la velocidad de Corrosión

Criterios de evaluación:

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevada
> 1	Muy elevada

Manual de inspección , evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, (Manual DURAR, p 134)

Comentarios finales

- Para poder determinar si una estructura es durable es necesario incluir evaluaciones que permitan conocer el estado del acero y del concreto.

- De ahí la importancia en considerar las pruebas químicas y electroquímicas como herramientas para dar un diagnóstico por durabilidad.

Bibliografía:

Manual de inspección , evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, (Manual DURAR, pp. 68-135)

P. Castro et al “Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones”, IMCYC, 1ª Edición, 1998, pp. 33-63.

M.A. Sanjuán, P. Castro Borges Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto, Edit. IMCYC, 1ª Ed., 2001, 46 p.

Gracias

Metodología

Secado de muestras

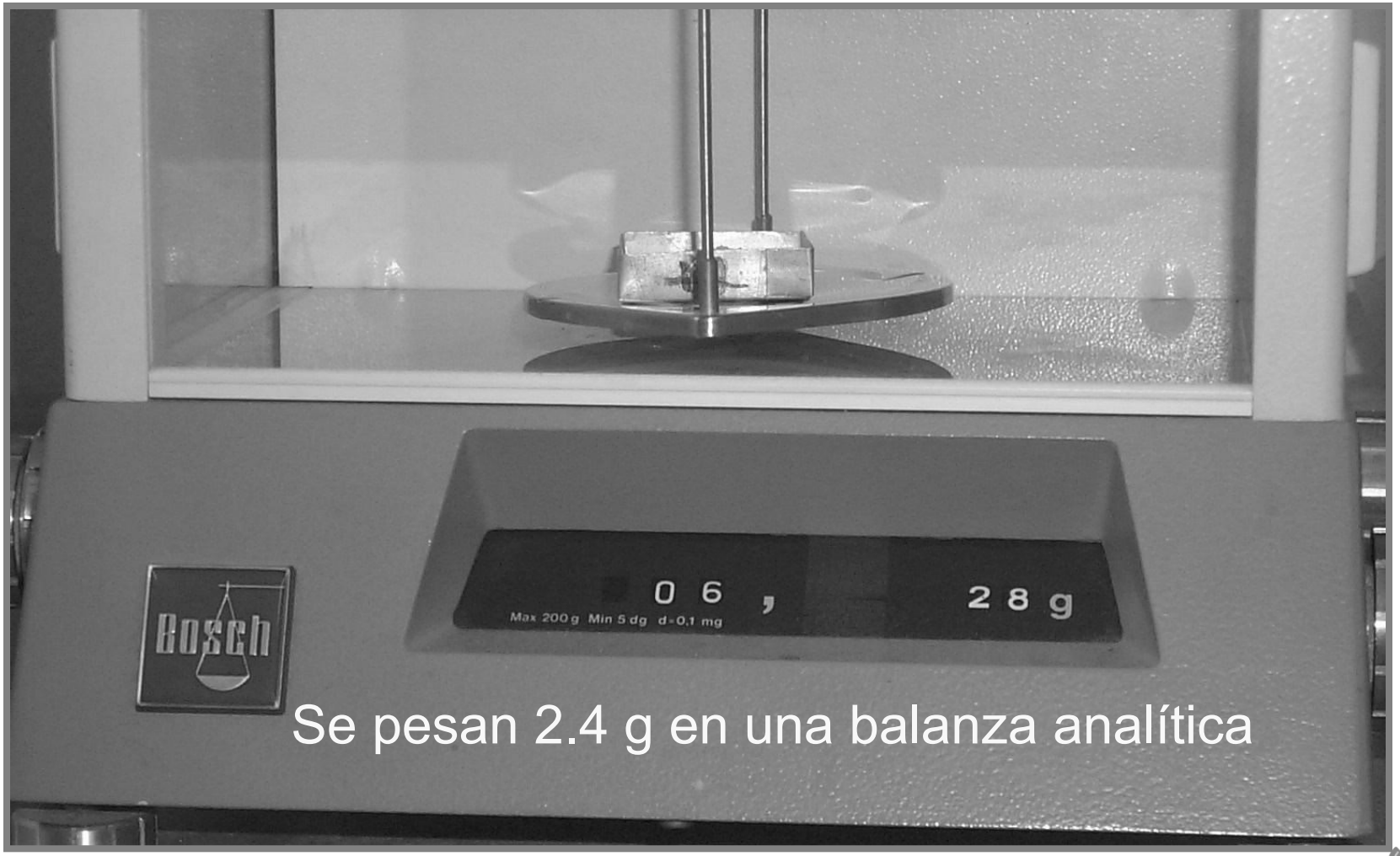
CINVESTAV
Unidad Mérida

Metodología

Enfriamiento de muestras

Metodología

Pesado de muestras



Se pesan 2.4 g en una balanza analítica

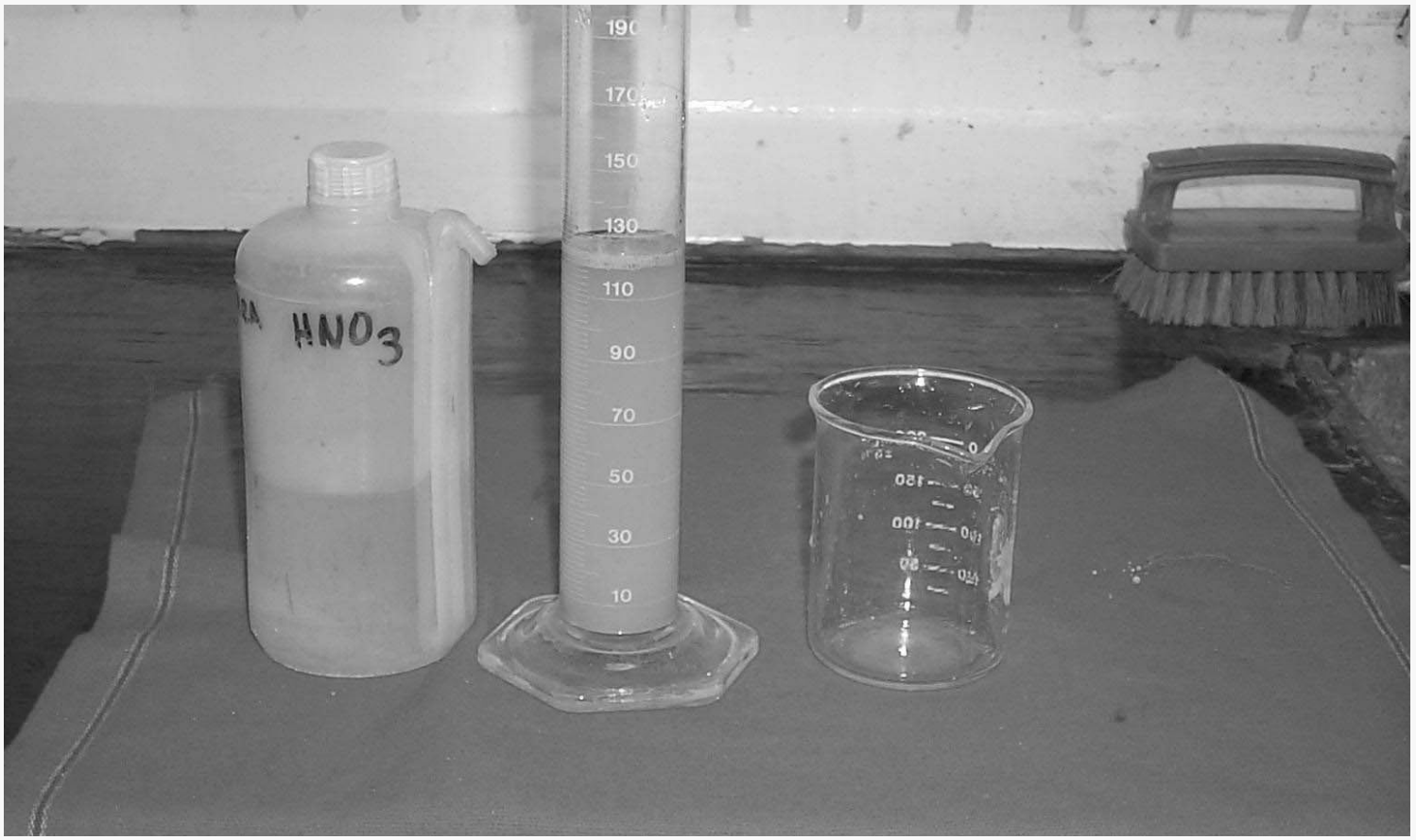
CINVESTAV
Unidad Mérida

Metodología

Agitación de muestras

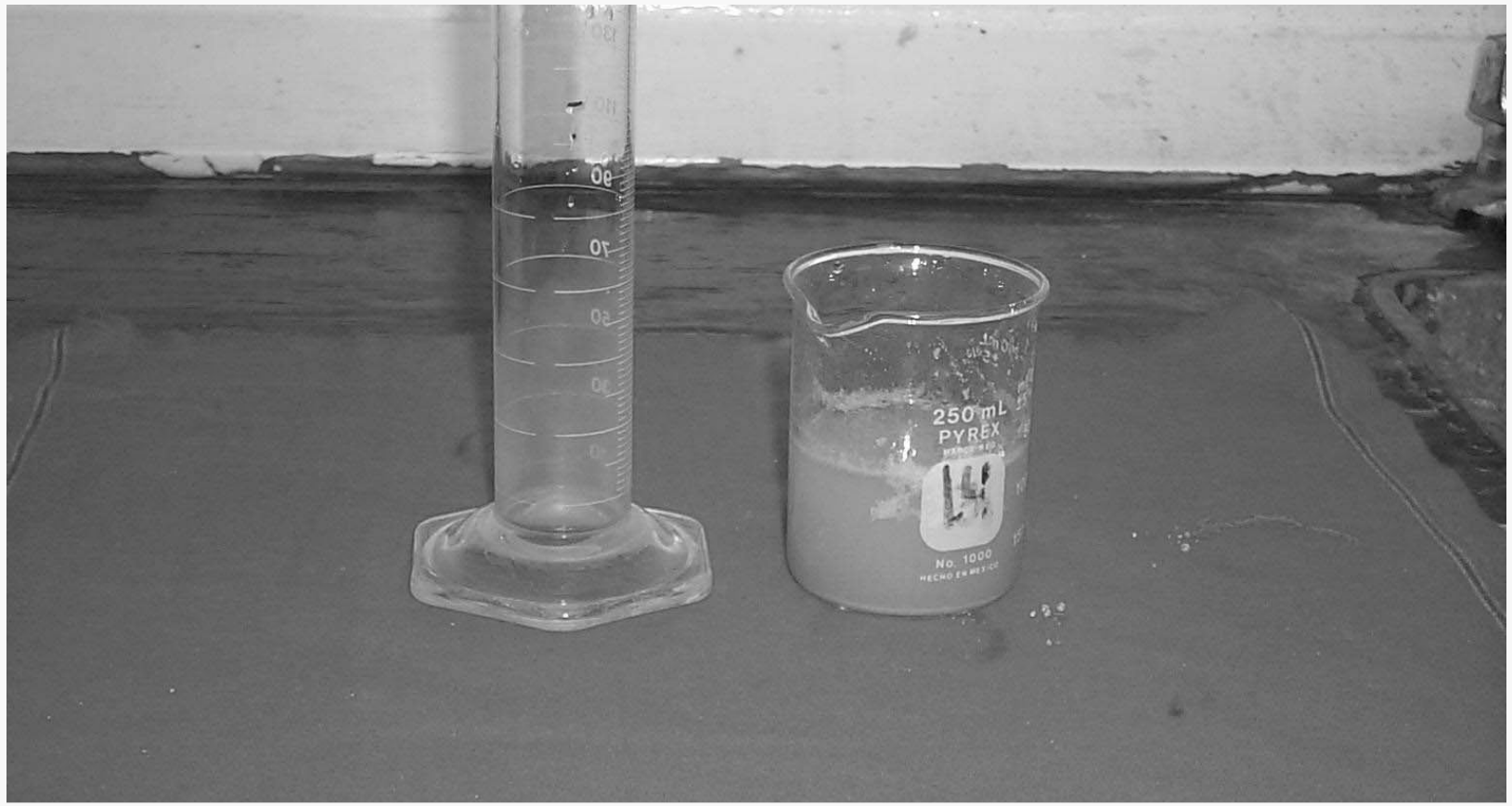
Se agita cada una de las muestras con 100 ml de ácido nítrico 0.6 M durante 15 minutos

Metodología



Se afora la muestra a 120 ml con ácido nítrico 0.6 M en una probeta graduada

Metodología



Se deja sedimentar la muestra durante una hora

Metodología

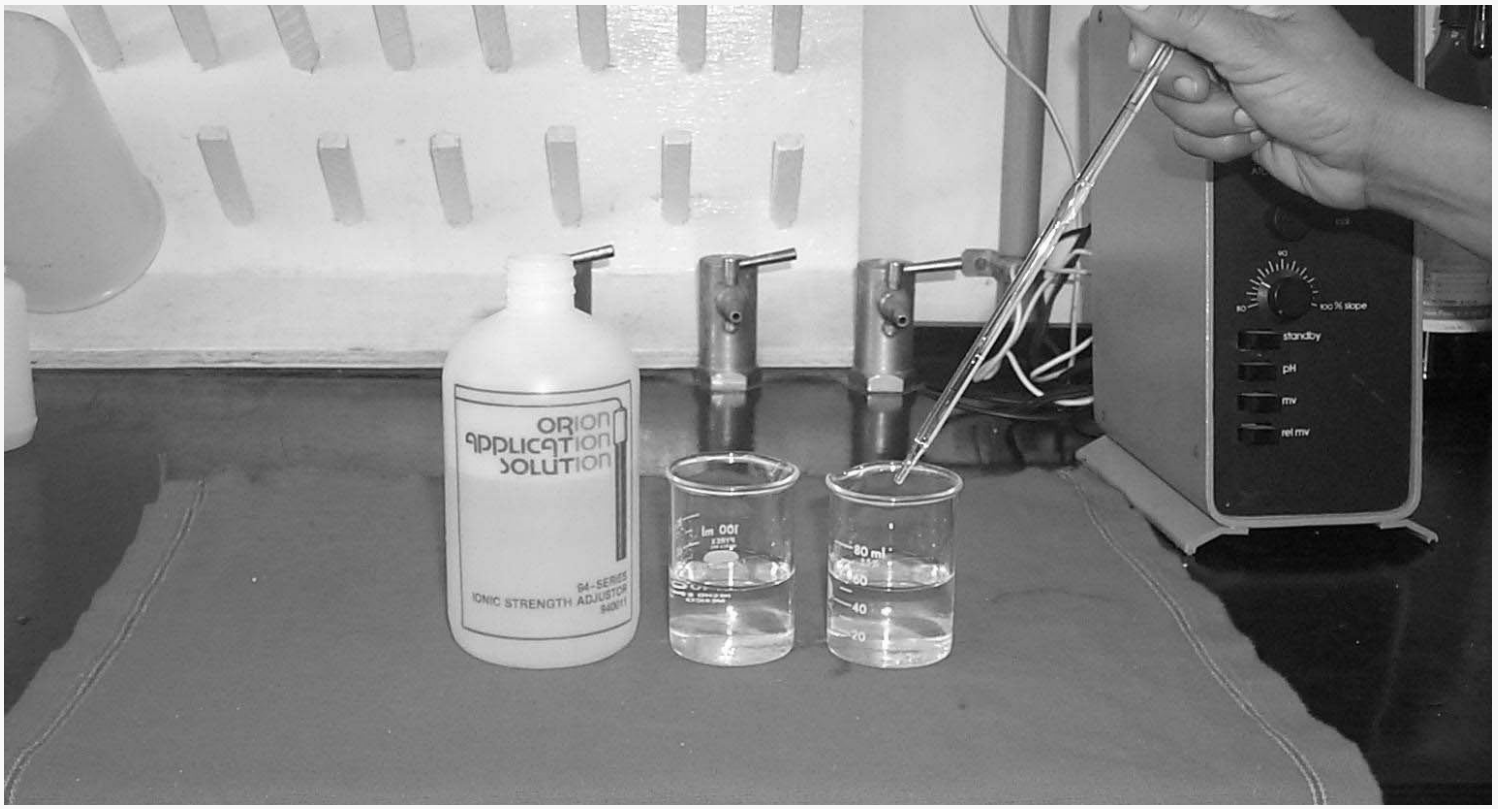
Se filtra la muestra con papel de porosidad media

Metodología

Se divide la muestra filtrada en 2, cada una de 50 ml

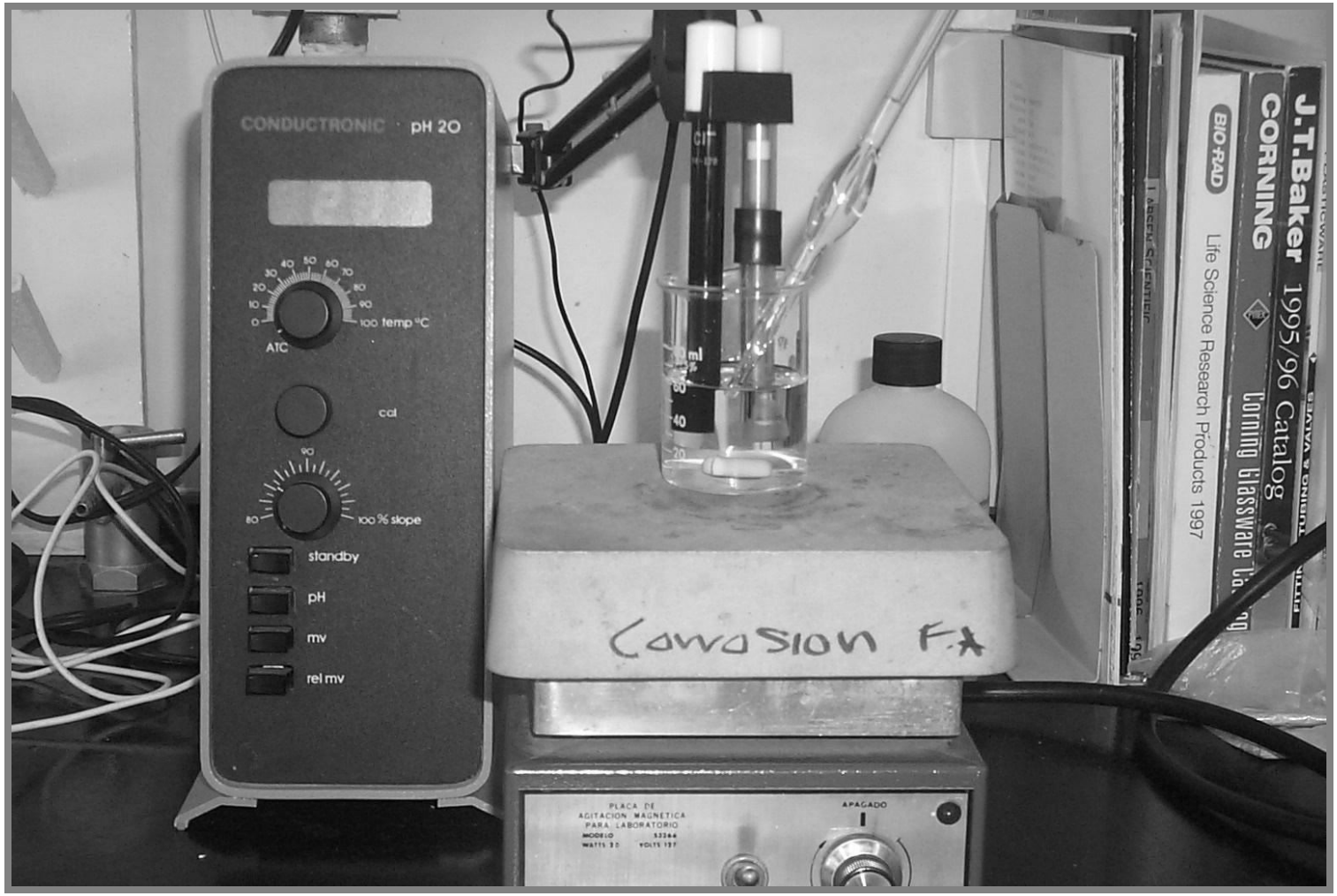
CINVESTAV
Unidad Mérida

Metodología



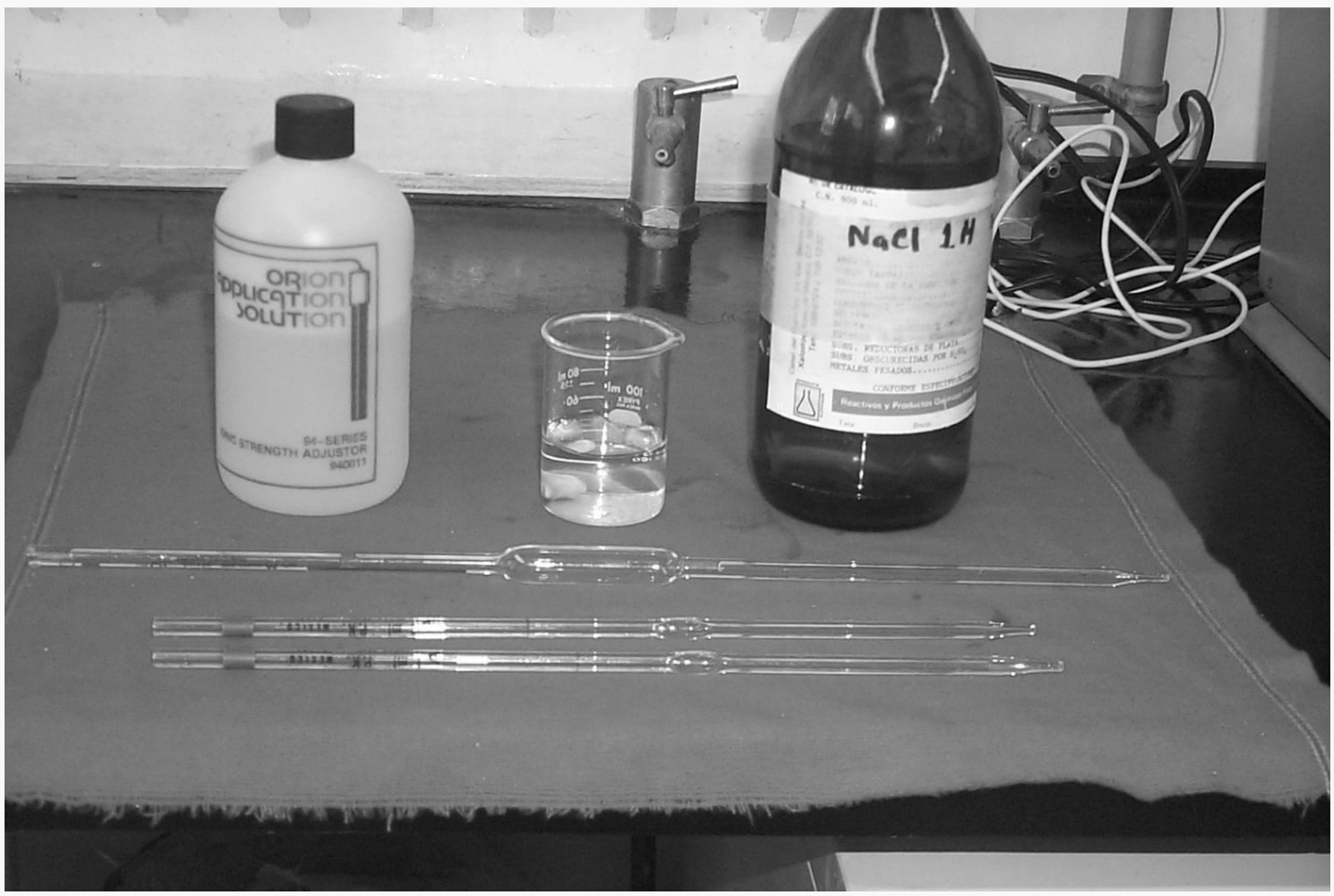
Se le adiciona 1 ml de nitrato de sodio ($NaNO_3$) 5 M, para romper la tensión superficial de la solución

Metodología



Determinación del blanco

Metodología



Se toma una muestra de agua destilada (blanco) para obtener la pendiente de acuerdo al siguiente procedimiento:

CINVESTAV
Unidad Mérida

Metodología

Primera parte: Determinación de la pendiente (S) de los electrodos.

1. Tomar una muestra de agua destilada de 50 ml.

2. Adicionar 1 ml de Nitrato de Sodio 5M (para romper la tensión superficial).

3. Agitar la muestra sobre placa de agitación a velocidad constante, introducir los electrodos en la solución. Cuando se estabilice el potencial adicionar 1 ml de cloruro de sodio 1 M (NaCl).

Metodología

4. Sin suspender la agitación esperar un minuto (hasta que la lectura del potencial sea estable), y tomar la lectura de potencial (S1)

5. Después adicionar 10 ml de cloruro de Sodio 1M (sin suspender la agitación) esperar por un minuto más (hasta que la lectura del potencial sea estable), tomar la lectura del potencial (S2).

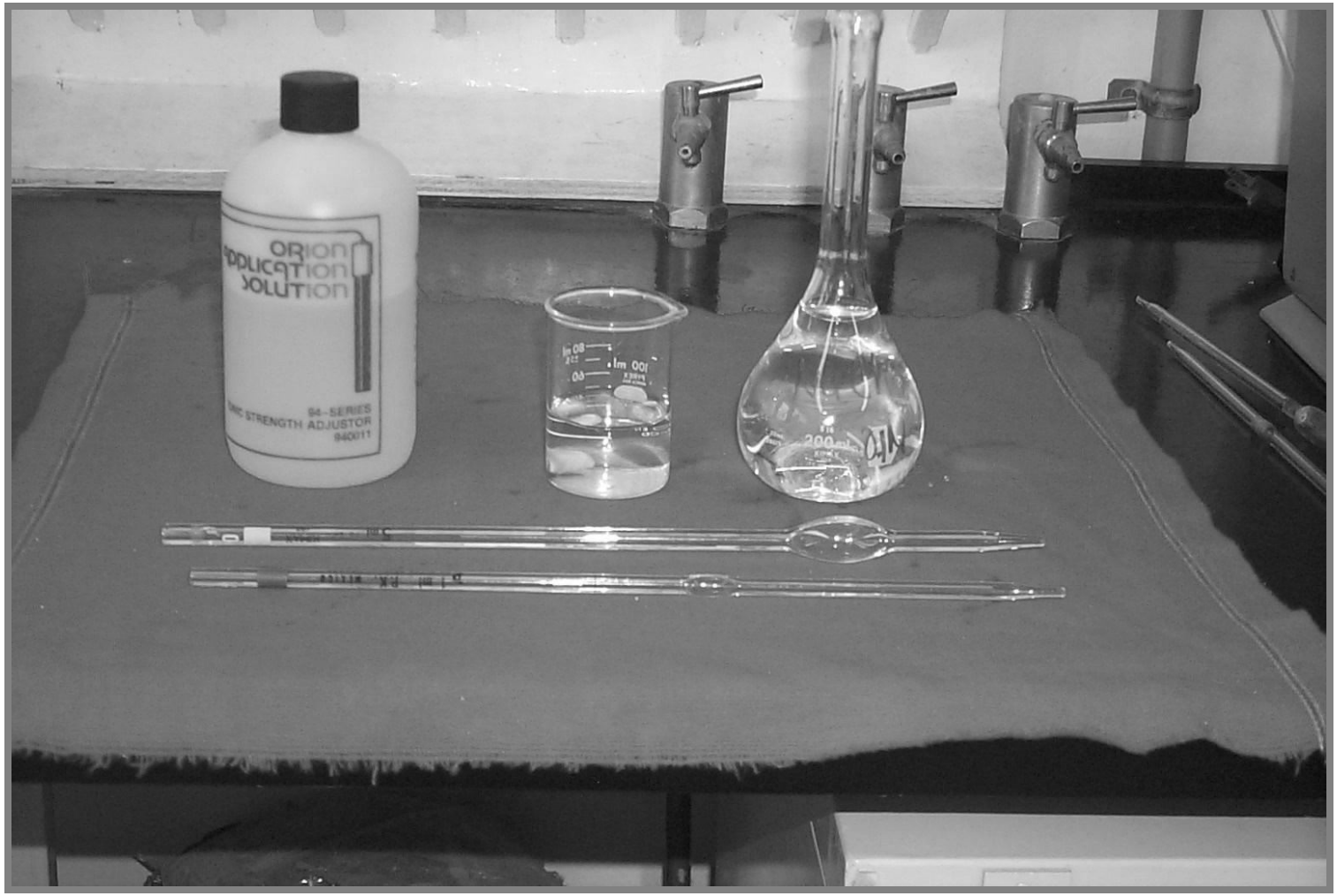
El valor de la pendiente se obtiene de :

$$S = S1 - S2$$

(este valor debe estar en el rango de 54-60 mV)

Nota: en caso de no obtener valores dentro del rango hay que repetir con un nuevo blanco

Metodología



Determinación de la muestra

Metodología

Segunda parte : Valoración de las muestras.

1. Tomar 2 muestras de 50 ml c/u .

2. Adicionar 1 ml de Nitrato de sodio 5 M. (para romper la tensión superficial).

3. Agitar a velocidad constante en una placa de agitación, introducir los electrodos en la solución , poner el botón del conductimetro en mV y cuando el potencial se estabilice (después de 1 minuto) tomar la lectura del potencial (E1).

4. Adicionar 5 ml de solución estándar (Cloruro de Sodio 0.01M*), sin detener la agitación, y tomar la lectura cuando el pontencial sea estable (E2).

Metodología

La molaridad del estándar dependerá de la concentración de la muestra.

Para saber si se esta empleando la solución estándar adecuada tomar los siguientes criterios:

a) El estándar es correcto si la diferencia de potencial (E1-E2) está en el rango de 6-60 mV.

b) Si la diferencia de potencial (E1-E2) de las muestras es mayor de 60 mV , el estándar debe ser más diluido (por ejemplo de 0.01 M a 0.001 M) .

c) Si la diferencia de potencial (E1-E2) de las muestra es menor de 5 mV, el estándar debe ser más concentrado (por ejemplo 0.01 M a 1 M)

Metodología

La concentración de cloruros en la muestra se obtiene:

$$C_{muestra} = Q \times C_{estándar}.$$

Donde:

$C_{muestra}$ = Concentración de la muestra

$C_{estándar}$ = Concentración del estándar.

Q = Depende del volumen y el cambio de potencial.

Metodología

$$Q = \frac{p}{(1+p) * 10^{\frac{E}{S}} - 1}$$

Donde :

E = E1 – E2.

S = pendiente del electrodo.

P = volumen del estándar entre el volumen de la muestra (5ml/50ml).

Metodología

Los resultados se expresan en %Cl en concreto.

$$\%Cl = mg\ Cl \times 100 / peso\ de\ la\ muestra$$

$$\%Cl = ppm\ Cl /200.$$